



HAL
open science

Etude des propriétés de structuration de matériaux mixtes et fins. Application à l'envasement des systèmes naturels

Saly Serhal

► **To cite this version:**

Saly Serhal. Etude des propriétés de structuration de matériaux mixtes et fins. Application à l'envasement des systèmes naturels. Génie civil. INSA de Rennes; Université Libanaise, 2017. Français. NNT: 2017ISAR0023 . tel-01784145

HAL Id: tel-01784145

<https://theses.hal.science/tel-01784145>

Submitted on 3 May 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse

UNIVERSITE
BRETAGNE
LOIRE

THESE INSA Rennes
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire
pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'INSA RENNES
Spécialité : Génie civil

présentée par
Saly SERHAL
ECOLE DOCTORALE : SPI
LABORATOIRE : LGCGM

Etude des propriétés de
structuration des matériaux
mixtes et fins- Approche
multi-échelle- Application à
l'envasement des systèmes
naturels

Yannick Melinge

Professeur des universités, Université de Cergy-Pontoise/ Co-encadrant/
Membre invité

Thèse soutenue le 19.12.2017

devant le jury composé de :

Anne Pantet

Professeur, Université du Havre / *Présidente et rapporteur*

Fadi Comair

Professeur, NDU Loueize Liban / *Rapporteur*

Sébastien Jarny

Maitre de conférences, Université de Poitiers / *Examineur*

Alexandre Pierre

Maitre de conférences, Université de Cergy-Pontoise / *Examineur*

Rawad Assaf

Professeur Associé, ISSAE-Cnam Liban / *Examineur*

Fawaz El Omar

Professeur, Université Libanaise / *Examineur*

Damien Rängeard

Maitre de conférences - HDR, INSA de Rennes / *Co-directeur de thèse*

Fadi Hage Chehadeh

Professeur, Université Libanaise / *Co-directeur de thèse*

Etude des propriétés de structuration des matériaux mixtes et fins- Approche multi-échelle- Application à l'envasement des systèmes naturels

Saly SERHAL



En partenariat avec



Université Libanaise

École Doctorale
Sciences et Technologies

Doyen

Remerciement

Ce travail a été réalisé grâce à la participation financière de la région Bretagne et de l'école doctorale de l'Université Libanaise.

Mes premières remerciements vont à mes directeurs de thèse, messieurs Yannick Melinge, Damien Rängeard et Fadi Hage Chehadeh. Je vous remercie pour m'avoir proposé et dirigé cette thèse en cotutelle. Je vous remercie aussi pour les pistes de travail que vous avez su me confier. Travailler sous votre direction fut un honneur et une fierté.

Je tiens à exprimer tous mes remerciements à l'ensemble du membre de mon jury : Madame Anne Pantet, monsieur Fadi Comair, monsieur Sébastien Jarny, monsieur Alexandre Pierre, monsieur Rawad Assaf et monsieur Fawaz El Omar, pour vouloir examiner et évaluer ce travail de recherche.

Je tiens aussi à remercier toute l'équipe du laboratoire LGCGM. Surtout Messieurs Jean Luc Metayer et Jean Yves Brossault et Raphael Leon pour leurs aides précieuses et leur collaboration. Je n'oublie pas de remercier Madame Anne Foutel-Richard pour ses conseils, son soutien et ses encouragements.

Un grand merci également à Monsieur Patrice Estellé pour sa disponibilité et son aide. Je le remercie vivement pour son apport et ses conseils qui m'ont fait progresser.

Je remercie particulièrement Alexandra. Le travail avec toi était un plaisir. Sans ton aide j'aurais pas pu finir cette thèse. T'es devenu parmi les personnes qui ont influencé ma vie.

Je remercie avec le sourire mes collègues doctorants Nelson, Jianhua, Sambath et tous les autres que j'ai rencontré durant ce voyage en thèse pour tous les bons moments passés au bureau et en dehors.

A mes BFF, Amandine et Ilham. Un grand merci pour votre amitié, votre amour, votre confiance et votre soutien.

A la bande libanaise, Ramez, Imad, Sanaa, Rachad et Ali. Mon séjour en France ne sera pas pareil sans vous. Un grand merci ma deuxième famille.

Et puis, à mes parents et mes beaux-parents, les mots ne peuvent pas exprimer ma gratitude envers vous. Merci pour votre support et votre confiance. Je ne pouvais jamais accomplir ce travail sans vos aides.

Enfin, à ceux pour qui j'ai fait tout ça, 7amoudi et Ali. Merci encore mes anges gardiens...

Une chose est sûre, je n'aurais rien pu faire sans vous tous ! Tout ce que vous avez fait signifie beaucoup pour moi ! Vous êtes les meilleurs !

Table des matières

.....	1
Remerciement.....	4
Introduction générale	8
Chapitre I. Etat de l'art.....	10
Introduction	11
Partie I : Quelques propriétés d'écoulement à surface libre en proche paroi	11
1. Introduction	11
2. Propriétés de l'écoulement plan, permanent d'un bi-couche composé d'un fluide visqueux newtonien et d'un fluide visco-plastique, placé dans le champ de pesanteur. Cas où la zone 1 présente un caractère de régime turbulent	11
3. Conclusion.....	20
Partie II : Comblement des estuaires	21
1. Envasement des systèmes naturels	21
2. Estuaires.....	21
3. Sédimentation dans l'estuaire	26
4. Comblement des estuaires : Causes et conséquences	40
Partie III : La Rance.....	42
1. Localisation	42
2. Caractéristiques hydrodynamiques et morphologiques.....	43
3. Envasement de La Rance	48
Partie IV : Rhéologie des sédiments.....	58
1. Introduction	58
2. Suspensions : définition et quelques restrictions.....	59
3. Identification de quelques comportements rhéologiques caractéristique en cisaillement simple.....	60
4. Modélisation de la viscosité.....	62
5. Modélisation de la contrainte de cisaillement seuil	64
6. Rhéologie des suspensions naturelles et remise en suspension	64
Conclusion.....	72
Chapitre II. Matériaux et protocoles expérimentaux	73
Partie I. Matériaux.....	74

1. Introduction	74
2. Méthode de préparation et techniques de caractérisation	74
3. Prélèvement des sédiments et variabilité du dépôt sédimentaire dans le piège	79
4. Caractérisation des sédiments utilisés.....	85
Partie II. Moyens expérimentaux	94
1. Introduction	94
2. Essai rhéologique à l'aide du rhéomètre Kinexus	94
3. Choix d'une géométrie Vane.....	102
4. Conclusion.....	104
Chapitre III. Rhéologie des sédiments	105
1. Introduction	106
2. Caractérisation des suspensions au jeune âge sous cisaillement à taux de cisaillement imposé aux temps courts et intermédiaires.....	107
2.1.1. Distinction liant- inclusions au jeune âge	108
2.1.2. Influence du sel et de la matière organique	109
2.1.3. Identification du seuil limite de cisaillement au jeune âge	111
3. Essai par palier de contrainte de cisaillement	118
3.1. Répétabilité des résultats	120
3.2. Interprétation des résultats	122
4. Conclusion.....	129
Chapitre IV. Etude de la structuration des sédiments du Lyvet en colonnes de sédimentation....	131
1. Introduction	132
2. Matériaux et méthodologie	133
2.1. Description des colonnes	133
2.2. Préparation des sédiments et montage des colonnes de sédimentation	134
2.3. Choix de la concentration initiale et éléments influençant la sédimentation.....	135
2.4. Démontage et méthodologie d'analyse des massifs sédimentés.....	135
3. Influence de l'âge.....	139
3.1. Structuration des sédiments dans une colonne âgée de 2 semaines.....	139
3.2. Influence de la durée de vieillissement	150
4. Conclusion.....	153
Conclusion générale.....	156
Liste des Figures.....	159
Liste des Tableaux.....	164

Introduction générale

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre d'une convention de cotutelle entre l'école doctorale de l'université libanaise et le laboratoire LGCGM de l'INSA de Rennes.

L'envasement des estuaires constitue un élément majeur dans les problématiques fluviales et maritimes. Dans cette partie des systèmes fluviaux du territoire, l'accumulation des matériaux fins modifie radicalement la morphologie de l'estuaire, conditionne la présence des espèces animales et végétales et on distingue ainsi un impact fort sur les plans économique, social et industriel. En effet, les comblements compliquent la circulation dans les voies navigables, compliquent les activités de pêches, de loisirs, modifient les propriétés des écoulements et constituent un facteur risque sur les zones d'habitations voisines. Des solutions temporaires consistent à curer les estuaires et des solutions d'aménagement de ceux-ci peuvent être envisagées.

L'estuaire de la Rance, situé en Ille et Vilaine, est plus particulièrement ciblé dans cette étude. Nos travaux sont plus précisément centrés autour de matériaux déposés dans un piège à sédiments, le piège du Lyvet, créé pour piéger la plus grande quantité possible de sédiments avant qu'ils arrivent dans la zone de navigation.

Il ressort de la littérature un manque important sur la caractérisation des mélanges liquides-solides et sur les mécanismes de structuration des sédiments déposés dans ce type d'environnement. Le travail réalisé vise à caractériser les mélanges liquides-sédiments en condition essentiellement de laboratoire. Dans le contexte estuarien, et en particulier celui de la Rance, la dominance des processus sédimentation/tassement/consolidation sédimentaires sont patents au regard des processus d'érosion. Comme tout estuaire, on distingue des apports amont imposés par le régime du fleuve et des apports aval conditionnés par le régime des marées. Les conditions dynamiques engendrées au sein de l'estuaire ne sont pas toujours favorables à la mobilisation (ou à la re-mobilisation solide), mais également au transport solide capable de limiter la généralisation de l'envasement. L'état de structuration du substrat représente ici un facteur potentiellement aggravant vis-à-vis de la capacité de mobilisation.

L'objet de ce travail est ainsi d'améliorer la compréhension de l'évolution de la structure des dépôts, et de leur capacité de résistance au cisaillement. L'effet de facteurs tels que la présence de sels et de matières organiques sera notamment analysé.

La présentation de ces travaux de recherche est ainsi décomposée en quatre chapitres :

Le premier chapitre est un état de l'art composé de quatre parties. La première détaille les propriétés d'écoulement à surface libre au voisinage d'une paroi, ce point de vue étant généralement retenu lorsque l'on aborde les problèmes d'érosion ou de mobilisation. La seconde partie synthétise les éléments principaux rythmant la « vie » des estuaires, tels que la marée et le débit fluvial. Les phénomènes principaux que sont le dépôt, la mobilisation, l'érosion et le transport des sédiments sont abordés. La troisième partie est consacrée à la présentation de l'estuaire de la Rance, objet de cette étude, et notamment de la problématique de son envasement et de la gestion de celui-ci. Enfin, la quatrième partie de cette revue bibliographique est consacrée à la présentation des concepts

rhéologiques nécessaires à la réalisation de ce travail et aux principales propriétés des fluides complexes.

Le second chapitre de ce mémoire est constitué quant à lui de deux parties. La première concerne la caractérisation physico-chimique et minéralogique des sédiments provenant du piège du Lyvet utilisés dans ce travail. La seconde partie de ce chapitre est consacrée à la description des moyens expérimentaux et des protocoles adoptés pour la réalisation de la caractérisation rhéologique des sédiments.

Cette analyse rhéologique est l'objet du troisième chapitre de cet ouvrage. On s'attache alors à mettre en évidence le possible rôle « d'inclusions » par rapport à une phase « liante » en analysant le comportement de suspensions de sédiments formées à partir de granulométries réduites de la suspension initiale. Dans cette partie du travail, pour s'affranchir des possibles réactions entre le fluide porteur et la matière solide, les essais ont été réalisés dans des temps « courts », avant que les réactions chimiques et/ou biochimiques ne se développent, et de plus, pour fiabiliser les données, des essais en substituant l'eau du site par de l'eau du robinet et de l'eau distillée ont également été réalisés.

Le dernier chapitre vise à étudier la structuration des sédiments à une échelle plus importante. On utilise alors une expérimentation en colonnes de sédimentation. Le dispositif développé permet d'obtenir un massif sédimenté de 50 cm de hauteur environ. Pour mettre en évidence l'effet potentiel du vieillissement, les sédiments sont laissés vieillir dans celles-ci pour des durées allant de deux semaines jusqu'à neuf mois. De plus, afin d'analyser l'effet du sel et de la matière organique sur le sédimentation/tassement/consolidation des colonnes avec des sédiments dépourvus de sels d'une part, et dépourvus de sels et de matière organique d'autre part, sont mises en place.



Chapitre I. Etat de l'art

Introduction

Ce chapitre synthétise les concepts principaux relatifs au comportement sédimentaire dans les estuaires. Il est constitué de quatre grandes parties. La première partie détaille les propriétés d'écoulement à surface libre en proche paroi car ce point de vue est généralement retenu lorsqu'on aborde la mobilisation solide ou l'érosion. Dans la deuxième partie, nous expliquons la notion de l'envasement des estuaires, ses causes et ses conséquences. Nous présentons ainsi une vue générale des estuaires et des éléments qui ont une influence telle que la marée et le débit fluvial. Ensuite nous détaillons le phénomène de sédimentation, l'origine des sédiments dans l'estuaire, l'érosion et le transport des sédiments.

La troisième partie présente quelques spécificités de l'estuaire de la Rance, l'estuaire sur lequel cette étude est appliquée. Nous abordons sa localisation, ses caractéristiques hydrodynamiques et morphologiques et surtout son problème d'envasement. Ensuite nous présentons une solution alternative destinée à la lutte contre l'envasement ; un piège à sédiments qui est déjà implanté dans l'estuaire et dont quelques études lui ont été consacrées. Nous relatons pour cette solution technique, sa réalisation, ses avantages et ses inconvénients.

La quatrième partie est consacrée aux concepts rhéologiques et à la présentation de quelques travaux qui combinent une approche de type mécanique des fluides et une approche rhéologique dont les conditions de raccord permettent d'appréhender la variabilité de la contrainte d'érosion. Dans les concepts rhéologiques, nous définissons les principales notions rhéologiques, les comportements rhéologiques et les propriétés des fluides complexes.

Partie I : Quelques propriétés d'écoulement à surface libre en proche paroi

1. Introduction

Dans cette partie du chapitre nous présentons comment un écoulement turbulent se structure au voisinage d'une paroi. Nous retiendrons le cas d'une paroi lisse et indéformable sur laquelle un écoulement se développe. Cela permet d'aboutir à la mise en évidence de la contrainte de frottement à la paroi via la vitesse de frottement (u^*) qui correspond à l'extrapolation de la distribution de vitesse dans la zone intermédiaire de la couche limite ou la zone de cette couche au niveau de la paroi. De façon apparente, cette vitesse n'est pas nulle à la paroi.

2. Propriétés de l'écoulement plan, permanent d'un bi-couche composé d'un fluide visqueux newtonien et d'un fluide viscoplastique, placé dans le champ de pesanteur. Cas où la zone 1 présente un caractère de régime turbulent

La configuration de la mobilisation sédimentaire peut être schématisée par un système bi-couche comme le montre la **figure I-1**. On retiendra que l'écoulement généré dans la zone 1 du bi-couche implique un fluide newtonien. La zone 2 représente un radier lisse soit indéformable ou potentiellement mobilisable en cisaillement.

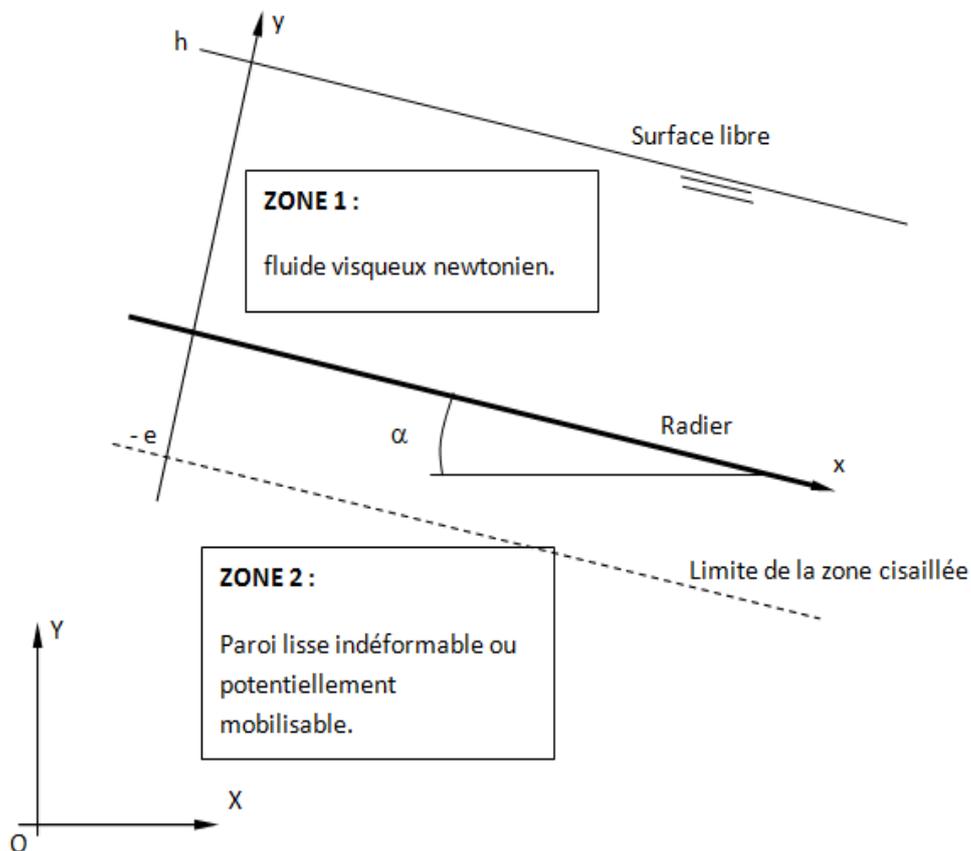


Figure I-1 : Schématisation d'une configuration d'écoulement bi-couche composé d'un fluide visqueux newtonien et d'une paroi lisse et indéformable ou potentiellement mobilisable en cisaillement. L'écoulement est placé dans le champ de pesanteur en régime laminaire permanent. Etude en milieu isotherme.

2.1. Notion de couches limites – Propriétés générales. Cas du développement sur un plan lisse à bord d'attaque mince sans gradient de pression

Dans le cas où la paroi est assimilable à une paroi lisse et indéformable afin de simplifier le propos, la littérature est riche de travaux permettant d'introduire les concepts d'écoulements à son voisinage (Figure I-2).

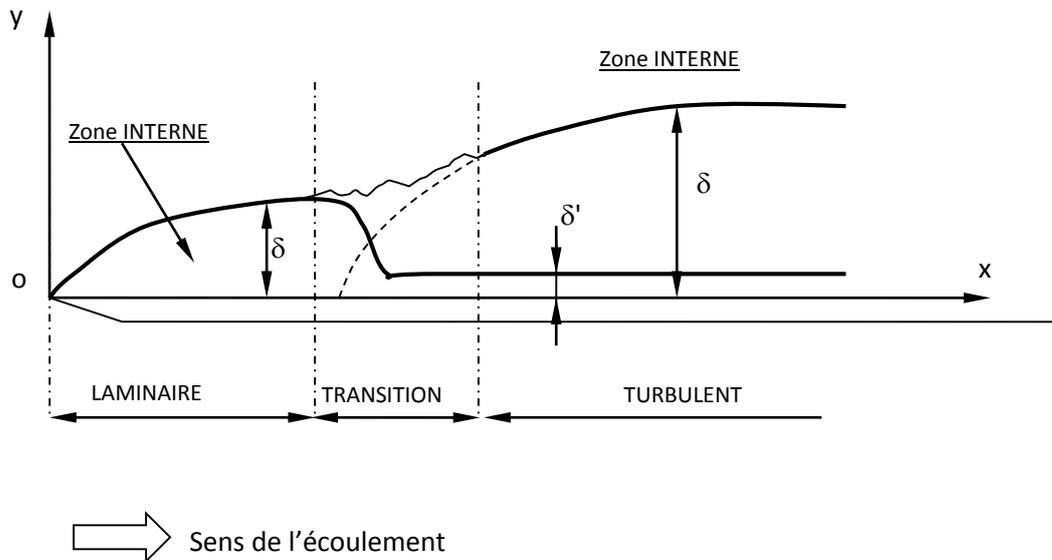


Figure I-2 : Mise en évidence des propriétés d'écoulement au voisinage d'une paroi. Cas d'une plaque plane à bord d'attaque mince. Propriétés de couche limite sans gradient de pression longitudinal.

Cette illustration permet de mettre en évidence le phénomène de couche limite qui peut être représenté comme une mince couche fluide située au voisinage des parois et où sont concentrés les effets de la viscosité (zone à fort gradient de vitesse). La notion de couche limite est conditionnée par la notion de régime d'écoulement :

- Dans le cas d'un régime laminaire, l'écoulement est tout entier régi (en termes de dissipation) par les effets visqueux et on ne peut pas véritablement parler d'une réelle existence de la couche limite.
- Dans le cas d'un régime turbulent, l'expérience montre que deux zones co-existent au sein de l'écoulement :
 - Une zone en proche paroi où le régime est laminaire : c'est la couche limite,
 - Une zone dite « externe » éloignée des parois et où le régime est turbulent.

La nature du fluide conditionne également les propriétés de la couche. L'analyse de la répartition des vitesses suivant une direction normale à la paroi montre que la vitesse s'annule à la paroi de par la condition d'adhérence et qui exclut toute activité turbulente à la paroi. En s'écartant de la paroi, la vitesse croît plus ou moins rapidement pour atteindre finalement les valeurs moyennes qui existent loin de la paroi : u_e .

L'épaisseur totale de la couche limite est notée δ et celle-ci est telle que :

$$\frac{u(x, \delta)}{u_e(x)} = 0,99,$$

Avec x l'axe principal de l'écoulement.

Pour le cas présenté sur la **figure I-2**, δ est une fonction de x . Au sein de la couche limite, les gradients transversaux de vitesse sont très importants. Par ailleurs, on note généralement que les vecteurs vitesses sont pratiquement tangents à la paroi.

En tout point de la couche limite, par rapport à un repère direct orthonormé, on a généralement :

$$\frac{\partial v}{\partial x} \ll \frac{\partial u}{\partial x}$$

et

$$\frac{\partial v}{\partial x} \ll \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} \ll \frac{\partial u}{\partial y}$$

En outre, dans le cadre de cette étude, nous considérons uniquement le cas bidimensionnel. Le vecteur vitesse prend la forme suivante en adoptant la convention de la décomposition de Reynolds :

$$\vec{V} \begin{cases} u = \bar{u} + u' \\ v = \bar{v} + v' \\ w = 0 \end{cases}, \text{ fonctions de l'espace et du temps dans le cas général.}$$

Dans le cas d'un régime permanent, nous considérons pour la modélisation des propriétés de cette partie de l'écoulement, deux longueurs caractéristiques suivant x , axe de l'écoulement et suivant y , perpendiculaire à l'écoulement.

Pour simplifier le problème, on admet que le rapport de ces deux dimensions est petit devant 1.

2.2. Mise en équations

L'équilibre de l'écoulement doit respecter simultanément l'équation de continuité et le principe de conservation de la quantité de mouvement. Pour ce dernier nous avons recours à la forme moyenne des équations de Reynolds.

Dans ces conditions, l'équation de continuité est de la forme : $\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0$,

Et les équations de Reynolds projetées :

Suivant x :

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} = \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{-u'v'}),$$

et suivant y :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} (\overline{-v'^2}).$$

La résolution de ce système différentiel admet que le terme $\frac{\partial \bar{P}}{\partial x}$ est négligeable devant les autres contributions. De plus, pour cette illustration (plaque plane à bord d'attaque mince) la couche prend naissance en $x = 0$, **figure I-2**. Elle est tout d'abord laminaire, puis transitionnelle et enfin turbulente. En général, on introduit un nombre de Reynolds dit d'abscisse afin d'établir ces différents états :

$$Re_x = \frac{u_e x}{\nu}$$

On distingue une valeur critique pour ce nombre qui marque la présence de la transition. Re_{xcr} est de l'ordre de 10^5 à 10^6 .

En condition d'espace dite établie, on peut retenir les ordres de grandeurs suivants qui caractérisent la couche limite :

10% - 20% de δ : zone dite interne,

90% - 80% de δ : zone dite externe.

2.3. Propriétés de la zone externe de la couche limite

La zone externe que l'on nomme également zone déficitaire est conditionnée par les propriétés de l'écoulement extérieur à la couche limite. En général, le profil de vitesse est représenté sous la forme d'un couple caractéristique :

$$\left(\frac{u_e - \bar{u}}{u_\tau}; \frac{y}{\delta} \right)$$

Dans ce repère, la forme universelle de distribution de vitesse est donnée par la loi de Clauser qui est pertinente dans la partie basse de la partie externe de la couche limite :

$$\frac{u_e - \bar{u}}{u_\tau} = -\frac{1}{k} \ln\left(\frac{y}{\delta}\right) + 2,5$$

Dans ce système de notations, u_τ représente la vitesse de frottement pariétale. $k = 0,41$ est la constante de Von Karman. Dans un problème d'érosion, cette zone est peu sollicitée.

2.4. Propriétés de la zone interne de la couche limite

La zone interne de la couche limite est caractéristique du phénomène de mobilisation d'interface. En effet, dans cette région l'écoulement interfère directement avec les éléments mobilisables qui forment l'interface.

Dans cette zone, les grandeurs caractéristiques sont :

- la vitesse de frottement : u_τ ,

- la viscosité cinématique : ν .

Le système différentiel se simplifie et notamment, la conservation de la quantité de mouvement devient : $\frac{\partial \tau}{\partial y} = 0$, ce qui impose : $\tau = Cte$.

De part la prédominance des effets visqueux dans la zone interne et en rappelant l'expression de la vitesse de frottement à la paroi :

$$u_\tau = \left(\frac{\tau_p}{\rho}\right)^{0,5},$$

Avec τ_p : la contrainte de cisaillement à la paroi.

$$\text{Dans ces conditions : } \tau = Cte = \rho u_\tau^2 = \mu \frac{\partial u}{\partial y} - \overline{\rho u'v'}.$$

A ce stade, on introduit généralement un changement de variable :

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u_\tau} \text{ et } y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \text{ (qui correspond à un nombre de Reynolds local).}$$

$$\Rightarrow \mu \frac{\partial u}{\partial y} - \overline{\rho u'v'} = Cte \text{ Devient : } \mu \frac{\partial(u^+ u_\tau)}{\partial\left(\frac{y^+ \nu}{u_\tau}\right)} - \overline{\rho u'v'} = Cte = \rho u_\tau^2.$$

Finalement, dans la zone interne on a à résoudre :

$$\frac{\partial u^+}{\partial y^+} - \frac{\overline{u'v'}}{u_t^2} = 1.$$

La résolution de ce nouveau système différentiel permet de mettre en évidence trois parties au sein de la zone interne :

* La zone de sous couche visqueuse d'épaisseur notée δ' , **figure I-2**. C'est la région proche de la paroi où le terme visqueux est prédominant :

$$\frac{\partial u^+}{\partial y^+} = 1 \Rightarrow u^+ = y^+$$

Dans cette zone, comme la vitesse est nulle à la paroi, la constante d'intégration est nulle. Cette couche est comprise entre la paroi pour $y^+ = 0$ et $y^+ = 5$.

* La zone dite logarithmique située au voisinage de la zone externe de la couche limite et où l'écoulement est pleinement turbulent. Dans cette zone de la région interne, on a :

$$\overline{u'v'} = u_t^2.$$

Une orientation classique pour modéliser la composante du tenseur de Reynolds ($\overline{u'v'}$) est d'établir une relation avec le champ moyen et dans ce cas, on peut s'appuyer sur la formulation de Boussinesq qui prend la forme d'une loi gradient :

$$\overline{u'v'} = \nu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y},$$

Avec : ν_t : la viscosité cinématique turbulente qui est fonction du régime de l'écoulement et pas des propriétés du fluide.

$\Rightarrow u_\tau^2 = \nu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$ et en introduisant les changement de variables, ce système différentiel devient :

$$\frac{\partial u^+}{\partial y^+} = \frac{\nu}{\nu_t}.$$

L'interprétation de ν_t peut être donnée par un modèle de type longueur de mélange et nous retenons

la formulation de Prandtl : $\nu_t = l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right|$,

Avec l_m : la longueur de mélange = $k \cdot y$ dans la zone logarithmique et $k = 0,41$.

Finalement, $u^+ = \frac{1}{k} \ln(y^+) + 5,6$.

La constante 5,6 dans cette zone est donnée par les travaux de Clauser. La zone logarithmique est comprise entre $y^+ = 30$ et $y^+ = 500$.

* La couche de transition correspondant à des altitudes y^+ comprises entre 5 et 30.

Dans cette zone de la partie interne, les termes de viscosité et de turbulence sont du même ordre et il s'agit là d'une zone de raccord. La modélisation de la contrainte turbulente peut être réalisée par une loi gradient à partir de l'hypothèse de Boussinesq, mais dans ce cas, la viscosité cinématique turbulente, ν_t est généralement modélisée de type longueur de mélange mais on retient ici la proposition de Van Driest :

$$l_m = k \cdot y \left(1 - e^{-\frac{y^+}{\lambda}} \right)$$

La modification de la loi de Prandtl avec le terme supplémentaire permet de faire tendre l_m vers 0 pour $y^+ = 5$ et vers $k \cdot y$ pour h_s .

λ est un paramètre de pondération généralement égal à 26.

Pour résumer cette présentation, la **figure I-3** montre le profil de vitesse en zone interne.

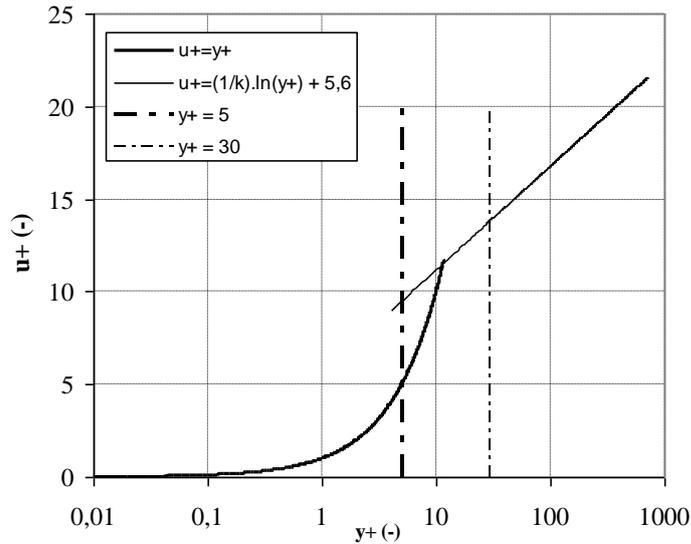


Figure I-3: Évolution de la vitesse au sein de la zone interne de couche limite. Représentation semi logarithmique en coordonnées adimensionnées.

2.5. Influence de la rugosité sur le développement de la couche limite

Pour clore cette partie introductive et de compléments bibliographiques au sujet d'un potentiel d'érosion, il convient de distinguer un dernier cas qui correspond à « l'interaction » de l'écoulement de la zone 1 et celui de la zone 2 au travers de la définition de l'interface. En effet, dès lors que l'on positionne des particules solides sur une « paroi lisse » où se développe une couche limite, les propriétés de cette dernière s'en trouvent modifiées – et en conséquence, la contrainte de cisaillement s'en trouve modifiée.

En général, on considère que la présence de la « rugosité » n'affecte que la zone interne de la couche limite et que la zone externe conserve les mêmes caractéristiques. Dans le cadre de ce travail, nous utilisons comme référence pour la notion de rugosité, le grain de sable proposé par Nikuradse. Le point fort de cette référence réside dans le fait qu'elle est naturelle, mais elle induit une incertitude sur la forme des grains. En référence aux travaux de Nikuradse, celui-ci définit trois régimes d'écoulement pour une couche limite influencée par la présence de la rugosité. Ces trois régimes sont définis en fonction de la hauteur des aspérités, h_s , adimensionnée sous la forme d'un nombre de Reynolds :

$$h_s^+ = \frac{h_s u_\tau}{\nu}$$

* Lorsque h_s^+ est inférieur à 5, on considère que l'écoulement n'est pas affecté par la rugosité. Les différentes zones décrites précédemment sont conservées. On est en présence d'un régime hydrodynamiquement lisse.

* Lorsque h_s^+ est supérieur à 70, on considère que la sous couche visqueuse et la zone de transition sont complètement détruites. On est en présence d'un régime pleinement rugueux et le profil de vitesse dans la zone interne n'est que logarithmique.

* Lorsque h_s^+ est compris entre 5 et 70, on considère que le régime est intermédiaire et que la zone en sous couche visqueuse est affectée par les aspérités.

La modification induite par la présence de la rugosité en condition de régime établi apparaît comme un décalage à l'origine des profils de vitesse qui prend la forme générale suivante :

$$\Delta u^+ = k^{-1} \cdot (h_s^+)^{0,1} + 26$$

Δu^+ Correspond au décalage qui est une fonction de h_s^+ .

* si est inférieur à 5, est nul,

* si est compris entre 5 et 70, Blanchard propose :

$$k \cdot y,$$

* si est supérieur à 70, on peut retenir :

$$\Delta u^+ = k^{-1} \cdot \ln(h_s^+) - 2,73.$$

En présence d'un régime pleinement rugueux, on peut alors écrire :

$$u^+ = k^{-1} \cdot \ln(y \cdot h_s^{-1}) + 8,5.$$

Cette formulation est assez semblable au profil « neige et vent » utilisé pour établir les propriétés de couche limite atmosphérique en couche de surface et correspondant aux cinquante premiers mètres :

$$u^+ = k^{-1} \cdot \ln(y \cdot y_0^{-1}),$$

où y_0 est égal à $h_s \times 30s^{-1}$. Cette expression met en évidence un décalage à l'origine du profil de vitesse suivant y_0 . La vitesse s'annule pour $y = y_0$ (**Figure I-4**).

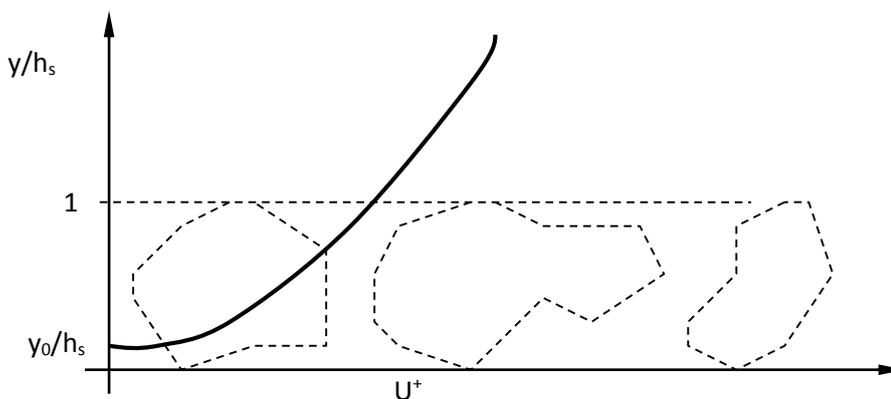


Figure I-4: Représentation schématique du profil de vitesse en régime pleinement rugueux.

Cette formulation est très intéressante en rugosité formée de grain de sable. Elle est mise en défaut dès que la rugosité est différente. En effet, dans le cas du régime pleinement rugueux, la constante de 8,5 utilisée pour le calcul de y_0 du profil neige et vent est établie pour du sable. Par conséquent, pour d'autres rugosités, il convient de déterminer la valeur de y_0 . Par ailleurs, la possibilité de disposer de résultats expérimentaux adaptés permet d'envisager l'adaptation des formulations au contexte d'étude. Finalement, nous retiendrons, pour le cas pleinement rugueux, que la distribution de vitesse peut s'écrire :

$$u^+ = k^{-1} \cdot \ln(y \cdot h_s^{-1}) + B_s,$$

Avec B_s une constante à définir.

3. Conclusion

Cette présentation permet de mettre en évidence la vitesse de frottement avec laquelle de nombreux auteurs déduisent la contrainte de frottement. C'est un outil disponible mais qui reste compliqué à mettre en œuvre in situ. Par ailleurs, cet indicateur est bien adapté au besoin de l'étude pour mesurer l'état structural de l'interface. Notre contribution souhaite s'affranchir de la difficulté d'évaluation de la vitesse de frottement en se focalisant plus sur les indicateurs de résistance mécanique de l'interface et les facteurs qui influencent la résistance. Bien évidemment, il conviendrait de pouvoir raccorder les deux points de vue dont l'un consiste finalement à approcher les propriétés de mobilisation de l'interface par la caractérisation de l'écoulement de « l'eau », tandis que l'autre consiste à approcher les propriétés de cette même interface à partir de la connaissance de la structuration des sédiments déposés.

Partie II : Comblement des estuaires

1. Envasement des systèmes naturels

L'envasement des systèmes d'eau (cours d'eau, canaux et plans d'eau) est un phénomène naturel qui s'opère depuis la fin de l'époque glaciaire et le commencement de l'époque du néolithique. Ce phénomène est dû à l'accumulation des sédiments dans les cours d'eau.

En situation d'équilibre (balance entre érosion et sédimentation), les apports en sédiments annuels dans les systèmes d'eau ne modifient pas de façon significative l'écosystème naturel. Chaque système naturel ou anthropisé a une capacité à supporter une quantité de sédiments et de revenir à l'équilibre après chaque évènement naturel (Crues, inondations, mascaret, sécheresse). Cette capacité dépend largement de ces caractéristiques et de son propre potentiel à réagir contre ces évènements. Dans la plupart des cas, des activités industrielles et anthropiques (agriculture, construction des usines, construction des ponts et des barrages, ...) ou même des phénomènes naturels (orages violents, éruptions volcaniques, ...) viennent perturber l'équilibre naturel des systèmes d'eau d'une façon qui dépasse largement la capacité du système. L'équilibre sera alors rompu (2). Ces activités entraînent l'accélération des processus d'érosion et d'accumulation des sédiments dans les masses d'eau en écoulement. En cas de déséquilibre, l'envasement n'est plus un phénomène naturel, mais il devient un problème qui peut être grave avec des effets sur la morphologie des systèmes et qui modifie les propriétés chimiques et physiques de l'eau. Les effets de l'envasement ont, par ailleurs, des conséquences sur la faune et la flore dans ces systèmes naturels.

2. Estuaires

L'estuaire est une transition spatiale où s'affrontent les influences marines et fluviales. C'est l'embouchure d'un fleuve dans la mer où l'effet de mer dans lequel se jette le fleuve est dominant.

Plusieurs définitions ont été données pour un estuaire. Pritchard (3) définit un estuaire comme étant « *une masse d'eau confinée ayant une connexion libre avec la mer ouverte et à l'intérieur duquel l'eau de mer est diluée d'une façon mesurable avec de l'eau douce issue du drainage du bassin versant* ».

Cette définition a été modifiée par Dyer (4) pour devenir plus satisfaisante de point de vue hydrodynamique : « *une masse d'eau confinée ayant une connexion libre avec la mer ouverte, se prolongeant dans la rivière jusqu'à la limite de l'influence tidale, à l'intérieur de laquelle l'eau de mer est diluée d'une façon mesurable avec de l'eau douce issue du drainage du bassin versant* ».

Un estuaire se divise généralement en trois parties (**Figure I-5**) :

- l'estuaire marin, en contact direct avec la mer,
- l'estuaire intermédiaire, constitué d'un mélange d'eau douce et d'eau fortement salée,
- l'estuaire fluvial, d'eau douce soumise à l'action quotidienne de la marée.

La limite entre ces trois parties est variable et dépend du débit fluvial.

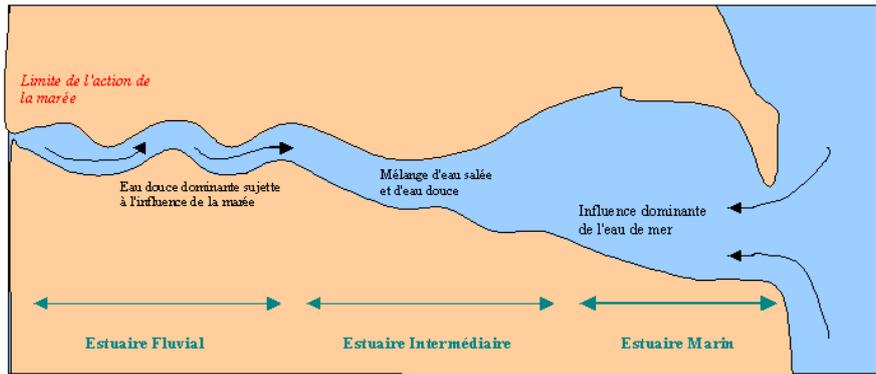


Figure I-5: différentes parties d'un estuaire (4).

Comme les autres milieux paraliques (lagunes, lagons, estuaires, écotones, et les abers), les estuaires sont en équilibre précaire continuellement soumis à des dynamiques variées. C'est un milieu aquatique permanent en communication directe ou épisodique avec la mer. Dans un estuaire, le fleuve apporte peu de matières grossières, mais surtout des suspensions fines et des matières en solution et l'hydrodynamisme marin est fort.

Etant donné la finesse des sédiments apportés dans l'estuaire, le sédiment structuré constitue une vase caractérisée par la présence d'une fraction fine de la classe des lutites (limons et argiles), des sulfures et d'hydroxydes de fer et de colloïdes organiques. La fraction fine doit être suffisamment abondante pour assurer la cohésion de l'ensemble, de sorte que les particules ne peuvent répondre individuellement aux sollicitations des courants tant que le sédiment n'a pas été dissocié. La vase est alors formée d'un mélange d'eau salée, de sables, de limons, d'argiles et de matières organiques. Les sédiments inorganiques ont une taille moyenne inférieure à 63 μm .

Les estuaires sont sensibles à la houle, aux ondes de tempête, au vent. Cependant les deux forces essentielles qui dirigent la dynamique des estuaires sont les ondes de marée liées à la mer et le débit fluvial lié au fleuve.

2.1. La marée

La terre est sujette à des interactions entre la lune et le soleil qui induisent des mouvements alternatifs, périodiques (sinusoïdaux) et journaliers montant puis descendant des eaux des mers et des océans. Ces mouvements sont appelés marées et influencent directement l'hydrodynamisme et le débit fluvial et par la suite la sédimentation dans les estuaires. Ces simples considérations ont des conséquences importantes, notamment en matière de possibles aménagements et la définition des emplacements des ports préférentiellement disposés au fond de l'estuaire.

Dans un estuaire, la marée cause la pénétration des eaux de mers dans les eaux douces du fleuve créant la marée dynamique produite par la rencontre des cours d'eau dirigée vers l'amont (courant de marée) et des autres dirigées vers l'aval (courant fluvial) et la marée saline dont le front se situe bien en-deçà du point extrême atteint par la marée dynamique. En effet, la marée montante provoque à l'amont de l'estuaire le stockage temporaire d'un volume d'eau qui est ensuite déstocké lors de la marée descendante provoquant des fluctuations du débit moyen : le débit fluvial diminue et atteint son minimum au cours de la marée montante. A l'inverse, à marée descendante, lorsque le niveau de l'eau diminue et devient minimum, le débit fluvial augmente libérant la quantité d'eau déjà stockée

en amont (5). D'ailleurs, le marnage est la différence entre une mer pleine et une basse mer successive (6).

La variation du marnage s'organise en deux périodes :

- La période de vive-eau, où le marnage est le plus fort,
- La période de morte-eau où le marnage est le moins fort (7).

Le marnage varie dans le temps et l'espace. Il est principalement influencé par deux facteurs : astronomique (où la position des astres est majeure) et la configuration du bassin qui peut soit annuler, soit amplifier la propagation des ondes de la marée.

Les estuaires se divisent selon l'importance des marées en 4 catégories. Cette classification quantitative est faite par Davies en 1964 (8) puis par Hayes en 1975 (9) et par Furgerot en 2014 (10):

- estuaires microtidaux : le marnage dans ces estuaires est inférieur à 2 m. Il est généralement dominé par l'action du vent et des vagues,

- estuaires mésotidaux : ce sont les estuaires les plus répandus dans le monde. Le marnage est entre 2 m et 4 m. Ce type d'estuaire est en équilibre entre le marnage et le débit fluvial,

- estuaires macrotidaux : Avec un marnage entre 4 m et 6 m ce type d'estuaires est influencé par les courants de marées.

-estuaires hypertidaux, le marnage dans ces estuaires est supérieur à 6 m. la présence de ces estuaires est relativement rare.

Le débit fluvial, quant à lui, se diffère d'un estuaire à un autre et dans le même estuaire selon la saison et la période pluriannuelle. Ce débit influe les courants de marée.

2.2. Le débit fluvial

Comme c'est connu, dans un estuaire, les apports fluviaux sont formés d'eaux douces et les apports marins sont salés. En conséquence, compte tenu des propriétés des effluents et de leurs écoulements spécifiques, des effets d'interfaces sont à considérer pour les mélanges des eaux douces et des eaux salées (11):

Le mélange des eaux de surfaces et des eaux de mer crée dans l'estuaire des phénomènes complexes physiques, chimiques et biologiques. Le mélange entre l'eau douce et l'eau salée forme les courants résiduels qui représentent moins de 10% de l'amplitude des courants de marée mais jouent un rôle important dans le transport des sédiments.

Si on tient compte de l'organisation des écoulements via l'évolution de la composante longitudinale du vecteur des vitesses selon la verticale ascendante, des scénarios de mélanges en deux parties peuvent être déduits (**Figure I-6**) :

- Une composante de la vitesse correspondant aux courants fluviaux et dirigés toujours vers l'aval selon une répartition « d'allure parabolique » sur la verticale,
- Une composante de la vitesse proportionnelle au gradient de salinité. Cette composante est dirigée vers l'aval en surface et ce jusqu'à une profondeur de l'ordre de 40% en dessous de la

surface libre où elle s'annule et se dirige ensuite vers l'amont jusqu'à s'annuler par la suite au fond.

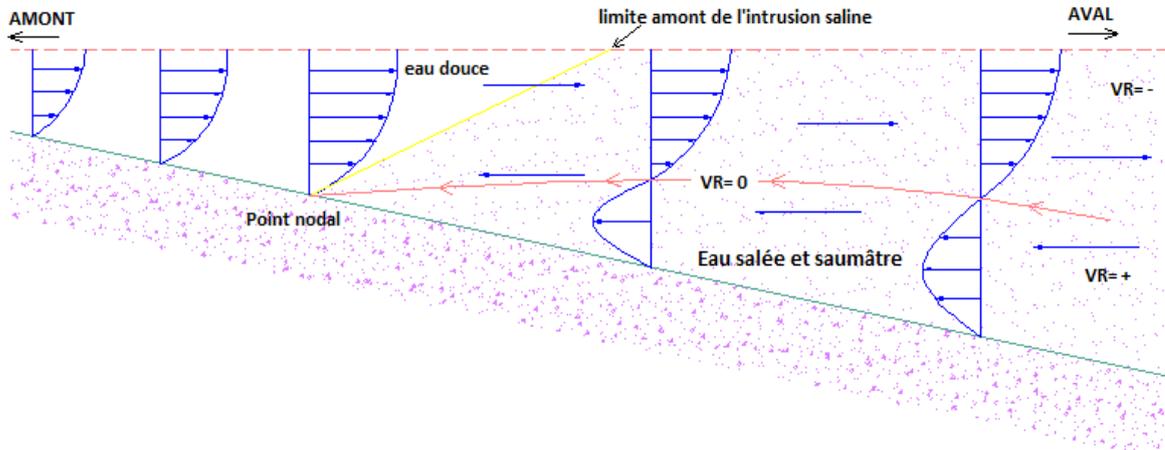


Figure I-6: gradient de vitesse dans un estuaire.

La résultante de ces deux composantes est toujours dirigée vers l'aval à la surface mais peut être dirigée vers l'amont au fond.

L'intensité du mélange des eaux dans l'estuaire est une fonction :

- De l'irrégularité des sections transversales et de leur variation suivant l'axe longitudinal. Ceci comprend la notion de zones « d'eaux mortes » ou « stagnantes » ;
- De la rugosité du fond ;
- Du degré de convection différentielle (lié aux deux points précédents) et par la suite du degré de diffusion. En effet, le mouvement du fluide se fait selon deux composantes de la vitesse : Le transport (convection) et le mélange dû à la turbulence (diffusion). La différence de densité entre l'eau douce et l'eau salée crée ce qu'on appelle une stratification qui joue en limitant la diffusion turbulente qui à son tour tend à détruire la stratification. Cette influence est exprimée par le nombre adimensionnel de Richardson Ri qui est le rapport entre l'énergie potentielle et l'énergie turbulente :

$$Ri = \frac{g(\delta\rho / \delta z)}{\rho \delta u / \delta z}$$

Avec $(\delta\rho / \delta z)$ le gradient de la masse volumique, ρ est la masse volumique du fluide, $\delta u / \delta z$ est le gradient vertical de la vitesse horizontale ;

- De l'énergie de la marée orientant l'intensité des courants ;
- De l'importance du débit fluvial.

En 1955, Pritchard (12) a établi une classification des estuaires basée sur les variations des débits fluviaux et des volumes d'eau introduits par la marée. Selon ce dernier les estuaires se divisent en 3 types : l'estuaire à coin salé, l'estuaire partiellement mélangé et l'estuaire bien mélangé. Pour faciliter cette classification, il a défini un paramètre hydraulique et un paramètre géométrique qui facilitent cette classification. Le paramètre géométrique reflète l'importance de la largeur (B) et de la profondeur (h) de l'estuaire dans cette classification. En effet, la diffusion par turbulence est plus importante si l'estuaire est peu profond ou constitué de chenaux multiples ou d'îles. Bien qu'il soit difficile de chiffrer un tel facteur, il reste toujours important d'analyser, par exemple, la

variation suivant le profil en long du rapport **B(moyenne)/h(moyenne)**. Le paramètre hydraulique, quant à lui, représente le rapport entre le volume d'eau entrant dans l'estuaire à travers une section transversale pendant le flot et le volume d'eau douce traversant l'estuaire vers la mer pendant un cycle complet de marée :

- Estuaire à coin salé : Ce cas est obtenu lorsque le fleuve par son débit a plus de puissance que la marée. Un fort gradient de densité et de salinité caractérise ce type d'estuaire. Le paramètre hydraulique est de l'ordre de l'unité.
- Estuaire partiellement mélangé : C'est le cas lorsque le débit du fleuve est faible par rapport au prisme de marée. Les deux masses d'eau sont suffisamment mélangées pour réduire le gradient de salinité. Le paramètre hydraulique est de l'ordre de 10 à 100.
- Estuaire bien mélangé : C'est le cas lorsque les courants de marée sont importants devant le débit fluvial. La salinité ne varie pratiquement pas avec la profondeur même si elle peut considérablement varier le long de l'estuaire. Le paramètre hydraulique est de l'ordre de 1000 ou plus.

Peters (11) a pu établir une classification des différentes zones de l'estuaire de l'Escaut en calculant les paramètres hydrauliques et géométriques correspondants à chaque zone.

D'autre part, l'estuaire de la Rance est classé comme étant un estuaire bien mélangé (13).

2.3. Classification des estuaires

La classification de Pritchard, mentionnée ci-dessus, reste assez peu suffisante, car elle ne prend pas en considération l'effet des variations temporelles du débit fluvial et des ondes de marées. De ce fait, une autre classification est proposée par Simmons (14). Elle prend en compte les variations du débit fluvial et de l'amplitude de marée. Hansen et Rattray en 1966 (15) proposent une classification qui permet de prendre en compte les variations temporelles et spatiales du mode de mélange des eaux douces et des eaux salées. Cette classification sera modifiée ensuite par Fischer (1976) (16).

En 1961, Le Floch (17) propose, de son côté, une classification basée sur les mécanismes de convergence liés à la morphologie de l'estuaire. En fait, la convergence des berges entraîne une augmentation de l'amplitude de la marée. Par contre, le frottement sur le fond diminue l'amplitude de la marée. Ainsi, on peut alors distinguer d'après cette classification trois types d'estuaire qui sont classifiés selon la variation de l'amplitude de la marée :

Les estuaires hyposynchrones : l'amplitude de la marée et les courants associés diminuent vers l'amont. La dissipation par friction est supérieure à l'amplification par convergence ;

Les estuaires synchrones : l'amplitude de marée et les courants associés restent constants longitudinalement. La dissipation et la convergence sont en équilibre ;

Les estuaires hypersynchrones : l'amplitude de marée et les courants associés augmentent brusquement dans l'embouchure avant de diminuer vers l'amont. L'amplification par convergence est supérieure au terme de friction.

3. Sédimentation dans l'estuaire

3.1. Définition

La sédimentation est le processus de chute d'éléments solides sous l'action de la pesanteur et des forces de frottement. La vitesse de sédimentation dépend de la concentration des sédiments, de la forme des sédiments, de la dimension des particules, de leur densité, de la salinité de l'eau et la présence des matières organiques ainsi que de la profondeur et du courant, ...

Dans ce travail, on aborde surtout l'influence de la concentration des particules et leurs dimensions, ainsi que la salinité de l'eau et la présence des matières organiques.

3.2. Origine des sédiments

L'estuaire est un espace ouvert à la mer, au fleuve et à l'atmosphère. Cette ouverture permet l'échange d'eau et de sédiments entre ces milieux. L'origine des sédiments dépend toujours de l'emplacement de l'estuaire, des conditions climatiques et des activités anthropiques se déroulant près de l'estuaire. Les activités anthropiques, (tel que dragages, piégeage dans les bassins, navigations, activités industrielles, ...) peuvent être à l'origine de la plupart des apports sédimentaires dans l'estuaire et peuvent modifier la quantité des apports en sables et en vases. Selon l'estuaire, il y a toujours une ou plusieurs sources sédimentaires dominantes. Pour les estuaires à débit fluvial élevé, les apports sédimentaires proviennent essentiellement du fleuve. Les estuaires mélangés sont dominés par les sédiments fluviaux en amont de l'estuaire et par les sédiments maritimes en aval. Les courants de marée contrôlent une grande partie du transport sédimentaire. Lorsque les courants sont importants c'est surtout les sédiments grossiers qui sont transportés.

Les sources atmosphériques sont généralement négligeables, sauf le transport de sables par actions éoliennes.

Généralement, la détermination de l'origine des sédiments dans l'estuaire dans le cas de sources multiples n'est pas facile. Cela nécessite une analyse isotopique ou l'étude de la composition des matières en suspension (MES). Par exemple les sédiments d'origine marine contiennent généralement des portions de coquillages. La **figure I-7** schématise les apports solides dans les estuaires. Les origines de sédiments sont plus ou moins importantes selon l'estuaire. Ils influent aussi sur la répartition des sédiments, leurs natures et leurs granulométries.

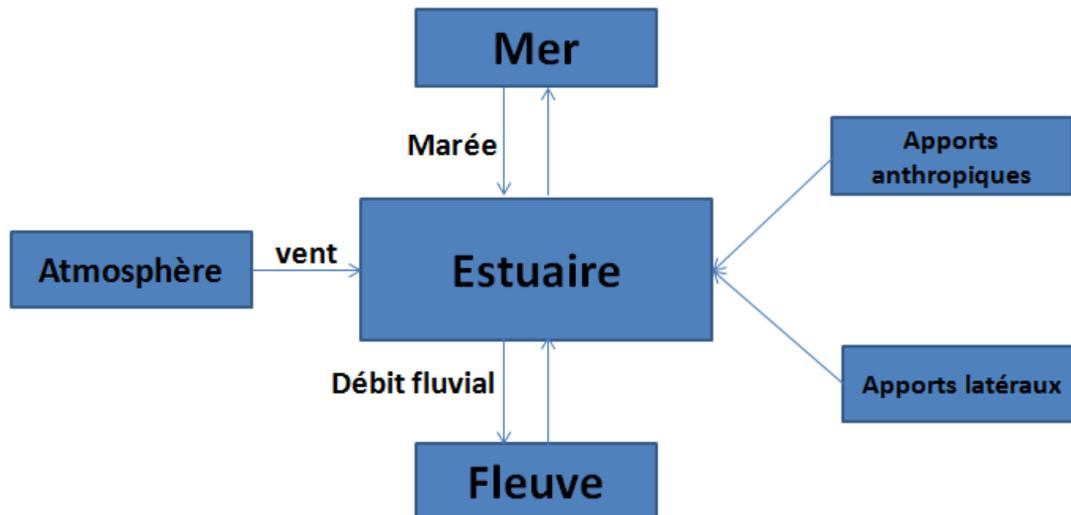


Figure I-7: Schéma des principales origines des sédiments dans un estuaire.

3.3. Caractéristiques des sédiments

Les sédiments peuvent être cohésifs ou non cohésifs. La cohésion des sédiments est principalement liée à la présence des argiles. Les sédiments non cohésifs sont constitués de particules grossières (taille des particules supérieure à 63 μm) de natures minéralogiques variées. Dans ce cas, on n'observe pas d'interactions physico-chimiques entre ces particules.

En revanche, les sédiments cohésifs sont composés de limons, sables fins (taille des particules comprise entre 2 μm et 63 μm) et d'argile (taille des particules inférieure à 2 μm). La nature cohésive de ces sédiments résulte des forces attractives entre les particules fines aboutissant à leur rassemblement en floccs de diamètre de 0,5 à 1,5 mm et de vitesses de chute de 10 à 100 000 fois plus grande que celle des particules individuelles. Ces floccs se comportent comme un fluide mais présente en général un comportement rhéologique non newtonien. Les forces qui réunissent les particules sont les forces attractives moléculaires de Van der Waals (Ces forces sont détaillées plus tard). D'autre part, des forces électriques répulsives induites par les charges négatives à la surface des particules s'opposent à ces forces attractives.

3.4. Accumulation des sédiments dans l'estuaire

L'accumulation des sédiments dans un cours d'eau correspond à des intersections complexes entre 3 phénomènes différents : l'érosion, le transport et le dépôt des sédiments (sédimentation) (Figure I-8).

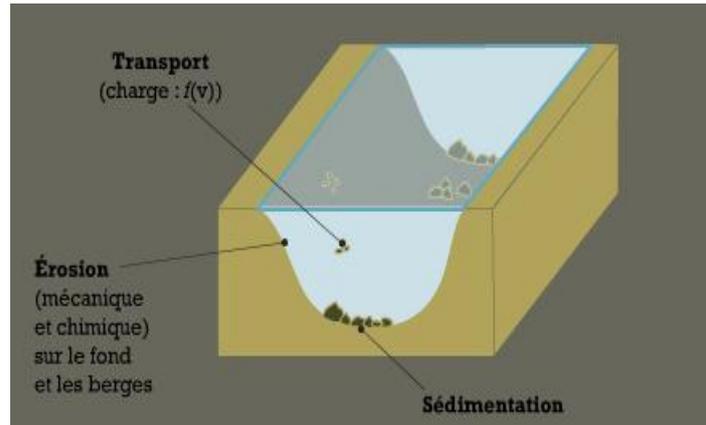


Figure I-8: Phénomène d'érosion, de transport et de sédimentation dans un cours d'eau.

Dans le cas particulier des milieux non cohésifs, Le diagramme de Hjulström, **figure I-9**, essentiellement basé sur des expériences de laboratoire, montre l'interaction existant entre la vitesse minimale des courants susceptible de déclencher la mobilisation, le transport et le dépôt de grains de quartz de granulométrie variable.

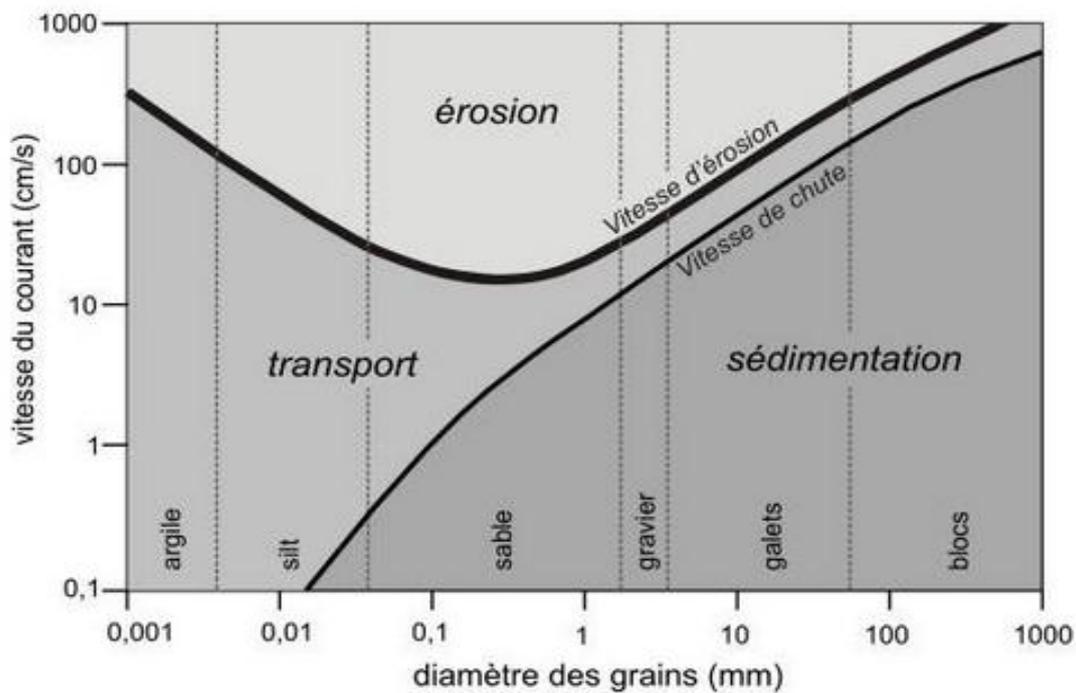


Figure I-9: Diagramme classique de Hjulström (18).

3.4.1. Erosion

L'existence du couple érosion- sédimentation est montrée dans les travaux du géologue James Hutton (18) . Le terme érosion groupe l'ensemble des processus qui conduisent à une usure de la surface terrestre sous l'action des agents météoriques et de transport (19).

L'érosion se produit lorsque la contrainte de frottement au fond devient suffisamment grande pour vaincre les forces de cohésion et de pesanteur qui maintiennent les particules au fond. Elle atteint

ainsi un seuil moyen d'érosion (**Figure I-10**) (20). L'érosion est d'autant plus efficace que la vase est fraîchement déposée et donc peu consolidée

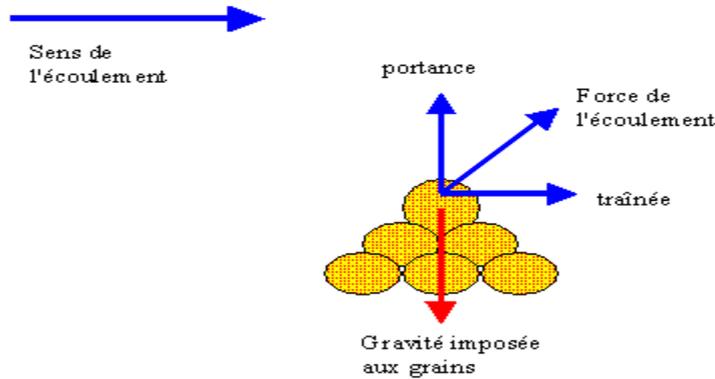


Figure I-10: forces appliqués sur les sédiments du fonds (21).

Schofield et Wroth (21) proposent un modèle qui relie le comportement mécanique du sol aux conditions de chargement appliqué d'une part, et, d'autre part, à la densité de tassement, la cohésion, l'histoire du sol et à la perméabilité (22). En se basant sur ce modèle, Winterwerp & Van Kesteren (23) ont défini quatre modes d'érosion : l'entraînement, l'érosion en floc, l'érosion en surface et l'érosion en masse (24).

L'entraînement se fait lorsque l'écoulement turbulent emporte avec lui la vase fluide.

L'érosion en floc se fait lorsqu'un courant d'eau vient détacher individuellement des floes à la surface du lit sédimentaire.

L'érosion en surface se fait lorsque la contrainte de cisaillement générée au fond dépasse le seuil moyen d'érosion. Dans ce cas, des sédiments sont érodés simultanément de la couche surfacique du lit sédimentaire contrairement à l'érosion en floc qui est aléatoire dans le temps et dans l'espace

Enfin, l'érosion en masse est un processus non drainé au cours duquel des morceaux de matière sont érodés en raison de contraintes fluide d'entraînement qui dépassent largement la résistance du lit vis-à-vis de sa cohésion, mais également la résistance résultante par les gradients de pression interstitielle.

Le taux d'érosion (E) résultant dépend du taux de consolidation des sédiments.

Pour les vases en cours de consolidation selon Sanford et Halka :

$$E = E_0 \exp\left[\alpha(\tau - \tau_e)^{1/2}\right] \text{ (Equation I-1) (25) .}$$

Pour les vases consolidées selon Ariathurai-Partheniades :

$$E = E_0 \frac{\tau - \tau_e}{\tau_e} \text{ (Equation I-2) (22), (26)}$$

Avec $E(kg.m^{-2}.s^{-1})$ est le taux d'érosion, $E_0(kg.m^{-2}.s^{-1})$ est un paramètre empirique d'érosion, $\tau(Pa)$ est la contrainte de cisaillement imposée au lit de sédiments, $\tau_e(Pa)$ est la contrainte

d'érosion seuil. E_0 et τ_e varie généralement pour les sédiments naturels et artificiels. Cela est dû à des influences biologiques (27), chimique (28) et physique (23) sur la stabilité des sédiments intertidaux.

L'efficacité de l'érosion dépend des caractéristiques du substrat et des caractéristiques du milieu. Ainsi, la cohésion, la texture, la structure, les propriétés mécaniques, l'uniformité, la nature, la composition et l'épaisseur du substrat influencent l'érosion. D'autre part, le tracé du littoral, la topographie du fond marin, le niveau d'exposition aux vents, la présence du cours d'eau, le drainage du milieu et la présence de végétation influence aussi l'érosion. L'érosion peut se présenter alors sous différents types : érosion éolienne, érosion fluviale, érosion karstique, érosion glaciaire et érosion marine (29). Dans notre étude, nous nous intéressons essentiellement à l'érosion fluviale et l'érosion marine.

3.4.2. Transport

Le transport permet le déplacement des sédiments dans les zones de dépôt. La possibilité de transport solide dépend à la fois de la capacité du fluide porteur en écoulement et des caractéristiques des particules ou agrégats formés par érosion. Durant le transport, les sédiments peuvent toujours subir des transformations. Cela est dû aux altérations chimiques et mécaniques qui s'opèrent durant le transport. D'autre part, le transport des sédiments peut causer un tri granulométrique. Les sédiments les plus fins peuvent aller plus loin tandis que les sédiments grossiers ne seront pas transportés sur de longues distances, ils se déposent ainsi plus vite (30).

En condition hydrodynamique, le transport peut se produire selon trois scénarios distincts. Ces scénarios dépendent de la taille des sédiments, de la viscosité du fluide et du niveau de turbulence au sein de l'écoulement (**Figure I-11**) :

- transport par glissement, charriage ou roulement : Ce type de transport se fait surtout pour les particules de gros diamètre. Les particules restent toujours en contact avec le fond et se déplacent en roulant et en glissant.
- transport par suspension : les sédiments restent suspendus dans le fluide et ne sont jamais en contact avec le fond. Cela est lié à la turbulence et concerne les particules fines.
- transport par saltation : quand le grain arraché se déplace par sauts successives. Dans ce cas on ne parle pas de transport par charriage car le sédiment n'est pas toujours en contact avec le fond ni de transport par suspension car le sédiment n'est pas suspendu dans le fluide mais de transport par saltation.

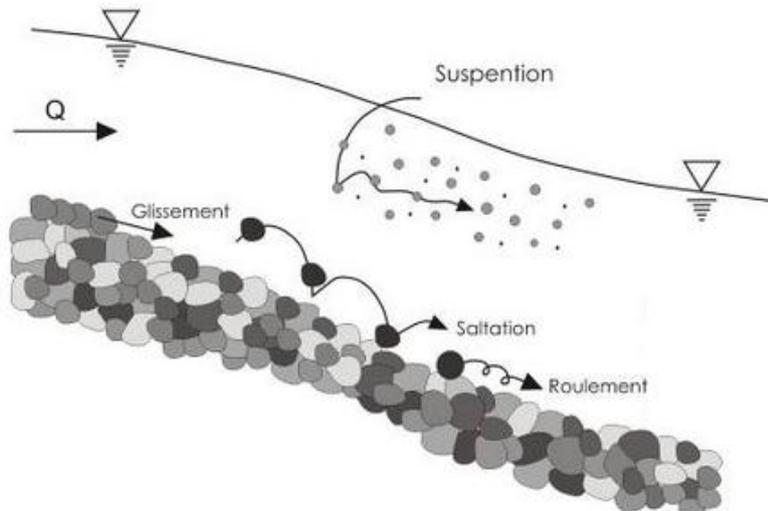


Figure I-11: Mode de transport des particules dans un cours d'eau (32).

Il faut noter que le type de transport dépend aussi de la cohésion des sédiments. Ainsi, les sédiments cohésifs ne sont transportés que par suspension, par contre, les sédiments non cohésifs se transportent par saltation ou par reptation.

Pour prédire la capacité d'un écoulement à mouvoir un grain solide, on peut envisager de comparer la vitesse de cisaillement du fluide à la vitesse de sédimentation du grain solide (31). Pour qu'une particule soit transportée il faut que la vitesse de cisaillement (W_*) du fluide soit supérieure à celle de sédimentation de la particule (W_s).

Si l'écoulement est gravitaire, Le Gall (32) propose d'exprimer la vitesse de cisaillement au fond du lit de la rivière au moyen de l'équation I-3:

$$W_* = \sqrt{ghS} \text{ (Equation I-3)}$$

Avec : h , la profondeur du flot et S , la pente ($\sin \alpha$) du lit.

Des modèles de calcul de la vitesse de sédimentation (W_s) sont proposés dans la suite.

Si W_* est proche de W_s le transport peut se produire par reptation.

Si $W_* > W_s$, les grains sont suspendus dans le fluide.

Si $W_* < W_s$ les grains sont charriés par saltation.

D'après Abbott & Francis (33) les 3 types de mouvement se produisent simultanément, dans des proportions variables (Figure I-12) :

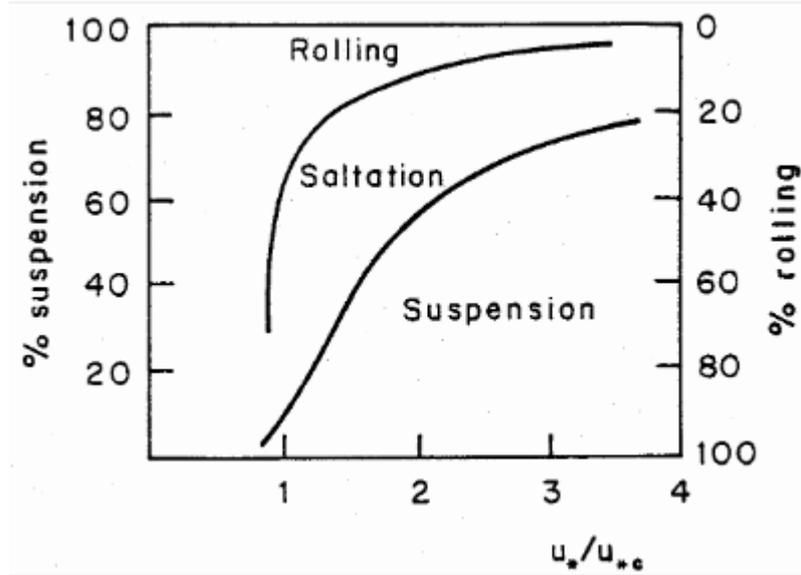


Figure I-12: proportions des sédiments pour chaque type de transport (35).

Le diagramme de Shields, **figure I-13** (34) relie le paramètre de Shields θ avec le nombre de Reynold Re .

$$\theta = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho)gd} \quad \text{(Equation I-4)}$$

$$Re = \frac{W_*d}{\nu} \quad \text{(Equation I-5)}$$

Avec:

ρ_s : masse volumique des particules solides

ρ : masse volumique de l'eau ;

g : accélération de la pesanteur;

d : le diamètre D_{50} des grains

ν : la viscosité cinématique de l'eau ;

τ_b : le cisaillement exercé par le fluide sur les particules solides. Il est donné par :

$$\tau_b = \frac{\rho g \bar{U}^2}{k^2 h^{1/3}} \quad \text{(Equation I-6)}$$

Avec :

\bar{U} : la vitesse moyenne de l'écoulement ;

h : la hauteur moyenne dans le cours d'eau;

k : le paramètre de Strickler;

W_* : la vitesse de cisaillement au fond.

Ce diagramme détermine ainsi le seuil de mise en mouvement d'une particule de diamètre donné, pour un nombre de Reynold donné.

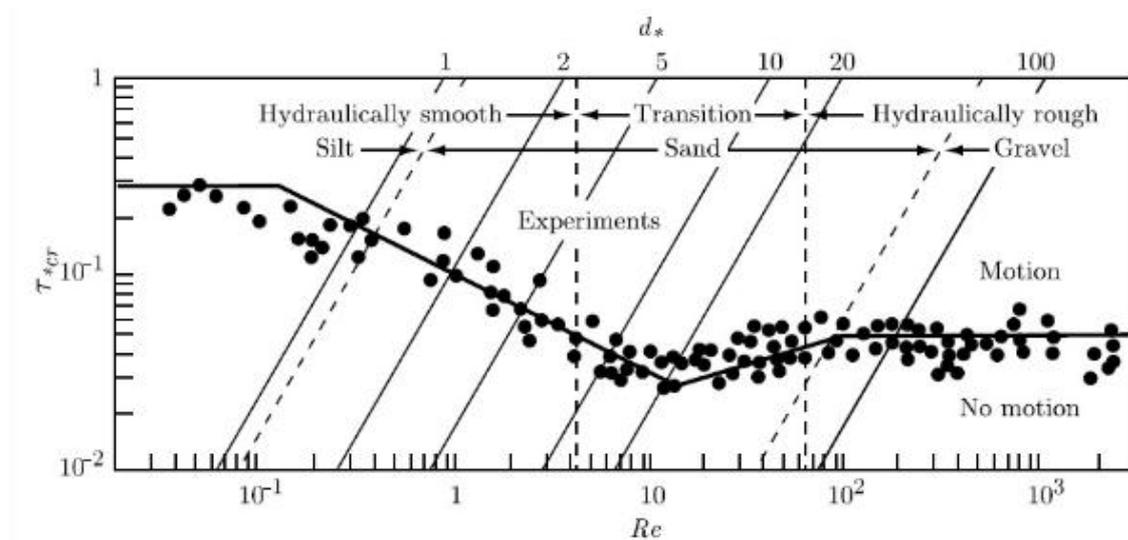


Figure I-13: Diagramme de Shield (37).

3.4.3. Sédimentation et consolidation

Pour les sédiments cohésifs fins, les phénomènes de sédimentation et de consolidation constituent un processus continu dans le temps et dans l'espace.

Le dépôt sédimentaire a lieu lorsque la vitesse du fluide porteur diminue ou lorsque l'écoulement disparaît. La sédimentation se présente selon trois types selon la concentration des sédiments :

- La sédimentation libre qui se produit pour les suspensions de faible concentration (pas d'interaction des particules les unes avec les autres).
- La chute entravée : dans ce cas la concentration est suffisamment élevée (influence de la présence des autres particules sur la vitesse de chute).
- La sédimentation par consolidation : dans ce cas la concentration doit être élevée. On n'aura pas de chute libre mais de tassement par consolidation.

La consolidation est la diminution progressive de la teneur en eau dans les sédiments sous l'effet de charge qui peut être dû au poids propre des sédiments. Pour la sédimentation, à part la formation des floes, les particules élémentaires ne forment pas un réseau continu. Au contraire, en cas de

consolidation, les particules élémentaires forment un réseau tridimensionnel qui transmet les contraintes effectives grain à grain.

L'état des vases qu'elles soient sédimentées ou consolidées dépend de sa teneur en eau. La teneur en eau limite entre la consolidation et la sédimentation peut être estimée à 7 fois la limite de liquidité du matériau.

L'évolution de la concentration dans une couche de vase est exprimée par l'équation de continuité de la phase solide :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial [\bar{w}_s C]}{\partial z} = 0 \quad \text{(Equation I-7)}$$

Avec C la concentration de la suspension (kg m^{-3}), \bar{w}_s la vitesse moyenne de la phase solide (m.s^{-1}), t le temps (s), et z la coordonnée verticale (m) (35).

3.4.3.1. Vitesse de chute

La vitesse de chute est une caractéristique importante des sédiments en suspension dans un cours d'eau. Elle dépend de plusieurs paramètres dont la taille et la forme des particules, la densité, de la concentration en sédiments, du régime de l'écoulement ainsi que de la salinité et de la présence de matières organiques.

Les sédiments non-cohésifs dans un cours d'eau sont soumis :

- à la force de gravité (poids propre du sédiment) et la force d'Archimède (poids apparent du sédiment) :

$$P = \frac{\pi}{6} (\rho - \rho_s) g D^3 \quad \text{(Equation I-8)}$$

- aux forces de frottement (traînée hydrodynamique) :

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D \left(\pi \frac{D^2}{4} \right) V^2 \quad \text{(Equation I-9)}$$

Avec ρ : la densité de l'eau,

ρ_s : la densité des sédiments,

g : accélération de la pesanteur,

D : diamètre équivalent des sédiments,

C_D : coefficient de traînée,

V : composante moyenne du vecteur vitesse représentative de l'écoulement loin de l'obstacle pour un grain supposé fixe.

Au cours de la chute en condition d'équilibre, ces forces se compensent. Les sédiments atteignent la vitesse limite de chute, W_s . Celle-ci est fonction du régime d'écoulement entre les particules ou associé à une particule.

Dans une logique d'un système bien identifié (grain unique par exemple) on définit le nombre de Reynolds particulière sans dimension :

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad \text{(Equation I-10)}$$

Avec, ν la viscosité cinématique du fluide,

D , la dimension caractéristique du système considéré,

V , la composante moyenne du vecteur vitesse représentative de l'écoulement loin de l'obstacle pour un système supposé fixe.

Avec s est la densité relative des grains par rapport à l'eau $s = \frac{\rho_s}{\rho}$ (36).

Si $D \leq 100 \mu m$, $Re < 1$ (écoulement laminaire) : on peut retenir pour exprimer la vitesse limite de chute l'expression du coefficient de traînée par la loi de Stokes.

$$W_s = \frac{(s-1)gD^2}{18\nu} \quad \text{(Equation I-11)}$$

Si $100 \mu m \leq D \leq 1000 \mu m$: on peut retenir pour exprimer la vitesse limite de chute l'expression du coefficient de traînée par la loi de Zanke (37).

$$W_s = \frac{10\nu}{D} \left(\left(1 + \frac{0.01(s-1)gD^8}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right) \quad \text{(Equation I-12)}$$

Si $D \geq 1000 \mu m$, $Re > 1000$ (écoulement turbulent) : on peut retenir pour exprimer la vitesse limite de chute l'expression du coefficient de traînée par la loi de Van Rijn, 1989 (38).

$$W_s = 1.1 \left[(s-1)gD \right]^{0.5} \quad \text{(Equation I-13)}$$

Dans le cas de particules cohésives, les forces ne s'appliquent pas sur la particule individuelle, mais sur l'ensemble des particules formant un flocc.

Soulsby (1997) (39), propose une formule empirique ajustée pour le sable naturel pour le calcul de la vitesse limite de chute et qui s'applique sur une large gamme de diamètre :

$$W_s = \frac{\nu}{D} \left[(10.36^2 + 1.049D_*^3)^{0.5} - 10.36 \right] \quad \text{(Equation I-14)}$$

Avec $D_* = D \left[\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3}$ et s est la densité relative des grains par rapport à l'eau $s = \frac{\rho_s}{\rho}$.

Kynch (40) suppose que la vitesse de chute des particules rigides en sédimentation libre ne dépend que de la concentration des particules en suspension. Elle est une fonction décroissante de la concentration en solide. Les particules de même dimension, de même forme et de même masse volumique sont équitombantes et leur concentration est uniforme pour chaque niveau de la colonne de sédimentation.

Ainsi, à partir d'essais en éprouvette, Kynch trace dans le diagramme (h, t) les droites d'isoconcentration correspondant aux niveaux où la concentration a une valeur C donnée, et à leur déplacement dans le temps. La pente de ces droites est donnée par la relation :

$$\frac{dh}{dt} = v(C) \text{ (Equation I-15).}$$

Avec $v(C)$ la vitesse de déplacement d'un plan de concentration constante (C), par rapport à l'éprouvette (41).

Certains auteurs ont tenté d'établir une relation empirique entre la vitesse de tassement d'une suspension et la vitesse limite en faisant intervenir la porosité du système (42) (43).

3.4.3.2. Flocculation

La flocculation est un processus physico-chimique aboutissant à l'agglomération des particules présentes dans un liquide qui accélère la sédimentation par rapport à celle des particules primaires. Au cours du processus de sédimentation des floccs, leur taille est croissante.

L'existence du processus de flocculation marque une distinction entre le mode de dépôt des sédiments cohésifs et celui des sédiments non cohésifs (44). Selon la proportion de vase présente dans un système sédimentaire, les sédiments présentent un comportement cohésif ou non cohésif et seront alors caractérisés par une loi de chute différente (45). Ce processus transforme les particules élémentaires en floccs dont les caractéristiques (densité, tailles et vitesse de chute) ne ressemblent pas à celles des particules qui les composent (46).

L'étude de ce phénomène et sa modélisation a fut le sujet d'étude de nombreux auteurs ((47), (48), (49) et d'autres).

Afin de comprendre le processus de flocculation, la théorie DLVO considère que les particules sont soumises uniquement à deux types d'interactions : les forces attractives de Van Der Waals et la répulsion électrostatique (50).

Forces de Van Der Waals

Ce sont des interactions colloïdales qui ne touchent que les particules fines. Ces forces résultent d'une attraction entre deux dipôles permanents (**Force de Keesom**), un dipôle permanent et un dipôle induit (**Force de Debye**), ou entre deux dipôles induits (**Force de London**). En effet, un dipôle permanent apparait dans une molécule dissymétrique il est dû à la différence d'électronégativité entre les atomes de la molécule. Une molécule sans différence d'électronégativité peut aussi acquérir un moment électrique induit non permanent lorsqu'elle se trouve dans un champ électrique créé simplement par

l'approche d'un dipôle permanent. Toutes ces forces induisent les forces de Van Der Waals qui tendent généralement à rapprocher les particules. Elles peuvent exister entre atomes, molécules ou ions (51).

$$F_a = \frac{k\mu_1^2\mu_2^2}{r^7} + \frac{k'\alpha\mu^2}{r^7} + \frac{k''\alpha_1\alpha_2}{r^7} \text{ (Equation I-16)}$$

Avec : μ , les moments dipolaires des molécules considérées,

α , les polarisabilités électroniques désignant l'aptitude d'un élément apolaire à se polariser en présence d'un champ.

Interactions interparticulaires

Ce sont des forces de natures électrostatiques. Elles proviennent des forces d'attractions ou de répulsions d'une molécule avec la molécule voisine. Toutes les molécules sont soumises à des attractions intermoléculaires, bien que dans certains cas, ces attractions sont très faibles. L'intensité de ces forces influe l'état de la matière (solide, liquide ou gaz). Ces interactions dépendent de la taille des particules, de leurs formes et de la concentrations volumique solide dans la solution, ainsi que de l'état des particules (au repos ou en écoulement) (52), (53).

La prédominance entre les forces de Van Der Waals et les forces électrochimiques dépend de la distance entre les particules. Elle est décrite dans la théorie DLVO (Derjaguin – Landau – Verwey – Overbeek) présentée dans la **figure I-14** (54).

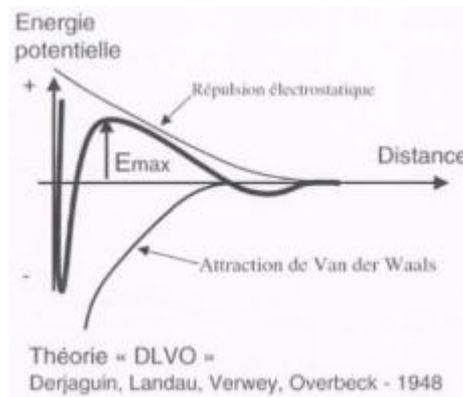


Figure I-14: : Théorie "DLVO" (57).

Le processus de floculation est fortement dépendant de la température, de l'activité turbulente, de la concentration de la phase solide et de la nature chimique des éléments en présence et de leur taille. L'évolution de la taille des floes en fonction de la concentration et de la turbulence est montrée par Dyer 89 (**Figure I-15**).

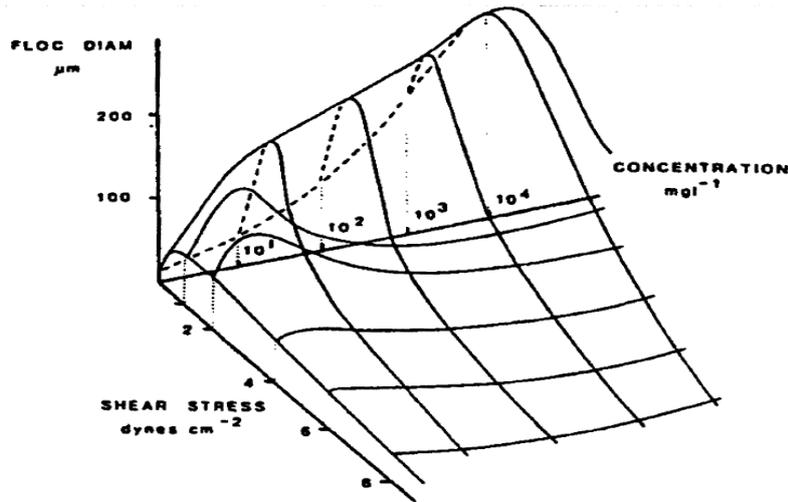


Figure I-15: Evolution de la taille des floes en fonction de la concentration et de la turbulence (55).

Dans leurs travaux, Gratiot (56) , Thorn (57) et Migniot (58) ont étudié l'influence de la concentration sur le phénomène de floculation et par la suite sur la vitesse de chute des sédiments et ont parlé de concentration critique d'entravement. La **figure I-16** montre les expériences de Thorn (57) dans la Serven où l'on voit la continuité des domaines de la floculation (ou chute accélérée) et de l'entravement.

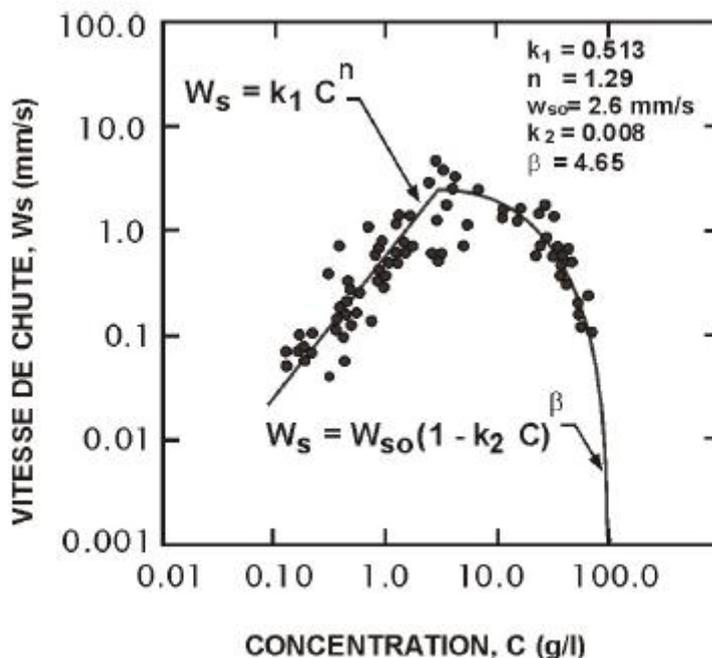


Figure I-16: Evolution de la vitesse de chute en fonction de la concentration dans les travaux de Thorn (57).

Mikes et al (59) à leur tour, ont étudié les facteurs influençant le phénomène de floculation estuariens dans l'estuaire de la Seine. Ils indiquent la floculation est favorisée par une turbulence faible.

La matière organique et la salinité influent aussi ce phénomène en jouant sur la densité des floes. En effet, La charge négative de la particule décroît de manière exponentielle quand la salinité augmente.

Cela inhibe la répulsion électrostatique et amplifie la floculation si la concentration en matières en suspension est suffisamment forte.

3.4.3.3. Evolution l'interface eau- sédiments dans la colonne d'eau et tassement des sédiments

Plusieurs études ont été réalisés sur des sédiments prélevés de différentes estuaires (la Seine (60), La Rance (61)) visant l'étude de l'évolution de l'interface eau-sédiments lors de la sédimentation et de la variation de la concentration et de la densité le long de la colonne d'eau. Ces études permettent de tracer une courbe de tassement et d'identifier les différentes phases y correspondantes.

En effet, l'évolution de l'interface eau-sédiments déroule en trois phases explicitant les trois phénomènes qui ont lieu : la floculation, la sédimentation et la consolidation (**Figure I-17**).

Au cours de la première phase, l'interface entre l'eau et les particules sédimentaires n'est pas claire. Dans ce stade, les particules floculent mais ne sédimentent pas.

Durant la deuxième phase l'interface eau-sédiment apparaît et elle descend avec une vitesse constante qui peut être considérée égale à la vitesse de sédimentation des particules sauf si la teneur en eau est très faible. Un dépôt de sédiment se forme en même temps progressivement au fond de la colonne. Dans cette phase deux phénomènes sont présents la sédimentation puis la consolidation progressivement.

La pente de la courbe position de l'interface Vs temps s'interrompt brusquement. La descente de l'interface se ralentit. Cela correspond à la phase de consolidation.

Migniot (62) a relié la variation de la concentration durant le tassement au temps de tassement par la formule suivante :

$$T_s = \alpha \log t + \beta \text{ (Equation I-17)}$$

Avec T_s étant le poids des particules sèches par volume du mélange, t le temps de tassement, α un facteur qui dépend principalement du diamètre des particules et β un facteur lié au milieu aqueux.

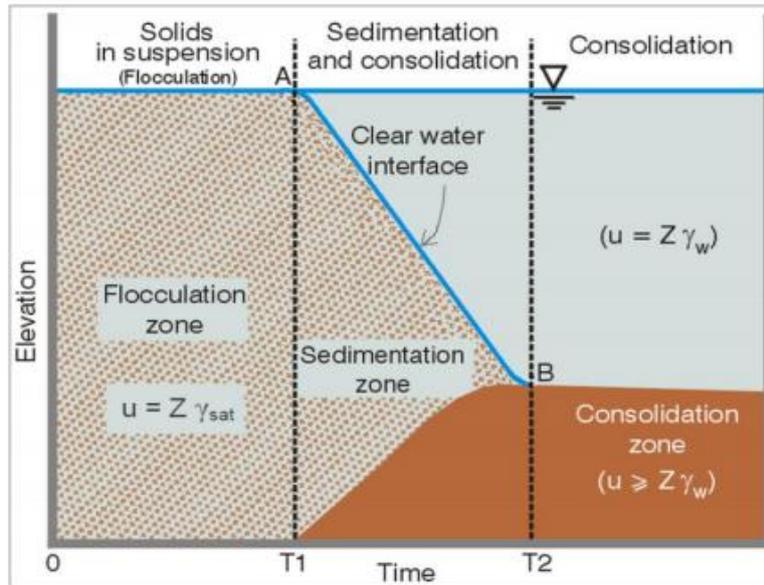


Figure I-17: Schéma du processus de floculation/sédimentation/consolidation (43).

4. Comblement des estuaires : Causes et conséquences

Les estuaires constituent un milieu sédimentaire original. Les matériaux sont apportés à l'estuaire des deux côtés : du fleuve et de la mer. Ces matériaux se déposent dans l'estuaire essentiellement sous forme de vase. Le comblement des estuaires se produit alors une fois que la quantité de sédiments dans l'estuaire dépasse sa capacité maximale. Ce phénomène était toujours un phénomène naturel, néanmoins il peut être accéléré par des contributions humaines.

En effet, dans la plupart des estuaires, les apports continentaux de matériaux sont très importants. Ils proviennent principalement de l'érosion qui à son tour dépend des conditions climatiques, géologiques, topographiques et biogéographiques (63). Les estuaires sont des milieux extrêmement dynamiques par leurs emplacements et leurs configurations ce qui a attiré des communautés humaines pour s'installer depuis longtemps dans les fonds des estuaires et donner naissance à des villes importantes (64). Ceci a abouti surtout, à partir du XIXe siècle et dans les pays industrialisés à une perturbation de l'équilibre de l'écosystème de ces estuaires et par la suite une modification des processus hydrologiques et sédimentaires naturels.

Aussi, les estuaires au cours des années sont soumis à de nombreuses fluctuations : régression (retrait de la mer) ou transgression (avancée de la mer sur le continent). Ainsi les estuaires passent par des périodes de sédimentation qui permettent d'obtenir des couches de sédiments plus ou moins grossières.

Tous les aménagements des estuaires visent l'amélioration de la navigation, la protection des inondations, la production de l'énergie et les développements industriel et urbain. Tous ces objectifs sont légitimes, cependant leurs applications ne prenaient pas en considération les fonctions hydrauliques et écologiques des estuaires. Ce qui cause la modification des composantes physiques des cours d'eau et de l'écosystème des estuaires.

Le comblement entraîne une modification profonde des paysages des estuaires, mais aussi une régression des surfaces favorables au développement des coquillages et autres ressources alimentaires, avec des conséquences prévisibles sur l'avifaune. Le comblement des estuaires induit un changement complet de la morphologie estuarienne, c'est-à-dire un changement de la marée et de la salinité dans l'estuaire. Il menace la biodiversité des espaces estuariens ainsi que leurs hydrodynamiques.

Partie III : La Rance

1. Localisation

La Rance est une rivière située à l'ouest de la France, de 102,2 km de longueur et qui permet la circulation de 25 à 35000 véhicules par jour. Elle prend sa source dans les monts du Mené à Collinée à une altitude voisine de 250 m et débouche dans la Manche entre Dinard et Saint-Malo.

La surface du bassin versant de la Rance est de 380 km² à Guenroc. Le cours de la Rance se divise, d'amont en aval, en 3 zones :

- La Rance fluvial de 80 km de longueur à chenal étroit,
- La Rance maritime s'étend sur une longueur de 20 km entre l'usine marémotrice au nord et l'écluse du Châtelier au sud qui marque la limite amont de l'incursion des eaux marines,
- L'estuaire de la Rance jusqu'à la Manche.

Ce dernier est de 21 km de longueur, **figure I-18**. Ces rives sont très découpées en baie.

Dans l'antiquité, le golfe Normand-Breton était perçu comme un coin de mer enfoncé dans la Gaule. Le transport maritime étant fort utilisé, l'estuaire de la Rance s'avérait d'autant plus important qu'il fournissait un axe de pénétration dans les terres. L'importance de la Rance durant l'antiquité et jusqu'à maintenant se révèle par son emplacement au fond du golfe normano-breton et son rôle de contact entre deux types de navigations, l'une maritime et l'autre fluviale.

En 1961, la construction de l'usine marémotrice a commencé, **figure I-19**. La construction de cette usine avait beaucoup d'influence sur les caractéristiques hydrodynamiques et hydrologiques surtout du bassin maritime de la Rance. L'usine marémotrice est mise en service en 1966. Elle est restée pendant 45 ans la plus grande usine marémotrice du monde avec une capacité de 240MW. Cette production permet d'alimenter environ 100 000 clients domestiques ce qui est équivalent à une ville comme Rennes. L'usine est caractérisée par ses cycles d'exploitation déterminés par les marées,

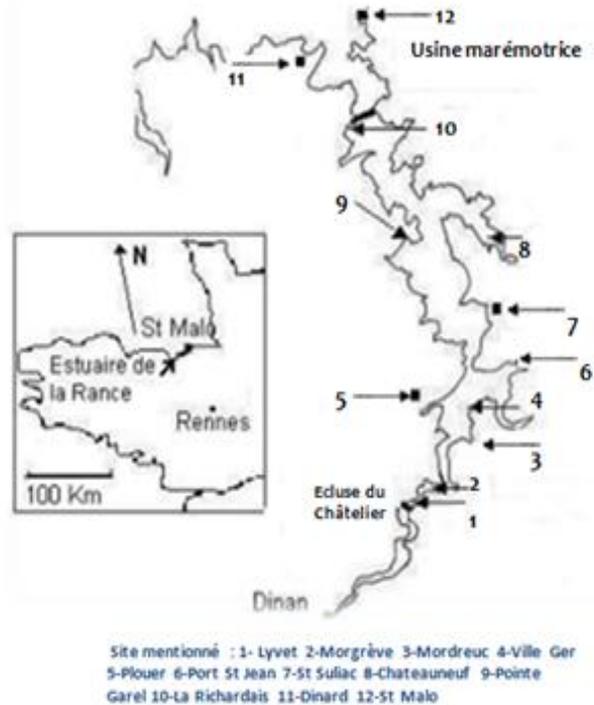


Figure I-18: L'estuaire de la Rance et les sites mentionnés (98).



Figure I-19 : usine marémotrice de La Rance.

par la disponibilité des vannes et par la prévision hebdomadaire de la valeur de l'énergie. Le barrage de la Rance s'étend sur 750 m entre la pointe de la Brebis sur la rive gauche et la pointe Briantais sur la rive droite. Il est situé au sud de Dinard et Saint-Malo, à l'embouchure du fleuve côtier de la Rance. Il crée un bassin de retenue d'une superficie de 22 km². La construction de l'usine a nécessité la création d'une zone sèche pendant les 2 premières années. La Rance fut totalement coupée par franges formés de 2 rangées de batardeaux de la mer afin de permettre aux constructeurs de travailler sur un chantier complètement asséché. La ria devient alors un vaste plan d'eau privée de tout mouvement.

A partir de la mise en fonction de l'usine, l'estuaire retrouve les mouvements d'eau. Mais ceux-ci sont pilotés par l'usine marémotrice et non plus par le cycle naturel des marées. Ils ne sont plus alors naturels et sont appelés « marées artificielles ». La construction de cette usine et du barrage a transformé l'écosystème de la Rance et changé sa morphologie. Ainsi l'usine est devenue la cause principale de l'envasement de l'estuaire de la Rance.

2. Caractéristiques hydrodynamiques et morphologiques

2.1. Marnage

Avant la construction de l'usine marémotrice, le marnage dans l'estuaire de la Rance était parmi le plus élevé du monde : de 12 à 13 m en eau vive et de 7 à 8 m en eau morte. Les études effectuées dans l'estuaire sur la courantologie montrent seulement que les courants des flots étaient plus importants que les courants du jusant. La construction de l'usine a causé la diminution du marnage d'environ 40%. Le marnage n'est plus que de 7 à 8 m en vive-eau et de 2,5m en eau morte, ce qui a entraîné la diminution de la surface intertidale qui représentait 70% de la surface totale du bassin en marée de vive-eau. Le niveau moyen des eaux dans la retenue est d'environ 9m alors qu'il était de 6,6m avant la construction du barrage, soit une remontée de 2,5m.

2.2. Courantologie

Avant la construction du barrage, les études courantologiques restent rares. Après la construction de l'usine marémotrice, des études détaillées de courantologie ont été effectuées.

A l'extérieur de l'estuaire, les courants de marée déjà chenaillés à l'embouchure entre Saint-Malo et Dinard ont un caractère alternatif marqué et s'orientent vers le Sud-Est au flot et le Nord-Ouest au jusant. Les vitesses maximums sont de l'ordre de 0,7 m/s en morte-eau et de 1,5 m/s en vive-eau. A l'intérieur du bassin maritime, les courants restent violents, surtout à proximité de l'usine marémotrice, mais s'atténuent rapidement dans les zones larges des anses et s'accélèrent au contraire au niveau des étroitures rocheuses. A Port-Saint-Jean les courants sont alternatifs, orientés au sud au flot et au nord au jusant, avec des vitesses de l'ordre de 0,7 m/s en morte-eau et qui peuvent atteindre 1m/s en vive-eau. Plus à l'amont, au niveau de Plouër et de la plaine de Mordreuc, les courants deviennent giratoires et ont des vitesses qui chutent à 0,3 m/s en morte-eau et à 0,5 m/s en vive-eau. Ces courants s'atténuent dans les zones larges des anses et s'accélèrent au niveau des étroitures rocheuses.

Les marées artificielles causées alors par la construction de l'usine marémotrice, sont décalées de plusieurs heures par rapport aux marées naturelles. Elles ont une durée d'étalement à marée haute et à

marée basse de plusieurs heures. Leur amplitude est fortement réduite avec un niveau haut bloqué à 12 m et un niveau bas qui ne descend plus en dessous de 5m.

2.3. Salinité

La modification du régime hydraulique naturel a entraîné une nouvelle répartition de la salinité dans l'estuaire. Avant le développement de l'usine marémotrice, le bassin de la Rance pouvait être divisé en 3 zones selon la salinité :

- Rance maritime entre Saint-Malo et Saint-Suliac ; la salinité dans cette partie varie de 30 % à 34%.
- Rance saumâtre à salinité élevée (de 20% à 30%), s'étend de Saint-Suliac jusqu'à Port-Saint-Jean.
- Rance saumâtre à salinité faible inférieure à 20% entre Port Saint Jean et l'écluse du Châtelier.

Depuis la mise en service de l'usine (1966), le mélange eaux douces-eaux salées n'est sensible que dans une faible portion du bassin maritime, comprise entre l'écluse de Châtelier et Port-Saint-Jean en hiver, soit de 5 km de long, et qui se réduit en été aux 2 km qui séparent le Châtelier de Mordreuc

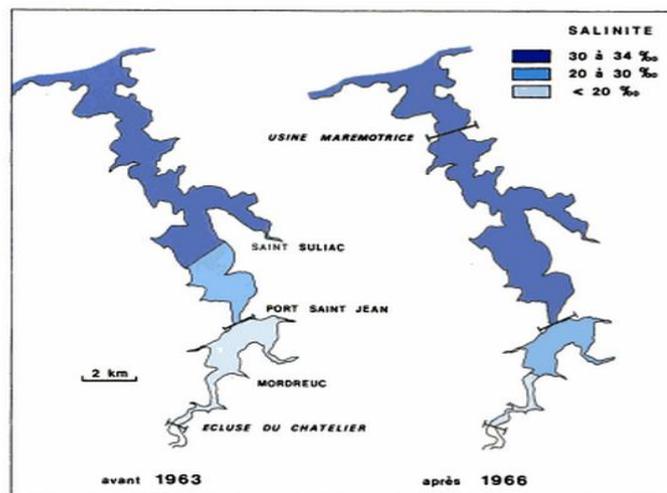


Figure I-20: : Salinité avant et après la construction de l'usine (72).

(66), **figure I-20**. L'étendue de la partie véritablement estuarienne du bassin maritime est donc faible par rapport aux 20 km de la ria soumise à l'influence de la marée dynamique. Actuellement, la diminution des variations de niveau dans le bassin de retenue a atténué les fluctuations saisonnières de la salinité et repoussé vers l'amont la partie plus strictement estuarienne de la ria. Après le barrage les zones du bassin sont devenues comme suit :

- Zone maritime remontée vers Port-Saint-Jean, ayant une salinité très proche de celle de la mer, c'est à dire de 30% à 34%.
- Zone estuarienne continuant jusqu'à Mordreuc au niveau de laquelle on distingue des variations importantes de salinité (de 20% à 30%)
- Zone estuarienne à salinité faible qui s'étend de Mordreuc jusqu'à l'écluse du Chatelier, où les variations de salinité ne sont pas très importantes. Dans cette zone, la salinité peut chuter jusqu'à quelques g/l en fonction des débits fluviaux.

Selon Rétrière et Richard (67), la diminution de la zone d'influence d'eau douce causée par l'augmentation du volume d'eau moyen à marée basse (relèvement du niveau bas) est la cause de l'augmentation de la salinité. Selon Stratakis (68), l'augmentation de la salinité est due à l'allongement des durées des étals. Le Laboratoire National d'Hydraulique (LNH) en 1999 (69) a considéré que cette augmentation ne concerne que la salinité minimale de l'estuaire. La présence du barrage a provoqué la diminution du niveau des marées hautes et en conséquence, il serait possible d'observer une diminution de la salinité maximale par écrêtage. Cependant une augmentation de la salinité est observée. Cette distinction dans les conclusions de ces deux études est peut-être liée au débit fluvial ou au coefficient de marée mesurés par Rétrière en comparaison des mesures du LNH.

Au-delà de l'écluse du Châtelier jusqu'à Dinan, il s'agit de la Rance fluviale et les eaux sont douces, avec parfois quelques incursions d'eaux salines dans le bassin du Lyvet situé à l'amont immédiat de l'écluse du Châtelier.

2.4. Turbidité

Peu d'études ont été consacrées à la turbidité de la Rance avant la construction du barrage. Seule la thèse de Morales en 1956 (66) présente un niveau de turbidité faible le long de la rivière (entre 2 mg/l et 20 mg/l). Après la construction de l'usine, on mesure une forte turbidité près de l'écluse de Châtelier de 100 mg/l qui s'atténue en aval jusqu'à des valeurs inférieures à 10 mg/l à Mordreuc. Les eaux de l'estuaire sont peu turbides à l'exception d'une zone située en amont de Port-Saint-Jean. C'est le bouchon vaseux. A l'extrémité amont de l'intrusion saline se situe la zone de convergence des courants résiduels, c'est-à-dire la zone où s'annule le courant de fond et le courant fluvial. Dans cette zone se concentrent les matières en suspension. La position moyenne dans l'estuaire du bouchon vaseux suit la fluctuation saisonnière amont-aval de l'intrusion saline et dépend du débit fluvial. Dans la partie amont du bassin maritime, les teneurs en matière en suspensions à proximité de l'écluse du Châtelier étaient comprises entre 100 et 300 mg/l en 1991, en période d'étiage où le bouchon vaseux était repoussé à l'extrême amont de la partie estuarienne.

2.5. Les surfaces exondées

Les surfaces exondées ont peu varié dans la partie amont de l'estuaire entre l'écluse de Châtelier et Port-Saint-Jean mais elles ont beaucoup diminué entre Port-Saint-Jean et le bras de Châteauneuf où les fonds sont en majorité en dessous de 5m CM. Les modifications apportées au temps d'immersion peuvent se résumer par l'évaluation du temps où le niveau d'eau atteint une valeur donnée.

2.6. Sédimentologie

Avant l'usine marémotrice, la seule carte représentant la répartition des sédiments de la Rance est celle réalisée en 1960, **figure I-21**. Cette carte montre une sédimentologie vaseuse dans les anses de la Rance. Les chenaux étaient recouverts de sable sur leurs bords et de sable plus ou moins grossiers dans la partie centrale. La construction du barrage a causé une nouvelle répartition des sédiments via les processus de sédimentation. On distingue deux gradients granulométriques longitudinaux et transversaux. Généralement, les dépôts grossiers se font plus dans les chenaux où les courants d'eau sont les plus importants (nécessitent une grande énergie de transport). En revanche, les sédiments fins se sont déposés dans les anses où les courants sont plus calmes. Les dépôts grossiers se font en

aval de l'estuaire près de l'usine marémotrice. Dans la partie amont située entre l'écluse du Châtelier et port Saint-Jean se déposent les vases les plus fines.

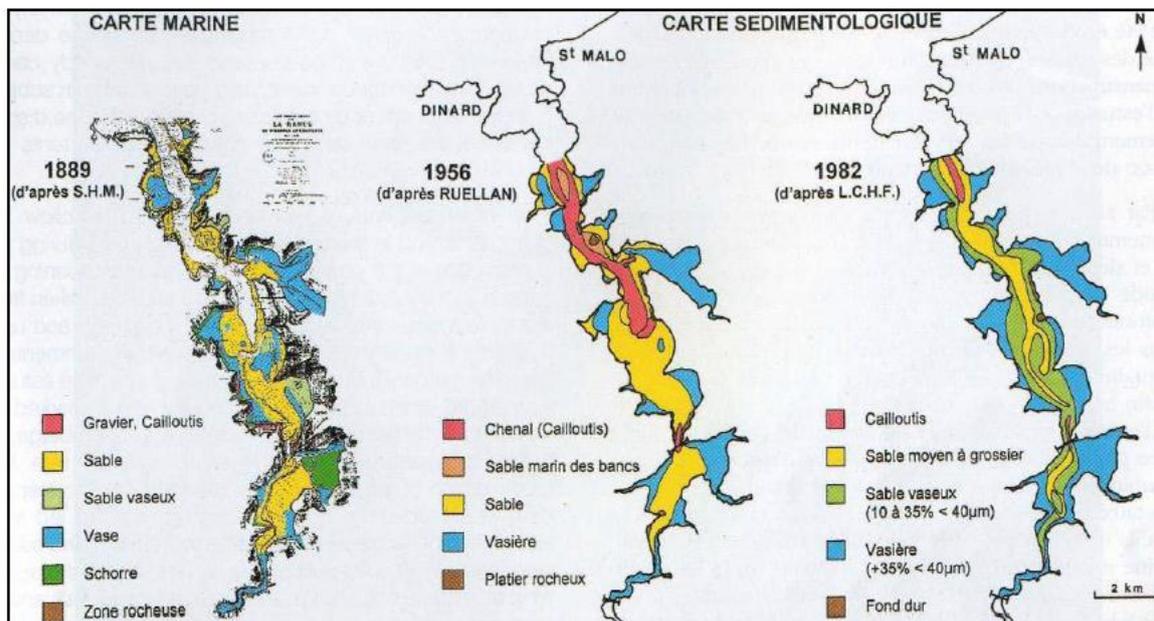


Figure I-21: Evolution de la sédimentologie dans la Rance avant et après la construction de l'usine (72).

Une étude détaillée réalisée par Courtois en 1994 décompose La Rance en trois zones sédimentaires (70):

- **A l'aval de l'estuaire :**

A l'aval de l'estuaire, l'eau est à salinité élevée. On trouve une succession de faciès :

Une bande sableuse dont le grain moyen augmente vers la basse plage et qui forme des cailloutis soulignant la limite avec la sédimentation des fines, une zone vaseuse dont la fraction très fine (< 40 μm) descend jusqu'à la cote +7m CM. Enfin, des sédiments sablo-vaseux qui s'étendent entre la cote +7 m CM et le chenal. D'autre part, l'anse des rivières est toujours le siège d'une sédimentation de fines, sablo-vaseuses qui couvre plus de 90% de la zone intertidale car elle est très bien protégée des courants de marée et de l'action des houles.

Une carotte réalisée dans l'anse des rivières à un niveau d'environ +9m CM montre la présence de sables grossiers et fins et de lits vaseux (70). Dans la partie la plus basse de la carotte, une vase grise homogène se distingue, surmontée à partir de 35 cm par un sable assez grossier qui s'étend sur une épaisseur d'environ 10 cm. Une vase noire, fine et homogène occupe les dix derniers centimètres de la carotte. La méthode du ^{210}Pb suggèrent une sédimentation non uniforme, des taux de sédimentation ne pouvant être estimés qu'à l'intérieur des différentes couches sableuses ou vaseuses. En profondeur de l'estuaire, les vitesses de sédimentation seraient de l'ordre de 0,16 cm/an alors qu'en surface jusqu'à 20 cm, elles seraient de 0,3 cm/an. Ces discontinuités peuvent être liées aux changements dans la granulométrie des matériaux. La partie inférieure de la carotte correspond à des sédimentations avant la construction de l'usine marémotrice. La partie moyenne correspond à une augmentation des conditions hydrodynamiques et aux faciès sableux vraisemblablement liés à la

réouverture de l'estuaire. Enfin, la partie supérieure est un milieu de bas estuaire de faible énergie où se déposent des sédiments fins dans une zone protégée de fond d'anse.

A l'amont de la Richardais, la sédimentation est constituée de vases très fines qui occupaient déjà l'ensemble de l'anse au début du siècle. Le carottage réalisé montre une vase noire homogène sur 60 cm de profondeur, composée de 50% de silt, 10 à 20% d'argile et 10 à 20% de sables fins. Dans les 20 premiers centimètres (au voisinage de l'interface fluide-sédiments), les deux fractions silteuses à 45 μm et très fines à 10 μm , sont en proportions équivalentes, tandis qu'en profondeur, le mode principal à 50 μm est largement dominant sur la fraction vaseuse à 10 μm . L'évolution des conditions de sédimentation se traduit par une tendance à l'affinement des vases dont la proportion augmente relativement dans les dépôts les plus récents. Les données du ^{210}Pb indiquent une sédimentation assez uniforme de l'ordre de 0,2 cm/an en profondeur et de 0,3 cm/an en surface entre 0 et 15 cm.

- Intermédiaire de l'estuaire :

Cette zone se situe à 15 km au sud de l'usine marémotrice, elle a une largeur de 200 m seulement. Etant donné la faible vitesse des courants de marée (et de la salinité) qui ne dépassent pas 0,5 m/s, cette zone constitue le lieu préférentiel de sédimentation des silts et des vases. A l'amont immédiat de Mordreuc, sur une épaisseur de 60 cm, les faciès sédimentaires sont constitués par une vase homogène composée de 60% de silt, 25% d'argile et 12% de sable fins. Les isotopes de ^{210}Pb suggèrent des taux de sédimentation variables avec une rupture à 30 cm sous la surface. Les vitesses de sédimentation sont de l'ordre de 0,5 cm/an entre 55 et 30 cm de profondeur et augmentent jusqu'à 1,8 cm/an à partir de 30 cm jusqu'à la surface. Plus au sud vers Mordreuc, le sable fin disparaît sous un sédiment fin gris dont l'épaisseur augmente vers l'amont. Depuis la mise en service de l'usine marémotrice, entre Port-Saint-Jean et Plouër une zone d'environ 1500 m de long et 200 m de large est en sédimentation sur la rive droite du chenal principal. Toujours en rive droite, une zone de dépôt de 800 m de long et 500 m de large s'étend au sud de Plouër jusqu'à Mordreuc. La sédimentation est de l'ordre de 1 m à 1,5 m et peut atteindre 2m devant la pointe du Chêne Vert en face de la cale de Mordreuc. A l'est deux zones de sédimentation, la tendance générale est à l'érosion, particulièrement en face de la plage de la Ville Ger. Cette érosion est supérieure à 1 m dans une bande de 1500 m de long et de 200 m de large, et atteint 3 m immédiatement au nord de la zone de sédimentation maximale.

- Amont de l'estuaire :

L'écluse de Châtelier marque la limite entre le bassin maritime et la Rance fluviale. La zone entre Mordreuc et l'écluse de Châtelier correspond alors à la zone de convergence des courants résiduels où se déplace le bouchon vaseux et la sédimentation est importante sous formes de dépôts vaseux.

Un carottage peu profond, réalisé à 800 m en aval de l'écluse de Châtelier (70) montre une vase noire, homogène, composée de 70% de silt et de 25% d'argile sur une profondeur allant jusqu'à 45 cm. La médiane de cette partie est comprise entre 7 μm et 10 μm . A partir de cette profondeur, on voit des sables fins et des sables plus grossiers (>250 μm) pour des profondeurs supérieures à 50 cm. Dans cette partie, les courbes granulométriques sont bimodales, avec un mode principal silteux et un mode secondaire plus fin à 10 μm . Les mesures de ^{210}Pb fournissent des taux de sédimentation variables le long de la carotte :

Entre 60 cm et 45 cm de profondeur, les vitesses sont de l'ordre de 0,5 cm/an, puis un ralentissement important de la sédimentation s'observe entre 45 cm et 35 cm. A partir de 35 cm et jusqu'à 15 cm de profondeur, les taux de sédimentation augmentent rapidement pour atteindre une valeur d'environ 2,7 cm/an. Enfin à la surface on trouve des taux de sédimentation de l'ordre de 0,9 cm/an. Les sédiments superficiels prélevés à proximité de l'écluse de Châtelier sont très fins ($< 40 \mu\text{m}$). Ils contiennent une phase ultrafine (30% $< 40 \mu\text{m}$).

Le dépôt de crème de vase, très riche en eau (200%) a connu depuis 1989 une augmentation importante qui a provoqué un envasement accéléré du chenal.

3. Envasement de La Rance

Tous les estuaires du monde sont exposés au phénomène d'envasement naturel. Le cas de l'estuaire de la Rance équipé de l'usine marémotrice et du barrage représente une particularité qui amplifie le processus d'envasement.

3.1. Mécanisme de sédimentation

3.1.1. Sédimentation naturelle

Dans l'estuaire de la Rance, on distingue la sédimentation naturelle directe liée à la faible vitesse locale de l'eau. C'est la sédimentation des matières en suspensions apportées lors de chaque cycle. Avant la construction du barrage, cette sédimentation ne concernait que le dépôt des grosses particules caractérisées par un temps de séjour dans la colonne d'eau faible. Les sédiments étaient alors de faible cohésion et plus exposés à l'érosion. Ce type de sédimentation peut être aggravé par des amplifications tel que le clapot qui est par définition une agitation de l'eau due à la rencontre de vagues ou de houles venant de sens divers et qui peut augmenter la turbidité locale en remettant en suspension les particules déjà sédimentées. La sédimentation des matières en suspension est, comme nous l'avons déjà noté, un phénomène physique dépendant de la taille des particules, de leur nature, de leur morphologie, de leur concentration locale et encore des caractéristiques physico-chimiques du liquide. Si le liquide est en mouvement, les forces transversales viennent perturber la chute libre des sédiments. Dans l'estuaire de la Rance, compte tenu de la modification des durées des étales et les mouvements d'eau artificialisés et par la suite les modifications hydrodynamiques effectuées, ce phénomène de sédimentation reste un phénomène physique mais pas naturel. Les sédiments se trouvant déplacés de l'aval vers l'amont et des anses vers les berges.

3.1.2. Sédimentation indirecte

Un autre mécanisme de sédimentation présent dans l'estuaire de la Rance est le mécanisme indirect de sédimentation. Ce mécanisme dépend des échanges entre les volumes résiduel et fonctionnel de l'eau. Il comporte plusieurs phases, **figure I-22 (71)**.

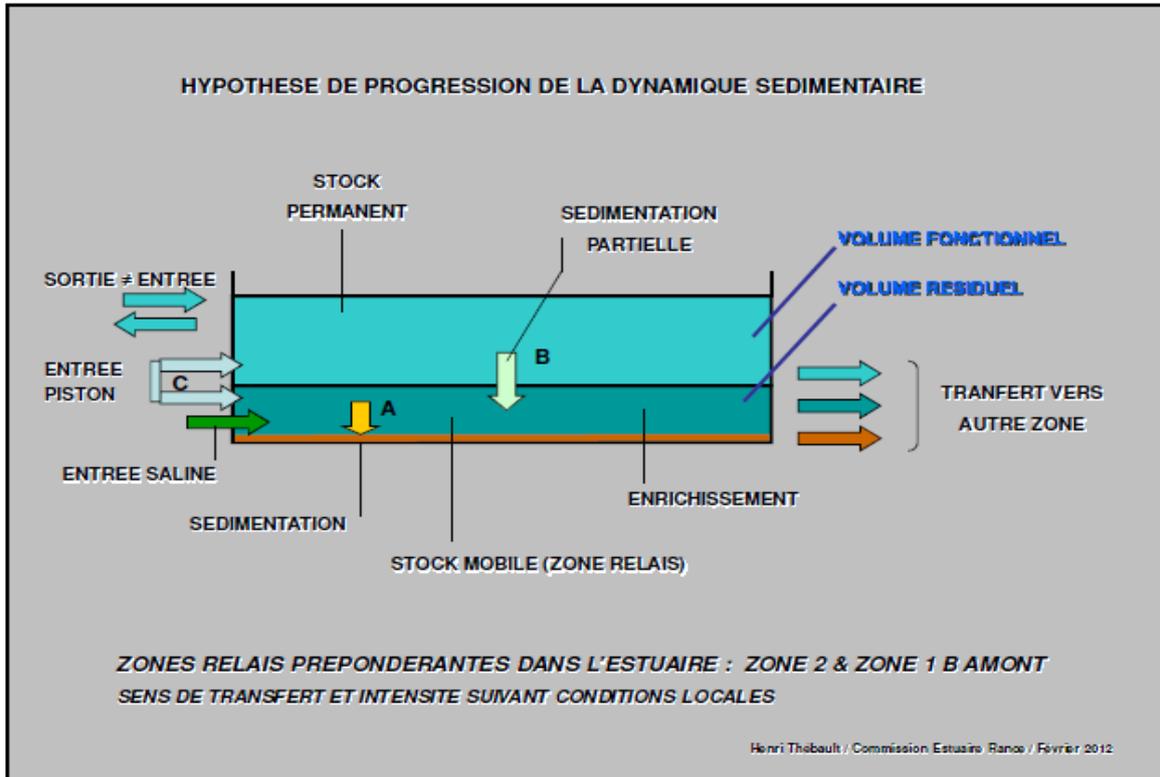


Figure I-22: mécanisme de sédimentation (73).

- La sédimentation A qui s'effectue du volume résiduel vers le fond durant le jusant et qui constitue un gradient de concentration.
- La sédimentation B depuis le volume fonctionnel vers le volume résiduel durant le flot et qui dépend des vitesses respectives entre les masses d'eau et de la forme et l'importance de la turbulence.
- L'effet de piston C, général ou différencié, qui alimente la masse résiduelle.

Lors du jusant, le volume résiduel reçoit des matières en suspension provenant de l'amont. Il peut de même transférer des matières en suspension vers les zones aval.

Lors du flot, c'est le transfert du volume fonctionnel au volume résiduel qui est le plus important. La sédimentation s'accélère donc dans les zones amont en fonction de l'apport amplifié en matières en suspension.

Donc, c'est le volume résiduel qui constitue un stock mobile à concentration élevée se déplaçant d'une zone à une autre qui favorise le transfert vers les zones amont et qui permet la modification du fond vaseux. La présence de ce volume résiduel constitue une particularité liée à la fonction artificialisée de l'estuaire surtout le niveau bas imposé par l'usine.

3.1.3. Erosion et dépôt

Les mécanismes d'érosion et de dépôt des sédiments sont à la fois fonction de la rigidité des sédiments, de leurs diamètres et de la vitesse des courants.

Lors des chasses d'eau dans le Lyvet, on peut observer des mécanismes d'érosion (vitesse de 1 à 1,5 m/s) suivis d'un transport avec redépôt à l'arrivée dans la zone entre port Saint-Jean et Mordreuc avec des vitesses chutant immédiatement à moins de 0,3 m/s.

3.2. Causes de l'envasement

Outre la cause d'amplification provoquée par l'usine marémotrice, les particules résultantes de l'érosion d'origines naturelles ou humaines par la pluie, le vent et le ruissellement de l'eau sont des processus normaux conduisant à l'accumulation de sédiments dans les cours d'eau. En situation d'équilibre, les apports qui surviennent au cours d'un cycle annuel normal ne modifient pas l'écosystème aquatique de façon significative. Ces particules apportées à l'estuaire sont la cause directe de l'envasement. Or l'apport de ces particules est amplifié par plusieurs facteurs.

Comme déjà mentionné, la construction de l'usine marémotrice a créé une situation particulière perturbant le régime naturel de l'estuaire. Il a nécessité la création d'une zone sèche durant 2 ans en transformant la rivière en un vaste plan d'eau dépourvu de tout mouvement.

Pour assurer la production de 600 000 000 Kwh/an qui est celle de l'usine marée-motrice, il faut une différence de niveau entre l'eau des deux côtés du barrage. L'eau se trouve immobilisée pendant des durées d'étales très longs : jusqu'à huit heures pour les étales de niveau haut, 3,5 à 4 heures pour le niveau bas. Les durées d'étales artificielles perturbent le fonctionnement de l'estuaire car la masse d'eau de mer est immobilisée au moins le tiers du temps, ce qui favorise la sédimentation des particules fines (vases). Les vasières se sont donc multipliées dans l'estuaire de la Rance, et particulièrement dans la queue du bassin et les zones latérales où les courants sont faibles. Ce processus est aggravé par le fait que dans l'axe du chenal, les courants très forts évacuent les particules et les envoient sur les bords. Or ces zones sont découvertes à marée basse et peu soumises aux courants : le remplacement du sable par la vase est visible et difficilement réversible car les vasières sont à peine dérangées par les courants. De fait, là où il y avait du sable, on trouve désormais à niveau bas de la vase. L'accumulation peut représenter jusqu'à 2 ou 3 mètres d'épaisseur. Chaque marée représente des entrées en Rance de 900 tonnes de vases. 95 % sont d'origine maritime en fond d'estuaire. La construction de l'usine marémotrice a provoqué l'augmentation du niveau des eaux dans le bassin et la diminution des courants qui répartissent ordinairement la vase. La présence de l'usine induit également l'augmentation du niveau bas et l'augmentation des surfaces constamment immergées. La diminution du marnage induit la diminution de l'efficacité du jusant ce qui limite l'érosion dans l'estuaire et favorise la sédimentation. Par contre, la diminution du marnage cause la diminution du volume d'eau entrant et alors la diminution du volume sédimentaire. Plusieurs avis ont été rédigés à propos de l'influence de l'usine sur l'envasement dans l'estuaire. Selon Lorin (69) l'usine a causé la redistribution des placages sédimentaires vers l'amont et pas un apport de sédiments. Selon Jigorel et Pitois (72), l'usine facilite la décantation et le dépôt de sédiment très fins à des endroits qui étaient sableux avant. Enfin, Courtois (70) indique que l'accumulation des vases est normale dans tous les estuaires mais la construction de l'usine marémotrice a contribué à l'accélération du dépôt.

Finalement, la construction de l'usine a modifié les conditions hydrosédimentaires de l'estuaire. Elle a notablement amplifié les dépôts de sédiments déjà existants dans les anses et en a créé de nouvelles.

Avec la progression des dépôts, il est observé un affinement des tailles des sédiments, du sable vers les vases, d'aval vers l'amont et du chenal vers les berges.

3.3. Conséquence de l'envasement

La conséquence principale au comblement de l'estuaire de la Rance est la perturbation de la navigation. En effet, la vase est répandue dans tout l'estuaire surtout à l'aval de l'écluse du Châtelier ce qui induit la réduction des mouvements d'eau et gêne la navigation dans l'estuaire. Cet envasement cause aussi la perte de 1% de la capacité du barrage par an, ainsi que des inondations, l'effondrement des berges et la divagation des cours d'eau. L'envasement a un effet direct sur la faune et la flore dans la rivière, la pêche, la baignade et sur la beauté des paysages. Enfin, le comblement nuit à la qualité de vie des habitats. Les zones grises se répandent dépourvues ou presque de végétation.

3.3.1. Piège du Lyvet

En raison de sa progression constante, l'envasement de l'estuaire est perçu comme une atteinte indésirable à la qualité environnementale du site. Il existe donc une attente forte de la part de la population et des élus des communes environnantes pour que le niveau d'envasement soit réduit et maîtrisé. Cette préoccupation s'inscrit également dans les projets structurels de la région Bretagne. Des solutions de lutte contre l'envasement existent mais sont souvent traumatisantes pour le milieu et l'environnement. Dans le cas de l'estuaire de la Rance, une solution alternative a été mise en œuvre par le biais d'un piège à sédiments dont on se propose de distinguer quelques aspects.

La **figure I-23** montre différentes estimations des évolutions linéaires de la sédimentation dans l'estuaire depuis la construction de l'usine. Les droites sont prolongées jusqu'à 2041 avec l'estimation de la sédimentation cumulée (en million de m³).

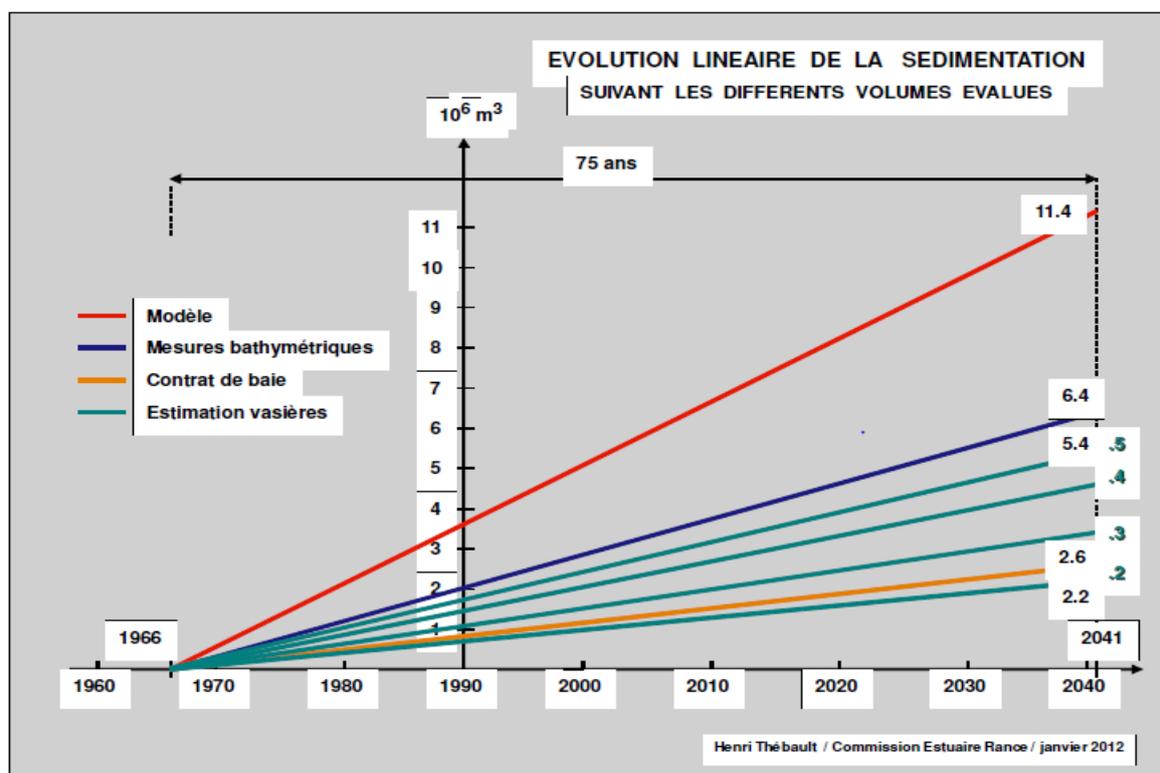


Figure I-23: Evolution linéaire de la sédimentation dans l'estuaire de la Rance (73).

Ces estimations étant nécessaires pour la prédiction des volumes de sédiments qu'il faut prélever pour construire le piège de sédiments. Pourtant ces valeurs présentent un niveau d'incertitude élevé. Ils sont bien loin de la réalité (mesures bathymétriques). A partir de 1991, et de façon récurrente, des opérations de dragages sont réalisées pour maintenir la navigation dans le bassin maritime et pour entretenir le chenal fluvial. Puis on a entretenu le chenal par des chasses hydrauliques à l'écluse de Châtelier. Mais ces méthodes se sont révélées peu efficaces. En effet, les sédiments sont mis en suspension lors de ces chasses et à cause du flot de chaque cycle de marée se déposent sur les vasières en aval du Lyvet jusque dans la plaine de la ville Ger. En plus, le dragage cause la destruction de la faune dans la rivière.



Figure I-24: piège Lyvet- mars 2014.

En 1996, l'association Cœur a créé le piège à sédiments du Lyvet, **figure I-24**. Ce projet a 2 objectifs : curatifs et préventifs. Il consiste à attirer la première lame de courant très chargée en sédiments dans le bassin de décantation où s'effectue la sédimentation pendant l'étape de marée de 2 à 3 heures. Le piège est situé en rive droite, à l'aval immédiat de l'écluse de Châtelier (limite entre la Rance fluviale et l'estuaire), dans la zone estuarienne à salinité faible du bassin maritime. Cette fosse crée une différence de gradient granulométrique et par conséquent un apport de sédiments très important.

3.3.1.1. Choix du Lyvet

L'accélération globale du comblement de l'estuaire qui évolue vers un marais salé dans la partie amont du Lyvet a nécessité de faire des choix rapides et concrets. L'association Cœur a alors choisi le Lyvet pour construire le piège à sédiments. La fosse est construite avant le chenal de navigation pour permettre aux sédiments de se structurer avant le chenal et par la suite résoudre le problème de perturbation de navigation. La présence de « l'îlot de Tangué » dans le bassin de décantation, établi sur un seuil rocheux face à l'entrée de la fosse et d'une digue naturelle en rive droite du bassin protège les sédiments déjà déposés de la remise en suspension. Pour établir l'implantation de la fosse et sa forme définitive, il fallait connaître les épaisseurs des sédiments et la topographie du platier rocheux. Les épaisseurs des sédiments varient entre 1,7m et 3,5m en fonction des irrégularités du substratum rocheux et avec la topographie de surface. En outre, la forte dissymétrie flot/jusant favorise une certaine remontée des sédiments vers l'amont. Il convient d'isoler le piège du chenal de navigation pour éviter que les courants de flots remettent en suspension les sédiments déjà déposés. La modification hydrodynamique créée par la fosse permet le piégeage des sédiments apportés par le

flot. La sédimentation dans la fosse est favorisée par la diminution de la vitesse de courants. Au début du service du piège, le gradient granulométrique est maximal favorisant ainsi la sédimentation qui se fait selon la granulométrie des sédiments. Par exemple, la sédimentation du sable se fait avant les autres matériaux les plus fins. Ce gradient décroît avec le temps, ce qui réduit l'effet de la fosse.

3.3.1.2. Réalisation et développement du projet

Ce piège est créé par extraction de 10^4 m^3 de matières cohésives par pelle mécanique et transport par camions au lieu-dit Lyvet sur la commune de la Vicomité- sur- Rance. L'association Cœur (Comité des Elus et Usagers de la Rance) avait initié dès 1995 un programme d'études et d'expérimentations visant à extraire et à valoriser les sédiments de la Rance. Les premières expérimentations notables d'extraction et de valorisation ont été effectuées entre les mois d'avril et mai de l'année 1996 dans le cadre de la première phase (1996 – 1998) du Contrat de Baie de la Rance, sous la maîtrise d'ouvrage d'EDF et la maîtrise d'œuvre d'EDF-CIH. Le programme a ensuite été développé pendant la seconde phase du Contrat de Baie (1998-2003). Deux chantiers d'extraction ont été réalisés en 2000-2001 : l'un dans la Rance fluviale (plaine de Taden) et l'autre dans le bassin maritime, à l'aval immédiat de l'écluse du Châtelier.

Ensuite, en 2004 une opération d'hydro suçage est réalisée à Mordreuc. Le piège est resté comblé après jusqu'à 2014 tout en effectuant des études et des synthèses afin de trouver la solution et le volume idéal à extraire pour résoudre le problème d'envasement de l'estuaire de la Rance.

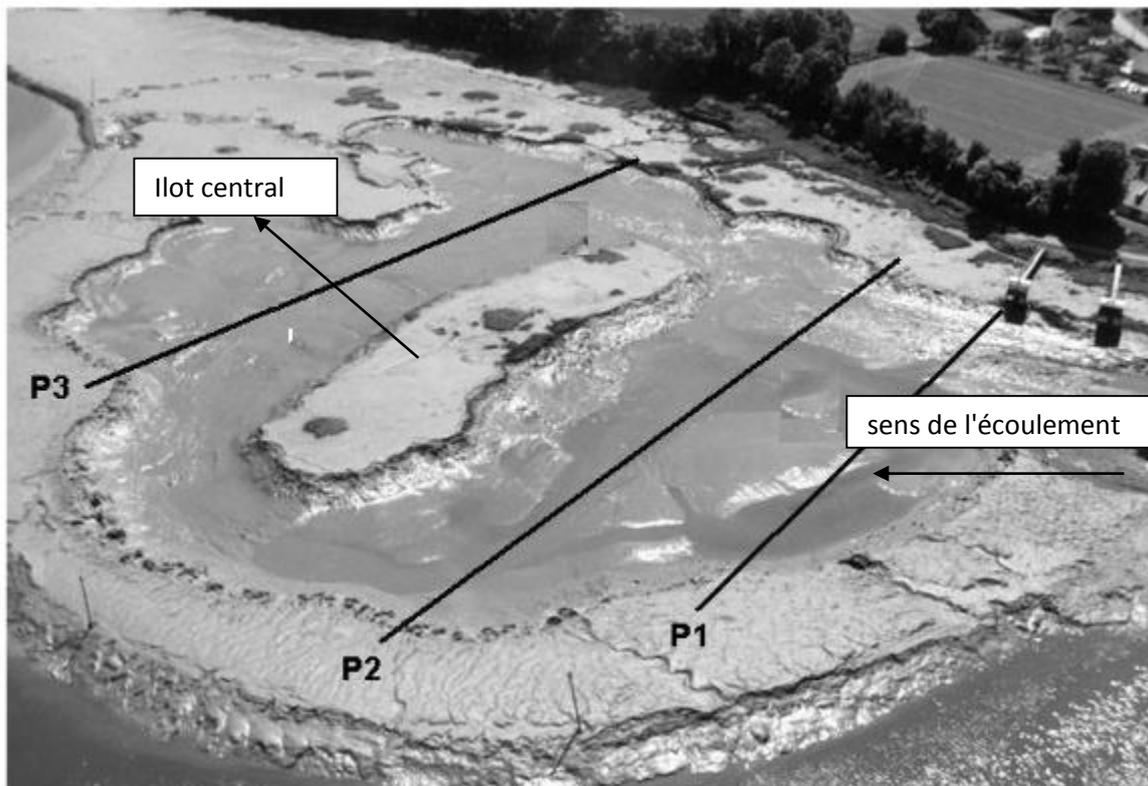


Figure I-25 : Vue aérienne du piège. Situation des profils bathymétriques.

3.3.1.3. Lyvet 1 et opération Mordreuc

Le premier curage du piège de Lyvet s'est fait entre octobre 2000 et mars 2001. L'association Cœur, chargée du contrôle des actions correctives dans le contrat de Baie de la Rance, a extrait 93000 m³ par hydro-suction visant à agrandir le piège initial pour qu'il devienne plus profond et afin de garder plus de sédiments. Ensuite, plusieurs études ont été déclenchées pour valoriser l'efficacité du piège de Lyvet après 2 mois, 5 mois, 6 mois, 15 mois, 20 mois, 25 mois et 37 mois de fonctionnement (73). On mesure l'épaisseur de vases selon 3 profils transversaux implantés dans le piège (P₁, P₂ et P₃) en employant ensemble une sonde de profondeur et une perche graduée avec embout adapté. Le suivi de sédimentation a montré que cette dernière est optimale dans les profils P₂ et P₃ pendant le premier semestre de fonctionnement. Par contre, la sédimentation est moindre dans le profil P₁ situé à l'entrée du piège. En effet, les courants de jusant ne sont pas efficaces à la décantation à l'entrée du piège, ils mettent en suspension une partie des sédiments pendant les phases de vidange de la fosse. Pendant le deuxième semestre, la sédimentation reste efficace dans les profils P₂ et P₃ mais elle devient maximale à l'entrée du piège (Profil P₁), **figure I-25**. Cela peut être dû à la baisse du niveau d'eau causée par l'abaissement de l'amplitude des marées qui jouait un rôle dans l'érosion des sédiments se trouvant à l'entrée du piège. Le piège a continué à se combler après la première année de fonctionnement et les épaisseurs des sédiments au niveau des trois profils ont légèrement augmenté.

Après 25 mois de fonctionnement une légère diminution d'épaisseur de sédiments est observée, **figure I-26**. Ceci montre la présence d'une faible érosion et le début de la compaction des sédiments ce qui entraîne une diminution de volume de dépôt observé entre décembre 2002 et mai 2003. Entre mai 2003 et mai 2004, la sédimentation est de nouveau améliorée par la création d'un îlot central qui a comme rôle la protection des dépôts de l'érosion pendant le jusant et de favoriser la sédimentation pendant le flot. Pendant les 12 derniers mois, l'érosion de sédimentation continue à augmenter, ainsi que le diamètre du grain moyen. Cela montre l'efficacité de l'énergie de transport due aux marées de fort coefficient. La sédimentation dans le piège du Lyvet est en relation avec l'hydrodynamique et l'hydro-sédimentation de l'estuaire. En 2003, il était prévu d'extraire un volume de 180 000 m³ de sédiments à Mordreuc. Mais, après le refus du stockage de ces sédiments dans la zone de la Rance protégée et comme aucun terrain n'a été trouvé en dehors de cette zone, les négociations avec la Diren (direction régionale de l'environnement) a fini par extraire 30 000 m³ de sédiments et de déplacer 60 000 m³ de sable.

En 2006, le piège du Lyvet s'est trouvé comblé. Son rôle de favoriser la sédimentation s'est réduit. Les sédiments recommencent de nouveau à s'accumuler dans le chenal de navigation. En plus, les marées au jusant provoquaient l'érosion partielle des dépôts. Cette érosion est assez claire, elle est montrée par la présence des chenaux dans le piège de décantation.

En conclusion, la première année de la construction du piège était la plus efficace (épaisseur 1,4 m et un volume de 37 000 m³). Pendant cette année, la morphologie du piège était très favorable à la décantation. Le remplissage de la fosse se poursuit ensuite et le volume de sédiments déposé est de l'ordre de 49 000 m³ (épaisseur moyenne de 1,8 m) après 20 mois de fonctionnement. Avec le temps, la fosse se remplit progressivement et son niveau topographique devient alors plus élevé que celui du chenal, ce qui rend la fosse défavorable à la décantation des sédiments. Donc, l'efficacité du piège est assurée pendant 3 ans du curage. Après 3 ans, la fosse n'est plus efficace et les sédiments se déposent dans le chenal comme c'était le cas avant la construction du piège.

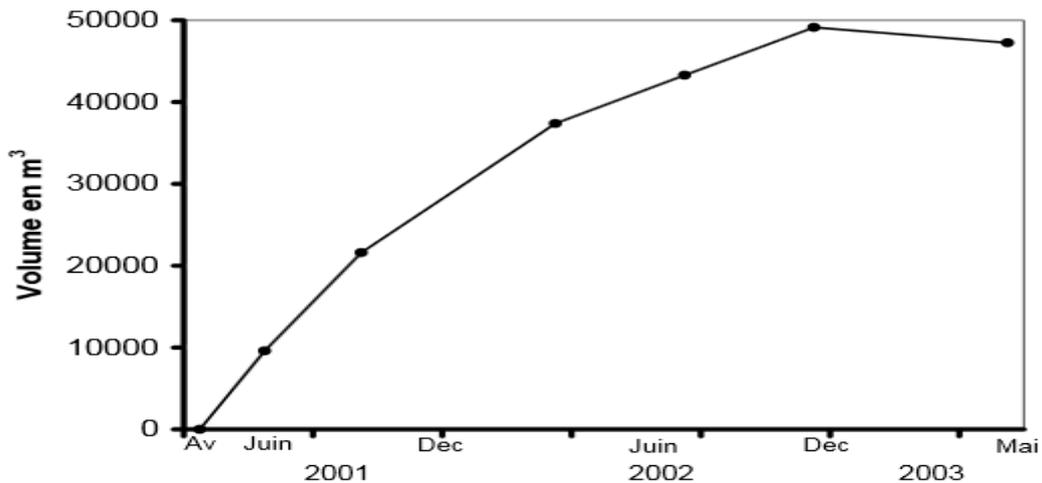


Figure I-26 : Evolution des volumes de sédiments accumulés dans le piège de Lyvet. Période avril 2001 – juin 2003 (76).

3.3.1.4. Granulométrie et caractéristiques des sédiments dans le piège

Pendant la première phase de remplissage, on remarque un gradient granulométrique amont-aval lié à la vitesse relative des courants. Ce gradient est maximal pendant les fortes marées. Ce sont surtout les matériaux les plus sableux qui sédimentent durant cette phase. Les caractéristiques granulométriques des sédiments dépendaient surtout de l'énergie de la marée. Après le remplissage de la fosse, on n'observe plus un gradient granulométrique : les sédiments n'entrent plus de façon privilégiée par l'entrée du piège. Le grain moyen est de l'ordre de 10 μm dans tout le piège. Une étude de la granulométrie des sédiments est réalisée en 2011 sur 4 sites du Lyvet P₁, P₂, P₃ et P₄, **figure I-27**.



Figure I-27: Présentation des 4 profils dans le piège du Lyvet (75).

Les mesures montrent l'homogénéité de la granulométrie des sites P₁, P₂ et P₄. Or les sédiments du site P₃ situés à proximité de l'îlot de tange présentent une morphologie différente des autres sites. En effet, « le remplissage et la vidange du piège se fait selon un mouvement circulaire autour de l'îlot ». Les sédiments des sites P₁, P₂ et P₄ présentent une texture fine (60% limons, 20% argiles) associée à une fraction sableuse fine (20%). Les grains moyens de ce site est voisines de 9 μm . La granulométrie du site P₃ est plus grossière, la fraction sableuse est dominante (50% à 70%) associée

à une fraction limoneuse (25% à 40%) et une fraction argileuse inférieures à 10%. Le grain moyen de ce site varie entre 22 et 34 μm . La sédimentation dans le site P₃ est la moins importante. La teneur moyenne en carbonate des vases est importante et voisine de 27%. La densité et la teneur en eau varient avec la profondeur. En surface, les vases sont molles avec une densité comprise entre 0,4 et 0,5 et une teneur en eau qui varie entre 150% et 200%. A 50 cm de la surface dans le piège, les vases deviennent plus compactes avec une densité supérieure à 0,7. Au-delà de 50 cm, la densité sèche des vases devient de l'ordre de 1,07 avec une teneur en eau de 60%. Enfin, l'épaisseur et la granulométrie des sédiments varient selon l'hydrodynamisme et la morphologie du piège de Lyvet.

3.3.1.5. Piège de Lyvet Aujourd'hui

Aujourd'hui, on ne parle plus de « désenvasement » de l'estuaire mais plutôt de « gestion des sédiments ». En fait, les études ont montré la pertinence de ces sédiments surtout dans le domaine agricole, en technique routière et aussi comme barrières étanches des centres de stockage de déchets. Compte tenu de ces résultats, l'association Cœur a repris au cours de l'hiver 2014/2015 l'exploitation du piégeage de Lyvet mais cette fois avec implantation d'un centre pérenne de traitement par lagunage situé sur la commune de Saint-Samson sur Rance, **figure I-28**.

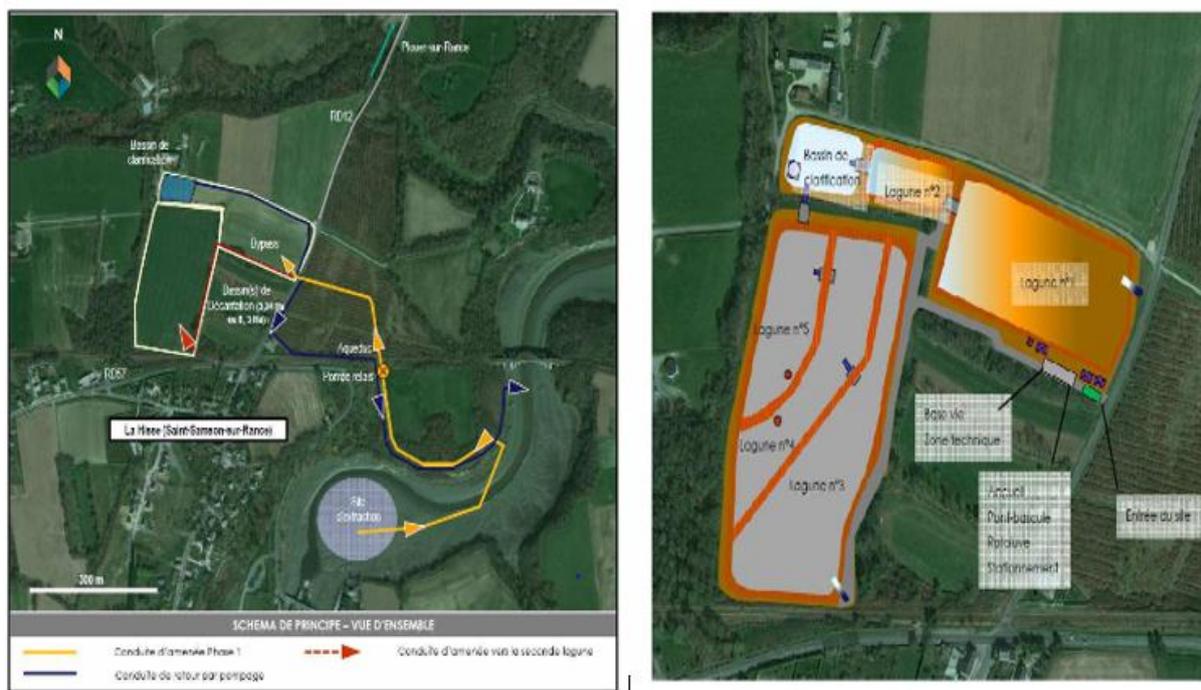


Figure I-28: centre de traitement par lagunage (77).

Les sédiments seront extraits au moyen d'un dragage hydraulique aspirateur. Cette technique a montré son efficacité et qu'elle limite au maximum l'impact sur le milieu naturel.

Le mélange vases + eaux sera alors acheminé depuis la drague aspiratrice sur le site de Lyvet vers 5 lagunes destinés à les recevoir. Une fois cette phase appelée phase de remplissage, terminée on commence la phase d'égouttage. Les eaux se séparent des sédiments et se dirigent vers le bassin de clarification où elles seront stockées ou traitées selon leurs natures (eaux de ruissellement, eaux pluviales...). Les sédiments resteront sur la plateforme de transit du Petit Châtelier pendant un délai maximum de 3 ans, pour être valorisés en restructuration des sols agricoles (utilisés comme

amendements). La capacité de traitement/ stockage étant de 100 000 m³ pour une périodicité de cycle de curage/ traitement de 3 ans, on trouve donc un volume annuel moyen de 33 000 m³.

L'association Cœur a prévu alors une opération sur 3 phases :

- phase 1 qui dure 3 mois (15 novembre 2014 jusqu'à 15 février 2015) durant cette phase on extrait 63 000 m³ de sédiments par aspiro-dragage qui sont ensuite transférés dans 4 volumes d'eau dans les lagunes de décantation situées au Petit Châtelier à Saint-Samson.
- phase 2 d'une durée de 2 ans et demie. Cette phase consiste à ressuyer les sédiments dans les lagunes
- phase 3 d'une durée de 3 mois (de septembre jusqu'à novembre 2017) comporte la vidange des lagunes et l'évacuation des sédiments pour épandage sur terres agricoles.

L'étude la plus récente de la situation sédimentaire de l'estuaire de la Rance est réalisée suite à une mission lancée par la ministre de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer dans le but de "procéder à une évaluation de la pertinence des actions proposées par Cœur Émeraude au regard des données accumulées, et expertiser les usages possibles des sédiments" (65). La mission a élaboré plusieurs rassemblements aboutissant à la fin à la proposition d'un calendrier et d'une méthode de travail adaptés à la mise en place d'un plan de gestion pérenne de l'estuaire de la Rance.

Le plan est divisé en deux périodes de travail (court et long terme) :

-Une période à court (2017-2018) et moyen terme d'une durée de 5 ans (2018-2023). La période de court terme consiste à réaliser l'opération de vidage du piège à vase du Lyvet (Lyvet 3) qui a pour but d'améliorer la gestion des sédiments et la situation de navigation dans la partie amont et sur le port de Plouer. Lors de la période à moyen terme, il convient de lancer dans un programme expérimental de gestion sédimentaire fondé sur un volume annuel moyen d'extractions de 50 000 m³, accompagné par un comité scientifique permettant d'envisager un plan de gestion durable des sédiments sur le plus long terme pour un objectif clairement établi.

-Une période à plus long terme qui commence en 2024 qui développe une ou plusieurs filières de valorisation des sédiments.

Outre la dynamique sédimentaire au sein de l'estuaire, s'ajoute à présent celle au sein du piège dont l'action doit pouvoir être mesurée. Ainsi, dans une logique d'amélioration de la gestion sédimentaire, une meilleure connaissance de certains des processus de fixation est à acquérir car ils conditionnent d'une certaine manière la remise en suspension et le transport en fonction de l'énergie de mobilisation moyenne disponible. Notre démarche s'inscrit dans le contexte de la compréhension du comportement des suspensions en phase de dépôts et d'établir une cinétique de « fixation » représentative des matériaux en place. L'originalité du travail tient aux indicateurs rhéologiques et mécaniques utilisés dont il convient d'en justifier certains aspects.

Partie IV : Rhéologie des sédiments

1. Introduction

Soit un milieu homogène, déformable, électriquement neutre, non réactif au sens chimique, assimilable à un milieu continu, placé dans un repère galiléen orthonormé direct et sollicité mécaniquement (en négligeant les contributions thermiques) répond à la sollicitation en respectant simultanément (au moins, sans tenir compte des équations d'état du milieu considéré) :

Le bilan de masse :

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dv = 0 \text{ (Equation I-18)}$$

Le bilan de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{V} dv = \int_V \rho \vec{g} dv + \int_S \vec{T} \vec{n} dS \text{ (Equation I-19)}$$

Au sens global, la considération de l'équilibre local pourrait être formulé mais n'apporte rien dans ce contexte introductif. Dans ces équations de bilan, V représente le volume du milieu considéré, S la surface de ce milieu. La quantité de mouvement est équilibrée par les actions volumiques et les forces de surfaces. \vec{T} est le tenseur des contraintes, symétrique d'ordre 2 que l'on décompose comme suit :

$$\vec{T} \equiv p \vec{\delta} + \vec{\sigma} \text{ (Equation I-20)}$$

Le premier terme représente la partie sphérique du tenseur des contraintes et les effets de pression et $\vec{\delta}$ est le tenseur unité. Le second terme représente la partie déviatorique (tenseur symétrique) du tenseur des contraintes et les effets de contraction/dilatation et les dissipations par frottement.

A l'état solide, les champs de contraintes résultent des déformations imposées au milieu, tenseur symétrique d'ordre 2 qui peut être décomposé en une partie traduisant les déformations en rotation et une partie traduisant les déformations en cisaillement. A l'état fluide, qui subit de très grandes déformations, on remplace avantageusement le tenseur des déformations par le tenseur des taux de déformations. Dans ce contexte simplifié mais 3D, les principes rhéologiques s'attachent à décrire et interpréter le comportement mécanique du milieu afin que sa réponse à une sollicitation mécanique intègre les spécificités de la matière considérée (solide, semi-solide, ou fluide dissipatif) :

$$\vec{\sigma} = f \left(\frac{1}{2} \left\{ \overline{\text{grad}(\vec{V})} + \left(\overline{\text{grad}(\vec{V})} \right)^t \right\} \right) \text{ (Equation I-21)}$$

Soit encore :

$$\vec{\sigma} = f(\dot{\gamma}) \text{ (Equation I-22)}$$

Pour faciliter les interprétations des lois de comportement des fluides, on tente de ramener les problématiques d'ensemble à des problèmes simplifiés dits de sollicitation simple 1D. Pour les configurations de cisaillement et de cisaillement simple dans le milieu fluide par exemple, on distingue l'écoulement de Poiseuille, l'écoulement de Couette, le plan incliné, ...

Dans la suite de cette partie, nous nous attachons à présenter quelques comportements rhéologiques clefs et dans le cas des suspensions, nous essayons de faire émerger quelques mécanismes représentatifs de structuration.

2. Suspensions : définition et quelques restrictions

Pour les besoins de l'étude, il convient de restreindre le champ d'investigation pour associer aux suspensions représentatives d'estuaires un comportement rhéologique correct. On appelle suspension dans le cas présent un fluide potentiellement triphasique composé d'une phase liquide (l'eau, le fluide porteur), d'une phase solide (la phase portée) et éventuellement d'une phase gazeuse (compte tenu du caractère réactif des phases en présence). Le mélange forme un fluide moyen équivalent cohérent, à la limite assimilable à un milieu continu, plus ou moins stable au sens de la séparation des phases. Selon la représentativité de la phase portée au sein du fluide porteur, on distingue des transformations du comportement rhéologique. La phase gazeuse complique l'interprétation du comportement par amplification des effets de compressibilité.

L'exemple d'un béton frais en phase dite dormante est une illustration intéressante (74). Un mélange granulats + eau ou sables + eau ne représente pas des suspensions au sens commun du terme. La taille, la forme et la masse volumique des solides ne permet pas d'observer un temps de séjour dans la colonne d'eau représentatif d'un ensemble stable. En revanche, le mélange poudre de ciment, milieu pulvérulent, de taille caractéristique voisine de 80 μm et d'eau peut conduire à la formation d'un fluide moyen équivalent homogène et stable pour un intervalle à définir de la fraction volumique solide, ϕ , (Equation I-23).

$$\phi = \frac{V_s}{(V_e + V_s)} \text{ (Equation I-23)}$$

Avec V_s , le volume solide et V_e , le volume d'eau.

En fonction de la valeur de ϕ , on distingue différentes textures rhéologiques, **figure I-29**

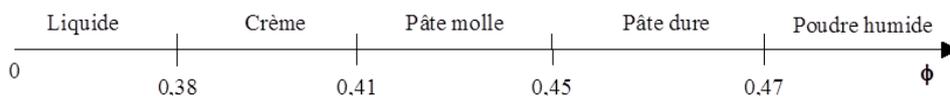


Figure I-29 : Représentation schématique des textures de fluide sur une échelle d'évolution de la fraction volumique solide, ϕ .

L'ensemencement des sables et des agrégats dans ce nouveau milieu porteur permet d'obtenir un nouveau fluide moyen stable formant une suspension. Bien évidemment, il convient que le mélange ciment + eau présente une texture adaptée (et par conséquent un comportement rhéologique adapté) capable de maintenir en sustentation les inclusions. On définit alors un système liant-inclusions.

Lorsque le liant est dominant, le comportement résultant de l'ensemble est dominé par le comportement du liant et les inclusions affectent les propriétés rhéologiques.

L'augmentation progressive des inclusions dans le liant réduit les distances inter granulaires. Le comportement du liant reste dominant tant qu'il assure une fonction lubrifiante entre les grains, mais dans le cas d'une granulométrie solide bimodale ou de spectre étendu, l'imbrication des grains gêne le cisaillement et transforme le comportement rhéologique. Le blocage de l'ensemble est atteint pour la fraction volumique solide d'empilement maximum, ϕ_m .

Dans notre étude, nous tentons d'adopter un tel point de vue mais à la différence d'un béton, la « formulation » de la suspension naturelle est imposée par des facteurs extérieurs divers que nous ne maîtrisons pas forcément mais qui dictent le comportement rhéologique.

Pour ce type de mélanges naturels, on est amené à définir la distinction liant/inclusions. On distingue également une transition liquide-solide qui marque un critère de stabilité des suspensions au sens de la séparation des phases. Par la définition des mélanges au jeune âge, il convient d'établir les mécanismes de structuration rhéologique des facteurs de viscosité, de plasticité, d'élasticité, ... pour exprimer un ou des modèles de comportement.

Au jeune âge, on se place dans un cadre de référence pour caractériser les interactions granulaires et la matière liante. En présence d'un système réactif, l'âge du mélange doit permettre de faire émerger des mécanismes de structuration d'ordre chimique et/ou biologique.

3. Identification de quelques comportements rhéologiques caractéristique en cisaillement simple

Sur la **figure I-30**, on distingue les principaux comportements rhéologiques macroscopiques soumis à une sollicitation de cisaillement.

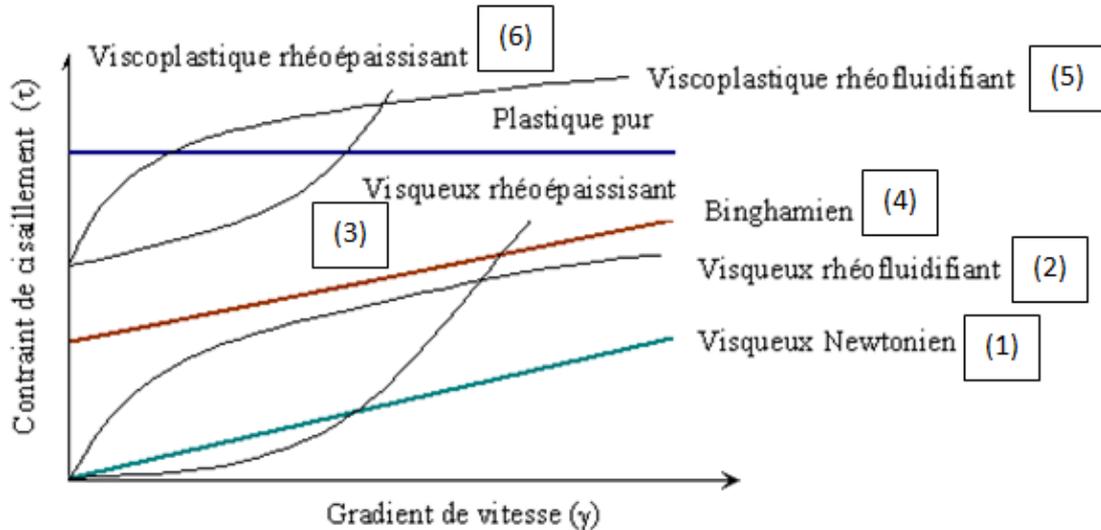


Figure I-30: présentation des rhéogrammes les plus usuels dans le plan $(\tau, \dot{\gamma})$.

La courbe (1) qui exprime la proportionnalité linéaire du taux de cisaillement ou vitesse de cisaillement (s^{-1}) avec la contrainte de cisaillement (Pa) induite correspond au fluide visqueux de Newton. La pente de cette courbe représente la viscosité intrinsèque du fluide considéré (viscosité dynamique [Pa.s]), (Equation I-24).

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \text{ (Equation I-24)}$$

Dans un même plan de représentation et pour une réponse non linéaire, courbe (2) et (3), la pente précédemment considérée est apparente et variable. On distingue alors les fluides visqueux non newtoniens. Deux cas se présentent :

La viscosité apparente augmente avec l'augmentation du taux de cisaillement, le fluide est rhéoépaississant,

La viscosité apparente diminue avec l'augmentation du taux de cisaillement, le fluide est rhéofluidifiant.

De tels comportements sont bien représentés par le modèle visqueux d'Oswald (75) via une loi puissance. Il est décrit par l'équation (Equation I-25) :

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \text{ (Equation I-25)}$$

k représente la consistance du fluide, ce paramètre n'a pas de correspondance physique et sa dimension est lié à la valeur de n qui est l'indice de fluidification (ou de structuration).

- Si $n < 1$, alors le fluide a un comportement rhéofluidifiant,
- Si $n = 1$, le fluide a un comportement newtonien,
- Si $n > 1$, le fluide a un comportement rhéoépaississant.

Macroscopiquement, on introduit un caractère visco-plastique pour décrire un comportement visqueux lorsque la contrainte de cisaillement dépasse un seuil critique et un comportement

assimilable à un solide tant que la contrainte de cisaillement reste en deçà de ce seuil de rupture plastique. On distingue sur la figure I-30 la courbe (4) qui caractérise le fluide de Bingham et les courbes (5, 6) caractérisent un fluide visco-plastique rhéofluidifiant et rhéoépaississant. A noter qu'en deçà du seuil de critique, le comportement mécanique ne peut pas être exprimé. Mathématiquement, ces comportements sont bien représentés par le modèle d'Herschel-Bulkley, (Equation I-26).

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = 0 & \text{si } \tau < \tau_0 \\ \tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n & \text{si } \tau > \tau_0 \end{cases} \quad \text{(Equation I-26)}$$

K est la consistance du fluide, τ_0 est la contrainte de cisaillement seuil et n est l'indice de fluidification. Comme le modèle d'Oswald, la valeur de n détermine le caractère structurant du fluide:

- Si $n < 1$, alors le fluide présente un comportement rhéofluidifiant.
- Si $n = 1$, le fluide se comporte comme un fluide Bingham.
- Si $n > 1$, le fluide présente un comportement rhéoépaississant.

Avec l'acceptation retenue d'une interaction liant-inclusions, le comportement des géosuspensions est expliqué par des dissipations d'énergie engendrées par le déplacement relatif des inclusions dans le fluide liant (76). La rhéologie des suspensions est une fonction complexe des propriétés physiques et des processus qui ont lieu à l'échelle des suspensions et qui se répercutent sur le caractère visqueux, plastique, élastique, ...

4. Modélisation de la viscosité

L'agglomération de la phase solide dans un mélange de phase solide-liquide conduit à l'emprisonnement d'une partie de la phase liquide entre les particules solides. Quémada a désigné cette agglomération par le terme de "structures" ou d'Unités structurales (US). Dans ses travaux sur les bétons, Charonnat a parlé aussi de notion de grain porteur et de cortège composé de fluide dans lequel des grains portés de taille inférieure aux grains porteurs γ sont en suspension. Ces notions d'US et de cortège, nous permet d'expliquer le comportement rhéofluidifiant des fluides complexes qui correspond selon Quémada à une rupture des unités structurales aboutissant à la libération de fluide saturant. Dans la même logique, le comportement rhéoépaississant est expliqué par la reformation des unités structurales qui fait augmenter la viscosité à vitesse croissante (74).

Les paramètres les plus importants qui influencent la viscosité sont la fraction volumique solide, ϕ , la forme des particules, les interactions entre les particules, leurs arrangements et la nature du champ de flux (77). Les publications sur la rhéologie des suspensions ont surtout porté sur la détermination d'une relation empirique entre la viscosité apparente et la fraction volumique solide. Rutgers (1962) et Thomas (1965) ont présenté des résumés critiques des premières recherches qui ont évoqués cette relation. Les deux ont distingué trois régimes : (1) un régime dilué $\phi \leq 0,01$ (Thomas), $\phi \leq 0,02$ (Rutgers) où la relation $\mu(\phi)$ est approximativement linéaire et le comportement rhéologique est newtonien ; (2) un régime semi-dilué $\phi \leq 0,25$ où la relation entre μ et ϕ est d'un ordre supérieur mais le comportement rhéologique reste newtonien ; (3) un régime concentré, commençant près de $\phi = 0,25$, caractérisé par une croissance rapide de la viscosité apparente et un comportement de plus en plus non newtonien avec l'augmentation de la fraction volumique solide.

Einstein (78) est le premier à décrire la relation entre la viscosité et la fraction volumique solide. Cette relation est essentiellement valable pour un régime dilué de sphères monodisperses :

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 1 + B\phi \text{ (Equation I-27)}$$

Avec B une constante connue sous le nom de "viscosité intrinsèque". Elle est liée à la forme des particules en suspension et est égale à 2,5 pour les particules sphériques. Cette valeur n'a pas été validée d'une façon sûre malgré tous les essais déjà réalisés. Les chercheurs proposent des valeurs comprises entre 1,5 et 5.

Pour les régimes semi-dilué, les coefficients associés aux ordres supérieurs à 1 en ϕ et négligés par Einstein sont calculés. La relation prend alors la forme suivante (79):

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 1 + B\phi + B_1\phi^2 + \dots \text{ (Equation I-28)}$$

avec $B = 2,5$ et $7,35 \leq B_1 \leq 14,1$.

Cette relation n'est plus valable pour des concentrations volumiques solides plus élevées puisqu'elle donne une valeur finie de la viscosité quand la fraction volumique solide tend vers 1, ce qui n'est pas acceptable physiquement. Pour remédier à cet inconvénient, on introduit dans les équations, ϕ_m , le coefficient d'empilement maximal des grains (ou packing), qui est la concentration volumique solide correspondant au volume maximum de particules que l'on peut empiler pour un volume total donné.

Dans ce domaine trois relations sont les plus utilisées (80), (81):

$$\mu = \mu_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-B\phi_m} : \text{Equation de Krieger-Dougherty (82) (Equation I-29)}$$

$$\mu = \mu_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2} : \text{Equation de Quémada (qui est une simplification du modèle de K-D) (Equation I-30)}$$

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{B\phi}{1 - \frac{\phi}{\phi_m}}\right) : \text{Equation de Mooney (Equation I-31)}$$

B est la viscosité intrinsèque, elle est égale à 2,5 pour les particules sphériques.

La modification microstructurale la plus importante qui se produit avec l'augmentation de ϕ est une diminution de la séparation minimale typique entre les particules les plus proches. La concentration d'empilement maximale ϕ_m est atteinte lorsque des particules voisines sont en contact permanent, formant un réseau bloqué avec une séparation minimale.

5. Modélisation de la contrainte de cisaillement seuil

L'étude de la rhéologie des vases consiste à mesurer ou calculer la contrainte limite de cisaillement correspondante. Celle-ci peut être soit extrapolée à partir des différents modèles rhéologiques (Bingham, Herschell-Bulkley, Oswald...) ou bien mesurée en appliquant une rampe croissante de contrainte et en détectant la valeur à partir de laquelle le matériau commence à être cisailé. A noter que la première méthode permet de mettre en évidence un seuil critique de cisaillement de type statique et que la seconde permet d'établir un seuil de cisaillement dynamique.

Plusieurs expressions ont été établies pour modéliser la contrainte seuil en fonction de la fraction volumique solide ou bien en fonction de la concentration massique :

Legrand (83):

$$\tau_0 = ae^{b(\phi-0.5)} \text{ (Equation I-32)}$$

avec τ_0 (Pa) la contrainte de cisaillement seuil, ϕ est la fraction volumique solide, a et b sont des paramètres à ajuster, dépendant de la granulométrie et de la surface spécifique du ciment.

Coussot (74) :

$$\tau_0 = \tau_{0ref} \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^n \text{ (Equation I-33)}$$

avec τ_0 (Pa) la contrainte de cisaillement seuil, ϕ est la fraction volumique solide, ϕ_m est le packing, τ_{0ref} et n des paramètres de calage du modèle.

Migniot (47) :

$$\tau_B = kT_s^p \text{ (Equation I-34)}$$

avec τ_B (Pa) la rigidité initiale, T_s (g/l) la concentration, k un paramètre qui caractérise la consistance de la structure et p compris entre 3 et 4.

Kervella (84) :

$$\tau_{y0} = 5 \times 10^{-7} C^3 \text{ (Equation I-35)}$$

Avec τ_{y0} (Pa) le seuil de contrainte de fluide interstitiel à une teneur en eau donnée et C (g/l) la concentration en solide.

6. Rhéologie des suspensions naturelles et remise en suspension

La rhéologie des géosuspensions a fait l'objet de nombreux travaux que ce soit dans les domaines alimentaire, agro-alimentaire, industrie des matériaux industriels, de constructions, cosmétique, ... En revanche, peu d'études sont dédiées à la rhéologie des mélanges liquide-solides sédimentaires

naturels peut-être à cause de la complexité des processus combinés et des possibles limitations expérimentales pour établir un véritable transfert des résultats de laboratoires vers les systèmes réels. Cette limitation peut être également induite par la diversité de la composition de ces sédiments. Pourtant, la rhéologie des sédiments a été étudiée par plusieurs auteurs afin de déterminer la sensibilité des sédiments à l'érosion, leur résistance à l'écoulement et leur changement de structure.

Dans ses travaux dédiés à l'érosion mécanique des vases, Périgaud (85) a étudié l'influence de la concentration T_s (g/l) sur la rhéologie des vases (viscosité et contrainte de cisaillement seuil). Elle a récapitulé dans deux tableaux les valeurs trouvées par différents auteurs sur le seuil de Bingham τ_B et sur la viscosité μ_B en fonction de la concentration T_s (Figure I-31).

Tableau II. – Valeurs du seuil de Bingham τ_B (Pa) en fonction de la concentration T_s (g/l) pour différents auteurs

T_s		T_s													
		100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1 000
Auteurs	Mahury	0,01	0,08	0,25	0,80	1,50	5,00	8,00	12,0	20	50	100			
	Provins			0,02	0,07	0,11	0,30	0,70	1,0	1,8	5	10	20		
	Gironde			0,16	0,25	0,4	0,7	1,4	2,0	1,7					
	Gularte	2,0	10		20					35	50	70		130	200
	Clanton	0,3				5,0				40		200		2 000	
	Valembois			0,06			0,33		1,25	2,27					

Tableau III. – Valeurs de la viscosité apparente (Poise = 10^{-1} SI) en fonction de la concentration T_s (g/l) pour différents auteurs

T_s		T_s													
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	1 000
Auteurs	Mahury		0,01	0,08	0,15	0,80	2,00		8,00		20	80			
	Provins	0,02	0,03		0,04	0,06		0,10		0,4	0,8		1		
	Gironde				0,1	0,2	0,3	0,3	1,6	1,9	25				
	Gularte		0,3				0,4						40		700
	Clanton	0,01	0,01	0,01	0,2		0,4		0,5		0,8	1,5	5		

Ces valeurs sont recalculées à partir des courbes expérimentales qui ne dépendent pas toujours de T_s mais parfois de la teneur en eau ou du poids effectif de la vase. Lorsque le pH, la température et la salinité varient, nous avons retenu les valeurs pour pH = 6, température = 20° C, S = 0 %.

Figure I-31: Valeurs de la viscosité et du seuil de Bingham en fonction de la concentration en grains (85).

Papenmeier et al (86), ont étudié la variation du comportement rhéologique selon la profondeur sur un lit de sédiment de deux différents estuaires (Weser and Ems estuaries, North Sea- Germany). Les sédiments de surface présentent une faible concentration volumique solide et se comportent comme un fluide newtonien, jusqu'à l'interface eau-sédiments où le comportement du fluide devient non-newtonien.

Granboulan et al (87) ont étudié le comportement rhéologique des vases prélevées de l'estuaire de la Gironde. Ils ont ainsi utilisé le rhéomètre Brookfield afin d'étudier la viscosité et la contrainte de cisaillement seuil de ces sédiments. Ils ont ainsi appliqué le modèle de Bingham dans le calcul de ces paramètres.

A leur tour Guibaud et al. (88) ont étudié la rhéologie des boues provenant des différents bassins d'aération en utilisant le modèle de Bingham et ont interprété l'influence de la teneur totale des solides en suspension sur les paramètres de ce modèle.

Laguionie et al (89) ont étudié la rhéologie des vases issues du milieu marin à l'aide d'un rhéomètre Malvern gémini 150. Ils ont détecté une évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement selon la loi de Bingham et cela pour des vitesses de cisaillement intermédiaires et pour différentes valeurs de fraction volumique solide.

Dans son HDR, Mélinge (1) a étudié le comportement rhéologique des vases de la Baie de Quiberon suivant la loi de Herschell-Bulkley détectant un comportement rhéofluidifiant de ces derniers.

En complément de ce qui a été présenté au début de cette partie bibliographique, l'étude des propriétés rhéologiques des vases peut avoir pour objectif d'éclairer sur le caractère élasto-viscoplastique structurant des suspensions cohésives drainantes, compactantes, ce qui en soi représenterait une sérieuse contribution à la compréhension du « fonctionnement » de ces fluides. L'usage de la rhéologie peut avoir pour objectif d'éclairer sur les propriétés de résistance de l'interface fluide-sédiments soit en condition laboratoire (en prenant soin d'établir des scénarios réalistes pour la mise en œuvre de cette interface) ou en condition in-situ. Dans ce dernier cas, on se heurte néanmoins encore à d'énormes difficultés d'ordre rhéométrique pour véritablement caractériser l'interface fluide-sédiments.

En condition laboratoire, Quentin, 2005 (79) et Laguionie, 2006 (30) ont effectué des mesures de seuils limites de cisaillement plastique sur des interfaces en milieu fluvial (rivière Vilaine (35)) découvertes en période de chômage de la rivière. Ils utilisent un test scissométrique modifié manuel dont les pales présentes une profondeur d'enfoncement de 10mm. Pour chaque mesure, un prélèvement de matière est réalisé afin de calculer la teneur en eau et par la suite la fraction volumique solide. Les résultats obtenus sont présentés sur la **figure I-32**. Logiquement, un lien fonctionnel est établi entre les deux paramètres qui caractérisent les matériaux en place. En condition laboratoire, des suspensions ont été formulées à partir de sédiments prélevés sur place, séchés et additionnés d'eau à teneur en eau imposée. Dans ces conditions, il peut être aisé de mesurer un seuil limite plastique de rupture en cisaillement. Les résultats sont reportés sur la **figure I-32** et montrent une distinction marquée avec les résultats in situ. Ceci est lié au fait qu'aucun facteur de compaction n'a été introduit dans le protocole. La texture des suspensions in situ peut ne pas avoir été reproduite. Dans une autre tentative, les auteurs ont fabriqué des mélanges qui ont sédimenté dans des colonnes pendant une certaine période (15 jours). Au terme de cette période, la colonne sédimentée est caractérisée à l'aide d'un test scissométrique et la teneur en eau est de nouveau estimée. Les résultats sont également reportés sur la **figure I-32**. Sans être identique, ces résultats montrent que le scénario retenu pour la mise en œuvre des suspensions est assez concluant.

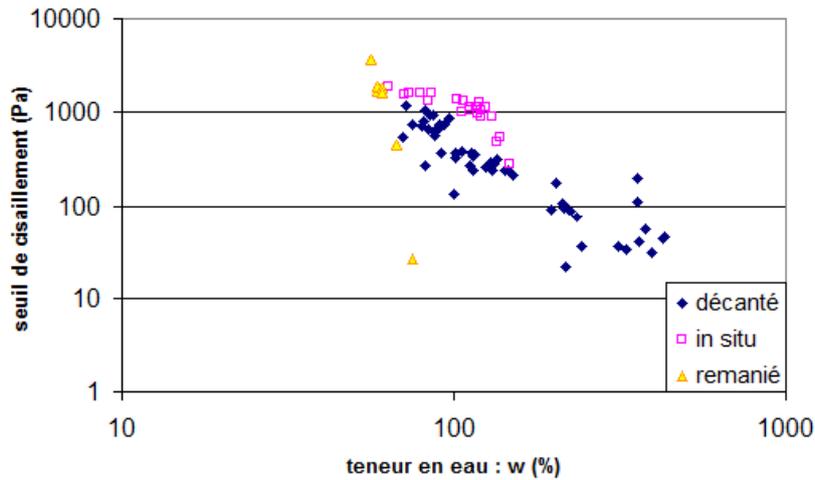


Figure I-32: Identification du lien $\tau = f(w)$ pour des vases de la rivière Vilaine en place in situ, remanié à partir des sédiments séchés et additionnés d'eau et après une période de sédimentation en colonne de 15 jours.

Avec l'objectif de montrer une possibilité de raccordement d'une démarche rhéologique et de caractérisation de l'écoulement de couche limite à l'interface fluide-sédiments dans l'estimation de l'érosion (79) a complété les travaux précédents (en admettant que le processus de sédimentation en condition laboratoire est représentatif de la réalité) en matérialisant dans une veine hydrodynamique à surface libre une maquette de sol (utilisant les matériaux de la rivière Vilaine) par sédimentation-tassement-consolidation durant 15 jours, **figure I-34**. Au terme de la période de vieillissement de l'interface, un écoulement cisailant d'eau claire est généré au-dessus de l'interface par accroissement progressif du débit volumique. Un capteur de turbidité placé au voisinage de l'interface permet de détecter ou non le transport solide et de déduire le débit critique pour lequel l'érosion survient. En parallèle, un vélocimètre ultrasonore 1D est utilisé pour reconstituer la distribution de la composante longitudinale du vecteur vitesse dans la colonne en écoulement depuis l'interface. Pour le débit critique de mobilisation solide, la vitesse de frottement est calculée et la contrainte de frottement est déduite et comparée à la distribution de contrainte limite de cisaillement dans la maquette du sol. Les résultats sont présentés sur la **figure I-33**. Des améliorations seraient à prévoir pour véritablement conclure sur la pertinence des conditions de raccordement des deux points de vue, mais ces premiers résultats sont encourageants.

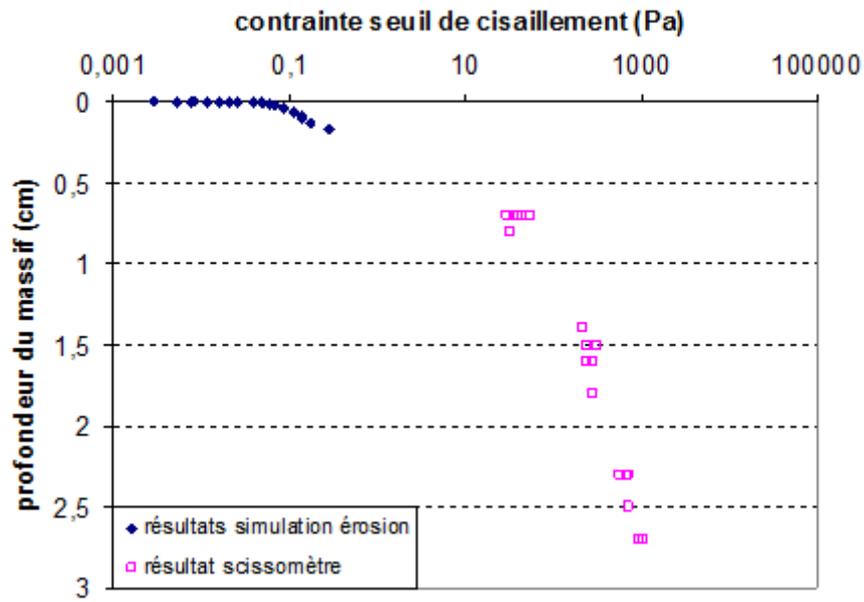


Figure I-33: Estimation de la distribution de la contrainte de cisaillement dans un massif de vase (matériaux prélevés dans la rivière Vilaine (35)) par l'estimation de la vitesse de frottement à l'interface décapée et par mesure du seuil limite de cisaillement, (79).

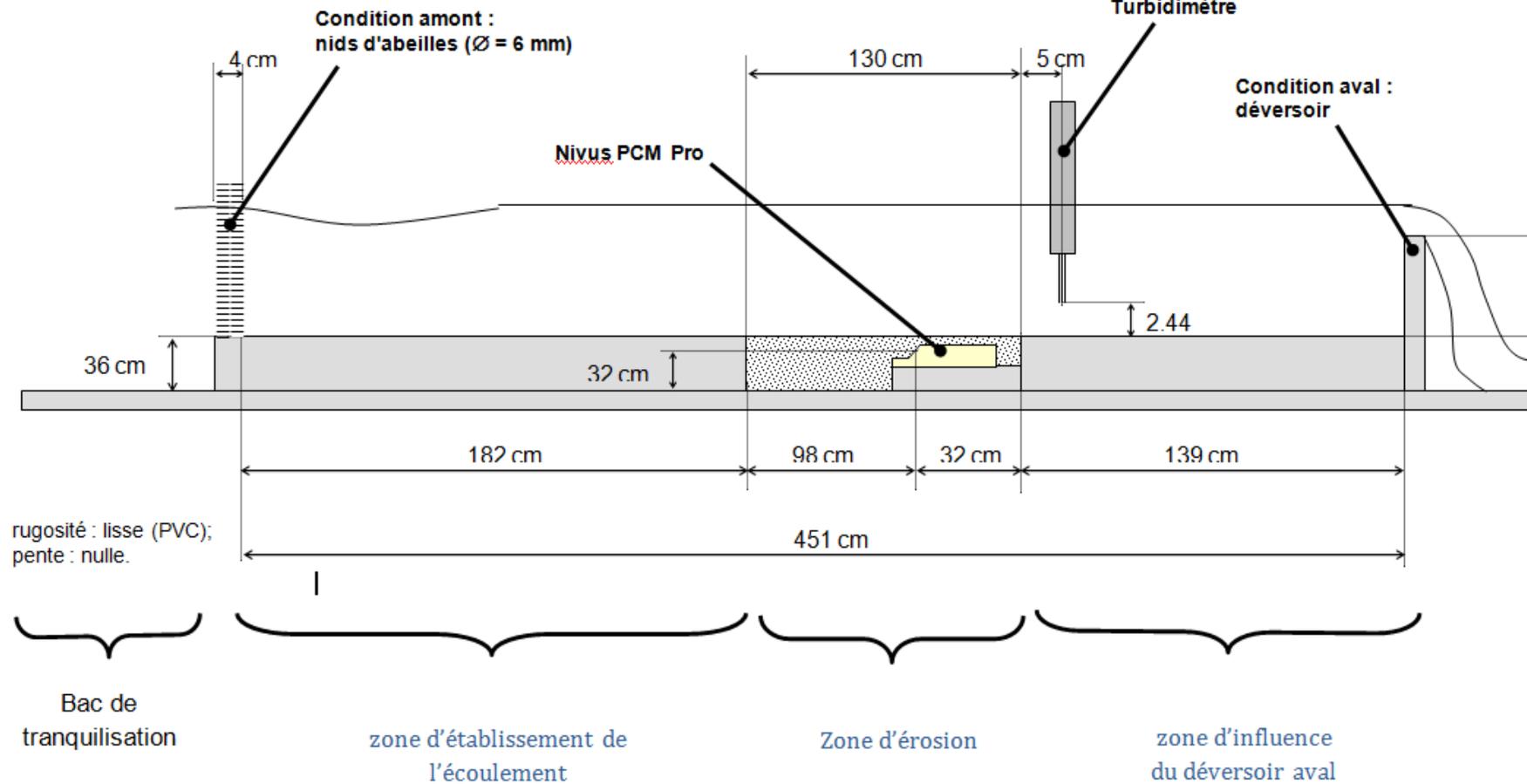


Figure I-34: Ecoulement dans une veine hydrodynamique à surface libre.

En retenant une démarche rhéologique et l'identification du seuil limite de cisaillement à l'interface fluide-sédiments sur le site de Marennes Oléron, Kervella (84) identifie un lien $\tau = f(\phi \text{ ou } W)$ pour différents types de vases : plutôt sableuses, sablo-vaseuses, vaseuses.... Ces résultats montrent que le lien établi pour les suspensions composées des particules les plus fines se reproduit pour les suspensions incluant des inclusions mais ces inclusions affectent la contrainte de cisaillement, **figure I-35**. L'introduction d'une fraction volumique d'inclusions par rapport à la fraction de fines permet d'exprimer la relation sous la forme d'une courbe maîtresse.

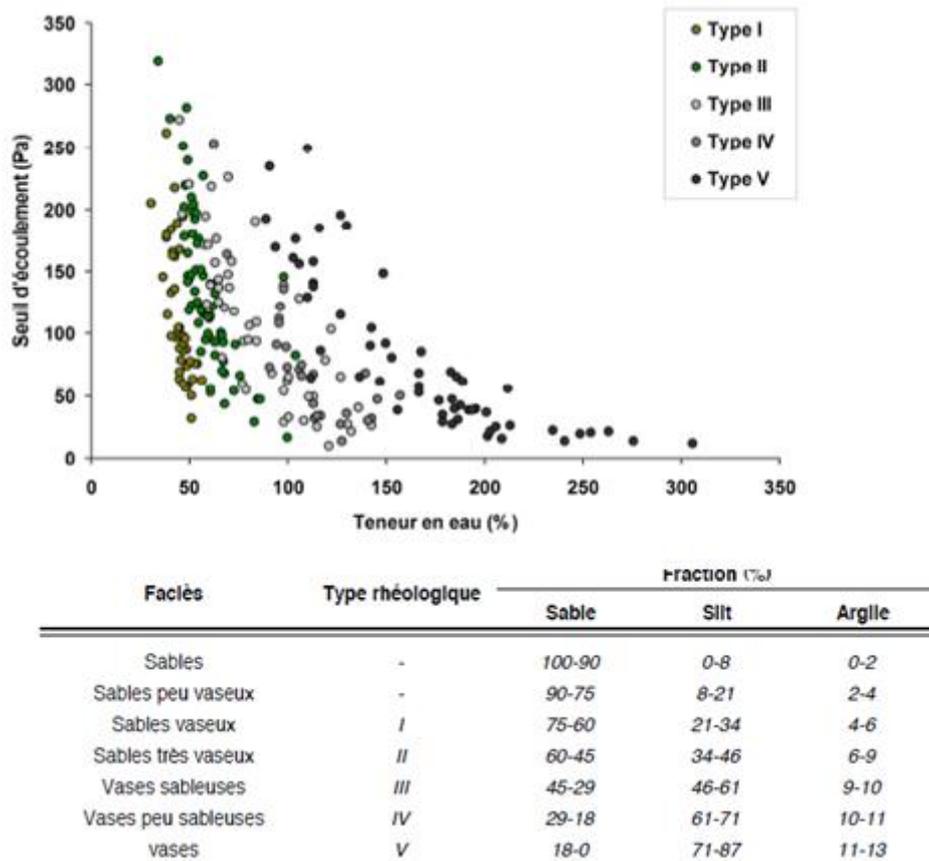


Figure I-35: Relation entre le seuil d'écoulement et la teneur en eau, en fonction des types de sédiments mixtes (sables/vases) définis à l'aide de la rhéométrie (84).

De tels résultats sont corroborés par Melinge (1) en produisant des suspensions au jeune âge (quelques minutes) à partir de sédiments prélevés dans la baie de Quiberon (56). Le comportement visco-plastique de suspensions supposées polydisperses est modélisé à partir d'essais expérimentaux dynamique pour le seuil limite de cisaillement, la viscosité apparente et l'indice de structuration et le concept de représentation via des courbes maîtresses. A partir de ces résultats et en reprenant le principe de structuration d'un massif de sol maquette par sédimentation (79), Melinge (1) propose une cinétique d'évolution du seuil limite de cisaillement au cours du temps pour une altitude donnée au cours d'une période de vieillissement maximum de 6 mois, **figure I-36**. Un tel résultat met en évidence la notion de variabilité du seuil d'érosion en fonction du degré de structuration des suspensions et suggère l'émergence d'un caractère asymptotique. On souhaite approfondir cette notion dans le cadre de cette thèse.

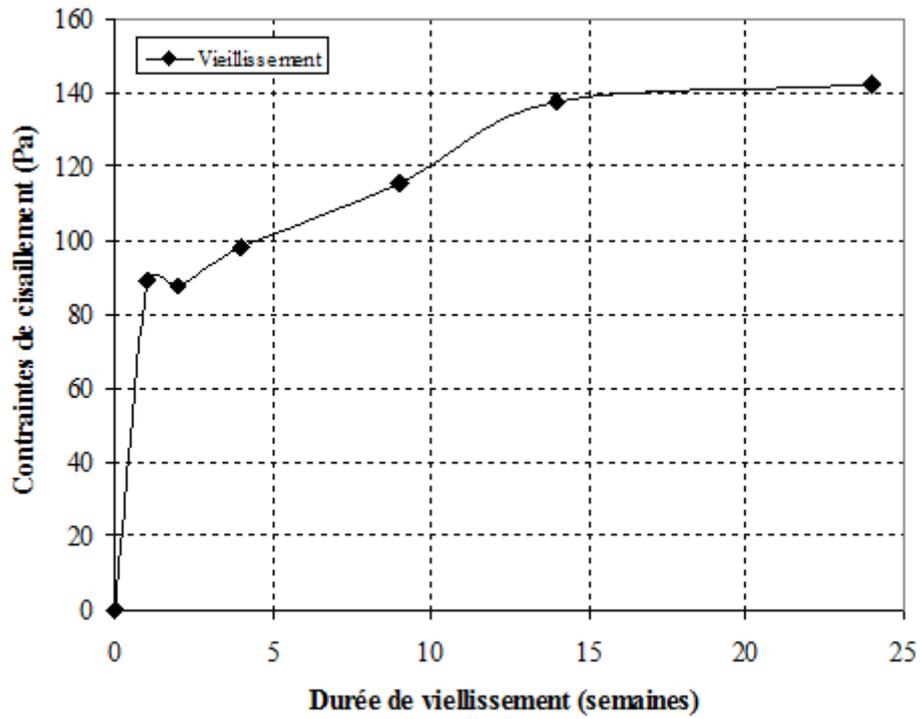


Figure I-36: Illustration de la cinétique de structuration de vases (mélanges de sédiments de la baie de Quiberon et d'eau) au cours d'une période de 6 mois via l'évolution du seuil limite de cisaillement au cours du temps à une altitude fixe dans un massif de sol maquette mis en œuvre par sédimentation-tassement-consolidation en condition laboratoire.

Conclusion

De nos jours, l'envasement des estuaires reste un problème majeur dans les problématiques fluviales et marines. Celui de la Rance, autour duquel est centrée notre étude, ne fait pas exception. Une synthèse des différentes études effectuées sur l'estuaire de la Rance visant à présenter le problème de l'envasement, ces causes, ces conséquences et les solutions déjà envisagées a été présentée.

Notre but est d'étudier la structuration des matériaux mixtes et fins sédimentaires. Cette étude est appliquée à l'envasement de l'estuaire de la Rance afin d'apporter une contribution à la compréhension des processus de sédimentation-tassement-consolidation et vieillissement des suspensions déposées. Nos travaux restent néanmoins centrés autour des matériaux du piège du Lyvet, solution alternative douce sur le plan environnemental pour lutter contre l'envasement.

Au terme de cette revue bibliographique, nous avons détaillé dans la première partie de ce chapitre, des propriétés d'écoulement à surface libre en proche paroi et mis en évidence les équations permettant le calcul de la vitesse de frottement et par la suite les contraintes de frottement aux parois. La deuxième partie de ce chapitre définit le phénomène de sédimentation dans les estuaires et le problème de comblement des estuaires.

Dans la troisième partie, on a présenté l'estuaire de la Rance, sujet de notre étude. Cet estuaire a été depuis la construction de l'usine marémotrice le sujet de nombreuses études visant à comprendre les causes et les conséquences de cet envasement. Suite à quoi, la construction du piège du Lyvet a été proposée comme solution à ce problème considéré très grave. On détaille dans cette partie la localisation de cette rivière, ses caractéristiques hydrodynamiques et morphologiques et on parle du problème d'envasement de cet estuaire.

La dernière partie permet d'introduire quelques concepts rhéologiques : notions de base, les principaux comportements, l'exposé des modèles de comportement les plus répandus en condition de cisaillement simple pour des fluides visqueux et visco-plastiques et quelques aspects dédiés à la structuration rhéologique. Enfin, quelques résultats de travaux liés à la mobilisation solide ont été proposés.

Chapitre II. Matériaux et protocoles expérimentaux

Partie I. Matériaux

1. Introduction

Le piège à sédiments du Lyvet est un piège construit en 1996 à l'aval du chenal de navigation de l'estuaire de la Rance afin de limiter l'effet du comblement dans cet estuaire (3.3.1). Notre étude porte sur la structuration des matériaux dont les sédiments ont été prélevés dans le piège. Depuis sa construction, le piège du Lyvet a subi plusieurs opérations de dragages et de vidanges. Ces opérations ont été détaillées dans le chapitre I (3.3.1). Grâce à des missions lancées par l'association COEUR Emeraude, la sédimentation dans le piège et les caractéristiques des sédiments ont fait l'objet de nombreuses études en cours de remplissage ou bien suite à la vidange du piège ((72) (90) (73) (91), ...). Ces études permettent d'avoir un certain recul sur les caractéristiques majeures des sédiments déposés dans le piège. Notre étude a démarré début décembre 2014, soit quelques semaines avant une des vidanges du piège, réalisée de mi-décembre 2014 à février 2015.

L'analyse qualitative des sédiments est ainsi réalisée sur les sédiments prélevés au cours de deux campagnes distinctes réalisées l'une avant la vidange du piège (fin 2014), la seconde en cours de son remplissage (en novembre 2015).

Sur le plan quantitatif, les travaux effectués et regroupés dans ce chapitre sont dédiés à la caractérisation physico-chimique des sédiments (granulométrie, teneur en eau, matière organique ATD, TG, minéralogie, ...). Après avoir détaillé le protocole de préparation et les techniques de caractérisation physico-chimiques des sédiments, nous nous intéressons dans un premier temps à la variabilité du dépôt sédimentaire dans le piège, en analysant la distribution granulométrique et la teneur en matière organique de prélèvements réalisés en différents points et à différentes profondeurs dans le dépôt sédimentaire. Dans une seconde étape, une analyse plus complète des matériaux retenus pour réaliser l'étude rhéologique de ce travail est présentée.

2. Méthode de préparation et techniques de caractérisation

2.1. Préparation des sédiments

Au laboratoire, les sédiments sont préparés afin de réaliser une étude rhéologique au jeune âge et une analyse des propriétés de massifs de sols obtenus par un processus de sédimentation-tassement-consolidation dans des colonnes développées à cet effet. L'objectif des travaux est de mettre en évidence quelques mécanismes de structuration au sein des massifs, de montrer le rôle des sels et de la matière organique dans la structuration des mélanges via une démarche physique, structurelle et mécanique. Pour ce faire, les sédiments ont été préparés :

- Un échantillon constitué des matériaux tels que prélevés (noté « naturel » par la suite),
- Un échantillon dépourvu de sel (noté « sans sel »),
- Un échantillon dépourvu de sel et de matières organiques (noté « sans sel et sans MO »)

Dans une première étape, dès leur arrivée au laboratoire, les sédiments sont tout d'abord tamisés à 2 mm afin d'éliminer les débris végétaux et les coquillages avant d'être séchés à température constante de 20°C sous flux d'air léger. Ce mode de séchage permet d'éviter la transformation chimique des éléments minéraux et de ne pas commencer à dégrader la matière organique présente en partie sous

la forme de micro-organismes. Après cette phase de séchage, le matériau se présente sous la forme de mottes solides et très fermes (**Figure II-1**). Il est alors réduit en poudre en utilisant un broyeur mécanique à mâchoires (pulvérisette) permettant de briser les mottes en éléments plus fins. Le matériau est ensuite tamisé à 2mm afin d'éliminer les éléments mottés restants.



Figure II-1: Aspect du matériau après séchage à 20°C (à gauche), et après broyage et tamisage (à droite).

Les sédiments sans sel sont obtenus par lavage à l'eau du robinet. Les sédiments sont mélangés avec une grande quantité d'eau puis laissés à décanter. L'eau surnageante est ensuite éliminée à l'aide d'une pompe péristaltique. Comme recommandé par M. Fall (92), l'opération est renouvelée trois fois afin d'obtenir une teneur en sel négligeable.

Pour éliminer la matière organique, les sédiments sont thermolysés à 375°C. Afin de garantir une élimination complète de la matière organique. La calcination est réalisée sur des prises d'échantillon de moins d'un kilogramme, disposées sur une faible épaisseur. La température de 375°C est maintenue constante 24h. Des visualisations MEB accompagnées de micro analyses EDX réalisées sur différents échantillons ont montré que l'opération de calcination détruit également les sels.

2.2. Technique de caractérisation des sédiments

2.2.1. Mesure de la teneur en matière organique

La matière organique joue un rôle important dans la détermination des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sédiments. La mesure de la teneur en matières organiques semble alors indispensable afin d'étudier dans ce qui suit l'influence de ces matières sur le tassement, la consolidation et le vieillissement.

Cette mesure peut être effectuée par dosage direct (après élimination des carbonates par traitement à l'acide), par dosage indirect (dosage du carbone total puis du carbone organique total) ou par incinération (perte au feu).

Pour nos mesures, nous avons utilisé la méthode par perte au feu. Elle permet de mesurer simplement la matière organique dans le sol en mesurant la perte de poids après calcination. Les sédiments étudiés contenant une partie d'argile (de type kaolinite, notamment), la température de calcination adoptée est de 375°C. À cette température, les minéraux argileux ne sont pas dégradés.

Pour ces mesures, les prises d'échantillons sont préalablement séchées à l'étuve pendant 16h, puis refroidies dans un dessiccateur. La calcination est ensuite réalisée dans un four à moufle, la température de 375°C est maintenue pendant 24h.

La teneur en matières organiques est alors comme la perte de masse induite par la phase de calcination exprimée en pourcentage de la masse sèche initiale.

2.2.2. *Mesure granulométrique*

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer quantitativement la distribution des particules de sol par classes de diamètres. Cette analyse peut se faire par plusieurs méthodes :

- Par tamisage à sec ou tamisage sous l'eau
- Par sédimentométrie
- Par diffraction laser
- Par microscopie optique
- Par centrifugation

Ces méthodes sont choisies selon la taille des grains constituant le matériau. Dans notre cas, nos sédiments sont systématiquement inférieurs à 2mm. Ainsi, l'analyse granulométrique des vases a été effectuée par granulométrie laser à l'aide d'un Granulomètre CILAS type 1180.

Cette technique créée dans les années 1970 est surtout utilisée pour des matériaux allant de quelques centaines de nanomètres à plusieurs millimètres. Elle permet en une minute de donner la distribution granulométrique d'une faible quantité de sédiments.

La granulométrie laser se base sur la diffraction de la lumière selon l'approximation de Fraunhofer et la théorie de Mie. Le granulomètre mesure la variation angulaire d'un faisceau de lumière traversant un échantillon de particules dispersées. Cette variation sera enregistrée sur des photos-diodes en considérant les particules sphériques et opaques de diamètre supérieur à la longueur d'onde. La proportion de chaque classe granulaire sera alors déterminée (93).

Pour les matériaux sédimentaires testés dans cette étude, la classification traditionnellement utilisée en sédimentologie, est rappelée dans tableau II-1 ci-dessous, est adoptée.

Tableau II-1: Classification granulométrique utilisée.

Argile	: 0 - 2 µm	Sables grossiers	: 0.2 - 2 mm
Limons	: 2 - 20 µm	Graviers	: 2 - 20 mm
Sables fins	: 20 - 200 µm	Cailloux	: 20 - 200 mm

Les distributions granulométriques peuvent également être caractérisées par les indices de Trask, S_o et S_k traduisant respectivement la dispersion et l'asymétrie de la distribution granulométrique. Ces indices sont définis ci-dessous :

$$S_o = (Q_3 / Q_1)$$

$$S_k = Q_1 Q_3 / Q_2^2$$

Où Q1 et Q3 sont les quartiles (25 et 75 % de la distribution), tandis que Q2 correspond au grain moyen.

Les limites suivantes ont été retenues :

- $So < 2,5$ Sédiment très bien classé ;
- $2,5 < So < 3,5$ Sédiment normalement classé ;
- $3,5 < So < 4,5$ Sédiment assez bien classé ;
- $4,5 < So$ Sédiment mal classé.

De plus, quand $Sk > 1$: le classement est maximal du côté fin ; et quand $Sk < 1$: le classement est maximal du côté grossier.

2.2.3. Technique ATD/TG

L'Analyse Thermique Différentielle (ATD) et l'Analyse ThermoGravimétrique (ATG) permettent l'étude des comportements thermodynamiques des matériaux et sont utilisées simultanément. Au cours d'une variation de la température, les matériaux subissent potentiellement des changements de phases chimiques qui conduisent à une recombinaison de la matière et éventuellement de son état structural. Dans la majeure partie des cas qui intéressent nos travaux, ces changements s'opèrent avec variation de masse et/ou variation de la quantité de chaleur. Dans ce dernier cas, on distingue les réactions exothermiques (elles produisent une quantité de chaleur au cours de la transformation), des réactions endothermiques (elles absorbent une quantité de chaleur au cours de la transformation).

La méthode ATG (analyse thermogravimétrique) consiste à suivre la variation de masse d'un échantillon avec une microbalance en fonction de la température et du temps dans une atmosphère contrôlée et de détecter par la suite la présence des composés chimiques présents à une certaine température (**Figure II-2**).

Deux effets peuvent être observés :

- Augmentation de masse qui peut être due globalement à une densification ou décomposition de la matière
- Diminution de masse qui peut être due à une oxydation de la matière.

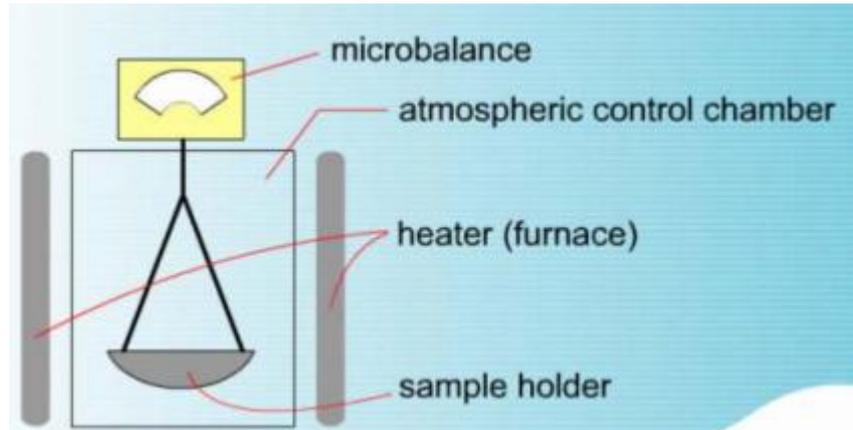


Figure II-2: Dispositif d'un essai ATG (94).

2.2.4. DRX

La technique de diffraction des rayons X est une technique non destructive visant la détection des matériaux cristallins. Cela nous informe par la suite sur les structures, les phases, la texture, la tension et les défauts du cristal (**Figure II-3**). L'échantillon est préparé sous la forme d'une poudre aplanie dans une coupelle ou bien sous la forme d'une plaquette solide plate. Il est ensuite bombardé par un faisceau de rayons X monochromatiques et parallèles de longueur d'onde connue. L'échantillon est placé au centre d'un dispositif rotatif qui lui-même tourne d'un mouvement uniforme autour de l'axe situé dans son plan afin de faire un balayage des rayons sur tout l'échantillon et mesurer l'intensité des rayons X selon la direction. Le faisceau incident qui se diffracte sur la structure cristalline du matériau vérifie la loi de Bragg :

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \text{ (Equation II-3)}$$

Avec : λ , la longueur d'onde du faisceau incident,

n , le nombre entier appelé "ordre de diffraction"

d , la distance entre les deux plans

θ , la moitié de la déviation.

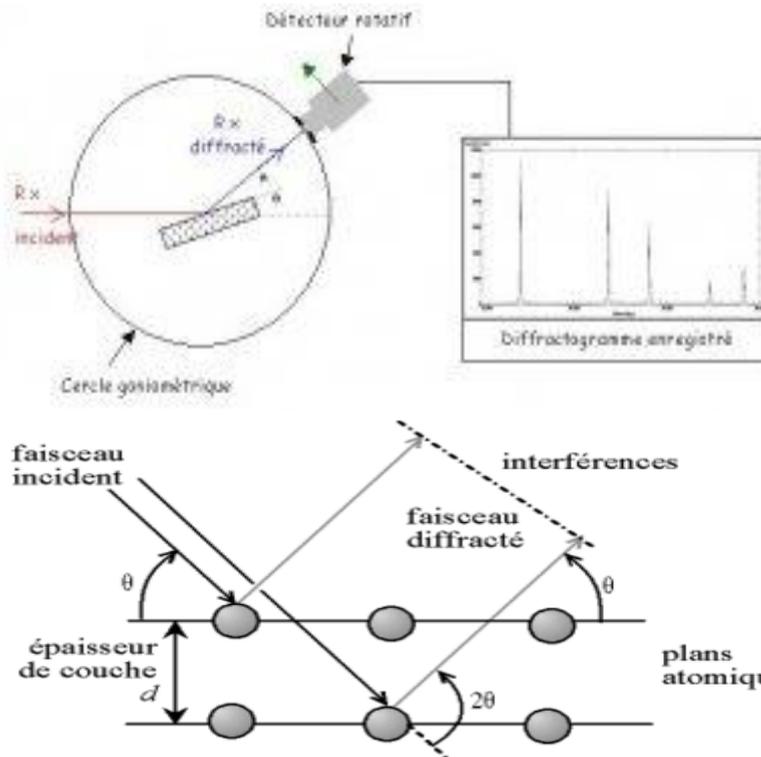


Figure II-3: Dispositif d'un essai DRX.

Le compteur goniométrique mesure l'intensité du rayonnement X diffracté sur le matériau. L'enregistrement réalisé est la courbe de l'intensité des rayons X diffractés en fonction des angles de diffraction.

3. Prélèvement des sédiments et variabilité du dépôt sédimentaire dans le piège

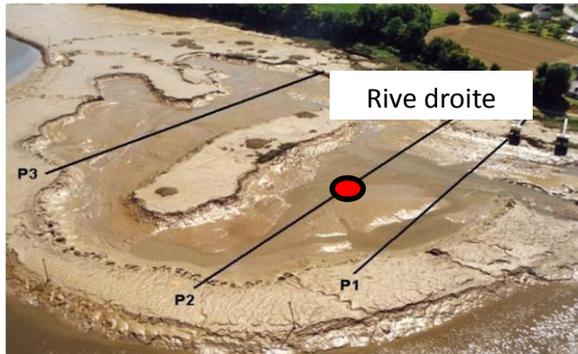
Les sédiments analysés dans ce travail ont été prélevés au cours de deux campagnes sur site distinctes. Durant une première mission réalisée en 2014, une quantité importante de sédiments a été prélevée à la benne preneuse pour la réalisation des essais rhéologiques. Au cours de cette campagne, une carotte de 50 cm a également été prélevée au centre du piège à l'aide d'un carottier russe (**Figure II-5**).

La seconde campagne de prélèvement a été réalisée en novembre 2015 en parallèle d'une étude bathymétrique du piège réalisée le long de trois profils, référencés P1, P2 et P3, et localisés sur la photo présentée en **figure II-4**. Le long de ces trois profils, huit prélèvements ont été réalisés au carottier russe. Ils sont répartis comme suit : Un prélèvement a été réalisé au centre des profils P1 et P3, tandis que 6 prélèvements ont été réalisés sur le profil P2 :

- Un prélèvement proche de la rive gauche (noté RG), à mi-hauteur de la hauteur sédimentée,
- Un prélèvement proche de la rive droite (noté RD), à mi-hauteur de la hauteur sédimentée,
- Quatre prélèvements réalisés au centre du profil, à différentes hauteurs :
 - En surface des sédiments (prélèvement noté 'surface') ; ces sédiments sont proches de l'interface eau/sédiments,
 - À 20cm sous la surface des sédiments (prélèvement noté 'haut'),
 - À mi-hauteur de l'épaisseur sédimentée (prélèvement noté 'milieu'),

- À la base de couche sédimentée (prélèvement noté 'fond'), soit proche du contact sédiments/platier rocheux (91).

Sur chacun des prélèvements, des analyses granulométriques, des mesures de la teneur en eau, de la teneur en matières organiques et des mesures de la masse volumique apparente des sédiments sont réalisés.



Le point rouge correspond à l'emplacement du carottage de 2014.

Figure II-4: Emplacement des trois profils transversaux dans le piège du Lyvet- P1 (amont), P2 et P3.



Figure II-5: vue du carottage P₂ centre.

L'analyse des sédiments prélevés au cours de la campagne de 2015 permet d'appréhender la variabilité spatiale des caractéristiques des matériaux déposés. Les résultats en termes de granulométrie, teneur en eau, teneur en matières organiques et masse volumique apparente sont donnés dans le **tableau II-2**.

Tableau II-2: Caractéristiques des sédiments prélevés en novembre 2015.

Echantillon	%	Argile 0 - 2 µm	Limons 2 - 20 µm	Sables fins 20 - 200 µm	Grain Médian	S0	Sk	M.O. en %	W (%)	MVA g/cm ³
P1 (2,00 m)	Partiels	11,8	40,2	48,0	18,1	3,1	0,6	4,6	85,3	0,79
	Cumulés	11,8	52,0	100						
P2 RG (2,50 m)	Partiels	19,6	65,1	15,3	6,0	2,3	1,0	5,9	118,3	0,63
	Cumulés	19,6	84,7	100						
P2 centre (surface)	Partiels	19,7	63,5	16,8	6,4	2,4	0,9	8,1	125,4	0,6
	Cumulés	19,7	83,2	100						
P2 centre (haut)	Partiels	18,5	54,3	27,2	8,3	2,8	0,9	5,2	108,2	0,67
	Cumulés	18,5	72,8	100						
P2 centre (milieu)	Partiels	14,9	57,0	28,1	9,9	2,6	0,8	4,6	87,0	0,79
	Cumulés	14,9	71,9	100						
P2 centre (fond)	Partiels	16,0	61,5	22,5	8,8	2,4	0,8	4,9	94,0	0,75
	Cumulés	16,0	77,5	100						
P2 RD (2,35 m)	Partiels	11,6	42,4	46,0	16,6	3,1	0,8	6,0	96,8	0,73
	Cumulés	11,6	54,0	100						
P3 (2,00 m)	Partiels	17,2	61,4	21,4	8,4	2,4	0,8	3,6	110,4	0,66
	Cumulés	17,2	78,6	100						

On observe globalement que les échantillons ont une texture à dominante limono-sableuse. La fraction argileuse (0 – 2 µm) varie peu et est comprise entre 11,8% et 19,5%. La fraction limoneuse (2 – 20 µm) est le plus souvent dominante et comprise entre 40 % et 65 %. Enfin, la fraction sableuse fine (20 – 200 µm) est comprise entre 15% et 48%. Le grain médian moyen est environ de 11,9 µm. L'indice de dispersion S0 est systématiquement supérieur à 2,4, traduisant des sédiments normalement à très bien classés.

On observe toutefois une variabilité spatiale de la granulométrie des sédiments. En effet, les sédiments prélevés selon le profil P1, soit à l'entrée du piège, ont un grain médian nettement plus important (18 µm) que ceux prélevés profil P2 et P3. Ce profil étant situé à l'entrée du piège, il s'agit de la zone de dépôt des plus grosses particules. Ceci est conforme au mode de fonctionnement du piège observé depuis sa création (**Figure II-6**).

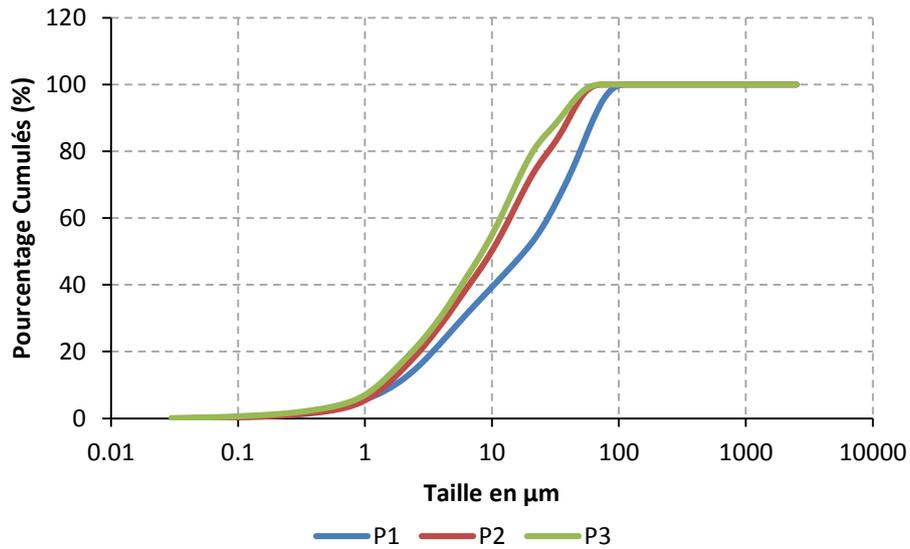


Figure II-6: Courbes granulométriques des sédiments prélevés des profils P₁, P₂ et P₃ à 2 m.

De même, les distributions granulométriques des trois prélèvements réalisés à mi hauteur le long du profil P2 (rive gauche, centre et rive droite) données dans la **figure II-7** montrent une variation spatiale de la granulométrie des sédiments. Les plus grossiers sont déposés rive droite, alors que ceux déposés rive gauche présentent un grains moyens plus fin. Ici encore, les sédiments les plus proches de l'entrée sont les plus grossiers.

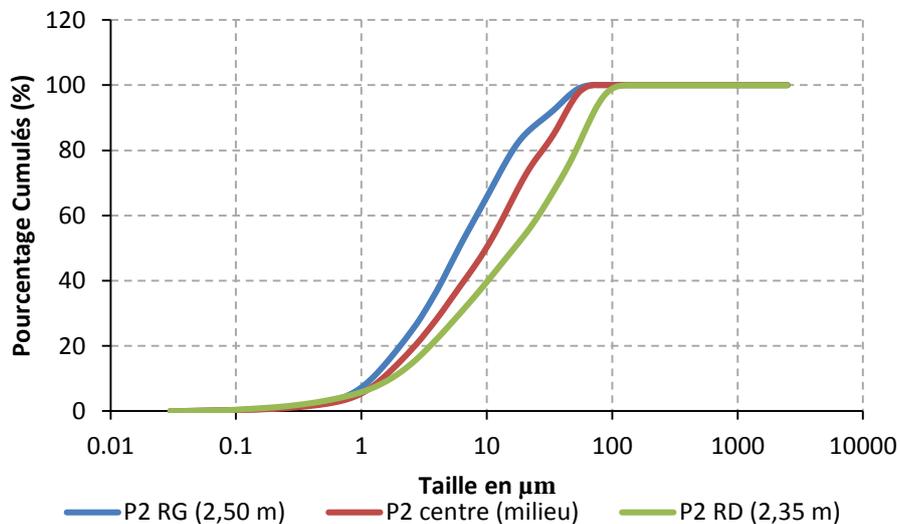


Figure II-7: Courbes granulométriques des sédiments prélevés le long du profil P₂.

Afin de déceler la présence d'un gradient vertical de granulométrie, les distributions granulométriques des prélèvements réalisés à plusieurs profondeurs au centre du piège, à l'emplacement du point de carottage repéré **figure II-4**, sont données dans la **figure II-8**. On observe que les courbes granulométriques des prélèvements réalisés en haut du massif, au milieu et au fond sont quasi confondues. Seule la granulométrie des sédiments prélevés en surface, c'est-à-dire à l'interface eau/sédiments, présente une granulométrie plus fine (grain moyen de 6,4 µm).

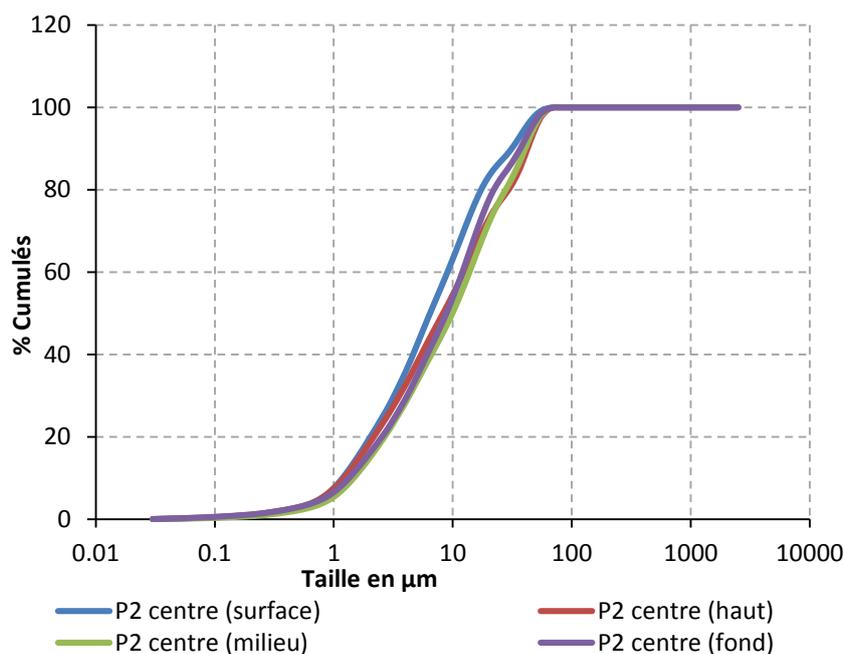


Figure II-8: Courbes granulométriques des sédiments prélevés du profil P₂ central à différentes profondeurs.

Il semble donc que la granulométrie du dépôt est globalement constante. Seuls les sédiments situés en haut du dépôt semblent avoir une granulométrie différente et légèrement plus fine. Pour analyser plus finement cette évolution granulométrique, la carotte de 50cm prélevée en 2014 en surface du dépôt au centre du profil P2 (voir localisation **figure II-4**) est décomposée en huit parties chacune ayant une épaisseur moyenne d'environ 5 cm (**Tableau II-3**).

Tableau II-3: Nom des courbes granulométriques en fonction de la profondeur.

Profondeur (cm)	Courbe
0,5	1a
5,5	1b
8,3	2
12,5	3
15,95	4
20,6	5
25,25	6
29,85	7
34,7	8

Une mesure de granulométrie par granulométrie laser est effectuée pour chaque partie. Les courbes granulométriques ainsi obtenues sont quasiment superposées (**Figure II-9**). Nous n'observons pas de différence significative entre les différents prélèvements réalisés le long de la carotte. L'évolution de la teneur en eau et du grain moyen D50 avec la profondeur est donné par la **figure II-10**.

On observe une valeur de teneur en eau quasi constante (si on considère une marge d'erreur de 5%) de l'ordre de 134% depuis le bas de la carotte et sur une longueur de 20 cm environ. Ensuite, la teneur en eau augmente pour atteindre une valeur de 165% environ pour les sédiments situés le plus proche de l'interface eau/sédiments.

Cette diminution de la teneur en eau avec la profondeur traduit un tassement des sédiments dans le piège du Lyvet. Ce phénomène est également illustré par les mesures faites dans le piège en 2015 et qui nous ont données une valeur de la teneur en eau maximale en surface, et qui diminue ensuite avec la profondeur.

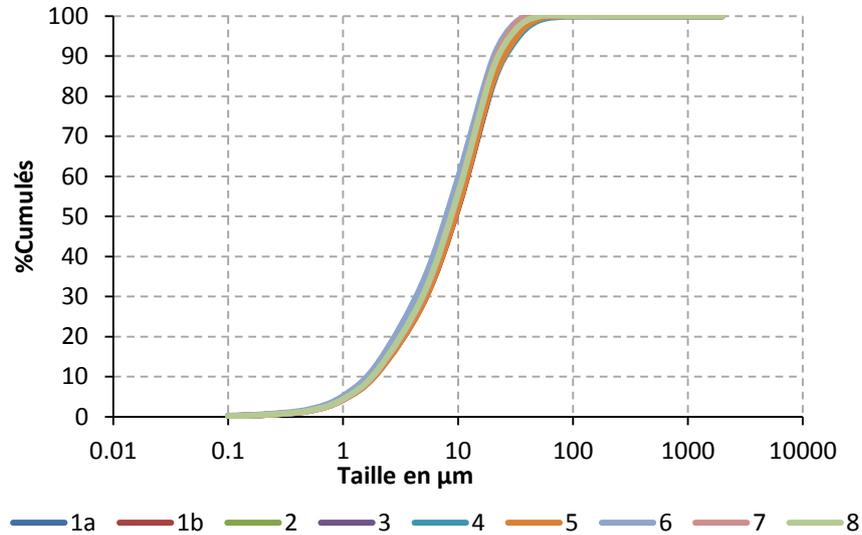


Figure II-9: Courbes granulométriques des différentes profondeurs de la carotte prélevée en mars 2014.

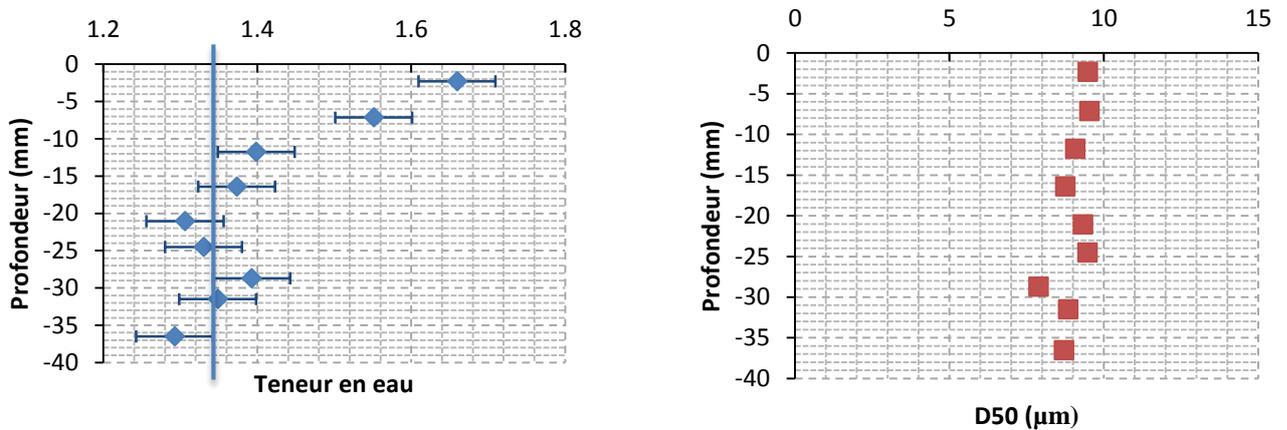


Figure II-10: Variation de la teneur en eau et du diamètre moyen le long de la profondeur de la carotte prélevée en 2014.

Les résultats de l'analyse granulométrique réalisée sur les différents prélèvements lors de la campagne de 2015 sont présentés sur un diagramme de texture (**Figure II-11**). Sur ce même diagramme sont également figurés les points représentatifs de la granulométrie moyenne des sédiments prélevés en 2011 et en 2014. Nous observons ainsi que les points représentatifs apparaissent tous alignés sur une droite qui relie le pôle sableux S au segment argiles- limons (A-L). Cela signifie, d'une part que c'est principalement l'importance relative de la fraction sableuse fine qui fait varier la texture des dépôts, d'autre part que la variabilité observée est liée au lieu et à l'altitude du prélèvement dans le piège.

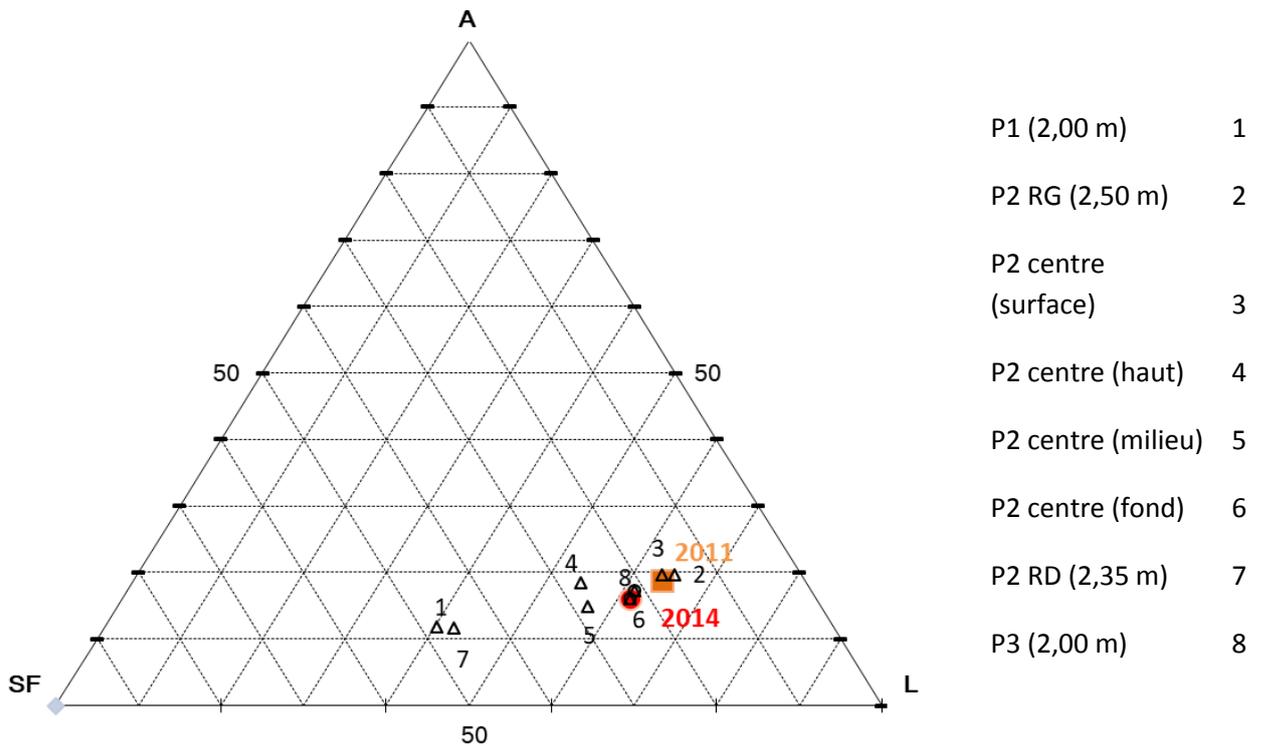


Figure II-11: Texture des sédiments prélevés dans le piège de Lyvet au mois de novembre 2015.

4. Caractérisation des sédiments utilisés

Compte tenu de la variabilité granulométrique, même limitée, observée des sédiments dans le piège, l'ensemble des analyses rhéologiques réalisées par la suite l'ont été sur un échantillon moyen créé à partir des prélèvements réalisés en différents points du piège à la benne preneuse en 2014. Le point représentatif de la granulométrie de cet échantillon moyen est celui noté « 2014 » positionné dans le diagramme de texture de la **figure II-11**. La répartition en fréquence des classes granulaires contenues dans le matériau naturel est donnée en **figure II-12**. Nous observons une répartition uni-modale de la distribution, avec un maximum de fréquence pour un grain de 15 μm .

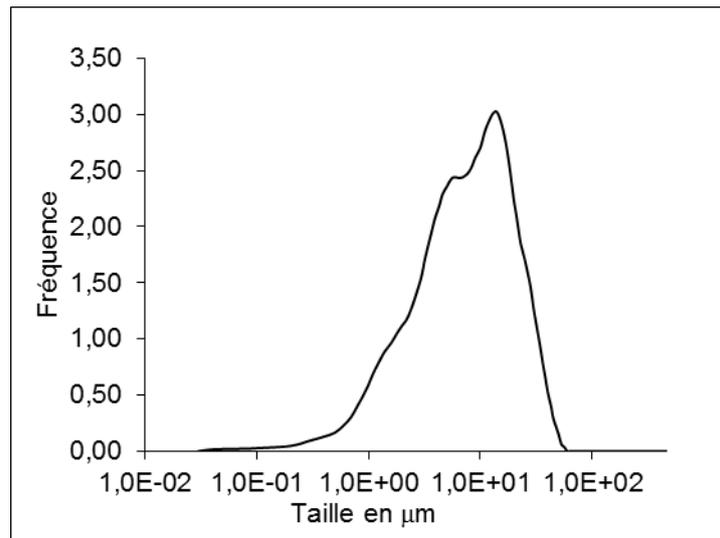


Figure II-12: Répartition granulométrique en fréquence – sédiments naturel.

La teneur en matières organiques mesurée pour cet échantillon moyen est de 6%. Ceci correspond à une valeur moyenne habituelle pour les sédiments provenant du piège du Lyvet. Les valeurs de la teneur en matières organiques des prélèvements réalisés en différents points du piège sont comprises entre 4,6% et 8,1 % (**Tableau II.2**).

La masse volumique des grains solides γ_s a été déterminée au pycnomètre sur plusieurs échantillons du matériau répartis en différentes réductions granulométriques. Les mesures ne montrent pas d'écart significatif entre les différentes coupures granulométriques. La valeur moyenne mesurée est de $19,9 \text{ kN.m}^{-3}$, avec un écart-type de $0,82 \text{ kN.m}^{-3}$.

Les analyses rhéologiques à suivre vont notamment viser à mettre en évidence la contribution différenciée des différentes fractions granulaires sur le comportement d'ensemble de la suspension. Ainsi, des échantillons de différentes franges granulométriques sont constitués par tamisage du matériau initial. La **figure II-13** montre les courbes granulométriques des franges étudiées par la suite : 0-40 μm , 0-63 μm , 0-80 μm , 0-125 μm et 0-160 μm . De même, les distributions granulométriques des échantillons préparés sans sel d'une part, et sans matières organiques d'autre part sont présentées sur la **figure II-14** avec la granulométrie des sédiments naturels. Nous ne notons pas de différence majeure de granulométrie après les traitements (lavage et calcination).

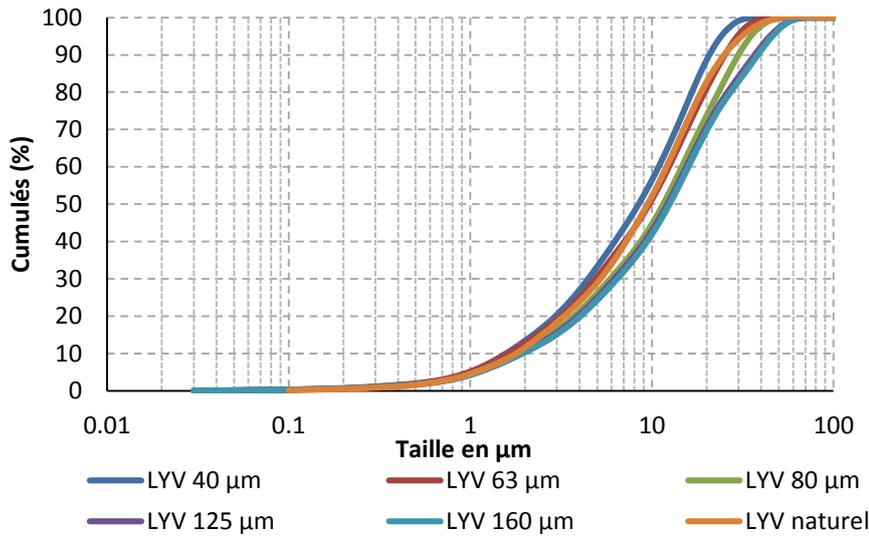


Figure II-13 : Courbes granulométriques des différentes franges granulaires.

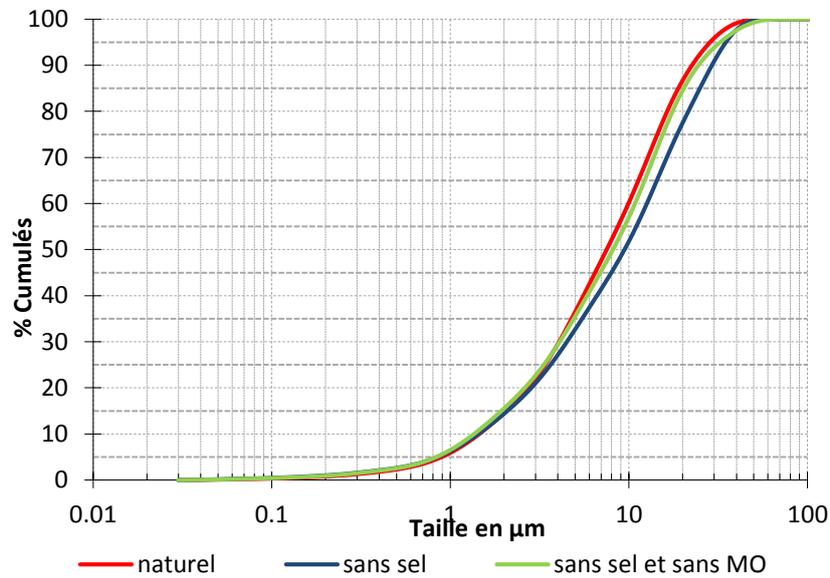


Figure II-14: Courbes granulométriques des échantillons naturels, sans sel et sans MO de la frange 0-125 µm.

4.1. Composition minéralogique des matériaux

La composition minéralogique des sédiments du Lyvet a été analysée à partir d’observations au microscope électronique à balayage et d’analyses de la diffraction des rayons X. Les observations MEB ont été réalisées sur trois coupures granulométriques du matériau naturel : 0 – 125 µm, 0-80 µm et 0 – 63 µm (**Figure II-15 à figure II-17**). Ces observations révèlent la présence d’éléments biogènes et de différents minéraux classiquement présents dans les sédiments marins. On retrouve notamment des diatomées, de la calcite (sous la forme de spicules et de fragments de coquillages), du quartz, des feuillets d’argiles et des sels. Cette analyse montre le caractère varié des éléments solides par leur nature, la forme et le caractère rugueux. Les observations réalisées sur les trois réductions granulométriques montrent que les différents éléments solides semblent être présents dans les trois réductions granulométriques observées.

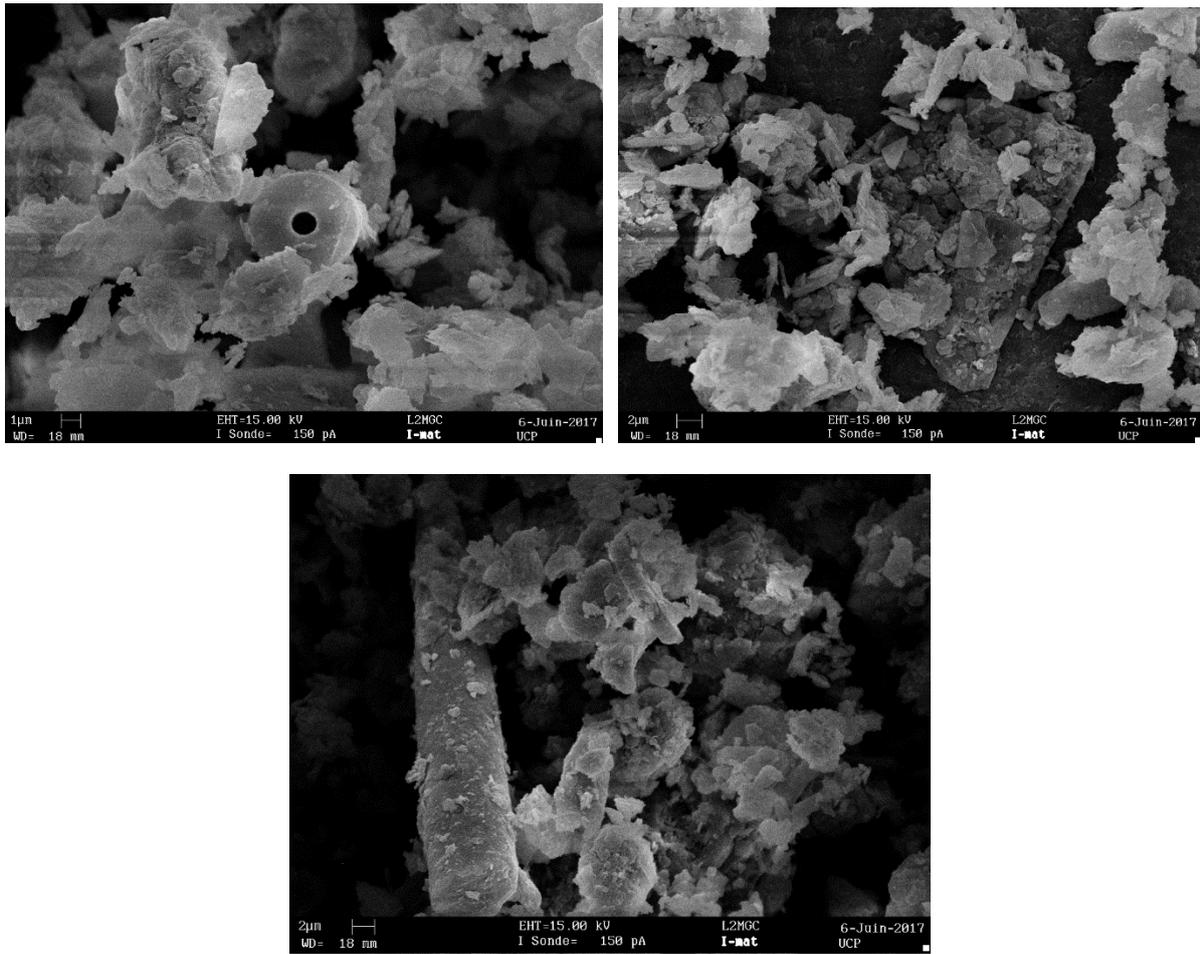


Figure II-15: Vue générale de la matière solide – frange 0 -125 μm.

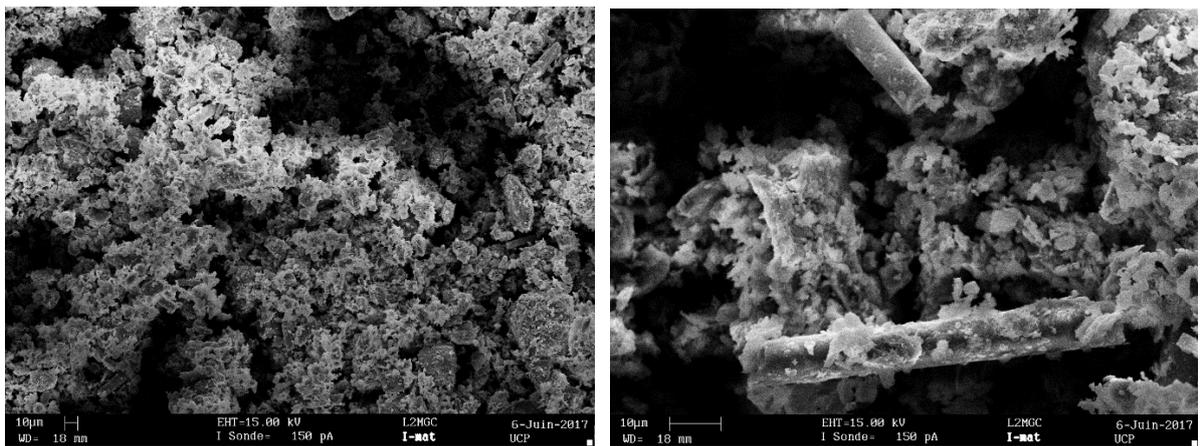


Figure II-16: Vue générale de la matière solide – frange 0 -80 μm- Présence de spicules à droite.

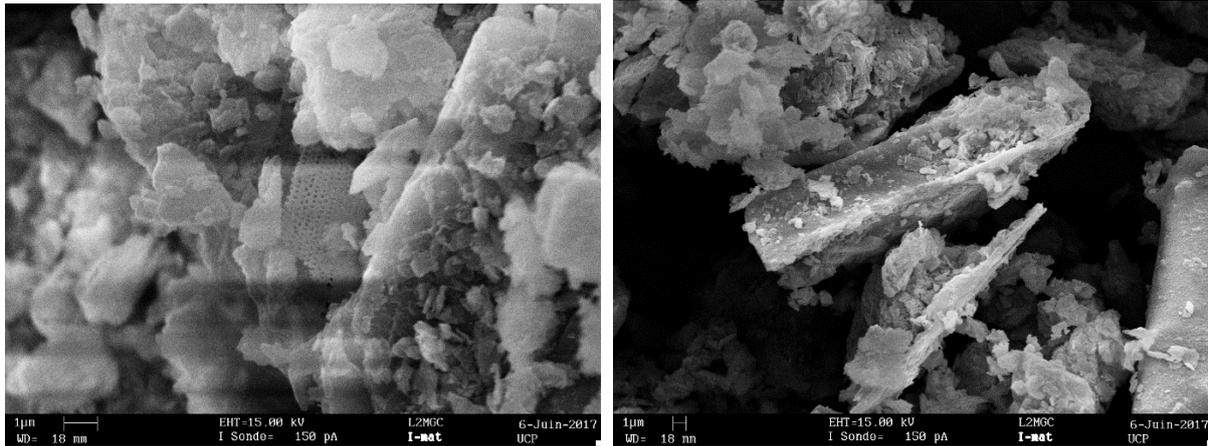


Figure II-17: Vue générale de la matière solide – frange 0 -63 μm --Présence d'une diatomée à gauche.

Des analyses EDS ont également été réalisées à l'aide d'un MEB environnemental de paillasse. Les analyses réalisées sur le matériau naturel, sans sel et sans matières organiques sont données dans le **figure II-18**, les teneurs pondérales en éléments chimiques présents sont données dans le **Tableau II-4**. Nous observons que, la composition minéralogique est similaire pour les trois échantillons. Comme attendu, les chlorures sont absents du matériau lavé (sans sel). Nous notons également que le traitement à 375°C réalisé pour éliminer la matière organique tel qu'exposé en début de ce chapitre semble également supprimer le sel de l'échantillon.

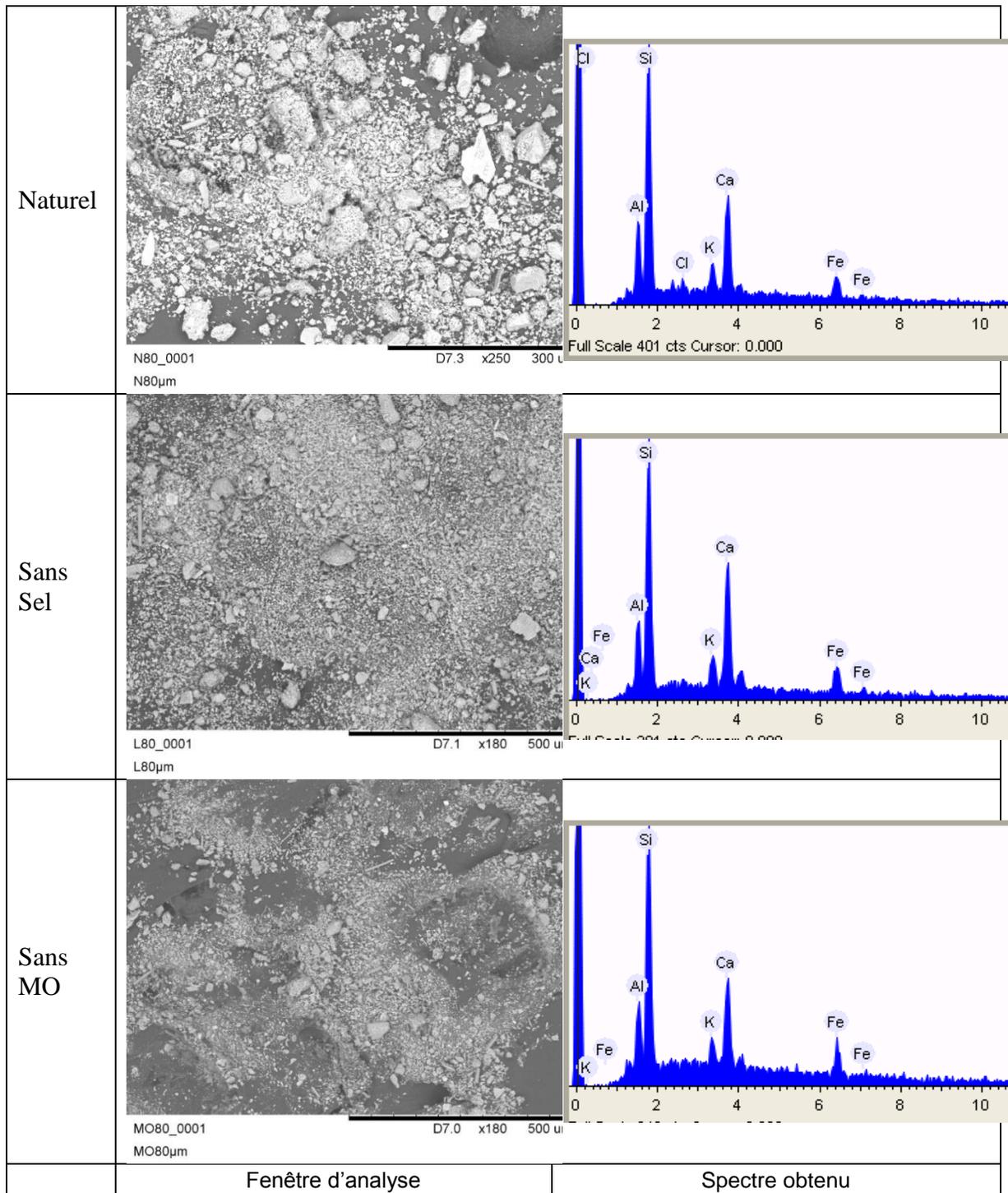


Figure II-18: Observations MEB et micro-analyse EDX sur les échantillons naturels, sans sel, sans MO.

Tableau II-4: Mirco analyses EDX sur les échantillons (% pondéral d'éléments)

	Naturel	Sans Sel	Sans MO
Al	11,0	10,1	10,8
Si	38,5	33,5	36,2
Cl	1,6	-	-
K	6,0	6,0	6,5
Ca	24,9	28,6	23,1
Fe	17,9	21,7	23,5

Une analyse de la diffraction des rayons X a été réalisée essentiellement sur plaques orientées. Le diffractogramme obtenu pour le matériau naturel est présenté dans la **figure II-19**. Nous observons deux pics de diffractions principaux pour des valeurs de 2θ de $26,5^\circ$ et $20,9^\circ$, correspondant respectivement à des valeurs de la distance inter-réticulaire d de $3,35 \text{ \AA}$ et $4,24 \text{ \AA}$. Ces deux pics correspondent aux angles de diffraction principaux du quartz. Les autres pics de diffraction présentent une intensité très inférieure. Ils mettent en évidence la présence de calcite (pics à 2θ égal à $29,4^\circ$ et $22,9^\circ$) et à des argiles de différentes natures. Pour s'assurer de la nature des phases argileuses en présence, un diagramme de diffraction a également été réalisé sur le matériau préalablement thermolysé à 550°C . En effet, à cette température, les argiles de type kaolinite sont transformées, et leurs pics de diffraction disparaissent, alors que les argiles de type illite sont encore présentes. L'observation de ces deux diffractogrammes permet alors de conclure sur la présence d'argiles de type illite (maintien du pic à $2\theta = 8,9^\circ$ ($d = 9,9 \text{ \AA}$), et de type kaolinite (disparition des pics à $d = 7,15 \text{ \AA}$, $3,57 \text{ \AA}$ et $2,33 \text{ \AA}$). Il apparaît toutefois que le pic représentatif de la kaolinite présente une intensité très faible au regard des autres pics de diffraction. Ceci laisse à penser que la kaolinite est présente en faible quantité dans le matériau. À noter que ces argiles ne font pas partie de la famille des argiles gonflantes.

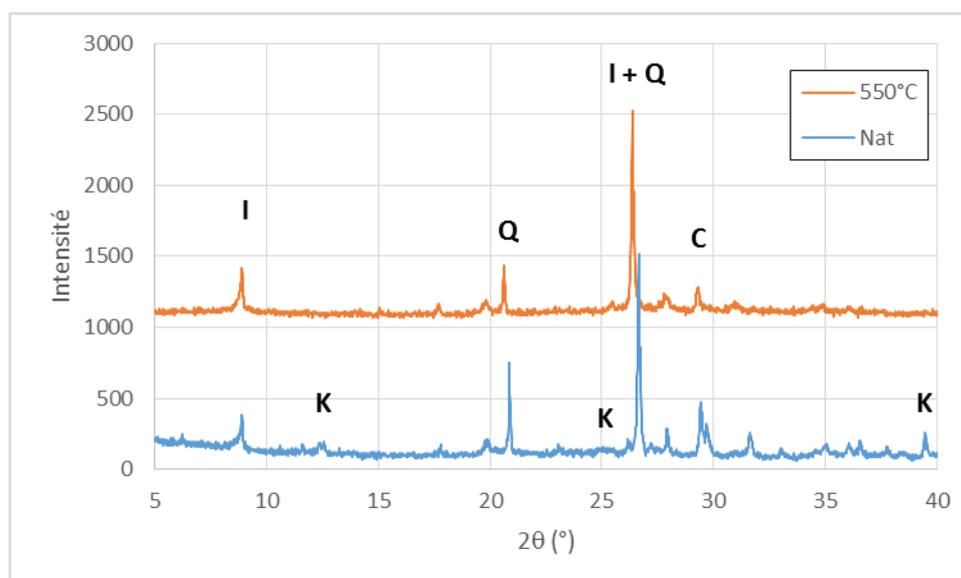


Figure II-19: Analyse DRX du matériau naturel et thermolysé à 550°C .

Une analyse de la diffraction des rayons X a également été réalisée sur chacune des franges 0-40 μm , 0-63 μm , 0-80 μm et 0-125 μm du matériau naturel (**Figure II-20**). Nous notons que toutes les espèces minérales présentes le sont à toutes les échelles du matériau. De plus, on remarque que, logiquement, les pics représentatifs de la kaolinite et de l'illite sont d'autant plus intenses que la coupure granulométrique est petite.

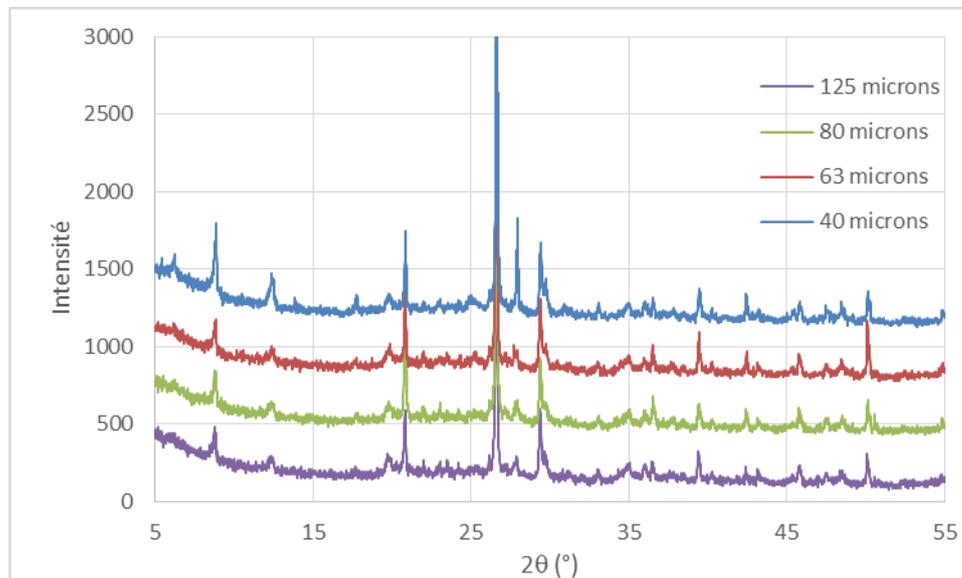


Figure II-20: Analyse DRX des différentes franges granulométriques.

Une analyse de la composition des échantillons sans sel et sans matières organiques a été menée par diffraction des rayons X (**Figure II-21**). Les résultats obtenus montrent ici encore que les espèces minérales sont présentes dans les trois échantillons naturels, sans sel, et sans matières organiques.

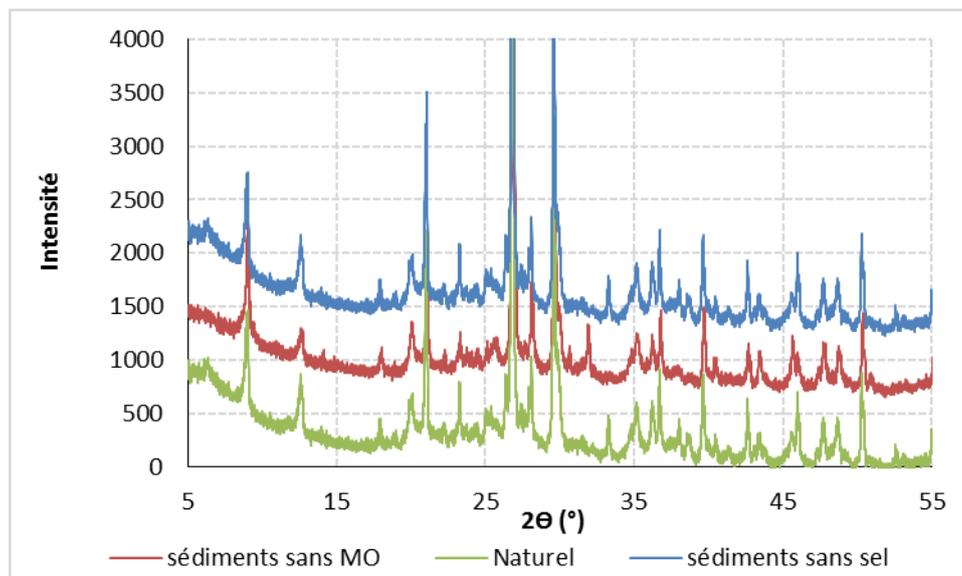


Figure II-21: Diffractogrammes des échantillons naturels, sans sel, et sans matières organiques.

Des analyses thermique différentielle et thermogravimétrique ont été menées sur les différentes franges granulométriques du matériau naturel. Les résultats (**Figure II-22**) traduisent, comme les analyses DRX et MEB, une similarité des compositions minéralogiques des différentes fractions

granulaires. Une différence importante est observée sur la courbe de perte de masse de la frange 0-125 μm pour les basses températures. Cet écart est imputable à un séchage incomplet de cette prise d'échantillon avant l'analyse thermique.

La courbe d'évolution du flux de chaleur dégagé montre un premier accident vers les basses températures correspondant au départ de l'eau restante dans les prélèvements. L'analyse confirme ensuite la présence d'argiles. En effet, nous observons une perte de masse associée à un flux endothermique centré autour de 550°C correspondant à la déshydroxylation des argiles. Nous notons ensuite une perte de masse marquée autour de 750°C traduisant la décarbonation des éléments calciques présents.

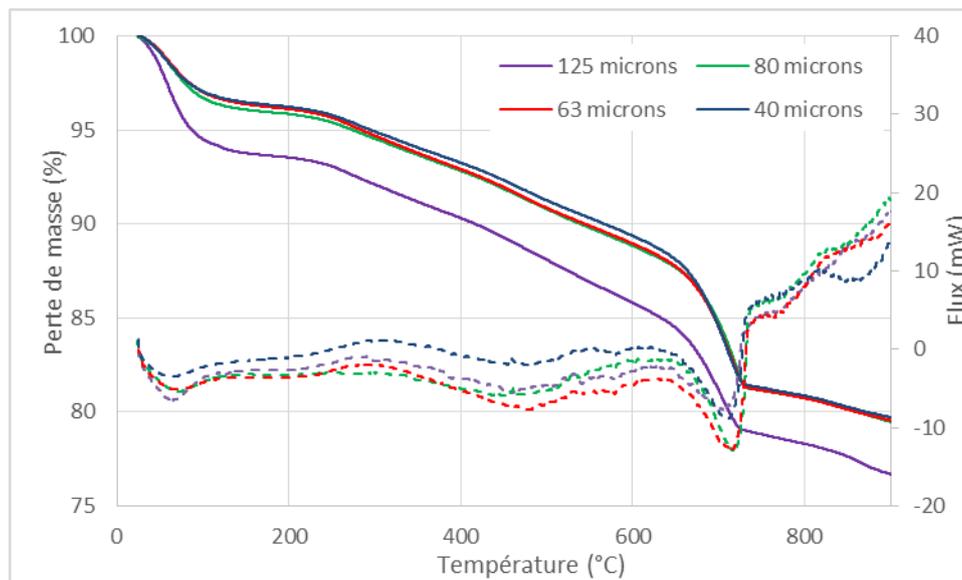


Figure II-22: Analyse TD/TG des différentes franges granulométriques.

Partie II. Moyens expérimentaux

1. Introduction

Cette partie est consacrée à la description des moyens expérimentaux utilisés dans notre étude. En effet, le comportement rhéologique des sédiments a été élaboré suivant deux types d'essais rhéologiques. Le premier type d'essai est réalisé à l'aide du rhéomètre Kinexus équipé d'une géométrie plan-plan. Cette configuration a été utilisée afin de mettre en évidence les courbes d'écoulement représentatives du comportement rhéologique visco-plastique de suspensions assimilées à un liant enrobant des inclusions granulaires dont l'étendue granulométrique est progressivement réduite afin de détecter leur influence. Dans ce travail, la structuration de la contrainte limite de cisaillement dynamique et de la viscosité en fonction de la fraction volumique solide est particulièrement étudiée pour des suspensions âgées au plus de 4 min en début du test. En condition statique, la contrainte limite de cisaillement (95) est également étudiée au moyen d'une configuration scissométrique pour différentes familles de suspensions en retenant comme paramètres d'influence, l'étendue granulométrique et la fraction volumique solide. Deux études distinctes ont été conduites :

L'une en utilisant un rhéomètre Brookfield Soft Solid Tester équipé d'un outil Vane et un récipient de grandes dimensions contenant les suspensions à caractériser. Le protocole de caractérisation développé a permis notamment d'étudier l'influence du temps sur le comportement rhéologique des suspensions sans que le vieillissement potentiel ne dépasse 90min.

La seconde en utilisant un rhéomètre Anton Paar MCR 101 équipé d'un outil Vane et un récipient de grandes dimensions et contenant les suspensions à analyser. Le protocole de caractérisation développé vient compléter les données précédentes pour des suspensions au très jeune âge.

2. Essai rhéologique à l'aide du rhéomètre Kinexus

2.1. Rhéomètre Kinexus

2.1.1. Définition

Pour nos travaux de caractérisation des propriétés rhéologiques, nous avons tout d'abord utilisé un rhéomètre rotationnel Kinexus, Malvern. C'est un rhéomètre à contrainte imposée, mais il peut toutefois fonctionner à taux de cisaillement imposé grâce à une boucle de rétroaction qui permet d'ajuster la contrainte appliquée au taux de cisaillement désiré. Il accepte toutes les géométries conventionnelles de caractérisation rhéométrique de cisaillement simple, d'oscillation et d'écrasement dans la limite du capteur de force normale de 50N. Le logiciel rSpace assure l'interface de pilotage et permet notamment de configurer les fonctions critiques suivantes :

- Contrôle en rotation (oscillation, cisaillement) - couple, vitesse et position,
- Contrôle vertical (axial) - entrefer et force normale,
- Contrôle de la température.

Ce rhéomètre offre une flexibilité du choix des paramètres sur des séquences déjà présentes, ou bien des tests entièrement personnalisés. Le rhéomètre peut être équipé d'une géométrie supérieure mobile munie d'une tige qui se verrouille sur une bague du rhéomètre. Les choix possibles d'outils sont variés et fonction des besoins. Le rhéomètre possède un système de reconnaissance automatique de la géométrie.

2.1.2. Choix du plan-plan

Ayant un entrefer ajustable, la géométrie plan-plan convient aux matériaux granulaires de tailles diverses et de faibles quantités (96). Son emploi est facile par comparaison à la géométrie cône-plan qui est très sensible au remplissage. Pour les essais de caractérisation dynamique, cette géométrie plan-plan d'un diamètre de 40mm est retenue. Pour ce type de géométrie, le cisaillement n'est pas homogène entre les deux plans. Il est nul au centre et maximum à la périphérie (97). Ce qui fait que, surtout à bas taux de cisaillement, une partie de l'échantillon peut ne pas être cisailée.

Dans cette partie, deux types d'essais sont réalisés à l'aide du rhéomètre Kinexus. Des essais par des essais de vieillissement (à taux imposé) et des essais par palier de contrainte (à contrainte imposée).

Ces deux essais seront détaillés par la suite.

2.1.3. Mise en place de l'échantillon

Trois méthodes de mise en place de l'échantillon sont testées par Pierre (98):

- Mise en place rapide sans arasement
- Mise en place progressive de l'échantillon de façon à obtenir une quantité d'échantillon qui occupe exactement l'entrefer
- Mise en place rapide avec arasement des matériaux débordés des deux plans du rhéomètre.

Pierre (98) a montré que la mise en place de l'échantillon n'influe pas la courbe d'écoulement obtenue.

Nous choisissons alors, une mise en place rapide de l'échantillon, suivie après fixation de l'entrefer d'un arasement des matériaux débordés de façon à obtenir un échantillon de diamètre égal à celui de la géométrie supérieure.

2.1.4. Choix de l'entrefer

La taille de l'entrefer doit être choisie en prenant en compte la taille des grains du matériau testé ainsi que son comportement rhéologique. Pour les fluides Newtoniens, l'entrefer doit toujours être inférieur à 0,5 mm en raison des problèmes de stabilité du film aux bords des plateaux. Par contre, pour les fluides complexes l'entrefer est généralement supérieur à 0,5mm. Dans la littérature, on recommande un entrefer au moins dix fois plus grand que la taille des grains du matériau (99) afin de réduire les risques de blocage granulaire dans la cellule de mesures. Les matériaux prélevés dans l'estuaire de la Rance présentent des grains de diamètre maximal de 160 μm malgré la dominance des particules de diamètre voisine de 80 μm . L'entrefer choisi doit être supérieur à 1,6mm. Néanmoins, pour conforter le choix de l'entrefer nous avons effectué l'essai avec des matériaux de caractéristiques déjà connues et un comportement qui ressemble à la vase du Lyvet (vase naturelle). Ces essais sont réalisés avec des matériaux prélevés dans la Baie de Quiberon (1). Les essais sont réalisés à 80% de

teneur en eau afin de tester le protocole expérimental réalisé avec le rhéomètre Kinexus et caler l'entrefer à utiliser durant les essais qui suivent.

Les essais sont réalisés pour un entrefer de 1 mm, 2 mm et 3 mm en appliquant pendant une minute un taux de cisaillement constant ($0,01 \text{ s}^{-1}$; $0,1 \text{ s}^{-1}$; 1 s^{-1} ; 10 s^{-1} et 100 s^{-1}). Pour l'entrefer 3 mm, la convergence du signal du taux de cisaillement vers la valeur de consigne est logiquement plus rapide à mesure que la valeur de consigne augmente. Pour la valeur la plus faible ($0,01 \text{ s}^{-1}$), le taux de cisaillement se stabilise après 18 s (Figure II-23).

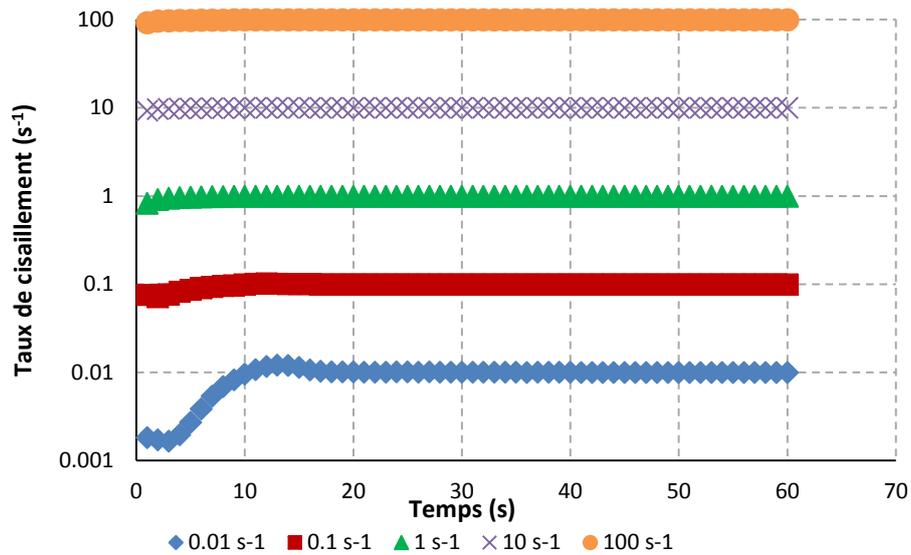


Figure II-23: Les différents signaux de taux de cisaillement en fonction du temps. Essais réalisés avec un entrefer de 3mm.

Pour le signal de la contrainte de cisaillement, sauf pour l'essai à $0,01 \text{ s}^{-1}$, passe par un maximum et tend progressivement vers une valeur moyenne stable peu après 30 s par rapport au début de l'essai. En revanche, pour l'essai de cisaillement réalisé à $0,01 \text{ s}^{-1}$, le signal de la contrainte de cisaillement ne se stabilise pas pendant la minute de l'essai (Figure II-24). Nous proposons alors de prolonger le temps des essais jusqu'à 10 min.

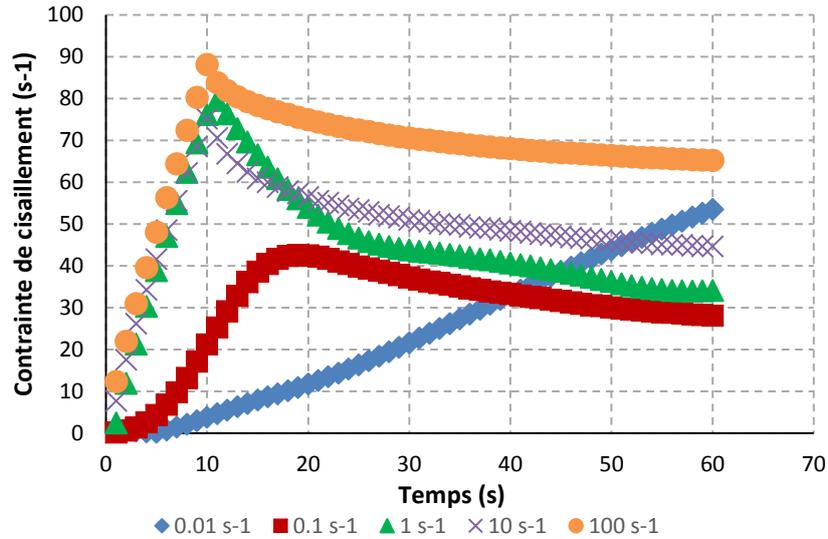


Figure II-24: Evolution de la contrainte de cisaillement pour les différents essais. Essais réalisés avec un entrefer de 3mm.

L'évolution de la contrainte moyenne de cisaillement en fonction du taux moyen de cisaillement est présentée dans la Figure II-25.

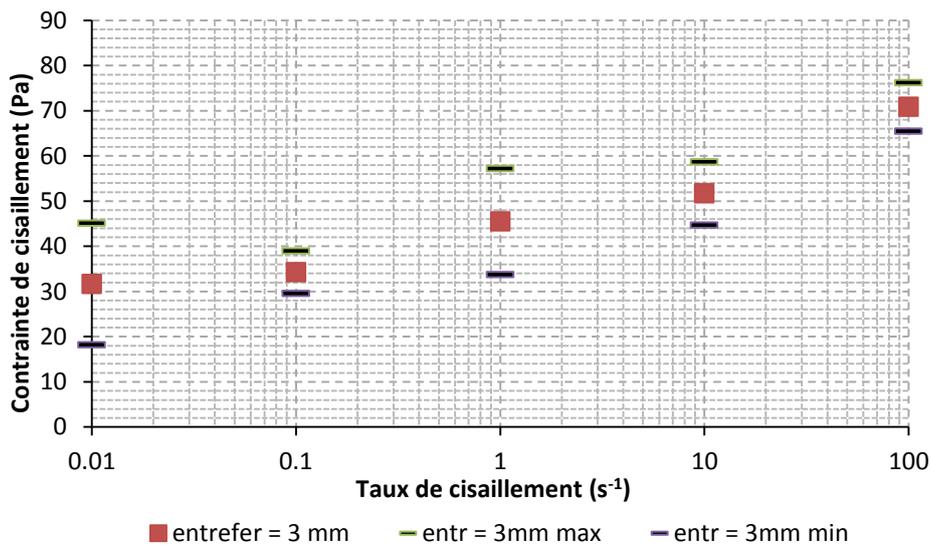


Figure II-25: Mise en évidence de la courbe d'écoulement obtenue avec un mélange liquide-solide (sédiments de la baie de Quiberon) – W = 80%. Essais réalisés avec un entrefer de 3mm.

Ces résultats sont comparés avec ceux obtenus en imposant un entrefer de 1 et 2mm. Les courbes d'écoulement sont présentées sur la Figure II-26. Nous notons que les résultats obtenus pour des entrefers de 2 et 3mm sont sensiblement équivalents et qu'une dispersion des données apparaît avec l'entrefer de 1mm. Compte tenu que les granulométries des sédiments de l'estuaire de la Rance sont moins étendues que celles de la baie de Quiberon, un entrefer de 2mm a été finalement retenu.

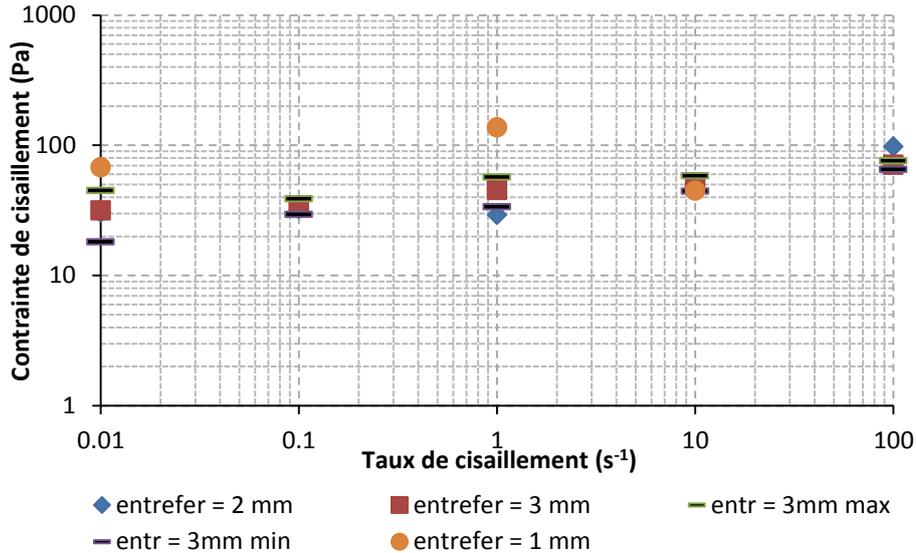


Figure II-26: Mise en évidence de la courbe d'écoulement obtenue avec un mélange liquide-solide (sédiments de la baie de Quiberon) – W = 80%. Essais réalisés avec un entrefer de 3mm.

2.1.5. Problèmes durant le cisaillement

Durant les essais rhéologiques au rhéomètres Kinexus, le cisaillement n'est donc pas homogène dans tout l'entrefer, il sera localisé dans une zone présentée sur la **Figure II-27**. On peut confronter plusieurs problèmes. L'évaporation est l'un de ces problèmes qui cause la diminution du volume cisailé et la variation de la fraction volumique solide et par la suite de la viscosité de l'échantillon testé. Afin d'éviter ce problème on a recours à l'utilisation d'un couvercle anti-évaporation qui se place autour de la géométrie et réduit cet effet.

Durant les essais rhéologiques, le problème d'hétérogénéité se manifeste selon deux phénomènes (**Figure II-27**) :

2.1.5.1. Phénomène de glissement

Le cisaillement d'un fluide complexe entre les deux plans lisses d'un rhéomètre induit un phénomène de cisaillement localisé à la paroi qui s'apparente à l'échelle de l'échantillon de vase placé dans la cellule à du glissement aux parois. Le déroulement d'un essai dans ces conditions fausse la mesure car la totalité du film n'est pas cisailée. Au contact de la paroi, on distingue une zone pariétale déplétive en particule qui favorise le glissement : c'est l'effet sigma. L'importance de ce phénomène dépend de la viscosité du matériau et du taux de cisaillement qui lui est appliqué. Afin d'éviter ce phénomène de glissement, les surfaces des plans du rhéomètre sont recouvertes de papier de verre à une rugosité déterminée qui assure une distribution homogène de la fraction volumique solide dans le volume testé. Dans le commerce, le type de papier de verre fait référence à la nomenclature ISO6344 dans laquelle un numéro sans unité est associé à une taille spécifique de grains. Pour nos essais, nous avons retenu un papier de verre possédant un indice de rugosité de 180 équivalent à une taille de grains de 82 micromètres (100) pour être cohérent avec la dominance des tailles de grains des matériaux de l'estuaire de la Rance.

2.1.5.2. Phénomène de sédimentation

Pendant l'essai, et lorsque la concentration volumique solide est faible, le phénomène de sédimentation peut s'établir et induire une hétérogénéité au sein de l'échantillon. Le cisaillement se concentre alors dans une couche de densité plus faible que la densité initiale (101). Afin de limiter le problème d'hétérogénéité, on a recours à une phase de pré-cisaillement suivie d'une phase de destructuration qui à son tour participe à l'homogénéisation de l'échantillon au besoin. Cette phase de caractérisation est ensuite suivie d'une phase de restructuration qui sera la seule phase dont les résultats seront analysés.

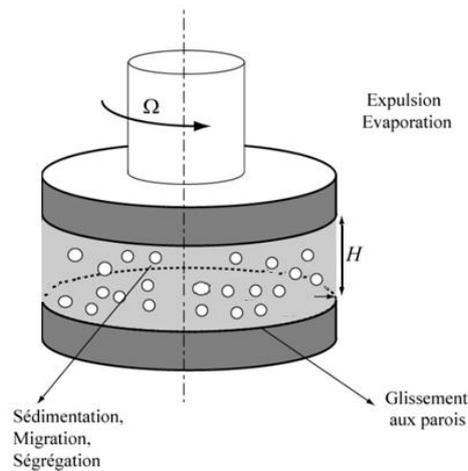


Figure II-27: Problèmes expérimentaux lors d'un essai rhéologique.

2.2. Préparation de l'échantillon

Les sédiments testés ont été prélevés dans le piège à sédiments mis en œuvre au voisinage de l'écluse du Lyvet à différents instants au cours de son remplissage (92). Les volumes prélevés ont été séchés à température ambiante sous flux d'air léger. Au-delà du séchage, les mottes ont été brisées et broyées pour obtenir une poudre. La poudre est ensuite séparée en différentes bandes granulométriques avec l'objectif de distinguer d'éventuelles interactions granulaires au sein des suspensions liquide/solides par tamisage à voie sèche. La décomposition suivante est retenue : 0-40 μm , 0-63 μm , 0-80 μm et 0-125 μm . Enfin, une partie du volume est débarrassée des sels et une autre des sels et de la matière organique. La préparation de ces sédiments est détaillée dans le chapitre II- partie I- 2.1. En fait les configurations testées avec le rhéomètres Kinexus :

- 1- Caractérisation de l'ensemble,
- 2 - Caractérisation des sédiments lavés (sans sels)
- 3 - Caractérisation des sédiments chauffés (sans MO).

Pour une coupure granulométrique donnée, entre 5 et 10 grammes de sédiments sont pesés avec une balance de précision. Une quantité d'eau distillée est ajustée à l'aide d'une pipette afin d'obtenir la teneur en eau fixe prévue (entre 120% et le packing). Le chronomètre est déclenché au moment de l'ajout de l'eau. Le mélange est ensuite brassé énergétiquement. A partir du moment où le chronomètre est déclenché, la fin du mélangeage ne doit pas excéder une minute. Ce temps doit être

le même pour tous les essais. Le mélange est ensuite déposé sur le papier verre du plan inférieur du rhéomètre. L'entrefer entre les plateaux de la cellule plan-plan est ensuite fixé à 2 mm, et l'excédent de matière qui déborde de la limite des deux plans est arasé de façon à obtenir un échantillon de diamètre égal à celui de la géométrie supérieure. Enfin, l'essai peut être déclenché et l'âge de la suspension est alors de 4 min.

2.3. Processus de mesure

Le but de ces essais est d'étudier le comportement rhéologique des vases du Lyvet, ainsi que l'influence des compositions granulaires et non granulaires sur ce comportement.

Deux types d'essais sont réalisés à l'aide du rhéomètre Kinexus :

- Essais à taux de cisaillement fixé : ce type d'essai est réalisé pour prévenir des effets du vieillissement sur la caractérisation des sédiments ainsi que le rôle des inclusions granulaires et non granulaires sur ce comportement. Chaque suspension calibrée est sollicitée durant 10 min de minutes maximum à une valeur imposée du taux de cisaillement.

- Essais par paliers de contrainte de cisaillement : Ce type d'essai est réalisé afin de mettre en évidence une courbe d'écoulement et de caler un modèle rhéologique correspondant au mélange liquide-solide calibré en fraction volumique solide et en population de grains.

2.3.1. Essais à taux de cisaillement fixe

Cet essai est réalisé dans le but d'étudier l'influence du temps de vieillissement sur le comportement rhéologique de chaque frange granulométrique étudiée en fonction de la valeur du taux de cisaillement imposé. Les essais sont conduits à 20°C. Chaque suspension est testée en cisaillement simple en imposant une vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) constante pendant 10 min. La durée est suffisamment longue pour faire converger la valeur moyenne de la contrainte de cisaillement (τ) et de la contrainte normale (σ) et suffisamment courte pour limiter les effets du vieillissement au cours de la caractérisation. Ainsi, on impose à l'échantillon jeune (après 4 minutes de préparation et d'homogénéisation) durant dix minutes un taux de cisaillement constant. De manière à construire une courbe d'écoulement, les essais sont reproduits en modulant ($\dot{\gamma}$) entre $0,01 \text{ s}^{-1}$ et 100 s^{-1} . Ce protocole est également utilisé pour simuler le vieillissement des suspensions. Après le premier test de cisaillement, on laisse vieillir l'échantillon pour un temps de repos d'une minute et on refait l'essai en imposant le même taux de cisaillement, après on laisse vieillir l'échantillon de 5 minutes et ainsi de suite jusqu'à obtenir un échantillon âgé de 90 minutes (**Figure II-28**). La surface des plans est aussi rendue rugueuse au moyen de papiers de verre calibrés et adhésifs. Les courbes d'écoulements sont reconstituées à partir des tests effectués pour $\dot{\gamma}$ compris entre $0,01$ et 100 s^{-1} .

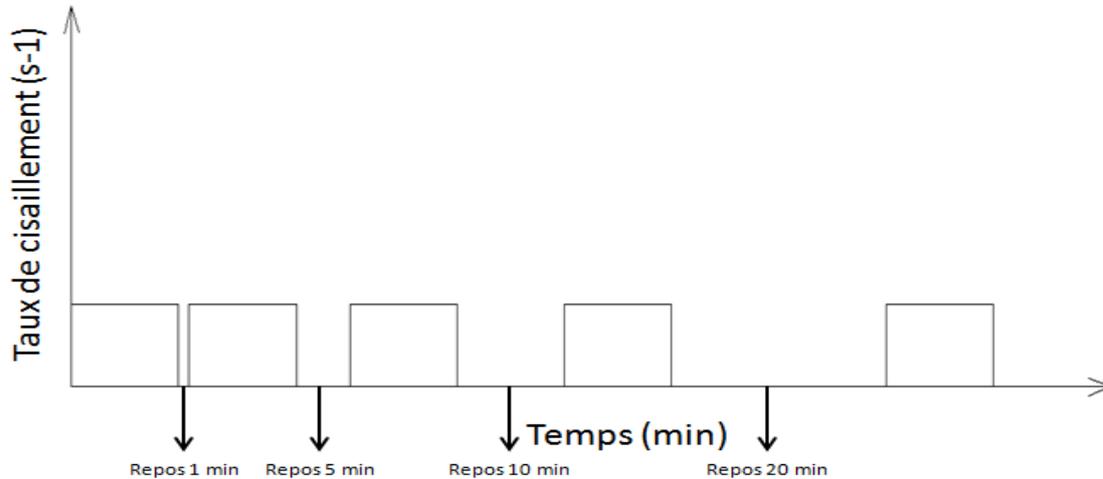


Figure II-28: Protocole des essais rhéologiques à taux de cisaillement fixe et simulation du vieillissement condition quasi isotherme à 20°C.

2.3.2. Essai par palier de cisaillement

Cet essai est constitué de trois phases (Figure II-29) :

- Phase de pré-cisaillement : cette phase consiste à imposer durant une minute une contrainte de cisaillement constante, assurant une vitesse de cisaillement modérée qui peut être contrôlée quelle que soit la fraction volumique solide de l'échantillon testé. Cette phase a pour but d'homogénéiser le fluide dans la géométrie de mesure,
- Phase de déstructuration : cette phase correspond à une rampe croissante à pas de contrainte de cisaillement d'une minute. Sa durée totale est de 30 minutes. La première partie de cette phase est généralement associée à des déformations dans le régime solide,
- Phase de restructuration : cette phase correspond à une rampe décroissante à pas de contrainte de cisaillement d'une minute. Elle dure 30 minutes. Cette phase est retenue pour décrire le comportement rhéologique de la suspension solide. En effet, elle permet d'atteindre des niveaux de taux de cisaillement plus faible en écoulement que la courbe de déstructuration (102). Pour ces raisons, seuls les résultats de cette phase sont interprétés dans la suite.

Les essais sont réalisés à température imposée (20°C). Finalement, les courbes d'écoulement obtenues sont analysées et un modèle rhéologique est adapté mathématiquement.

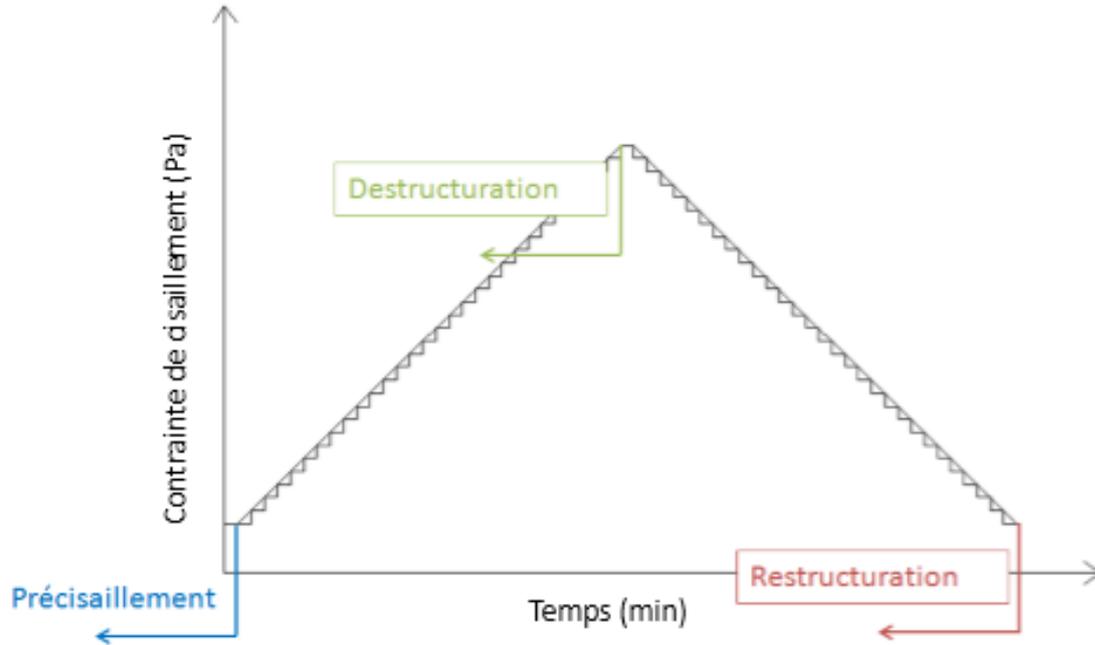


Figure II-29: Protocole des essais rhéologiques par palier de contraintes imposés.

3. Choix d'une géométrie Vane

Le recours à une géométrie Vane est justifié pour la réalisation des essais en condition quasi statique afin d'établir un seuil limite de cisaillement pour les suspensions visco-plastiques. Cette démarche permet de contourner un risque de cisaillement partiel des suspensions au sein de la cellule de mesure plan-plan qui fausserait cette mesure du seuil. Pour les essais, nous avons utilisé un outil à quatre pales de 22 mm de diamètre et de 40 mm de hauteur. Un récipient de grandes dimensions (au regard de la taille de l'outil) est utilisé.

L'identification rhéométrique en condition quasi statique est réalisée au moyen du protocole décrit sur la **figure II-30**. Ces essais sont menés avec un rhéomètre Anton Paar MCR série 101.

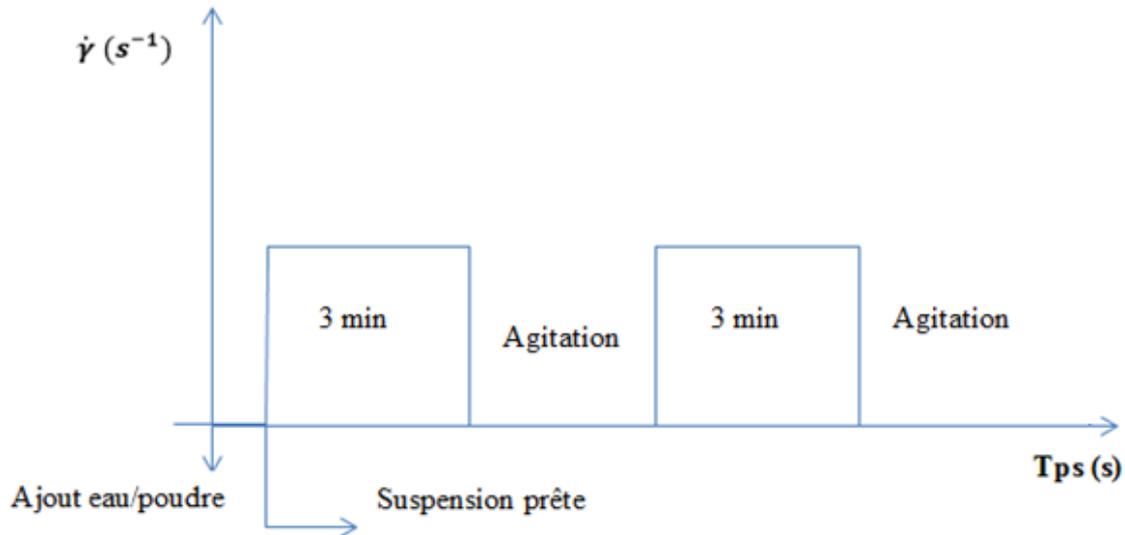


Figure II-30: protocole expérimentale de la formulation des suspensions jusqu'à la fin de chaque essai.

Ce protocole de caractérisation a été développé à la suite des essais réalisés au moyen de la cellule et à taux de cisaillement constant imposé à une suspension jeune pendant une durée de 10 min. Le faible avancement du vieillissement des suspensions durant environ une heure a rendu ce protocole acceptable :

La vitesse de cisaillement est fixée constante est égale à $\dot{\gamma} = 0,5 s^{-1}$ (compromis sur la vitesse pour limiter la mobilisation de la part visqueuse et l'avancement du vieillissement potentiel des suspensions),

- 200 g de poudre de matière solide sont versés un récipient,
- La teneur massique d'eau est comprise entre 80% et 160% soit 160g d'eau au départ et une augmentation de 20g d'eau est faite pour adapter la suspension
- Une fois la suspension formulée, le mélange est placé dans la cellule du rhéomètre
- La géométrie Vane est placée sur la partie mobile du rhéomètre et descend dans le mélange à un gap de 20 mm,
- Chaque essai dure 3 minutes, ce qui correspond à 180 points en raison d'un point enregistré par seconde,
- A la fin de chaque essai, le récipient est démonté et le même échantillon est remué pendant environ 10s pour une bonne homogénéité puis fixé à nouveau au rhéomètre pour répéter l'essai par deux fois afin de s'assurer d'un niveau de reproductibilité des résultats.

Au terme des trois essais, le récipient est démonté, une augmentation de 10% en teneur d'eau est faite dans le même échantillon et on répète la même expérience jusqu'à atteindre une teneur massique en eau de 160% dans le mélange.

Les contraintes calculées sont obtenues à partir de la loi :

$$\tau = \frac{T}{2\pi h R^2 + n 2\pi R^3 / 3} \quad \text{(Equation II-4)}$$

Avec :

$h = 40mm$ est la hauteur de la géométrie Vane,

$R = 11mm$ est le rayon de la géométrie,

n est pris égal à 1 et correspond au fait que la limite supérieure de l'outil Vane de la géométrie est positionnée à la surface libre de l'échantillon à caractériser,

T est le couple de cisaillement (N.m) mesuré par le rhéomètre.

La seconde série d'essais réalisée en recourant à une configuration de type Vane test est réalisée au moyen d'un rhéomètre soft solid tester. Un outil à 4 pâles perpendiculaires de hauteur $h = 16$ mm et de diamètre $D = 16$ mm est utilisé. Une adaptation de la géométrie de l'outil en fonction de la texture du fluide étudié reste néanmoins possible. La contrainte limite de cisaillement est également estimée au moyen de l'équation II.4 en imposant une vitesse de rotation inférieure à 1 tr/min (103) et les essais sont menés en condition d'entrefer très large. Pour chaque famille de suspension étudiée, les essais sont systématiquement répétés.

4. Conclusion

La première partie de ce chapitre a permis de définir la nature des sédiments présents dans le piège du Lyvet, et d'appréhender la variabilité du dépôt sédimentaire à l'échelle de ce piège. Cette variabilité, même limitée, a conduit à la constitution d'un échantillon moyen réalisé à partir de plusieurs prélèvements afin de disposer d'un volume de sédiments conséquent homogène pour la réalisation de la totalité des études rhéologiques envisagées par la suite.

Les analyses réalisées ont montré que le sédiment utilisé est constitué d'une partie biogène et d'une partie minérale. On trouve notamment des diatomées, de la calcite (sous la forme de spicules et de fragments de coquillages), du quartz, des feuillets d'argiles de type kaolinite et illite et des sels. La teneur en matière organique est de l'ordre de 6%. Enfin, d'un point de vue granulométrique, le matériau présente une texture dominante limono-sableuse, et la fraction argileuse ($< 2\mu m$) est de 18%.

Le découpage de l'échantillon en différentes franges granulaires depuis une frange 0-40 μm , jusqu'à 0-160 μm a mis en évidence la présence de l'ensemble des espèces minérales et biogènes à toutes les échelles granulométriques du matériau.

Pour la suite, des échantillons de matériau sans sel (obtenu par lavage) et sans matière organique (obtenu par calcination) ont été préparés et analysés. Les analyses minéralogiques ont ainsi confirmé d'une part l'absence de sel dans l'échantillon lavé, et d'autre part l'absence de matières organiques et également de sel dans le matériau sans matières organiques.

Dans une deuxième partie, les matériels rhéométriques et protocoles utilisés pour la caractérisation rhéologiques des matériaux sont présentés.



Chapitre III. Rhéologie des sédiments

1. Introduction

De par la constitution des sédiments (présentée au chapitre II), l'omniprésence des fines et des éléments argileux, de la matière organique, des limons, des sels, on s'attend en abordant cette partie rhéologique à décrire des comportements complexes plus ou moins couplés avec des suspensions potentiellement réactives. Cette partie du mémoire est structurée pour faire émerger des informations qui renseignent, étape par étape, sur « le comment » étudier le comportement de telles suspensions et en fournissant des données fiabilisées qui caractérisent véritablement le/les comportements. Face à la granulométrie présente et l'omniprésence des éléments fins et une étendue granulaire jusqu'à 160 μm , les suspensions produites par addition d'eau forment un milieu cohésif que d'éventuelles inclusions peuvent perturber. Dans la démarche de caractérisation déployée, nous avons repris le protocole de Mélinge (1) qui à partir d'une granulométrie donnée produit « n » granulométries « réduites » en retirant progressivement des volumes initiaux les éléments solides les plus gros et ainsi de suite. Cette démarche a le mérite de tenter de faire émerger le rôle des inclusions et leurs interactions en introduisant dans l'analyse plus ou moins explicitement la taille des éléments présents.

Ainsi, on distingue des suspensions qui seront formées à partir des granulométries réduites suivantes :

- 0 ---> 40 μm ,
- 0 ---> 63 μm ,
- 0 ---> 80 μm ,
- 0 ---> 100 μm ,
- 0 ---> 125 μm ,
- 0 ---> 160 μm .

Ensuite, dans le contexte réel, le fluide porteur est potentiellement riche en éléments dissous susceptibles de faire réagir les composés de la matière solide. Cet aspect peut représenter une contribution à la structuration des suspensions. Dans nos travaux, nous avons intégré cette notion en introduisant un postulat : à l'échelle d'analyse (d'ordre macroscopique) si les phases doivent réagir, nous pouvons cependant disposer d'une période (à définir) durant laquelle, comme un béton, une phase dormante existe. En complément, pour faciliter la réalisation des travaux, nous avons substitué l'eau du site par de l'eau distillée et de l'eau du robinet. Néanmoins, il convenait de s'assurer que les résultats restent cohérents avec les mélanges *in situ*.

Dans le contexte bibliographique, nous avons noté que la mise en œuvre des suspensions conditionne les propriétés mécaniques et qu'un processus de sédimentation-tassement-consolidation permet de se rapprocher des propriétés *in situ*. Ce protocole est conservé et fera l'objet des travaux présentés au chapitre IV pour étudier un effet de vieillissement aux temps longs sur la résistance à la mobilisation. Aux temps intermédiaires, les suspensions sont caractérisées en les laissant reposer et en faisant en sorte que le séchage ne soit pas la source dominante du vieillissement. Pour certaines granulométries réduites, des suspensions ont été produites et caractérisées aux temps courts, c'est-à-dire que l'âge n'excède pas 10 min au terme de la caractérisation ; ce qui a permis de définir les protocoles de caractérisation destinés à montrer l'influence de la vitesse de cisaillement, la fraction volumique solide, une dimension moyenne probable des éléments solides des suspensions analysées.

Dans ce travail, nous avons négligé le caractère thixotrope des suspensions et nous avons tenté de contourner l'influence colloïdale.

2. Caractérisation des suspensions au jeune âge sous cisaillement à taux de cisaillement imposé aux temps courts et intermédiaires

Compte tenu du caractère « besogneux » et chronophage du protocole de test mise en œuvre et qu'il nécessite de grandes quantités de matière pour établir une courbe d'écoulement, seuls quelques cas d'illustrations ont été réalisés pour établir quelques ordres de grandeurs. Ainsi, en considérant la granulométrie réduite (0 – 40 μm), une suspension additionnée d'eau à fraction volumique solide fixée à 27% ($W = 150\%$) est réalisée et testée. La concaténation des résultats pour les différentes valeurs du taux de cisaillement permet de décrire une courbe d'écoulement présentée sur la **figure III-1**. Un comportement visco-plastique rhéo-épaississant est mis en évidence au moyen du protocole de test. En complément, les résultats obtenus après des durées de vieillissement sont présentés sur la **figure III-2**. Nous notons que le caractère visco-plastique rhéo-épaississant est confirmé pour les différents temps d'attente. Ces résultats montrent deux comportements distincts en fonction du taux de cisaillement.

A fort taux de cisaillement, soit environ 10 s^{-1} sur la **figure III-2**, nous notons que jusqu'à 50 min la courbe d'écoulement n'est pas trop altérée, ce qui ne semble plus être le cas à 80 min, durée pour laquelle, la structure du matériau a vraisemblablement évolué. Malgré les précautions prises, nous ne pouvons pas exclure le séchage du mélange même si le résultat est représentatif au regard de la reproductibilité (les barres d'erreurs mentionnées sur les figures correspondent à deux fois l'écart type des trois mesures). Nous pouvons admettre que l'énergie apportée à la suspension pour ce cisaillement que nous qualifions de « fort » permet de s'affranchir de possibles effets de modification de la structure du mélange testé au moins jusqu'à 50 min.

A faible taux de cisaillement, c'est-à-dire en deçà de 10 s^{-1} , nous notons que le temps de repos induit une structuration du matériau avec une variation non négligeable de la contrainte de cisaillement.

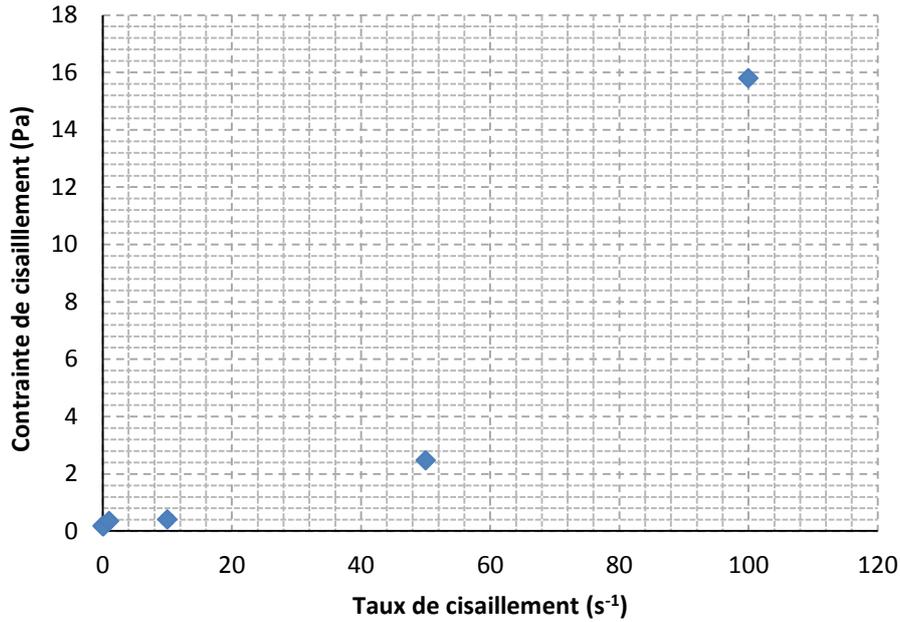


Figure III-1: Courbes d'écoulement moyennes pour la frange granulométrique 0-40 μm à l'âge de 4 min pour $W = 150\%$ ($\phi = 27\%$).

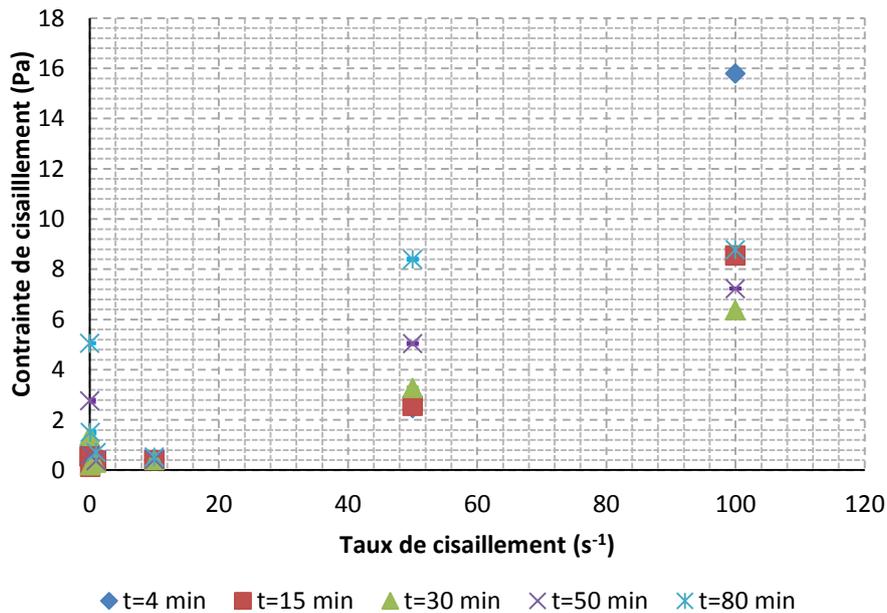


Figure III-2: Courbes d'écoulement moyennes pour la frange granulométrique 0-40 μm à différents âges pour $W = 150\%$ ($\phi = 27\%$).

2.1.1. Distinction liant- inclusions au jeune âge

Le principe de décomposition de la phase solide tel qu'il a été présenté en début de chapitre (introduction) a pour but de distinguer un éventuel effet de liant (caractère fortement cohésif de certains constituants tels que les argiles et les limons) combiné à un effet granulaire enrobé. Les résultats sont présentés sur la **figure III-3** pour des suspensions dosées à $\phi = 27\%$ ($w = 150\%$). Les

courbes d'écoulements obtenues juste après la fin de la préparation sont similaires à celle décrites précédemment et ce quelle que soit la réduction granulométrique, figures III-1, III-2. Un tel résultat suggère que le comportement rhéologique est dominé par une fraction de la phase solide. En l'occurrence, comme les fractions les plus fines se retrouvent systématiquement à mesure de la réduction granulométrique et que les courbes d'écoulement ne sont pas transformées mais seulement décalées suivant l'axe de la contrainte, cela suggère que les éléments les plus fins dictent le comportement rhéologique. Compte tenu des réductions granulométriques retenues, la frange 0-40 μm apparaît comme la partie liante et dans cette logique l'extension granulométrique à 63 puis à 80 μm tend à diminuer la contrainte de cisaillement à taux de cisaillement fixé ; ce qui est caractéristique d'un apport granulaire au sein d'une matrice liante (105). En revanche, l'extension granulométrique jusqu'à 125 μm révèle une courbe d'écoulement dont la contrainte de cisaillement est supérieure à celle de la frange 0-40 μm . Cette augmentation de la contrainte de cisaillement à taux de cisaillement fixé ne peut pas être imputée à un ajout granulaire passif et nous suspectons la présence d'un composé réactif fixé de façon privilégiée sur cette dernière frange. Cette hypothèse sera reprise par la suite avec une caractérisation plus précise de cette notion d'interaction granulaire en se concentrant plus particulièrement sur le seuil limite de cisaillement.

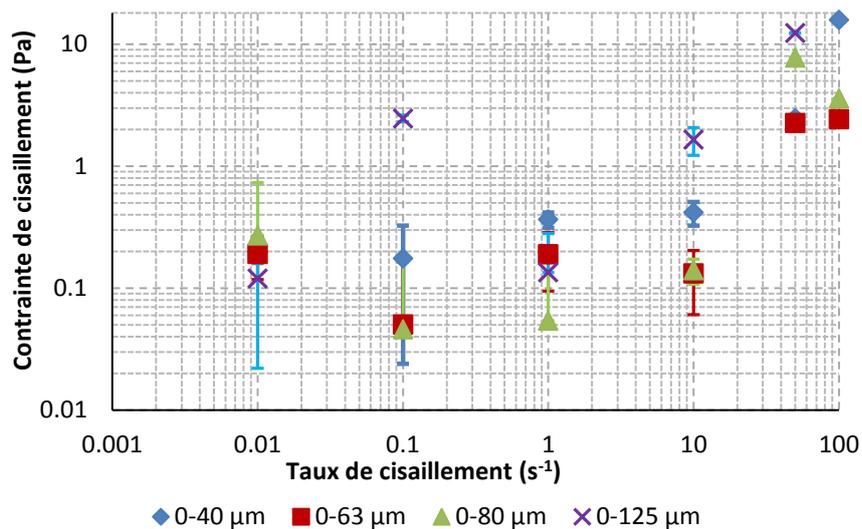


Figure III-3: Courbes d'écoulement moyennes pour différentes réductions granulométriques (0-40, 0-63, 0-80, 0-125 μm) à l'âge de 4 min pour $W = 150\%$ ($\phi = 27\%$).

2.1.2. Influence du sel et de la matière organique

Avec l'objectif de compléter l'analyse précédente, nous présentons sur la **figure III-4** les courbes d'écoulements obtenues pour des suspensions composées :

- De la phase solide naturelle (0-125 μm N) et d'eau du robinet $\phi = 27\%$ ($w = 150\%$),
- De la phase solide sans sels (0-125 μm SS) et d'eau du robinet $\phi = 27\%$ ($w = 150\%$),
- De la phase solide sans sels et sans matière organique (0-125 μm SMO) et d'eau du robinet $\phi = 27\%$ ($w = 150\%$).

Les tests sont réalisés juste après la période de préparation des suspensions. Sans expliquer complètement la reprise de contrainte de cisaillement évoquée au paragraphe précédent, nous notons que l'élimination soit des sels ou de la matière organique de la phase solide décale d'une valeur constante la courbe d'écoulement selon l'axe de la contrainte de cisaillement. Ces deux composés ne modifient pas l'effet de la vitesse de cisaillement sur les mélanges.

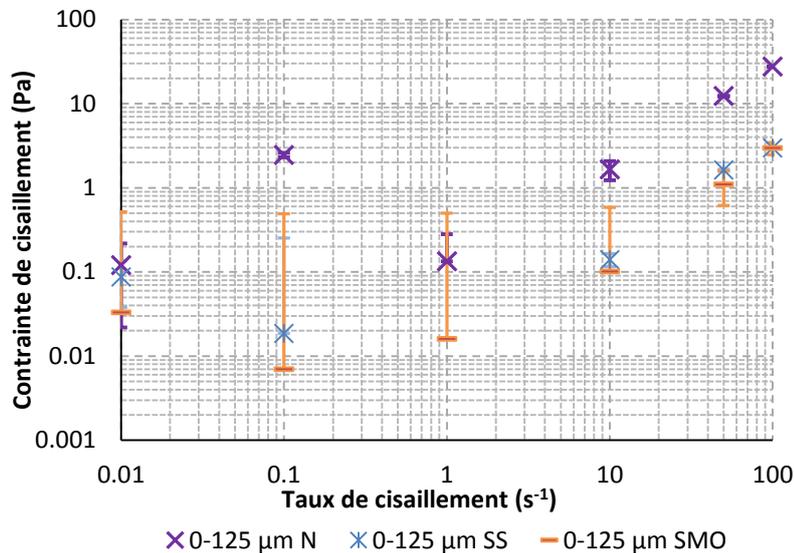


Figure III-4: Courbes d'écoulement moyennes pour la frange 0-125 µm naturel, sans sel et sans matières organiques.

Cette première série d'essais sans être complètement généralisable, suggère déjà que la fraction solide comprise entre 0 et 40 µm contrôle le comportement rhéologique de l'ensemble. L'ajout des composés de dimensions plus importantes modifie les propriétés de résistance mécanique mais ne modifie pas la courbe d'écoulement. Une interprétation des courbes d'écoulements au moyen du modèle de Herschel-Bulkley semble très appropriée pour les suspensions analysées. Un caractère structurant à bas taux de cisaillement est mis en évidence, tandis que l'énergie de cisaillement à fort taux de cisaillement inscrit le comportement des suspensions dans une signature reproductible tant que l'âge des suspensions n'excède pas 50 min. Ce point est important car cela permet de tester les suspensions non plus de façon stricte pour une valeur du taux de cisaillement fixée mais plutôt en imposant une rampe de structuration et/ou de restructuration sans craindre les risques de réactivités biochimiques au sein des suspensions. Par ailleurs, le fait que les suspensions présentent une courbe d'écoulement assez peu modifiée à fort taux de cisaillement suggère qu'une phase de d'homogénéisation pourrait être imposée pour éliminer un potentiel effet d'âge.

Pour la suite de l'exposé, nous avons intégré le fait que l'identification de la courbe d'écoulement à bas taux de cisaillement pouvait être entachée d'erreur par un possible cisaillement que partiel au sein du film formé dans la cellule plan-plan. Par la suite, compte tenu du caractère patent viscoplastique des suspensions, le seuil limite de cisaillement est identifié au moyen du Vane test en condition quasi statique au jeune âge. Régulièrement, les mélanges sont agités avec l'objectif de replacer les suspensions en condition de jeune âge.

Ensuite, la part visqueuse est identifiée, seulement, à partir des courbes d'écoulement obtenues à fort taux de cisaillement. Le caractère structurant est obtenu implicitement par comparaison d'un seuil limite de cisaillement obtenu de façon dynamique à celui mis en évidence en condition quasi statique.

2.1.3. Identification du seuil limite de cisaillement au jeune âge

La caractérisation des suspensions en condition quasi statique et au moyen de la configuration Vane est illustrée au moyen de la réduction granulométrique 0-63 μm mélangée à l'eau du robinet pour différentes valeurs de la teneur en eau (fraction volumique solide). Pour chaque suspension les essais sont répétés trois fois, **figure III-5**.

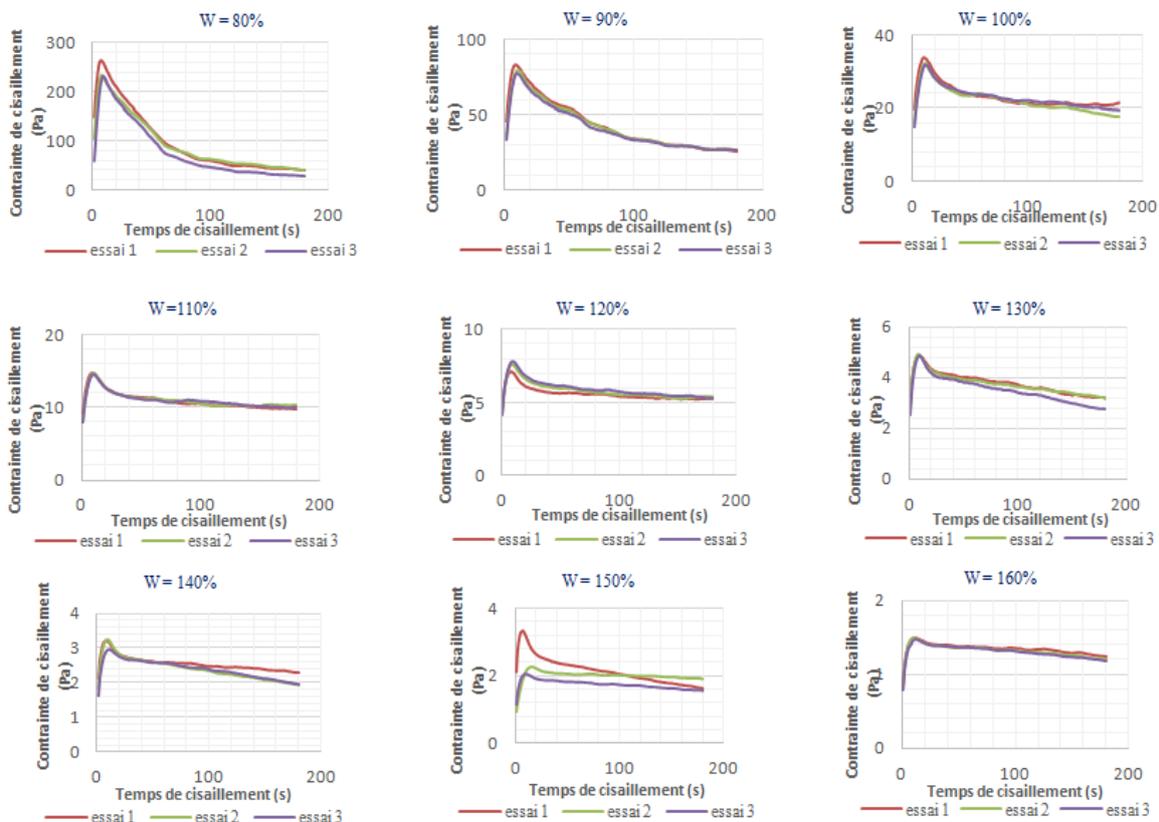


Figure III-5: Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du temps pour chaque essai et pour la réduction granulométrique des sédiments 0 - 63 μm . Influence de la quantité d'eau ajoutée et notion de répétabilité.

À l'image des résultats de la littérature, l'analyse des données de la **figure III-5** montre que la contrainte de cisaillement passe par un maximum. Ce maximum traduit la rupture plastique de l'élément de matière inscrit entre les pales de l'outil Vane par rapport au reste du fluide dans la cuve. Qualitativement, la répétition des essais montre un caractère reproductible.

Pour toutes les réductions granulométriques étudiées (0-63 μm , 0-80 μm , 0-100 μm , 0-125 μm , 0-160 μm) les résultats sont présentés sur la **figure III-6** en cumulant pour chaque réduction granulométrique les différentes textures des fluides (représentée ici par la variation de la teneur en eau : W). Chaque courbe correspond à la moyenne de trois essais. Quelle que soit la réduction granulométrique, Nous notons que l'augmentation de la teneur en eau tend à diluer les sédiments dans les mélanges ce qui a pour effet de réduire, voire éliminer, la part plastique.

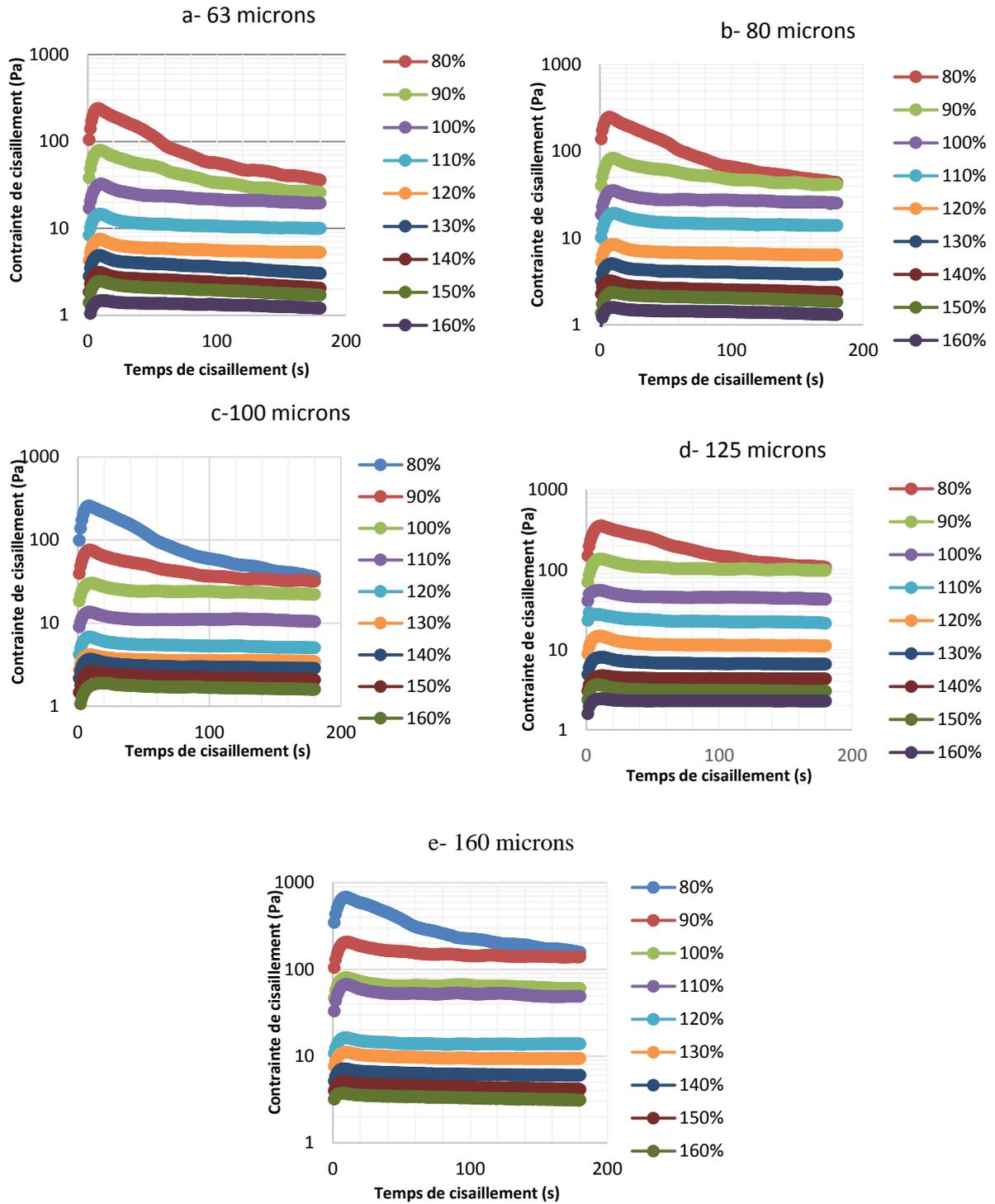


Figure III-6: Évolution de la contraite moyenne de cisaillement au cours du temps pour différentes réductions granulométriques. Influence de la quantité d'eau ajoutée pour former la suspension.

2.1.3.1. Influence des tranches granulométriques et de la fraction volumique solide

Pour chacune des cinq franges granulométriques, nous avons calculé le seuil limite de cisaillement, qui correspond au maximum de la courbe $\tau = f(t)$. Afin d'établir le caractère structurant, le seuil est relié à la fraction volumique solide de la suspension. Un exemple de résultat obtenu avec la frange granulométrique 0 – 125 μm est donné sur la **figure III-7**. Pour chaque fraction volumique solide, les trois valeurs sont reportées. Nous notons ici le caractère reproductible de la valeur du seuil. Ensuite, à l'image de la littérature, le lien (τ, ϕ) est très fonctionnel. Pour les valeurs croissantes de la fraction volumique solide (ϕ), la contrainte de cisaillement tend vers un comportement asymptotique vertical. Ce caractère illustre la réduction de la distance inter-granulaire de la partie solide au sein de la suspension et met en évidence une fraction optimale d'organisation des grains solides que l'on note comment étant la fraction volumique solide maximale ou la fraction dite de packing. A l'inverse, pour les valeurs décroissantes de la fraction volumique solide, la contrainte tend vers une asymptote « horizontale » et à la limite, une fraction critique peut être mise en évidence qui traduit la disparition du caractère plastique de la suspension.

La notion de confiance de la valeur mesurée du seuil est représentée sur la **figure III-8** en analysant l'évolution du rapport de l'écart type (calculé sur les trois essais) avec la valeur du seuil en fonction du seuil limite de cisaillement mesuré. Cette figure montre que l'écart relatif est quasi systématiquement en deçà de 10%, exception faite de quelques données qui présentent un écart que nous jugeons aberrant. Ce constat rend représentatives les valeurs moyennes du seuil mesurées du phénomène limite plastique.

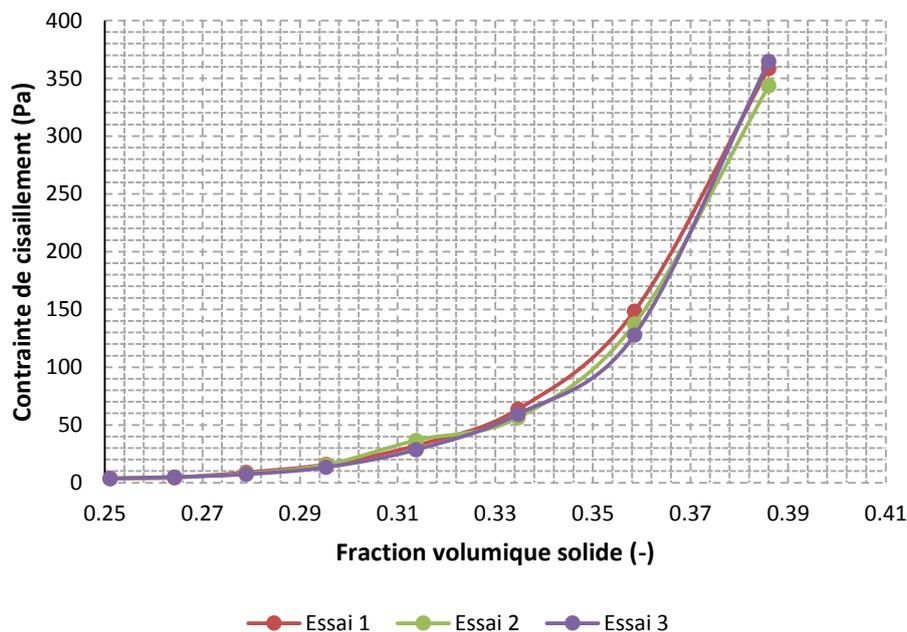


Figure III-7: Seuil de contrainte de cisaillement en fonction de la fraction volumique solide pour les trois essais et pour la suspension de 125 μm

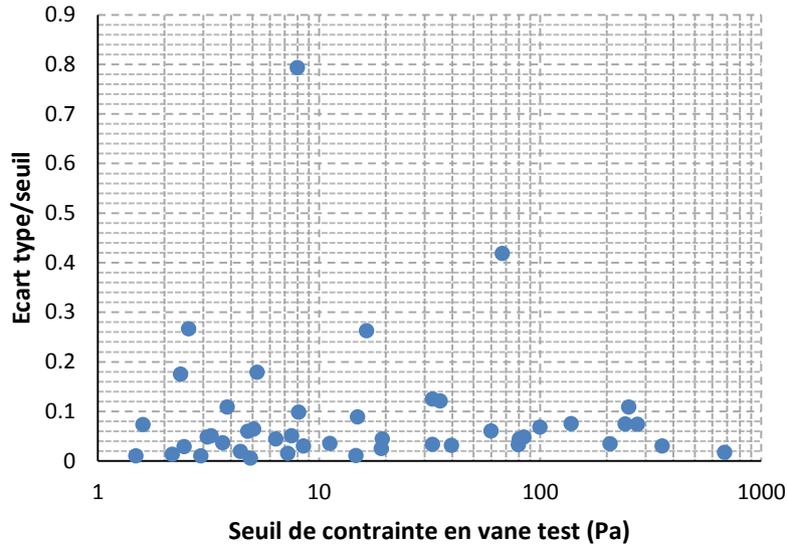


Figure III-8: Évolution de l'écart-type adimensionné en fonction du seuil limite de cisaillement pour les essais effectués au Vane test.

La généralisation de la courbe de la **figure III-7** pour toutes les franges granulométriques en retenant pour chaque essai la valeur moyenne du seuil est présentée sur la **figure III-9**.

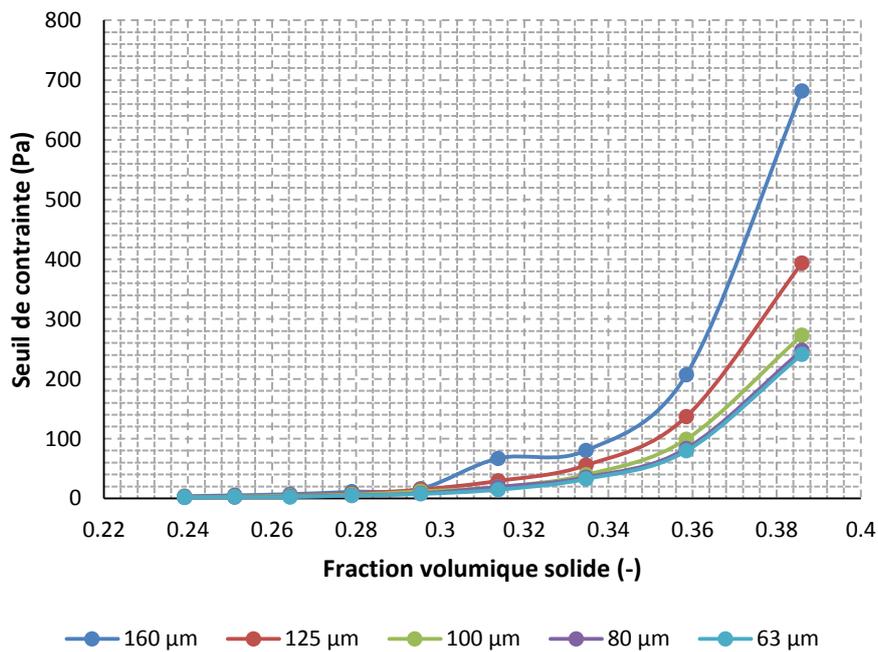


Figure III-9: Evolution de la contrainte limite de cisaillement en fonction de la fraction volumique solide pour toutes les franges granulométriques étudiées.

Sur la **figure III-9**, nous notons que les courbes obtenues pour toutes les franges granulométriques présentent une allure similaire. On note également que les courbes 0-63μm et 0-80μm sont pratiquement similaires. À partir de la frange 0-100μm, les courbes se distinguent. Un tel résultat conforte des résultats déjà établis avec des sédiments prélevés en Baie de Quiberon (1) et suggèrent que les franges 0-63 et 0-80 μm forment un liant dans laquelle on ensemence par la suite des

inclusions granulaires. Un tel résultat conforte et complète les résultats présentés dans la partie 2 où nous avons noté que la réduction granulométrique 0-40 μm pouvait jouer seule le rôle d'un liant. Il semble plus judicieux de corriger cette proposition en remarquant que la notion de liant engloberait les éléments solides compris entre 0-80 μm .

A fraction volumique fixée, nous remarquons que l'accroissement de l'étendue granulaire tend à augmenter la contrainte limite de cisaillement. Un tel résultat n'est pas en accord avec des résultats préalablement établis (106). En effet, pour de tels mélanges dont l'étendue granulaire augmente, nous nous attendons à ce que l'ensemencement au sein de la fraction la plus fine d'éléments non réactif de plus gros diamètre perturbe la structure de la suspension et la fragilise mécaniquement. A ce stade du travail, nous attribuons un tel comportement au fait que les éléments qui ensemencent la fraction la plus fine (et qui figure l'accroissement de l'étendue granulaire) ramène systématiquement de la fraction fine avec eux (et en particulier des plaquettes d'argiles – la réalisation de visualisations MEB confirme cette hypothèse). Avec une telle hypothèse, si nous fixons la fraction volumique solide, le volume des éléments les plus fins augmente avec l'augmentation de l'étendue granulaire et tendrait à augmenter la fraction volumique solide au sein de la pâte et par conséquent la contrainte limite de cisaillement. La validation de cette hypothèse est aussi obtenue par la réalisation d'une série d'essais avec des suspensions formées à partir des sédiments prélevés auxquels une quantité fixée de sables normal calibré entre 0 et 200 μm est ajouté. Dans ce cas, les grains du sable normal ne sont pas « contaminés » par les fines. Les résultats obtenus montrent un lien seuil de cisaillement-fraction volumique solide équivalent aux résultats de la **figure III-9** mais le décalage de la courbe montre nettement que l'ajout des inclusions diminue la contrainte seuil à fraction volumique fixée.

2.1.3.2. Modélisation : approche de FLATT

Dans un domaine de la fraction volumique solide pour lequel la contrainte limite plastique existe, le comportement décrit précédemment correspond bien au modèle mathématique proposé par Flatt (107), **équation III-1**

$$\tau = m \frac{\phi(\phi - \phi_p)^2}{\phi_{\max}(\phi_{\max} - \phi)} \quad \text{Equation III-1}$$

Avec ϕ_{\max} la fraction volumique maximale et ϕ_p la fraction volumique solide de percolation déterminées à la section, m est un paramètre de calage qui intègre tout ce qui ne dépend pas de la fraction volumique solide. Ce paramètre permet de remonter à la distance entre particule aux points d'accroche selon l'équation III-2:

$$h = \left(\frac{1.8 \times a^* \times u_{k,k} \times H_a}{m \times \pi^4} \frac{1}{R_{v,50}} \right)^{1/2} \quad \text{Equation III-2}$$

Avec $R_{v,50}$ le rayon moyen de la distribution volumique des particules ; a^* le rayon de courbure (pris ici égal à 600 nm); $f_{\sigma,\Delta}$ la distribution normalisée égale à l'unité dans le cas d'un système

monodisperse (nous prenons cette hypothèse par simplification) et $u_{k,k} = \frac{16\pi}{2-\sqrt{3}}$; H_a la constante d'Hamaker non retardée d'une valeur de 10^{-20} J.

Nous présentons ci-dessous (**Figure III-10**) un exemple de modélisation pour les réductions granulométriques de (0-63 μm et 0-160 μm). Le coefficient de régression pour les différentes réductions granulométriques est supérieur à 0,9.

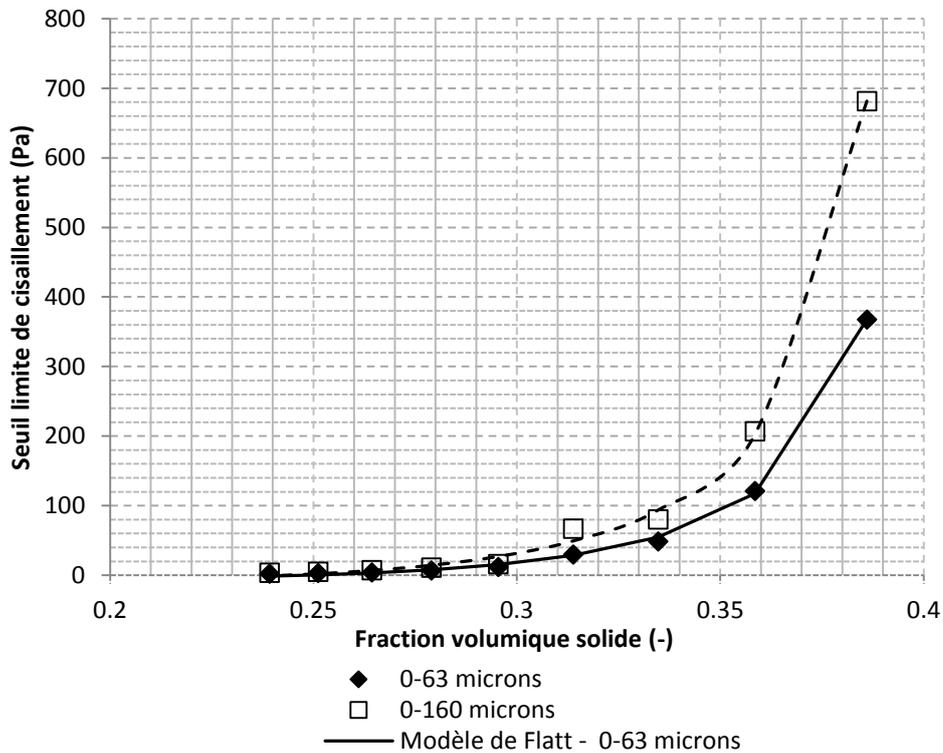


Figure III-10 : Illustration de la modélisation de Flatt pour les réductions granulométriques de 0-63 et 0-160 microns.

Après modélisation, la fraction volumique maximale et la fraction volumique de percolation sont respectivement 0,409 et de 0,24 pour chaque frange granulométrique.

Nous nous intéressons alors au paramètre de calage m qui prend en compte les forces interparticulaires, la taille des particules et leur distribution. L'évolution du paramètre m est présenté sur la **figure III-11** en fonction de la dimension maximum théorique de la réduction granulométrique.

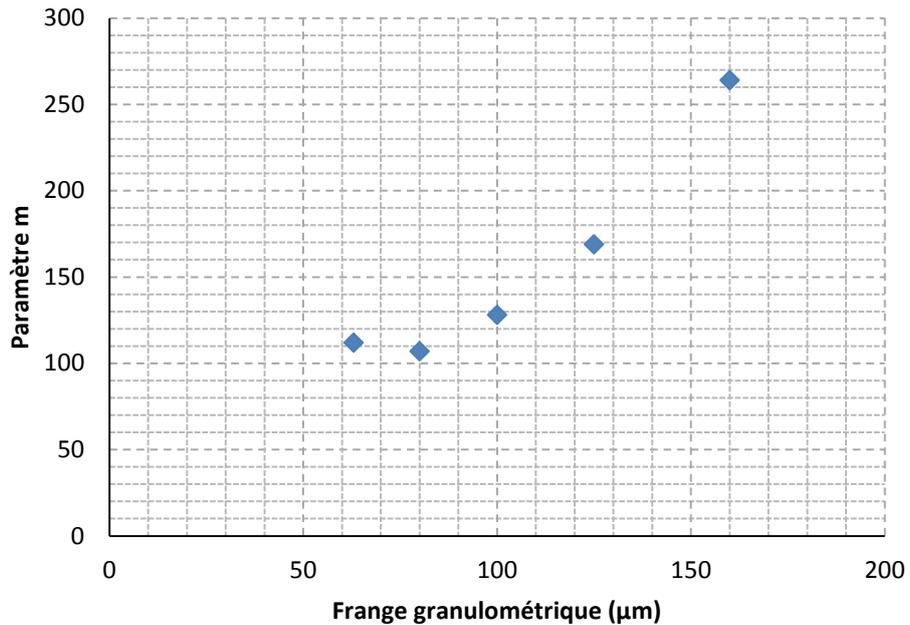


Figure III-11: Evolution du paramètre m en fonction de la taille des tamis.

Nous observons une augmentation de ce paramètre m , qui devient plus marquée lorsque la réduction granulométrique dépasse la centaine de micromètre (Figure III-11). Via l'équation III-2 nous pouvons alors évaluer la distance interparticulaire au point de contact.

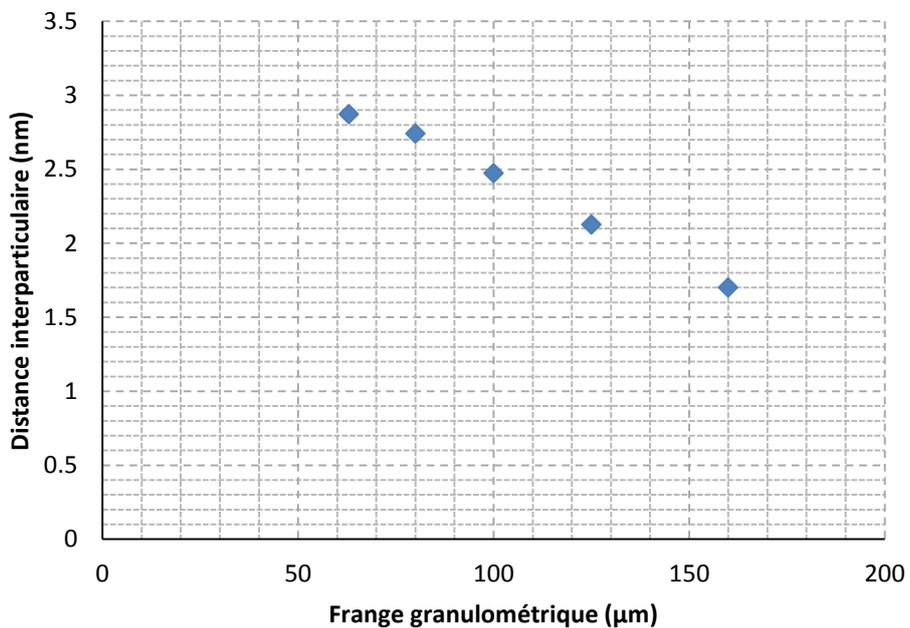


Figure III-12: Distance interparticulaire en fonction de la taille de frange granulométrique.

Nous observons une diminution de la distance interparticulaire avec l'augmentation de la réduction granulométrique (Figure III-12). Pour de tels systèmes floculés, les ordres de grandeur obtenues sont cohérents en comparant aux résultats obtenus sur des suspensions cimentaires (108). Il convient de

rester prudent sur cette évolution de la distance interparticulaire car pour les particules supérieures à 100 micromètres, les forces de Van der Waals peuvent être négligeables.

2.1.3.3. Conclusion partielle

D'après nos résultats, il ressort que la contrainte de cisaillement d'une suspension augmente jusqu'à une valeur seuil puis diminue progressivement en tendant vers un plateau. Ce changement de sens de la courbe de contrainte peut s'expliquer par le fait que les liaisons atomiques entre les molécules de la matière ont été totalement rompues. Le seuil de contrainte augmente avec la fraction volumique solide et diverge pour une valeur maximale de fraction volumique solide. Le modèle de Flatt s'adapte sur les données obtenues lors des expériences. En fixant les fractions volumiques solides de percolation minimale et maximale constante pour toutes les franges granulométriques, nous avons mis en évidence la diminution de la distance interparticulaire en fonction de l'augmentation de l'étendue granulaire du mélange.

3. Essai par palier de contrainte de cisaillement

Ces essais sont réalisés pour les franges 0-40, 0-63, 0-80 et 0-125 μm .

Comme nous l'avons déjà précisé, seule la phase de restructuration fait l'objet d'une analyse des données. Les échantillons sont considérés complètement déstructurés après les phases de pré-cisaillement et de destructuration dont le taux de cisaillement maximal sera toujours inférieur à 300 s^{-1} de manière à limiter le développement d'instabilité au sein de la cellule plan-plan tout en restant en régime laminaire. À partir de la phase de restructuration et compte tenu des résultats déjà présentés dans la partie des travaux préliminaires, nous admettons que l'histoire de tous les échantillons est globalement comparable.

Les données de la phase de restructuration sont analysées par palier. Pour chaque palier on distingue l'évolution du taux de cisaillement et de la contrainte de cisaillement et de l'effort normal. Chaque palier dure 1 min et les mesures sont enregistrées toutes les 1/10 s. Chaque palier est donc représenté numériquement par 600 points. L'illustration de l'analyse des données s'appuie sur des essais réalisés avec la réduction granulométrique 0-80 μm et un apport en eau tel que la teneur $W = 200\%$.

Pour un palier donné, nous étudions l'évolution de la contrainte de cisaillement, du taux de cisaillement et de la force normale au cours du temps afin de calculer une valeur moyenne stabilisée qui représente chaque variable pour ce palier, à savoir le taux de cisaillement correspondant à la contrainte de cisaillement de consigne imposée. Dans ce travail, les données correspondant au développement de l'effort normal ont été archivées, mais n'ont pas fait l'objet de traitement.

Pour certains paliers, la contrainte de cisaillement ne se stabilise pas au cours du temps (surtout pour le premier palier). Ces paliers ne seront pas pris en compte pour l'établissement de la courbe d'écoulement. La **figure III-13** montre pour le deuxième palier de la phase de restructuration de la suspension formée à $W = 200\%$ sollicitée en cisaillement. Nous notons que la valeur de consigne de la contrainte de cisaillement est atteinte dès le début du palier.

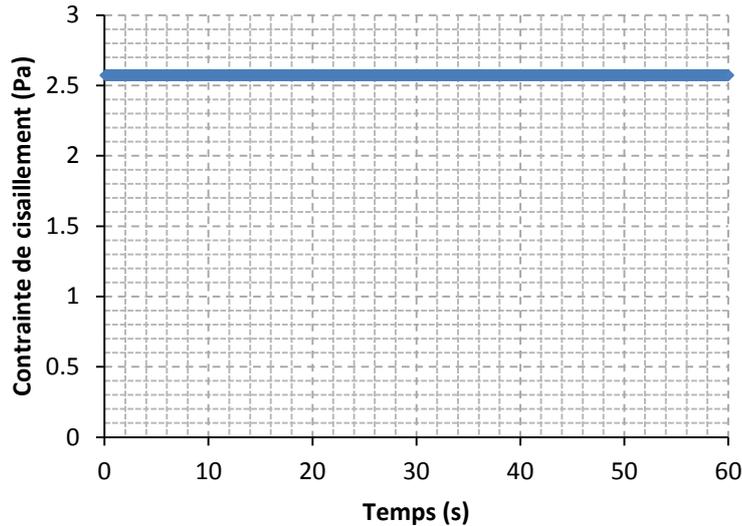
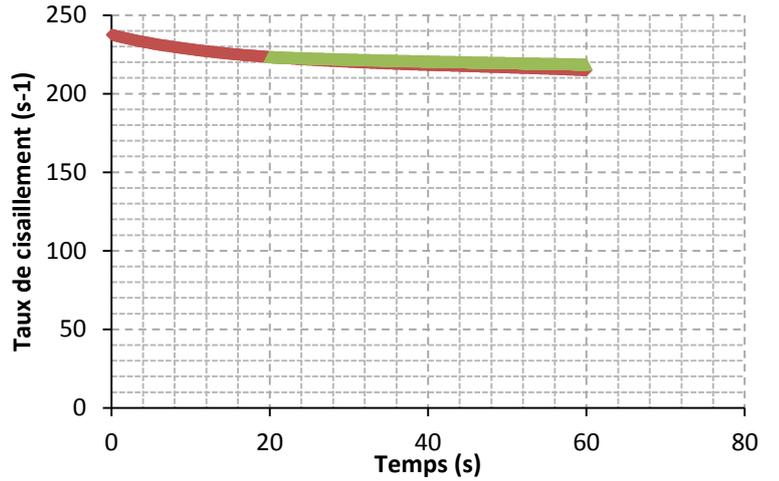


Figure III-13: : Analyse en restructuration d'une suspension formée au moyen de la réduction granulométrique 0-80 μ m et d'eau du robinet à $W = 200\%$. Illustration de l'évolution de la contrainte de cisaillement au cours du temps pour un palier particulier.

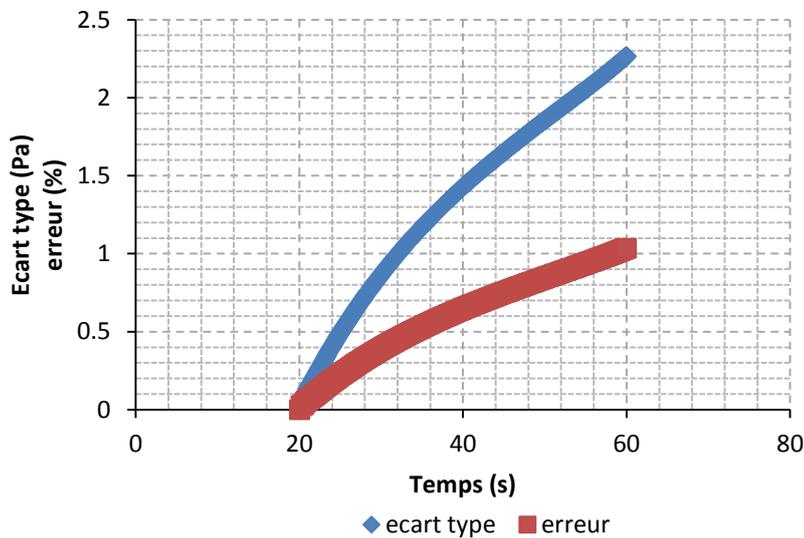
L'évolution du signal du taux de cisaillement au cours du temps est ensuite analysée pour le même palier afin d'exprimer un couple $(\tau, \dot{\gamma})$ représentatif de la courbe d'écoulement. La **figure III-14** montre que le signal du taux de cisaillement diminue au cours de l'essai et commence à se stabiliser dès la vingtième seconde. C'est à partir de cet instant que la moyenne du taux de cisaillement et l'écart type sur les mesures sont calculés.

La convergence de la valeur moyenne calculée (et de l'écart type) est obtenue par un calcul de moyenne glissante (augmentation du nombre de points à chaque calcul depuis $t = 20s$ pour l'exemple présenté. A 20s la moyenne est calculée sur une valeur. A 21s, le moyenne est calculée sur deux valeurs et ainsi de suite). Nous calculons une valeur moyenne représentative et un écart type. Cet écart permet de juger du caractère crédible de la valeur moyenne en introduisant le rapport écart type/moyenne (erreur) à partir de l'instant 20 s du palier. Ce rapport est généralement de l'ordre de 1%. L'erreur est jugée acceptable tant que le rapport est inférieur à 5%, sinon le palier est rejeté.

L'évolution du taux de cisaillement est globalement la même pour tous les paliers de cisaillement et toutes les réductions granulométriques.



◆ taux de cisaillement (s-1) ▲ moyenne du taux de cisaillement (s-1)



◆ ecart type ■ erreur

Figure III-14: Analyse en restructuration d'une suspension formée au moyen de la réduction granulométrique 0-80 μm et d'eau du robinet à $W = 200\%$. Illustration de l'évolution du taux de cisaillement et de la moyenne au cours du temps et de l'écart type et de l'erreur pour un palier particulier.

Lorsque la moyenne du taux de cisaillement et de la contrainte de cisaillement est calculée pour chaque palier, nous obtenons les courbes d'écoulement correspondantes aux différentes teneurs en eau et pour les différentes réductions granulométriques solides.

3.1. Répétabilité des résultats

La répétabilité des essais est vérifiée pour toutes les franges granulométriques et toutes les fractions volumiques solides. À cette fin, tous les essais sont réalisés deux fois. Les résultats sont comparables mais pas rigoureusement identiques (Figure III-15). Ceci peut être dû au fait que les matériaux utilisés sont des sédiments naturels dont la composition peut varier d'un échantillon à l'autre.

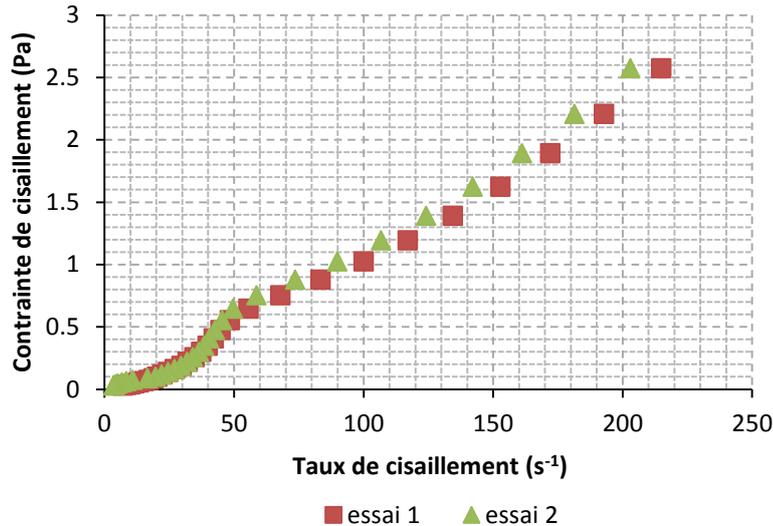


Figure III-15: Vérification de la répétabilité des essais de caractérisation rhéologique des suspensions par suivi des courbes d'écoulement obtenus après deux essais similaires.

Finalement, la courbe d'écoulement qui fait l'objet de l'analyse du comportement est exprimée par le signal moyen de ces deux essais. Là encore, la moyenne est exprimée au moyen d'un algorithme de moyenne glissante sur 5 points (Figure III-16).

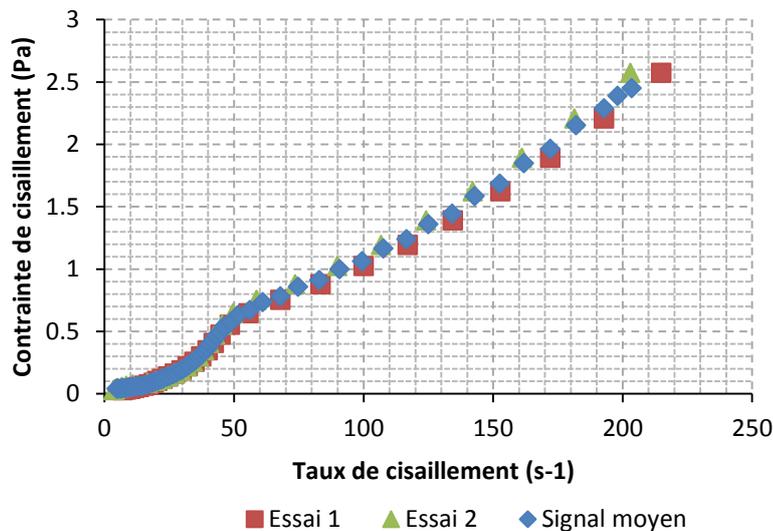


Figure III-16: Courbe d'écoulement moyenne obtenue à partir des deux essais rhéologiques similaires.

La figure III-17 montre l'évolution de l'écart entre les essais 1 et 2 ($\text{Ecart} = \frac{\dot{\gamma}_1 - \dot{\gamma}_2}{\dot{\gamma}_1} \times 100$ avec $\dot{\gamma}_1$ le taux de cisaillement mesuré dans l'essai 1 et $\dot{\gamma}_2$ le taux de cisaillement mesuré dans l'essai 2). Cet écart est élevé à basse contrainte, mais devient acceptable pour des valeurs de contrainte supérieure à 1 Pa.

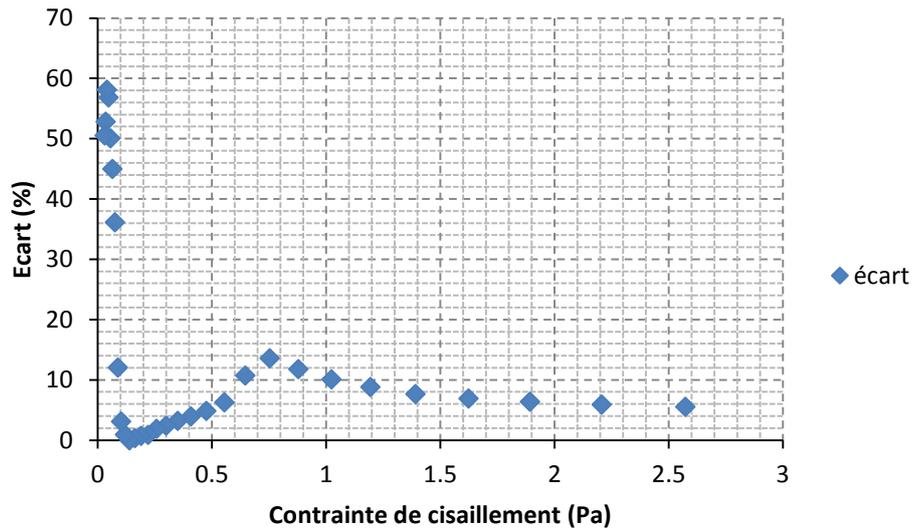


Figure III-17: Evolution de l'écart entre les deux essais en fonction de la contrainte de cisaillement appliquée.

3.2. Interprétation des résultats

Les essais rhéologiques par palier sont réalisés pour les franges granulaires 0-40 μm , 0-63 μm , 0-80 μm et 0-125 μm et pour des fractions volumiques solides qui varient entre 0,14 (300% de teneur en eau) et 0,24 (160% de teneur en eau). Des essais ont été réalisés avec des mélanges plus fortement dosés en fractions volumiques solides, mais des éjections de matériaux en dehors de la cellule plan-plan ont été observées durant ces essais, ce qui rend inexploitable les données résultantes. Par conséquent, pour limiter ces inconvénients, la fraction volumique solide maximum testée est 0,24, correspondant à une teneur en eau de 160%.

Les **Figure** III-18 à III-21 montrent les différentes courbes d'écoulement obtenues pour la réduction granulométrique 0-40 μm . A taux de cisaillement fixe, l'augmentation de la fraction volumique solide entraîne une augmentation logique de la contrainte de cisaillement. L'allure des courbes montrent un comportement viscoplastique rhéofluidifiant des sédiments. Ce qualificatif pourrait paraître contradictoire à celui formulé dans la partie travaux préliminaires, mais il faut tenir compte ici de deux points :

- Lors des essais réalisés à taux de cisaillement imposé pendant une durée de 10 min pour une suspension seulement âgée de 4 min, les valeurs qui composent la courbe d'écoulement sont en nombre restreint. Au sens de la mesure, la fréquence d'échantillonnage est insuffisante pour reproduire fidèlement la réponse du système,
- Par ailleurs, la figure 16 montre nettement une bifurcation dans l'évolution de la courbe d'écoulement qui peut être imputable à de la structuration des mélanges à bas taux de cisaillement, un cisaillement partiel dans la cellule, ...

Par conséquent, et de façon logique pour de telles suspensions, le caractère rhéo-épaississant n'est qu'apparent alors que le processus rhéo-fluidifiant (qui peut caractériser certaines des suspensions) correspond bien à un mécanisme de défloculation de la suspension avec l'augmentation du taux de cisaillement. Cependant, à l'image de l'illustration précédente, **Figure** III-17, l'évolution des courbes d'écoulement pour le taux de cisaillement croissant confirme une notion de bifurcation pour une

valeur critique, $\dot{\gamma}_c$, comprise entre 40 et 70 s^{-1} , **Figure III-18** à **Figure III-21**. Au-delà de cette valeur critique, soit le signal est légèrement non linéaire et caractérise un fluide rhéo-fluidifiant mais dans tous les cas, une tendance linéaire reste très acceptable, ce qui correspond à un comportement de type fluide de Bingham. Enfin, ces résultats montrent pour les différentes réductions granulométriques que l'augmentation de la fraction volumique solide accroît la capacité de résistance au cisaillement, ce qui est logiquement en accord avec les résultats de la littérature. Il convient à présent d'interpréter ces données et la suite de l'exposé restreint cette analyse des courbes d'écoulement au-delà du taux de cisaillement critique, $\dot{\gamma}_c$. Compte tenu des tendances observées, nous retenons une description du comportement au moyen du modèle de Bingham.

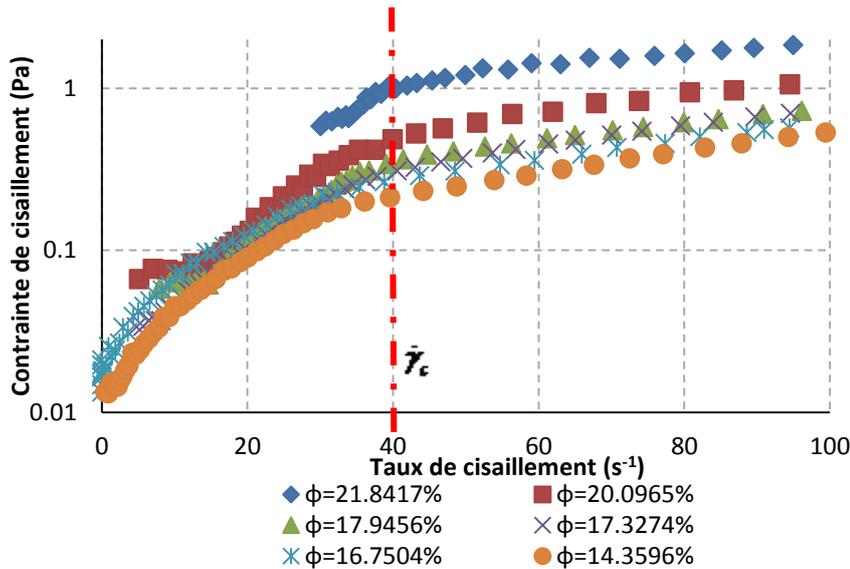


Figure III-18: Mise en évidence des courbes d'écoulement moyennes pour la réduction granulométrique 0-40 μm et pour différentes fractions volumiques solides.

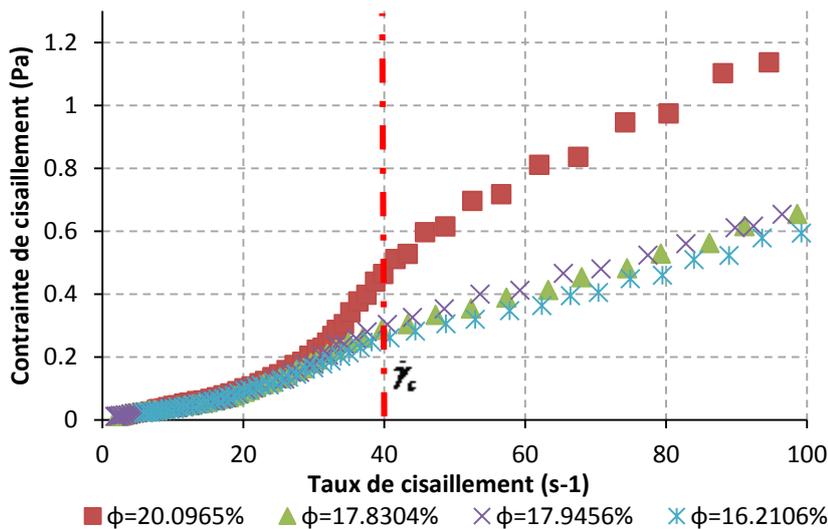


Figure III-19: Mise en évidence des courbes d'écoulement moyennes pour la réduction granulométrique 0-63 μm et pour différentes fractions volumiques solides.

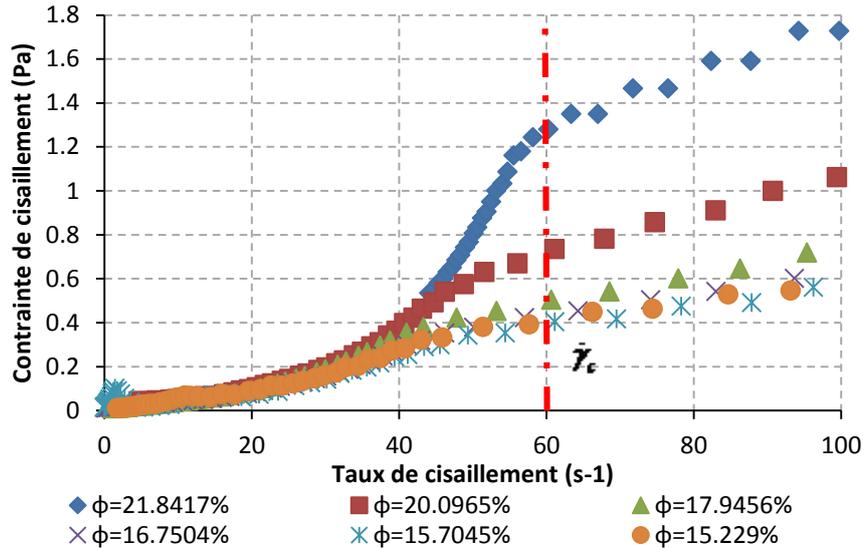


Figure III-20: Mise en évidence des courbes d'écoulement moyennes pour la réduction granulométrique 0-80 μm et pour différentes fractions volumiques solides.

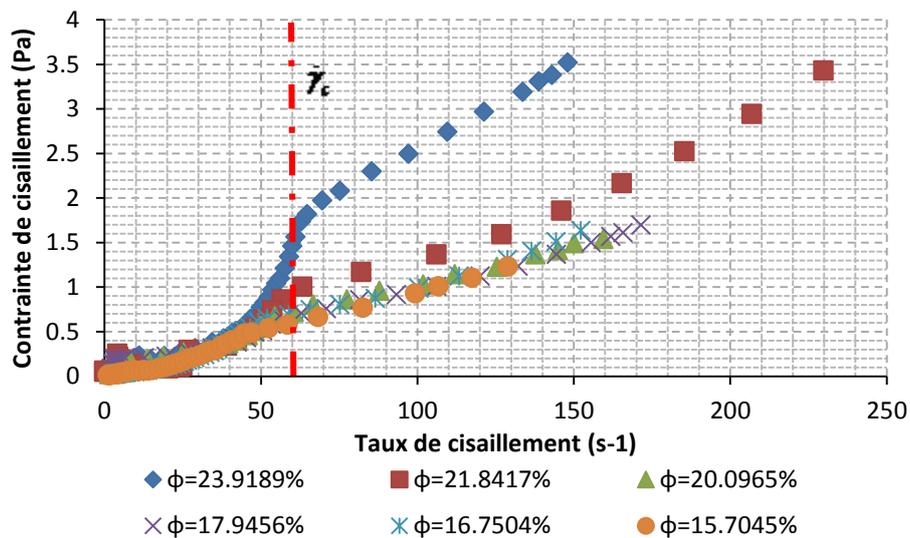


Figure III-21: Mise en évidence des courbes d'écoulement moyennes pour la réduction granulométrique 0-125 μm et pour différentes fractions volumiques solides.

3.2.1. Interprétation des courbes d'écoulement au moyen du modèle de Bingham

Dans ce contexte de cisaillement simple des suspensions, le modèle macroscopique de Bingham représente un comportement rhéologique visco-plastique, tel que, équation III-3

$$\begin{cases} \tau \leq \tau_c : \dot{\gamma} = 0 \\ \tau > \tau_c : \tau = \tau_c + \mu\dot{\gamma} \end{cases} \quad \text{(Equation III-3)}$$

Tant que la contrainte de cisaillement reste en deçà du seuil limite de cisaillement, le fluide n'est pas cisailé. Un mouvement en bloc du fluide reste néanmoins possible. Au-delà du seuil limite de cisaillement, la contrainte de cisaillement résulte de la somme de la contrainte limite de cisaillement et de la part visqueuse. Cette dernière part de la contrainte est proportionnelle au taux de

cisaillement, pondéré par la viscosité dynamique dite plastique du fluide. Cette loi à deux paramètres, linéaire suggère une faible structuration des fluides au-delà du seuil en fonction du taux de cisaillement. En outre, pour les valeurs du taux de cisaillement supérieures à la valeur critique, le recours à un tel modèle suggère que les suspensions sont relativement homogènes pendant toute la période de caractérisation. Les deux paramètres sont a priori au moins liés à la fraction volumique et à l'étendue granulaire. Le calage mathématique du modèle sur les données expérimentales est réalisé au moyen d'un algorithme de minimisation des moindres carrés et la confiance est systématiquement donnée par le coefficient de corrélation R^2 qui est au moins égal à 0,9.

Remarque : nous rappelons que la valeur du seuil limite de cisaillement qui est ici calculé n'est qu'une valeur apparente et que le seuil précédemment obtenu en condition quasi statique reste la valeur représentative.

Les valeurs de la viscosité plastique et de la contrainte limite de cisaillement apparente sont déduites pour chaque réduction granulométrique et chaque fraction volumique solide.

3.2.2. Interprétation de la viscosité

L'évolution de la viscosité plastique en fonction de la fraction volumique solide et pour les différentes réductions granulométriques est présentée sur la **figure** III-22. Ces résultats montrent un lien fonctionnel entre la viscosité plastique et la fraction volumique solide, ϕ . En comparaison des résultats obtenus avec l'analyse de la contrainte limite de cisaillement (en condition quasi statique), nous ne discernons pas véritablement une influence de l'étendue granulaire sur l'évolution de ce paramètre. Un comportement moyen représentatif de toute la courbe granulométrique est mis en évidence sans que l'on puisse véritablement distinguer l'influence d'ajout d'inclusions pour ces sollicitations dynamiques. Nous remarquons que le lien (μ, ϕ) moyen décrit une tendance divergente pour les fortes valeurs de la fraction volumique que l'on peut imputer à un effet de packing de ϕ . En complément, pour les faibles valeurs de ϕ , nous notons que le lien tend à décrire un comportement asymptotique (horizontal) et mettant ainsi en évidence les propriétés rhéologiques du fluide porteur. Une telle description correspond bien au modèle de structuration de Krieger-Dougherty, équation III-4 (**Figure** III-22).

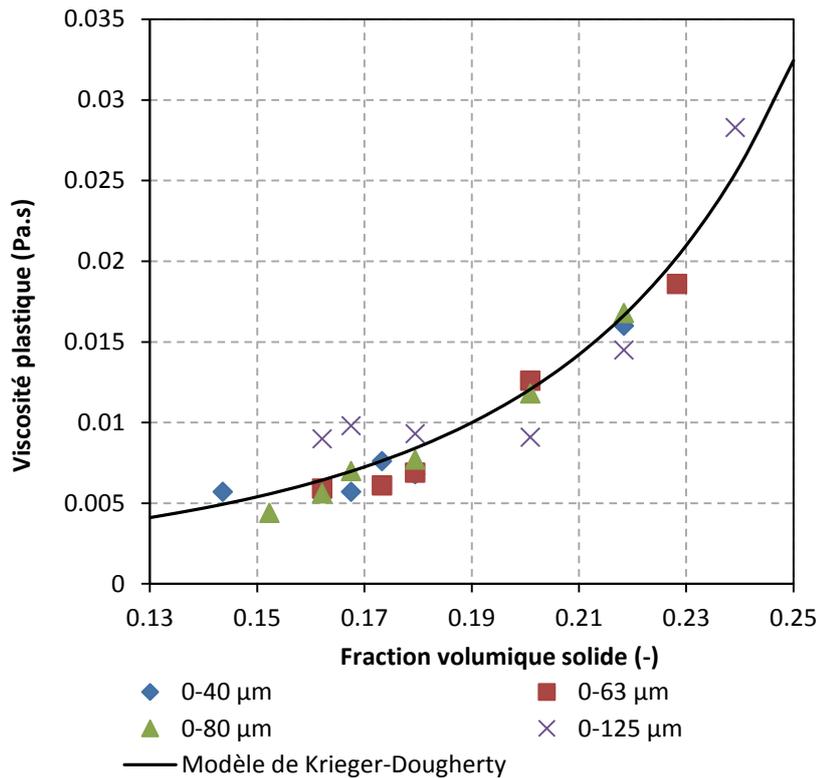


Figure III-22: Evolution de la viscosité en fonction de la fraction volumique solide pour les différentes franges granulométriques et modélisation de l'ensemble des données avec le modèle de Krieger-Dougherty. $\mu_0 = 100,2 \cdot 10^{-5}$ Pa.s ; $\phi_m = 0,409$; $\eta = 9$.

$$\mu = \mu_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-\eta \phi_m} \text{ (Equation III-4)}$$

Avec ϕ_m la concentration solide d'empilement maximal ou le paramètre de packing ($\phi_m = 0,673$ pour un arrangement dense aléatoire).

η appelée paramètre de viscosité intrinsèque (sans unité). C'est un paramètre lié à la forme de particules en suspension.

Le calage du modèle revient finalement à la détermination du paramètre η . En effet, dans ce travail, nous imposons que le fluide porteur est bien représenté par l'eau (Mélange (1) pour des sédiments de la Baie de Quiberon et par Toutou (74) pour le béton) dont la viscosité dynamique est de $100,2 \cdot 10^{-5}$ Pa.s en condition normale de température. Ensuite, compte tenu des travaux de modélisation du seuil limite de cisaillement en fonction de la fraction volumique solide en recourant au modèle de Flatt, nous avons obtenu une fraction volumique solide de packing, $\phi_m = 0,409$. Il nous apparaît cohérent de tester la pertinence de cette proposition avec le paramètre visqueux. Aussi, cette fraction de packing est retenue dans le modèle. L'ajustement du modèle proposé sur la **figure III-22** est obtenu pour $\eta = 9$ et un coefficient de régression (en confondant toutes les données sans distinction des réductions granulométriques) supérieur à 0,9 ; ce qui semble tout à fait acceptable et représentatif du mécanisme de structuration de la viscosité plastique.

3.2.3. Interprétation de la contrainte de cisaillement seuil

La **figure III-23** représente l'ensemble des données calculées de la contrainte limite de cisaillement à partir du calage du modèle de Bingham lorsque le taux de cisaillement permet de distinguer une courbe d'écoulement pratiquement linéaire en fonction de la fraction volumique solide. La figure regroupe les différentes granulométries réduites. Ces résultats montrent :

- Que le seuil limite de cisaillement calculé est soit positif (physiquement admissible) ou négatif (un peu moins admissible sur le plan physique). En recourant à des sédiments prélevés dans la Baie de Quiberon, Mélinge (1) a été confronté à la même situation. Ces valeurs négatives lui ont servies à distinguer une frontière entre un comportement visco-plastique et un comportement visqueux. Dans le cas présent, le nuage de points obtenus est assez bruité, mais il se dégage néanmoins une valeur critique de l'ordre de 17% pour la fraction volumique solide,
- Que le lien (τ, ϕ) n'est pas influencé par la notion de réduction granulométrique. Une tendance globale est plutôt à considérer avec les résultats obtenus avec la cellule plan-plan,
- Sans être idéale, la tendance décrite entre les deux paramètres (par les valeurs positives du seuil) est globalement cohérente. L'accroissement de la fraction volumique solide tend à augmenter la contrainte limite de cisaillement.

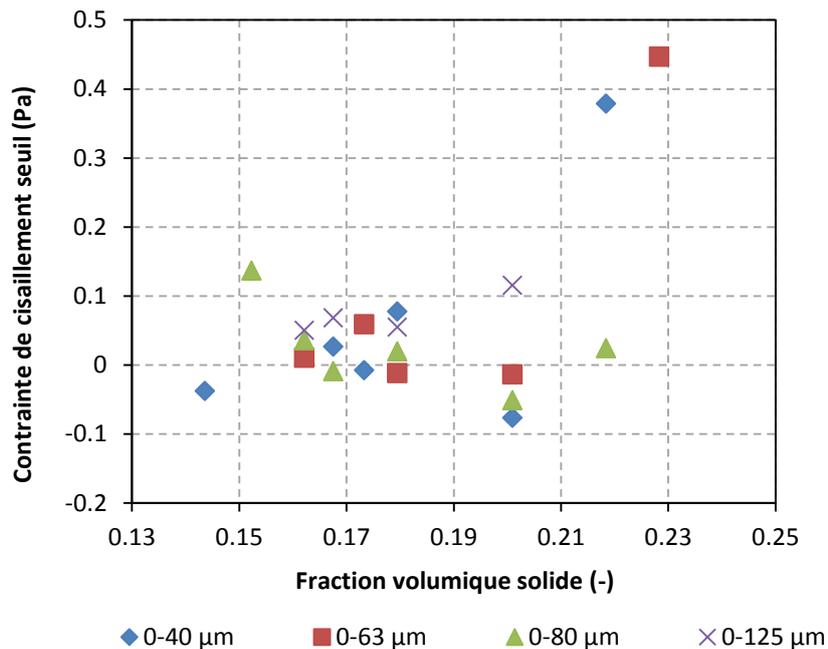


Figure III-23: Evolution de la contrainte de cisaillement seuil calculée à partir du modèle de Bingham en fonction de la fraction volumique solide.

Pour clore cette analyse du seuil, nous effectuons un comparatif du lien (τ, ϕ) obtenu en condition dynamique (modélisation des courbes d'écoulement avec le modèle de Bingham) et en condition statique. Les résultats sont présentés sur la **figure III-24**. Un tel comparatif est destiné à montrer si un mécanisme de structuration est susceptible d'exister lorsque les suspensions sont cisailées à bas taux de cisaillement. Ces résultats montrent non seulement la cohérence des données obtenues avec les deux techniques de mesures (cellule plan-plan et Vane test) et que les données s'inscrivent selon une même tendance. Ce dernier propos tendrait à suggérer que le caractère Binghamien pourrait être

généralisé au domaine total du taux de cisaillement prospecté car les mesures obtenues en condition statique et dynamique prédisent des conclusions similaires. Il est important de noter que les deux techniques demeurent complémentaires car il ne nous a pas été possible de caractériser le comportement des suspensions avec la cellule plan-plan pour des fractions volumiques solides supérieures à 24% ; ce qui ne pose pas de problème avec le Vane test.

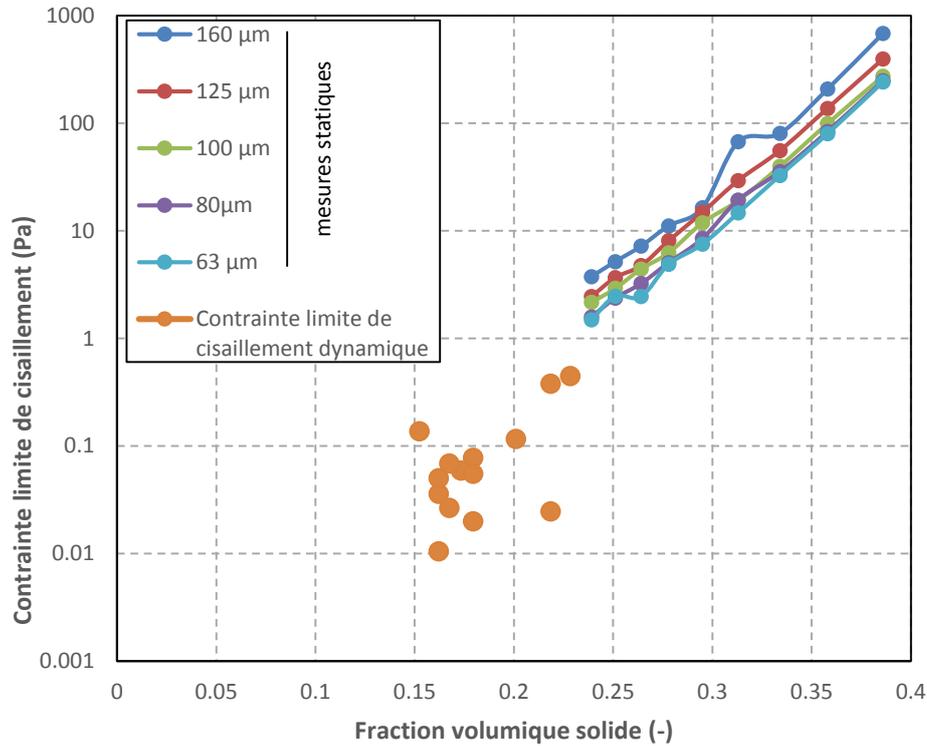


Figure III-24: Comparaison de l'évolution du seuil limite de cisaillement dynamique et statique en fonction de la fraction volumique solide.

4. Conclusion

Confrontés à la caractérisation de suspensions composées de sédiments naturels et d'eau potentiellement réactives, nous avons débuté ce chapitre par l'exposé de quelques résultats obtenus au moyen d'un protocole de caractérisation rhéométrique au temps court :

Une suspension jeune (4 min) est simplement cisailée durant 10 min à taux de cisaillement imposé.

Ce protocole complexe et chronophage avait pour but d'établir des tendances de références du comportement rhéologique des suspensions en se prémunissant d'un risque de réactivité et d'établir une durée représentative durant laquelle les suspensions restent dans une phase dormante (faiblement réactives). Dans ce protocole, les valeurs du taux de cisaillement imposés sont : 0,01 ; 0,1 ; 1 ; 10 et 100 s^{-1} . De ce travail, il ressort l'identification d'un comportement apparent rhéo-épaississant induit par le faible nombre de valeurs du taux de cisaillement retenues pour cette partie de l'étude et par le fait que les mélanges se structurent au bas taux de cisaillement. Ces essais ont montré qu'à fort taux de cisaillement, l'énergie apportée efface l'histoire de la structuration des mélanges et un comportement de type Bingham se distingue.

En complément de ces essais, les travaux ont permis de montrer que les suspensions restent en phase dormante durant au moins 50 min. Ce résultat a permis d'entreprendre une caractérisation rhéologique dynamique au moyen d'un protocole à contrainte imposée en phase de restructuration (après une phase de déstructuration des mélanges). Les courbes d'écoulement sont modélisées seulement à fort taux de cisaillement au moyen du modèle de Bingham. L'analyse de la contrainte limite de cisaillement dynamique a montré un lien assez fonctionnel avec la fraction volumique solide. Nous avons en outre montré qu'une fraction volumique solide critique ($\phi = 0,17$) se distingue et qui marque une transition d'un fluide visqueux et un fluide visco-plastique. Dans cette partie de l'étude, il ne se dégage pas de tendance marquée de l'influence des populations de grains et surtout de leur dimension caractéristique. Des conclusions similaires sont formulées lors de l'analyse de la viscosité qui est liée fonctionnellement à la fraction volumique solide via le modèle de structuration de Krieger-Dougherty. Une fraction volumique de packing est mise en évidence ($\phi_M = 0,409$) et le fluide porteur est bien représenté par l'eau.

Face au risque de structuration des mélanges à faible taux de cisaillement, un programme d'essais d'identification de la contrainte limite de cisaillement en condition quasi statique est réalisé en recourant au Vane test. Dans cette partie du travail, nous avons montré que les sédiments dont la taille n'excède pas 80 μm jouent un rôle de liant dans les suspensions, tandis qu'au-delà les sédiments jouent un rôle d'inclusions. Cependant, ces inclusions étant présentes en faible quantité, la structuration du seuil en fonction de la fraction volumique solide est dominée par la fraction fine. Au final de cette partie de l'étude, le lien ($\tau ; \phi$) est bien représenté par le modèle de structuration de Flatt.

Finalement, au jeune âge, le comportement rhéologique des suspensions est bien représenté par le modèle de Bingham et par conséquent au moyen de deux paramètres :

- La contrainte limite de cisaillement statique que nous retenons comme facteur de mobilisation solide. Ce paramètre est lié à la fraction volumique solide et à l'étendue granulométrique,
- La viscosité plastique. Ce paramètre est lié à la fraction volumique solide, mais a priori pas à l'étendue granulaire. Pour ce dernier facteur d'influence, cette conclusion tient probablement au fait de la sur-représentation du liant par rapport aux inclusions et surtout parce que la caractérisation de la viscosité est faite à fort taux de cisaillement favorable à l'émergence d'un régime de lubrification des inclusions.

Chapitre IV. Etude de la structuration des sédiments du Lyvet en colonnes de sédimentation

1. Introduction

Cette dernière partie du mémoire est consacrée à la caractérisation de mélanges liquide-sédiments en place en condition essentiellement de laboratoire. Dans le contexte estuarien et en particulier celui de l'estuaire de la Rance, la dominance des processus de sédimentation-tassement-consolidation sédimentaires sont patents au regard des processus d'érosion. Comme tout estuaire, on distingue des apports amont imposés par le régime du fleuve et des apports aval conditionnés par le régime des marées. Les conditions dynamiques engendrées au sein de l'estuaire ne sont pas toujours favorables (i) à la mobilisation ou à la re-mobilisation solide, mais également (ii) au transport solide capable de limiter la généralisation de l'envasement ; l'état de structuration du substrat représente ici un facteur potentiellement aggravant vis-à-vis de la capacité de mobilisation. Le dernier chapitre du mémoire s'inscrit dans ce contexte et vise à apporter une contribution à l'amélioration de la compréhension de l'évolution de la structure des dépôts et de leur capacité de résistance au cisaillement.

Les conditions d'étude sont principalement en condition laboratoire et accélérées par le simple fait que les travaux se déroulent à la température ambiante. Vis-à-vis de la mise en place des dépôts, nous avons privilégié le scénario de mise en suspension des sédiments de l'estuaire de la Rance en colonne et placé par la suite au repos afin que s'initie un processus de sédimentation conduisant à la matérialisation d'un dépôt compactable au cours du temps. Compte tenu du caractère potentiellement réactif des mélanges, s'ajoute au cours du temps des mécanismes chimiques et/ou biochimiques. Un tel scénario de sédimentation-tassement-consolidation sous poids propre apporte au cours du temps une capacité de résistance à l'érosion (i) par cisaillement, (ii) par le battement de la nappe ou (iii) une combinaison des deux. La connaissance de l'avancement de la structuration des dépôts doit pouvoir renseigner sur l'énergie que doit fournir l'évènement « érosion » pour la mobilisation solide (principalement aborder dans ce travail) et par la suite pour transporter les sédiments. L'amélioration des connaissances sur l'interaction structuration de la matière et potentiel de mobilisation doit permettre ensuite d'établir des scénarios de lutte contre l'envasement.

Dans le cas de l'estuaire de la Rance, des campagnes de curage sont réalisées périodiquement notamment pour préserver les voies navigables. Ces évènements indispensables sont très traumatisants pour l'environnement. L'alternative du piège à sédiments est une voie prometteuse de lutte contre l'envasement et nos travaux représentent une contribution à la compréhension de son fonctionnement. Le piège du Lyvet a été construit dans le but de détourner une partie des sédiments de l'estuaire dans une zone de dépôts. L'abaissement du fond de l'estuaire par hydro-curage modifie les conditions d'écoulement favorisant la sédimentation et le piégeage des sédiments avant leur arrivée dans la zone de navigation.

La localisation du piège, ainsi que sa géométrie, ont été définies par les partenaires scientifiques de l'association COEUR Emeraude afin d'assurer le piégeage d'une quantité maximale de sédiments et surtout d'éviter par la suite leur remise en suspension. Le contexte local du piège, situé en eau saumâtre, à proximité d'une écluse et en amont du barrage hydro-électrique de la Rance, induit des conditions particulières quant aux mécanismes de structuration/déstructuration pour les sédiments du piège du Lyvet. Se pose alors la question sur la manière dont les sédiments se structurent dans le piège et quelle est la contrainte de cisaillement seuil correspondante à leur remise en suspension. De même, on peut s'interroger sur l'influence de certains paramètres telle la présence de sels, de matières organiques, sur la sédimentation et quel serait le temps caractéristique représentatif de la

stabilisation des processus. En d'autres termes, la capacité de résistance peut-elle atteindre une limite et quelle serait la durée à prévoir pour l'atteindre ?

Des études antérieures ont été réalisées à l'échelle du laboratoire (quelques centilitres) sur les mécanismes de sédimentation-tassement-consolidation de sédiments. Nous pouvons citer par exemple les travaux de X. Quentin (79) et de Y. Mélinge (1) portant sur la structuration des sédiments de la rivière Vilaine (Ille et Vilaine) et de la baie de Quiberon (Morbihan) respectivement.

D'autre part, des auteurs comme Been (109) et Sills (110) et Nguyen (111) ont étudié le phénomène de sédimentation-consolidation des vases naturelles le long des colonnes de sédimentation en mesurant le profil de densité à différentes hauteurs et pour des durées allant de quelques minutes jusqu'à un mois (111). D'autres proposent des modèles numériques pour décrire la propagation verticale des fronts de concentration (112), (113), (114).

Nous cherchons ainsi à étudier le mécanisme de structuration des sédiments, mettre en évidence les éléments influençant la structuration des matériaux sous poids propre pour ensuite optimiser la sédimentation dans le piège. Cependant, compte tenu de la complexité à mesurer in situ l'évolution de la structuration, et afin de séparer les effets de différents paramètres (influence de la présence de sels, de matières organiques, ...), nous nous sommes orientés vers cette approche de laboratoire.

Dans cette partie, nous cherchons à reproduire les phénomènes à une échelle plus importante que celle étudiée précédemment (voir Chapitre III). Ainsi des colonnes de sédimentation ont été mises en place afin d'étudier ces phénomènes.

Les sédiments sont laissés vieillir dans les colonnes de sédimentation pour différentes durées allant de deux semaines jusqu'à 9 mois afin d'étudier l'effet de l'âge sur les caractéristiques de structuration. Pour évaluer l'influence de la présence de matières organiques et de sels, trois types de sédiments sont testés : sédiments naturels, sédiments lavés (sans sels) et sédiments dépourvus de matières organiques.

La structuration des sédiments naturels a été la plus détaillée : des colonnes de sédiments naturels sont laissés vieillir pendant 2, 24 et 36 semaines.

2. Matériaux et méthodologie

2.1. Description des colonnes

Les colonnes de sédimentation ont été confectionnées à partir de tubes en plexiglas d'épaisseur 5mm, et de diamètre intérieur 150mm. Parce que transparent, ces tubes permettent l'observation visuelle des mélanges depuis la mise en place et pendant la période de sédimentation-tassement-consolidation sous poids propre. Ces colonnes sont constituées de deux parties :

- Une partie supérieure de 2 m de hauteur comportant trois robinets à différentes altitudes pour effectuer la vidange de la colonne. Cette zone matérialise la zone de chute des sédiments au cours de la phase de sédimentation,
- Une partie inférieure de 0,5 m de hauteur qui reçoit le massif de sédiments sédimentés.

Ces deux parties sont assemblées par un système de boulons et de joints toriques qui assure la liaison et l'étanchéité de l'ensemble.

Les colonnes sont placées dans un support fixé au mur. Le support individuel de chaque colonne permet de régler le positionnement afin d'assurer la verticalité de la colonne (Figure IV-1). Ce banc d'essais est placé dans un hall du laboratoire et est soumis à la température ambiante qui évolue au cours de l'année. L'emplacement a été retenu pour que les colonnes soient soumises au cycle diurne-nocturne. Pour empêcher l'évaporation au cours des périodes de structuration des mélanges déposés, l'extrémité des tubes est obstruée.

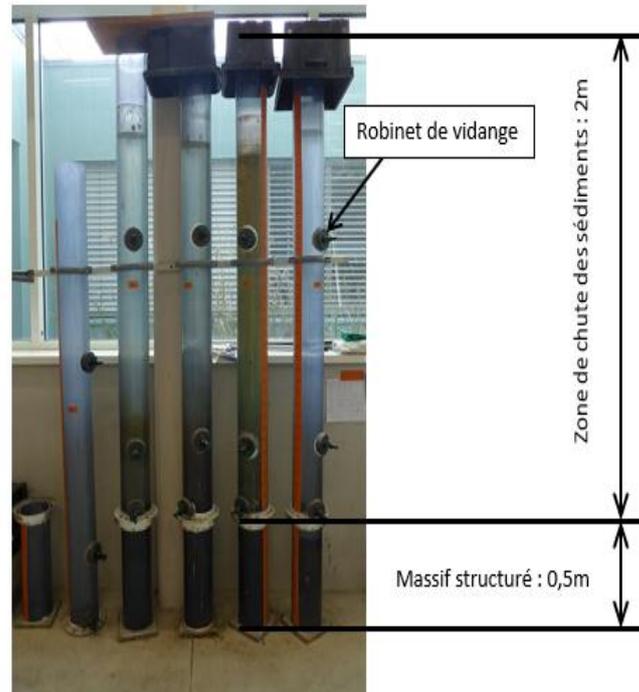


Figure IV-1: Colonnes de sédimentation

2.2. Préparation des sédiments et montage des colonnes de sédimentation

Avant la mise en place dans la colonne, une masse sèche de sédiments est préparée, et pré-mélangée dans un volume de 15 litres d'eau du robinet mise à température ambiante. Ils sont ensuite laissés en phase d'imbibition pendant 24 heures au cours de laquelle la suspension est mélangée régulièrement. À l'issue de cette phase, l'ensemble est déversé dans la colonne de sédimentation depuis un échafaudage mobile. Avant le déversement des sédiments, un agitateur de 3m de long, constitué d'une tige munie d'un hérisson à son extrémité, est placée dans la colonne. Le niveau d'eau est complété pour atteindre systématiquement 2,25 m. Les suspensions est alors mélangée à l'aide de l'agitateur sur toute la hauteur de la colonne d'eau.

La colonne est laissée par la suite au repos. On observe successivement la phase de sédimentation, la matérialisation du massif et au cours du vieillissement il s'opère le processus de tassement-consolidation pendant une durée imposée. Dans ce travail les périodes de vieillissement imposées sont comprises entre deux semaines et 36 semaines.

2.3. Choix de la concentration initiale et éléments influençant la sédimentation

La concentration initiale est choisie de façon à obtenir, après sédimentation, un massif d'une hauteur de l'ordre de 50cm (variable suivant les temps de sédimentation) afin de garantir la sédimentation dans la partie basse de la colonne, permettant ainsi son démontage. Entre 5 et 6 kg de sédiments sont alors utilisés pour la préparation des colonnes de sédimentation. La concentration massique ainsi obtenue est de l'ordre de 35 kg.m^{-3} ($\Phi=0,0176$).

Le choix de cette concentration influera sur la vitesse de sédimentation. En effet, pour des concentrations inférieures à la concentration critique d'entravement, l'augmentation régulière de la concentration des sédiments favorise la floculation et entraîne par la suite l'augmentation de la vitesse de chute des sédiments. En revanche, au-delà de cette concentration critique, la vitesse diminue quand la concentration en sédiments augmente (62), (115). La valeur de la concentration critique d'entravement varie entre 5 kg.m^{-3} ($\Phi=0,0025$) et 10 kg.m^{-3} ($\Phi=0,005$) selon le type des sédiments étudiés. Sanchez et Delanoë (116), montrent que la sédimentation dans les colonnes dépend en plus de la concentration initiale des sédiments, des dimensions de la colonne utilisée (hauteur et diamètre). En fait, les effets de bords perturbent l'écoulement et induisent l'augmentation de la viscosité de la solution vaseuse d'autant plus que le diamètre de la colonne est petit.

2.4. Démontage et méthodologie d'analyse des massifs sédimentés.

2.4.1. Démontage des colonnes de sédimentation

Lorsque la durée de vieillissement du massif prévue est atteinte, l'eau présente au-dessus du massif sédimenté est évacuée. Pour ce faire, les 4 robinets situés le long de la colonne sont ouverts successivement, du plus haut vers le plus bas, afin d'éviter la remise en suspension de la partie supérieure du massif. Les deux parties de la colonne sont ensuite désolidarisées puis séparées délicatement. Le massif est alors prêt pour la caractérisation :

- Recherche de la distribution verticale depuis l'interface fluide-sédiments de la contrainte de cisaillement (critère de remise en suspension des sédiments),
- Recherche de la distribution verticale depuis l'interface fluide-sédiments de la teneur en eau (de la fraction volumique solide),
- Recherche de la distribution verticale depuis l'interface fluide-sédiments de la distribution granulométrique.

Afin de procéder à l'identification de la contrainte de cisaillement, la partie basse contenant le massif de sédiments est alors placée en dessous du système de caractérisation mécanique du massif.

2.4.2. Système de caractérisation des massifs

Le système de caractérisation des colonnes est constitué d'un rhéomètre Brookfield Soft Solid Tester (1) permettant la mesure de la contrainte de cisaillement seuil des sédiments (**Figure IV-2**), associé à une presse uniaxiale que l'on utilise pour le contrôle du positionnement vertical sur une distance voisine de 50cm. Le rhéomètre est muni d'une tige (2) de 60 cm de longueur qui se termine par un

outil "Vane" (pâles cruciformes) (16 mm de diamètre équivalent x 16 mm de hauteur). L'outil est mis en place par fonçage dans le massif sédimentaire à différentes profondeurs. La profondeur de l'outil est contrôlée par la presse (3) placée sur une table mobile (4) et reliée à un ordinateur (5) pour le pilotage du déplacement vertical de la presse et du test de cisaillement.

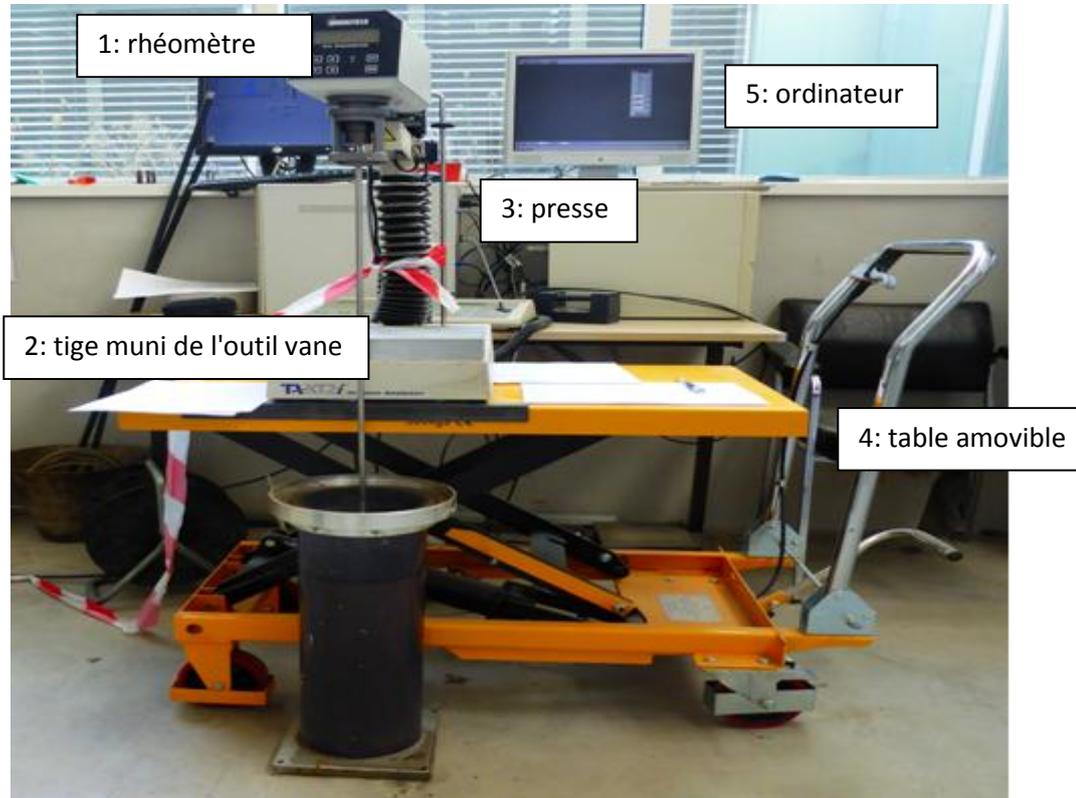


Figure IV-2: Système de caractérisation des colonnes de sédimentation

Lorsque l'outil Vane est positionné à la profondeur voulue, le test de cisaillement localisé est déclenché. Le rhéomètre mesure le couple résistant engendré sur l'outil par les sédiments c'est à dire le moment de torsion induit sur l'arbre moteur. Ce moment mesuré permet de calculer la contrainte de cisaillement du matériau. Pour chaque massif sédimenté testé, les mesures sont réalisées le long de trois sondages distribués sur la surface circulaire de la colonne. Des mesures sont réalisées à différentes profondeurs dans chacun de ces sondages, comme précisé sur la **figure IV-3**.

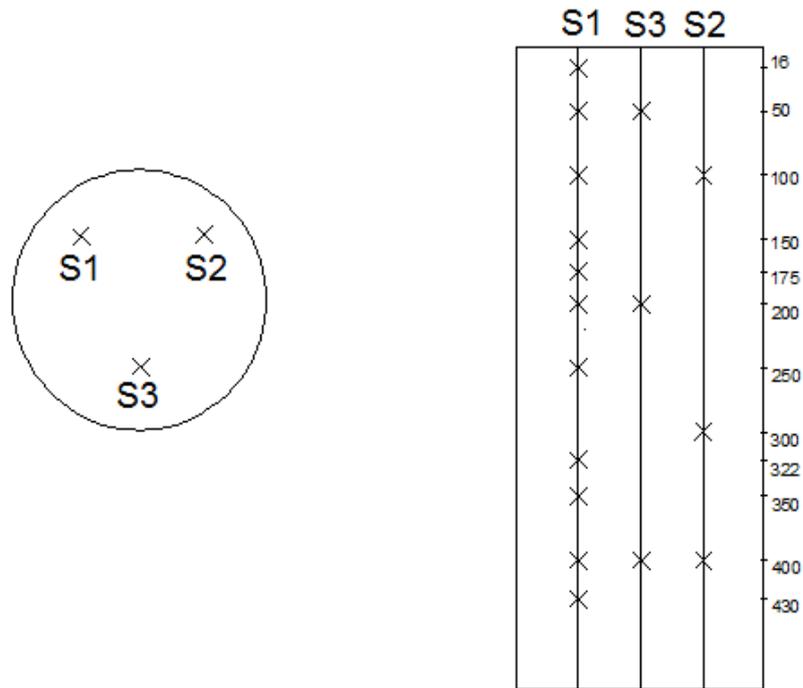


Figure IV-3: Essais scissométriques réalisés dans le massif sédimenté.

Pour la première mesure, la position de la presse est maximale. La hauteur de la table est ajustée de façon à pouvoir positionner la face inférieure de l’outil Vane à l’interface eau-sédiment (**Figure IV-4**). Cette mesure représente le zéro du positionnement des altitudes pour lesquelles les paramètres sont mesurés.

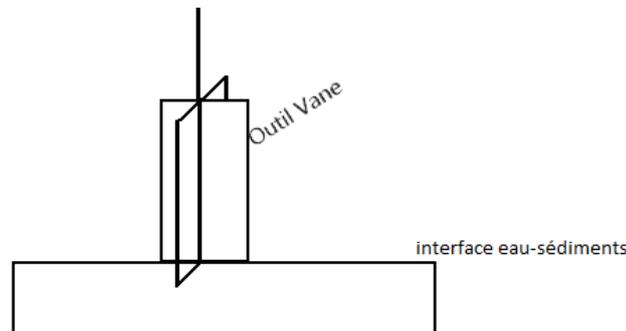


Figure IV-4: Outil Vane test à l’interface eau-sédiments

Nous notons alors la hauteur initiale de la table. Ensuite, à l’aide de la presse, on entraîne l’outil dans le massif à une profondeur de 16mm. La première mesure est réalisée à cette cote. L’enfoncement de la tige est ensuite ajusté à l’aide de la presse jusqu’à arriver à la position limite basse de la presse. Afin de pouvoir positionner l’outil Vane au plus profond, les essais suivants imposent de repositionner la table amovible et en ramenant la presse en position haute. Ce double réglage permet d’effectuer les mesures sur la hauteur totale du massif. L’essai de cisaillement est le même que celui décrit au chapitre II-partie II-2-4. L’essai est réalisé à un taux de cisaillement imposé fixe de $0,01 \text{ s}^{-1}$ pendant 1500 s. L’essai est toutefois arrêté plus tôt si le passage par un maximum est détecté avant la limite

des 1500 secondes. Pour quelques profondeurs des essais de répétition sont réalisés. Les résultats sont alors exprimés par la valeur moyenne. À noter que ces essais de cisaillement se distinguent des précédents par le nombre de surfaces frottantes à prendre en compte pour le calcul de la contrainte de cisaillement.

Après ces séries de mesures de la contrainte limite de cisaillement, deux carottes sont prélevées. Ces carottages sont réalisés à l'aide d'un mini carottier de diamètre intérieur de 25 mm, et de 0,2 mm d'épaisseur. Ces carottes sont découpées tous les deux centimètres afin d'effectuer sur chaque morceau une mesure de la teneur en eau et une analyse granulométrique (**Figure IV-5**).



Figure IV-5: Photo du carottier et un exemple d'une carotte prélevée et découpée de la colonne de sédiments sans matières organiques d'âge de deux semaines.

2.4.3. Influence du cisaillement autour de la tige

Les essais de cisaillement étant réalisés à différentes profondeurs dans le massif tassé-consolidé, on peut se poser la question de l'influence du frottement le long de la tige au-dessus de l'outil Vane. En effet, en bas de massif, l'outil est enfoncé d'environ 40 cm, il y a donc 40 cm de tige dans le matériau. Pour évaluer cet effet, des mesures ont été réalisées dans un massif avec (i) la tige munie de l'outil Vane et par la suite (ii) dans le même massif avec la tige seule (sans l'outil Vane). Ces mesures ont été réalisées dans un massif de matériaux sans matières organiques, correspondant ainsi aux matériaux les plus frottants et donc représentant les conditions les plus sévères vis-à-vis du frottement le long de la tige. La **figure IV-6** montre que l'effet du cisaillement de la tige n'affecte pas l'identification du maximum du couple de torsion et par la suite du calcul de la contrainte limite de cisaillement. Aussi, dans la suite du travail, l'effet de la tige a été négligé.

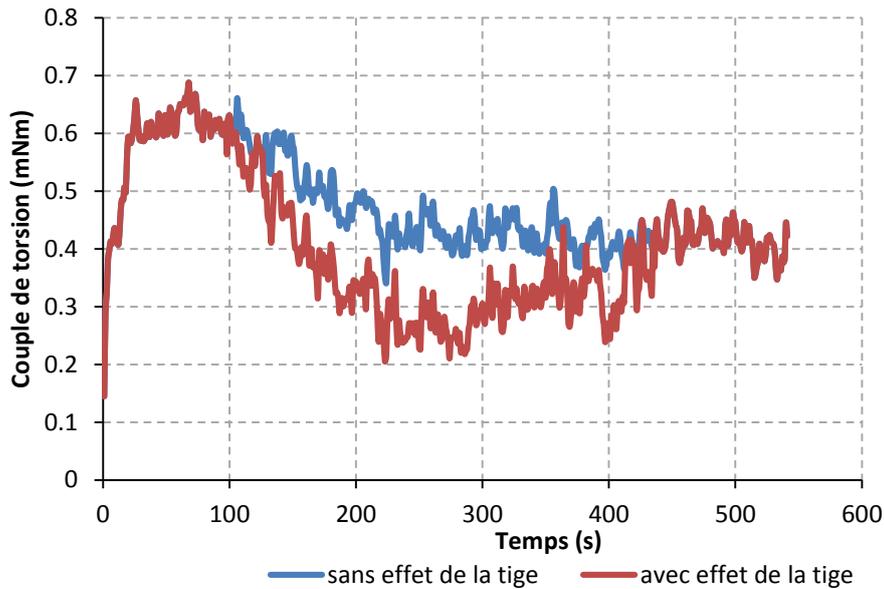


Figure IV-6: Évolution du couple de torsion au cours de l'essai avec et sans effet de la tige

3. Influence de l'âge

3.1. Structuration des sédiments dans une colonne âgée de 2 semaines

La contrainte de cisaillement seuil est un indicateur du degré de structuration des sédiments. Au cours du temps, l'évolution de la contrainte de cisaillement seuil nous permettra d'étudier la compacité des sédiments. Plus la contrainte de cisaillement est grande, plus les sédiments sont structurés.

À chaque profondeur, nous effectuons une mesure de la contrainte de cisaillement seuil (essai Vane test), nous obtenons alors la courbe Couple de torsion en fonction du temps (comme déjà mentionné).

Nous sélectionnons la zone de temps où le couple maximum est obtenu. Nous calculons alors la moyenne sur cette zone pour déterminer le moment maximal et calculer par la suite la contrainte de cisaillement seuil. La **figure IV-7** montre un exemple d'évolution du couple de torsion en fonction du temps et de détermination de l'étendue temporelle utilisée pour calculer la moyenne du couple (dans ce cas, la zone de calcul est comprise entre les temps $t = 40s$ et $t = 80 s$)

La **figure IV-7** présente une courbe typique obtenue. Sur cette courbe, le couple (ou la contrainte) augmente d'abord linéairement en fonction du temps, puis atteint un maximum avant de décroître. La première phase correspond à une réponse quasi réversible du matériau (phase élastique). Le maximum correspond au seuil d'écoulement du matériau. La dernière phase de décroissance du couple en fonction du temps est liée à la déstructuration du matériau sous cisaillement. Notons que le pic est d'autant plus marqué que le matériau est apte à se structurer au repos (forme de thixotropie). En l'absence de ce phénomène, le couple (ou la contrainte) tend vers une valeur constante après la phase élastique. C'est ce palier qui définit alors le seuil de mise en écoulement (95).

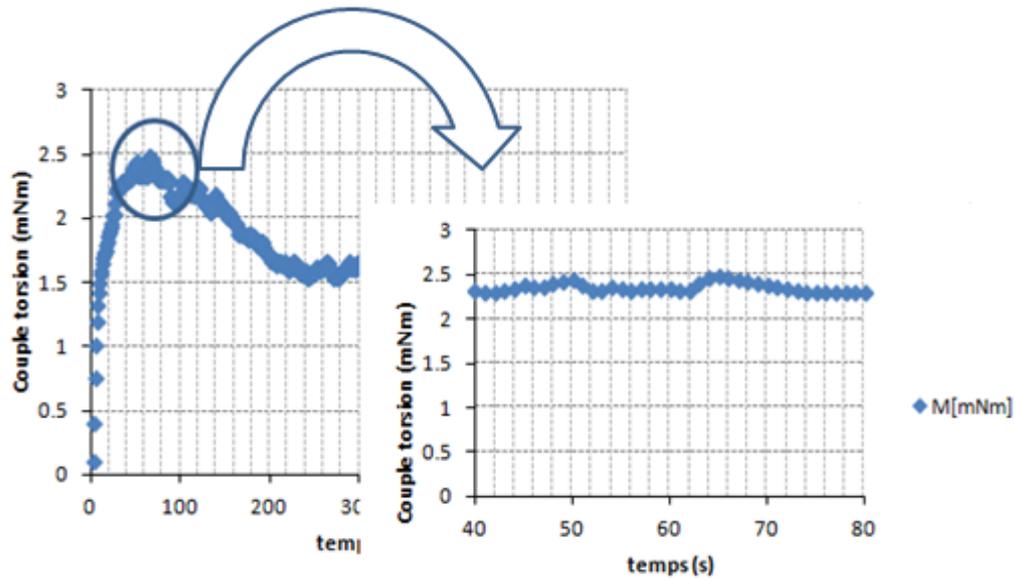


Figure IV-7: Exemple d'évolution du couple de torsion en fonction du temps de l'essai.

L'évolution de la contrainte moyenne limite de cisaillement en fonction de l'enfoncement dans le massif est représentée sur la (Figure IV-8) pour la colonne de sédiments naturels qui a été tassée-consolidée sous poids propre et vieillie pendant deux semaines. Les valeurs obtenues à partir des trois sondages se situent sur une même courbe d'évolution du seuil avec la profondeur. Les sédiments situés le plus en profondeur sont logiquement plus compactés que ceux proches de la surface du massif. Les barres d'erreurs montrent le caractère répétable des résultats.

Sur cette figure, on note l'absence de seuil limite de cisaillement au voisinage de l'interface fluide-sédiments. Ceci peut être lié à la précision de mesure du rhéomètre utilisé pour ces essais, mais suggèrent surtout qu'après cette période de vieillissement de deux semaines, cette zone du massif présente un comportement rhéologique à dominance visqueuse. Au-delà, les résultats obtenus suggèrent une évolution semi-logarithmique. La frontière entre une zone visqueuse et une zone visco-plastique est située entre -50mm et -100mm. Pour compléter, nous avons reporté la modélisation du profil au moyen d'une équation semi-logarithmique figure IV-9. La confiance obtenue en retenant le coefficient de corrélation R^2 est très acceptable.

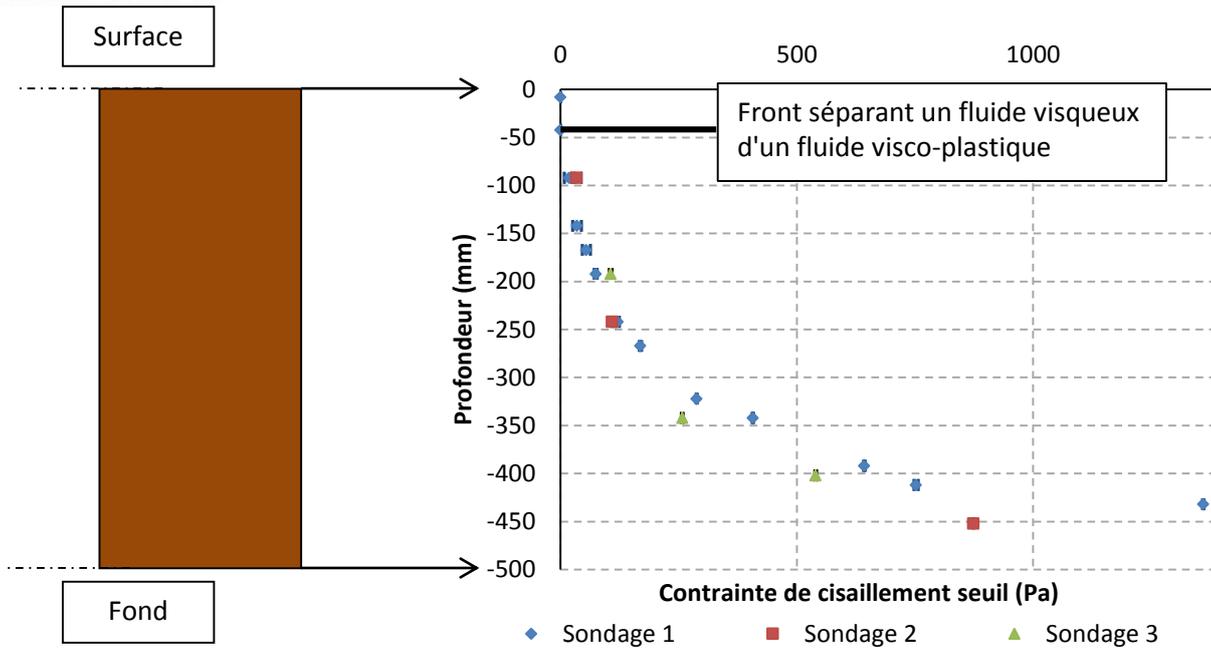


Figure IV-8: Évolution de la contrainte de cisaillement seuil en fonction de la profondeur pour la colonne de sédiments naturels d'âge deux semaines. L'altitude 0 représente l'interface fluide-sédiments.

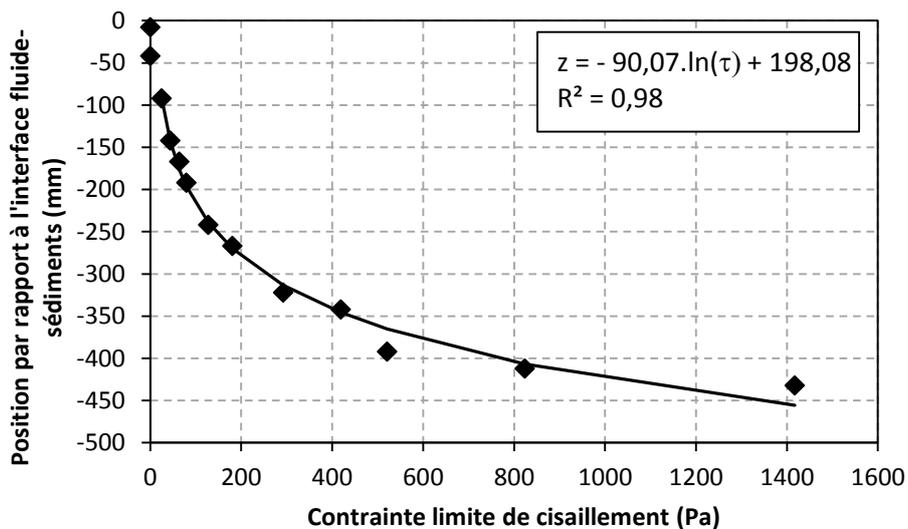


Figure IV-9 : Modélisation de l'évolution de la contrainte limite de cisaillement en fonction de l'enfoncement au moyen d'un modèle semi logarithmique pour un massif âgé de deux semaines. L'altitude 0 représente l'interface fluide-sédiments.

Deux facteurs de structuration des massifs sont introduits dans l'analyse : la présence de sels dans les sédiments et celle de la matière organique. Pour rappel, l'élimination des sels dans les sédiments est effectuée par lavage à l'eau claire. La calcination est employée pour éliminer la matière organique qui élimine également les sels. Pour le vieillissement à deux semaines, deux colonnes ont été réalisées : une avec des sédiments sans sels et une seconde avec des sédiments sans sels et sans matière organique. L'évolution de la contrainte limite de cisaillement en fonction de l'enfoncement est présentée sur la **figure IV-10**.

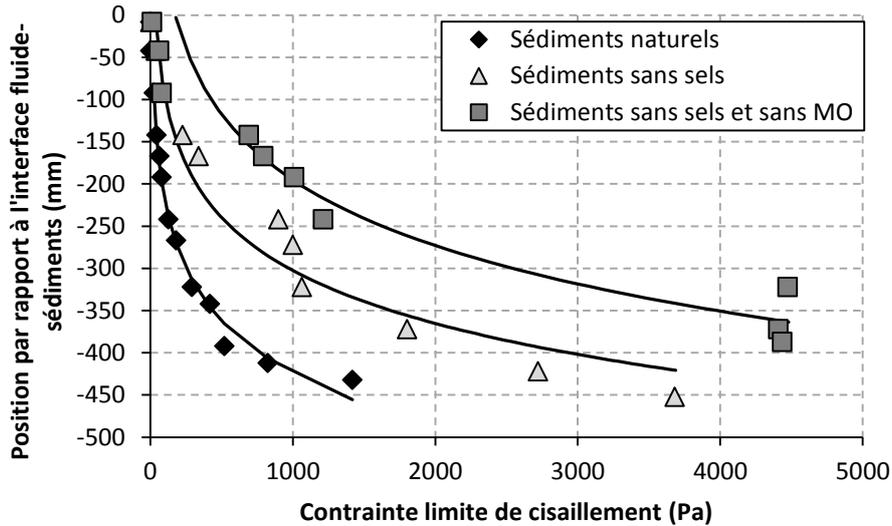


Figure IV-10 : Modélisation de l'évolution de la contrainte limite de cisaillement en fonction de l'enfoncement au moyen d'un modèle semi logarithmique pour un massif âgé de deux semaines. Essais réalisés avec des sédiments naturels, des sédiments sans sels et des sédiments sans sels et sans matière organique. L'altitude 0 représente l'interface fluide-sédiments.

Sédiments naturels : $z = -90,07 \cdot \ln(\tau) + 198,09 - R^2 = 0,98$

Sédiments sans sels : $z = -90,62 \cdot \ln(\tau) + 323,5 - R^2 = 0,94$

Sédiments sans sels et sans matière organique : $z = -112,14 \cdot \ln(\tau) + 579,34 - R^2 = 0,94$.

Ces résultats montrent que la tendance semi logarithmique est conservée dans les trois cas. Nous notons que les coefficients directeurs (dans le plan $[z ; \ln(\tau)]$) sont sensiblement équivalents et que la zone de la colonne dépourvue de seuil limite de cisaillement se réduit en retirant successivement les sels et par la suite les sels et la matière organique. La conservation de la courbe de tendance et l'identification d'un coefficient directeur moyen commun suggèrent que les sels et la matière organique agissent plus comme un accélérateur de structuration (par l'augmentation globale de la résistance au cisaillement durant une même période de tassement-consolidation et vieillissement) que sur la structuration de la matière.

3.1.1. Distribution de la teneur en eau (fraction volumique solide) dans le massif

Les résultats des mesures de la teneur en eau pour les deux carottes prélevées au sein des massifs composés de sédiments naturels, de sédiments sans sels et de sédiments sans sels et sans matière organique permettent d'établir deux profils de distribution en fonction de l'enfoncement, **figure IV-11**. Pour chacune des configurations, les deux évolutions dans le plan (z ; W) sont confondues. On note une bonne répétabilité des résultats. Ensuite, dans la continuité de l'analyse de l'évolution de la contrainte limite de cisaillement, on note que les trois profils obtenus sont sensiblement équivalents mais décalé globalement selon l'axe de l'enfoncement. Pour conforter ce constat, nous avons opéré un glissement global de la courbe sans les sels (décalage global de 80 mm) et la courbe sans les sels et sans la matière organique (décalage global de 250 mm) vers la courbe des sédiments naturels. Le résultat est présenté sur la **figure IV-12** et il confirme bien la similitude des évolutions. Pour chaque cas, on note que la teneur en eau w présente deux évolutions distinctes et quasi linéaire par morceau, zone 1 et 2 sur la **figure IV-11** (c'est un peu moins visible en présence des sédiments naturels car le second tronçon est situé au voisinage du fond de la colonne). Cette distribution résulte des matériaux employés et du processus de mise en œuvre des massifs (concentration volumique solide de départ imposée pour l'obtention d'un massif de hauteur moyenne calibrée et hauteur de chute des sédiments au cours du processus de sédimentation). À l'interface fluide-sédiments, en retenant une évolution linéaire de la teneur en eau en fonction de l'enfoncement, la teneur en eau et la fraction volumique solide sont estimées dans le **tableau IV-1**.

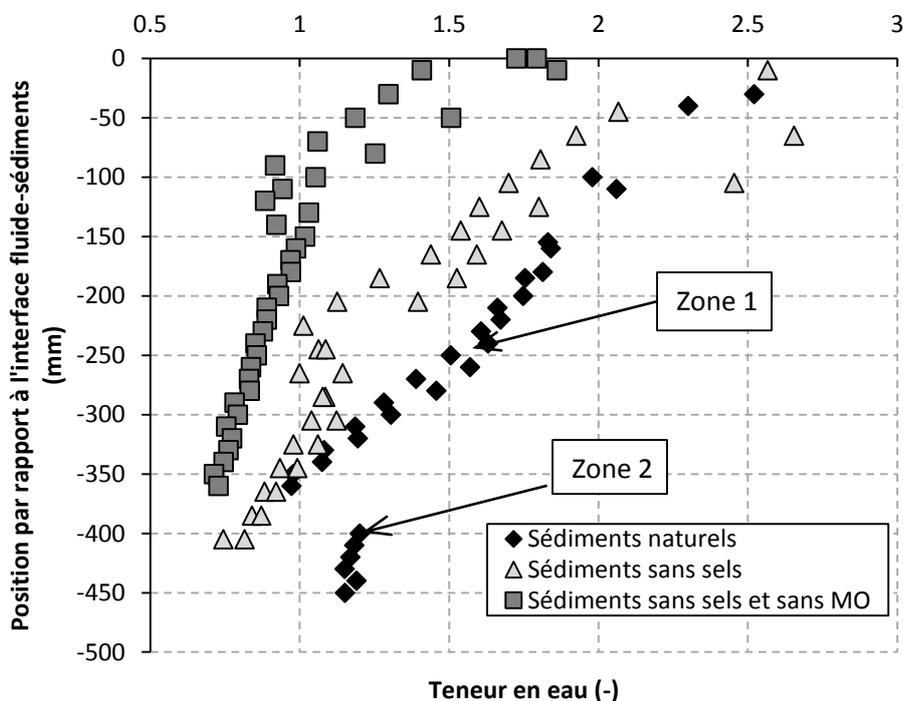


Figure IV-11: Évolution de la teneur en eau en fonction de la profondeur pour la colonne âgée de deux semaines. Effet de l'élimination des sels et de la matière organique. L'altitude 0 représente l'interface fluide-sédiments.

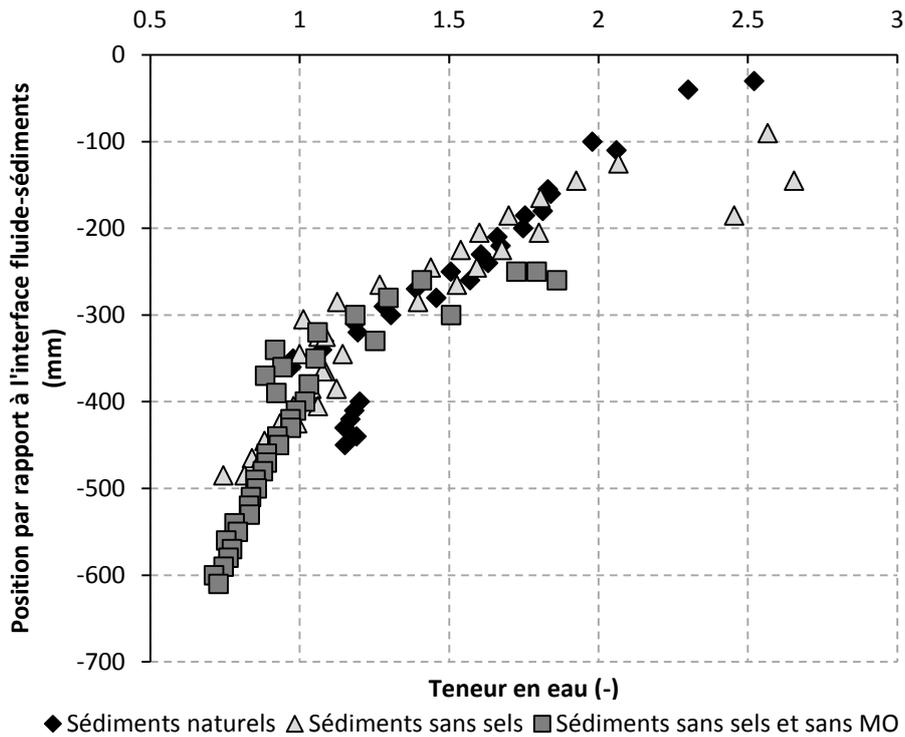


Figure IV-12: Évolution de la teneur en eau en fonction de la profondeur pour la colonne âgée de deux semaines. Effet de l'élimination des sels et de la matière organique. L'altitude 0 représente l'interface fluide-sédiments.

Les résultats présentés dans le **tableau** IV-1 peuvent être mis en parallèle des résultats exposés au chapitre III vis-à-vis du seuil limite de cisaillement et de sa structuration en fonction de la fraction volumique solide pour des mélanges jeunes. Les travaux menés ont permis de suggérer une fraction volumique solide critique séparant un fluide visqueux d'un fluide visco-plastique et de l'ordre de 0,17. En présence des colonnes ici âgée de deux semaines, nous notons l'absence de seuil à l'interface fluide-sédiments pour le massif composé de sédiments naturels et des sédiments sans sels. Pour ces deux cas, la fraction volumique solide est en deçà de la valeur critique ; ce qui suggère que pour ces deux cas une couche visqueuse surmonte le massif visco-plastique. Une illustration complémentaire est donnée sur la **figure** IV-13 avec une photographie d'une des carottes prélevées dans la colonne des sédiments. On note le caractère fluide de la matière au voisinage de l'interface fluide-sédiments (Interface F-S) et le caractère plastique au plus bas du massif (fond).

Tableau IV-1 : Estimation de la teneur en eau (W (-)) et de la fraction volumique solide (ϕ (-)) à l'interface fluide-sédiments ($z = 0$) pour un massif âgé de deux semaines. Influence de la présence des sels et de la matière organique dans les sédiments.

Configuration	Teneur en eau ($z = 0$)	Fraction volumique solide ($z = 0$)
Sédiments naturels	2,57	0,12
Sédiments sans sels	2,22	0,18
Sédiments sans sels et sans MO	1,48	0,25



Figure IV-13: Carotte prélevée de la colonne d'âge deux semaines.

En revanche, en l'absence des sels et de la matière organique, nous avons montré que le seuil limite de cisaillement existe à l'interface fluide-sédiments et la fraction volumique solide est au-delà de la valeur critique. Finalement, en complément des propos formulés avec la contrainte de cisaillement, la similitude des profils de teneur en eau confirme que les sels et la matière organique agissent ici de façon privilégiée comme un accélérateur de structuration.

L'aspect compressibilité des matériaux impact également directement l'évolution du comportement de ceux-ci en cours de consolidation. Ainsi, des essais de compressibilité à l'œdomètre ont été réalisés sur le matériau naturel et sur le matériau sans matières organiques et sans sels. Pour la réalisation de ces essais, les matériaux sont humidifiés pour atteindre une rhéologie proche de l'état liquide, et similaire pour les deux matériaux. Les essais sont ensuite conduits à vitesse de déformation constante, en assurant un drainage uniquement sur la face supérieure de l'échantillon, tandis que la suppression interstitielle générée sur la face inférieure est mesurée. Les courbes de compressibilité ainsi obtenues sont représentées **figure** IV-11. Sur ce diagramme figurent l'évolution de la contrainte effective verticale (σ'_v) (en trait plein) et celle de la surpression interstitielle Δu mesurée en bas de l'échantillon en trait pointillé.

On note tout d'abord qu'à l'état initial, correspondant à une même rhéologie, la valeur de la fraction volumique solide est nettement plus élevée dans le cas du matériau sans matières organiques.

On observe également que la surpression interstitielle générée en bas de l'éprouvette est nettement plus faible dans le cas du matériau dépourvu de matière organique. Ceci indique que la vitesse de consolidation est nettement plus élevée lorsque la matière organique est absente.

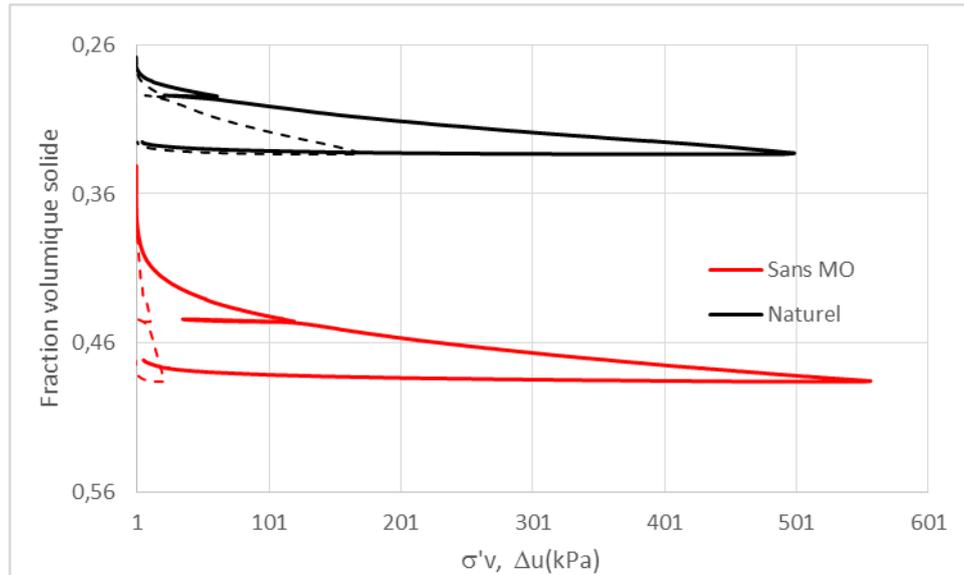


Figure IV-11 : Courbes de compressibilité unidimensionnelle des sédiments naturels et des sédiments sans sels et sans matières organiques.

L'augmentation du seuil de cisaillement observée pour les sédiments sans sels et sans matières organiques (par rapport aux sédiments naturels) pour une même durée de vieillissement semble ainsi pouvoir être imputée à une cinétique plus rapide du phénomène consolidation induite par la suppression des matières organiques et des sels.

La finalisation de l'analyse des données doit permettre d'exprimer un critère de structuration au sein des massifs. Dans cette logique et dans la continuité des travaux du chapitre III, nous ré-interprétons les résultats précédents en introduisant la fraction volumique solide. Pour cette analyse, nous conservons le principe d'une courbe maîtresse pour analyser l'évolution de ce paramètre en fonction de l'enfoncement. Les résultats sont présentés sur la **figure IV-14** en confondant les données des sédiments naturels, des sédiments sans sels et des sédiments sans sels et sans matière organique.

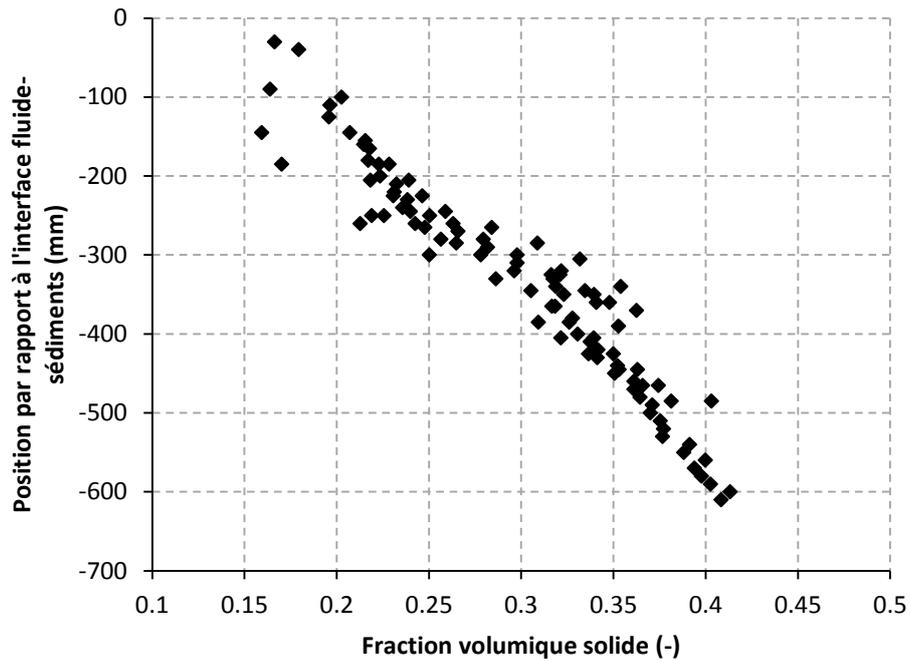


Figure IV-14 : Évolution de la distribution de la fraction volumique solide le long du massif et modélisation en tenant compte des trois configurations de test exprimées sous la forme d’une courbe maîtresse. L’altitude 0 représente l’interface fluide-sédiments.

L’introduction de ce paramètre permet d’uniformiser les évolutions en faisant abstraction des zones 1 et 2 mises en évidence lors de l’analyse de la teneur en eau. Une évolution quasi linéaire sur la totalité des massifs est mise en évidence dont les paramètres sont exprimés dans le **tableau IV-2** avec un degré de confiance (R^2) acceptable.

Tableau IV-2 : Paramètres de modélisation de l’évolution de la fraction volumique solide en fonction de l’enfoncement dans le massif ($z = \text{coef dir.} \cdot \phi + \text{Cte}$) en distinguant l’emploi de sédiments naturels, de sédiments sans sels et de sédiments sans sels et sans MO.

Configuration	Coefficient directeur (mm)	Constante (mm)	R^2
Sédiments naturels	-1889,48	230,57	0,91
Sédiments sans sels	-1889,48	310,57	0,91
Sédiments sans sels et sans MO	-1889,48	480,57	0,91

3.1.2. Évolution de la distribution granulométrique dans le massif

Les mesures par granulométrie laser (en voie liquide avec ajout de dispersant) effectuées sur des prélèvements le long des carottages révèlent des histogrammes monomodaux ou bimodaux, comme l’illustre la **figure IV-15**. Pour chaque granulométrie effectuée, le diamètre moyen probable a été calculé ($\overline{d_{moy}}$) et le diamètre maximum (d_{max}) a été identifié.

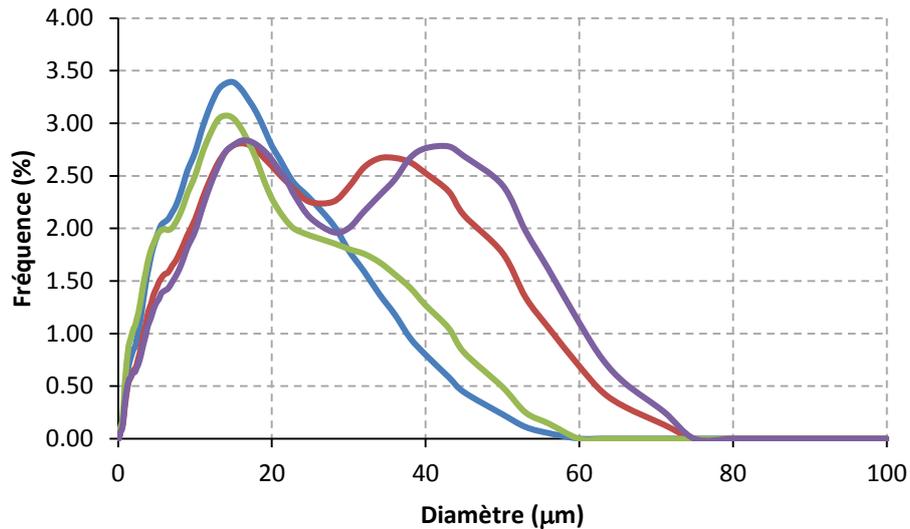


Figure IV-15 : Illustration des distributions granulométriques mises en évidence le long des massifs.

Sans chercher à distinguer l'effet de l'âge ou de la présence des sels ou de la matière organique, nous avons tenté de vérifier qu'un profil moyen granulométrique s'impose dans les colonnes dès lors que le protocole de mise en œuvre des mélanges reste sensiblement le même. En présence des sédiments simplement séchés, on peut s'attendre à ce que l'âge n'influence nullement cette distribution car l'organisation du massif s'établit au cours d'une journée. En revanche, on pouvait s'attendre à ce que la présence ou non des sels et de la matière organique ait un rôle dans la distribution moyenne granulométrique. Les évolutions du diamètre moyen probable et du diamètre maximum en fonction de l'enfoncement sont présentées sur la **figure IV-16**. Ces résultats montrent que quelle que soit la position par rapport à l'interface fluide-sédiments, le diamètre maximum est quasi systématiquement borné entre 34 et 71 μm exception faite des mesures effectuées au voisinage de l'interface qui révèlent logiquement le d_{max} le plus faible. Les événements mesurés à 140 μm restent assez peu représentatifs. Vis-à-vis des réductions granulométriques introduites au chapitre III, les résultats présentés montrent l'omniprésence de la part liante (80 μm) identifiée avec les travaux de rhéologie au jeune âge.

Pour le diamètre moyen probable, on note un léger gradient entre l'interface fluide-sédiments et le fond du massif (augmentation de $\overline{d_{moy}}$ avec l'enfoncement dans le massif). Sa valeur maximum reste inférieure à 25 μm.

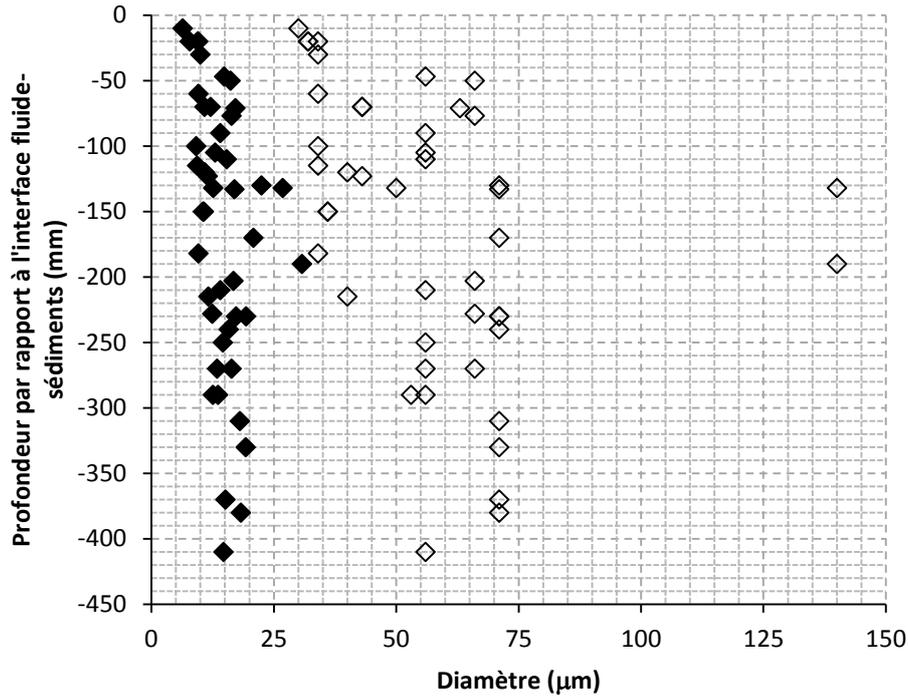


Figure IV-16: Évolution du diamètre moyen probable ($\overline{d_{moy}}$) (symbole plein) et du diamètre maximum (d_{max}) (symbole vide) le long du massif sans distinction d'âge et de présence de sels et de matières organiques.

3.1.3. Vers une courbe de structuration du seuil limite de cisaillement ($\tau ; \Phi$)

A ce stade du traitement des données, sans intégrer explicitement la variabilité de l'étendue granulaire au sein du massif (compte tenu des résultats d'analyse des courbes granulométriques qui ne montrent pas de dispersion notable des distributions de grains dans le massif) nous construisons à partir des données mises en forme une courbe de structuration ($\tau ; \phi$) qui est comparée aux courbes de structuration obtenues au chapitre III pour des suspensions au jeune âge, **figure IV-17**.

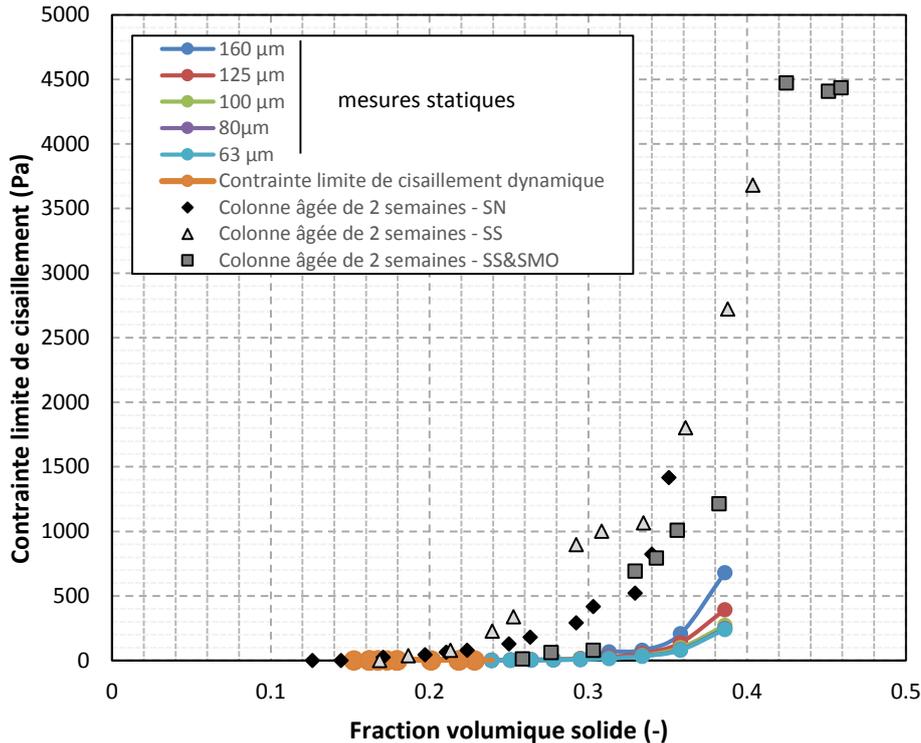


Figure IV-17 : Courbe de structuration de la contrainte limite de cisaillement (τ ; Φ) pour des suspensions au jeune âge et des suspensions formant un massif tassé-consolidé et vieilli pendant 2 semaines. SN : Sédiments naturels ; SS : Sédiments sans sels ; SS&SMO : Sédiments sans sels et sans matière organique.

Après la période de deux semaines, les résultats obtenus montrent nettement que le massif a globalement acquis une capacité de résistance au cisaillement. Au cours de cette période, il apparaît clairement que les sels et la matière organique modifient la vitesse de structuration de la colonne, mais sans pour autant changer le mécanisme de structuration des massifs. En effet, même si les résultats sont un peu bruités, les évolutions (τ ; ϕ) dans les trois cas restent sensiblement équivalentes. Par ailleurs, ces résultats montrent que la fraction volumique solide critique identifiée au jeune âge et voisine de 0,17 reste une valeur acceptable pour distinguer la transition entre un fluide visqueux et un fluide visco-plastique. Ensuite, la fraction volumique solide de packing établie au chapitre III ($\phi_{\max} = 0,409$) reste très acceptable. En revanche, en reprenant le modèle de Flatt et son calage sur les données obtenues au jeune âge, il apparaît que le seuil de percolation est surestimé et qu'il conviendrait plutôt de retenir la fraction volumique solide critique de transition entre un fluide visqueux et visco-plastique.

3.2. Influence de la durée de vieillissement

Pour clore ce chapitre, la transposition de la méthode décrite précédemment est effectuée au temps long vis-à-vis du vieillissement afin de distinguer si la stabilisation du processus de tassement-consolidation sous poids propre et vieillissement peut être atteinte. En présence des sédiments naturels, la durée du projet a permis de fiabiliser les données pour les périodes de 24 et 36 semaines que nous exposons à présent. En premier lieu, l'évolution des contraintes limites de cisaillement sont présentées sur la **figure IV-18** après la période de 2, 24 et 36 semaines.

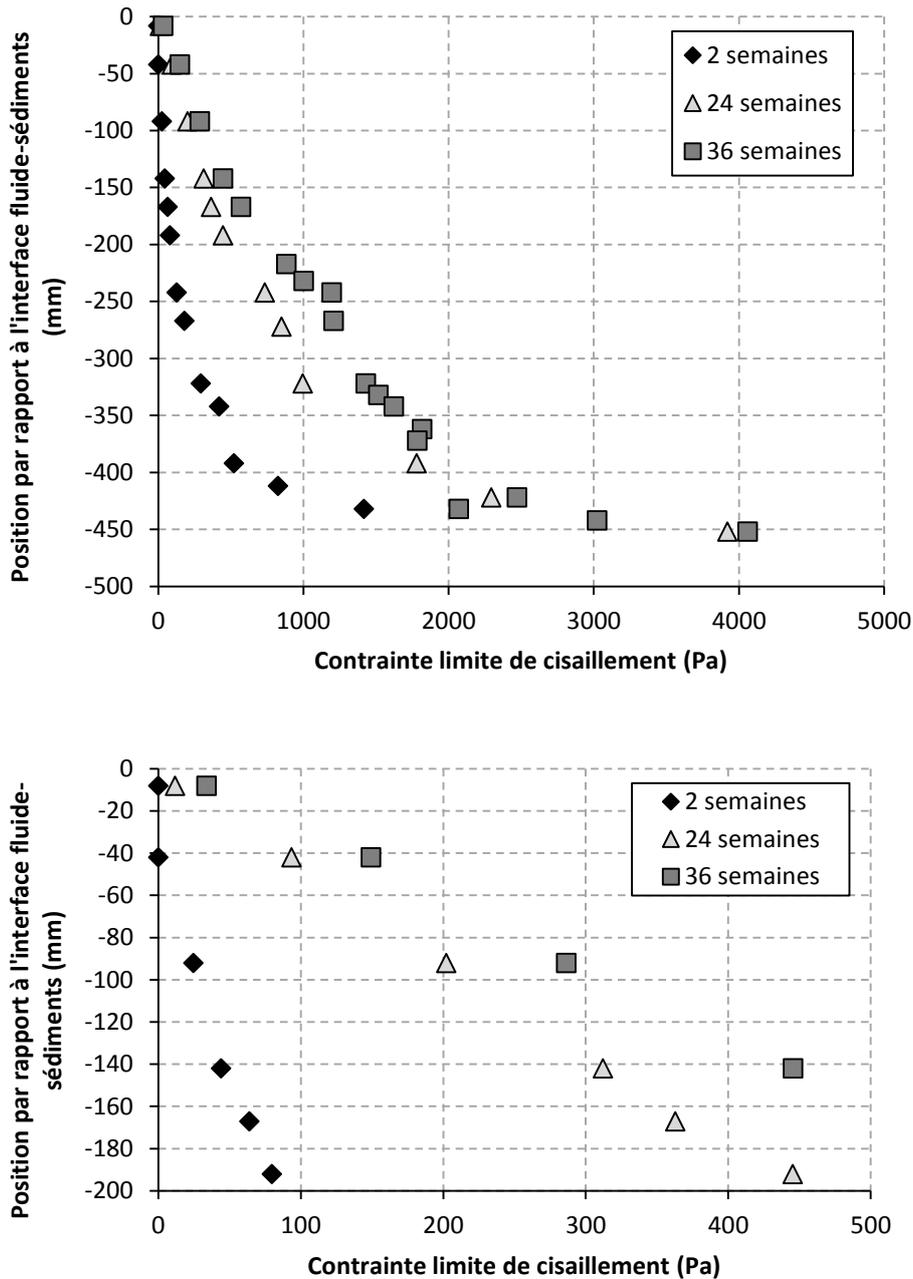


Figure IV-18 : Évolution de la contrainte limite de cisaillement en fonction de l'enfoncement dans les massifs pour des périodes de vieillissement de 2, 24 et 36 semaines et détail au voisinage de l'interface fluide-sédiments. L'altitude 0 représente l'interface fluide-sédiments.

Ces résultats montrent que la tendance déjà décrite après 2 semaines est bien conservée pour les périodes de vieillissement de 24 et 36 semaines. L'accroissement global de la contrainte démontre l'avancement de la structuration des mélanges. Entre 24 et 36 semaines, une augmentation du seuil est notée ce qui indique que la stabilisation du processus n'est pas atteinte. Le détail de la **figure IV-18** montre que l'avancement de la structuration au voisinage de l'interface fluide-sédiments permet de distinguer un fluide visco-plastique par l'existence du seuil limite de cisaillement à l'interface.

En complément, les évolutions de la fraction volumique solide en fonction de l'enfoncement sont présentées sur la **figure IV-19**.

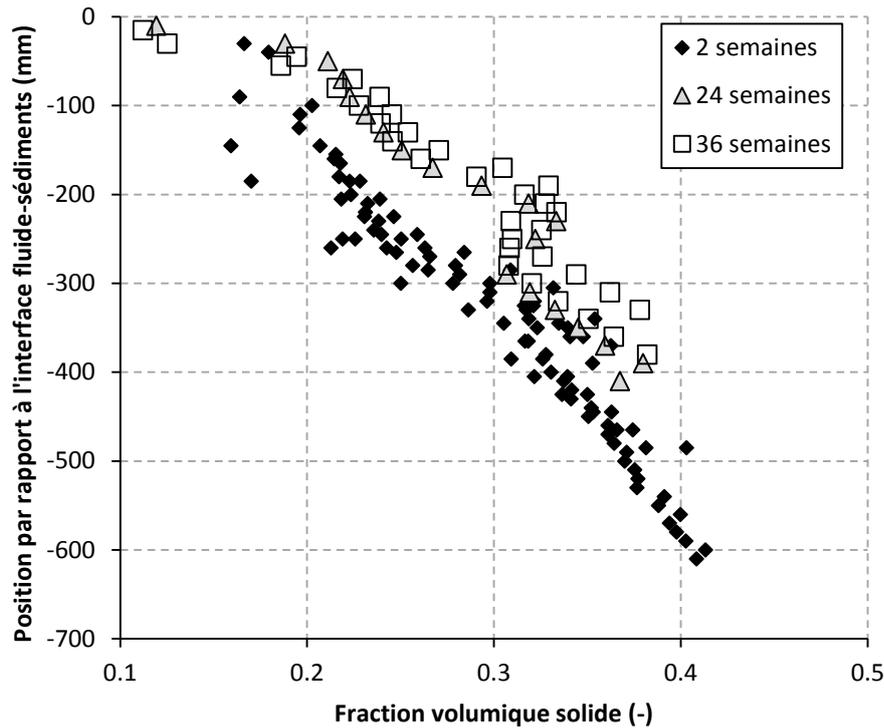


Figure IV-19 : Évolution de la fraction volumique solide en fonction de l'enfoncement dans les massifs pour des périodes de vieillissement de 2, 24 et 36 semaines. L'altitude 0 représente l'interface fluide-sédiments.

Ces résultats sont importants par les deux informations principales qui s'en dégagent :

- Les profils obtenus après 24 et 36 semaines de vieillissement des massifs sont semblables ce qui indique que le processus de tassement-consolidation sous poids propre dans une colonne fluide au repos est achevé dès la 24^{ème} semaine. Un tel résultat indique que l'accroissement de la contrainte de cisaillement qui existe entre la 24^{ème} semaine et la 36^{ème} semaine est à imputer à un ou des processus chimiques et/ou biochimiques,
- Quelle que soit la durée de vieillissement, en présence des sédiments naturels (non traités) les évolutions peuvent être décrites au moyen d'une courbe maitresse. Les « deux courbes » sont simplement décalées selon l'axe du positionnement et décrivent globalement une tendance linéaire. D'un tel constat, la modélisation de l'évolution de la fraction volumique solide en fonction de l'enfoncement est donnée pour chaque cas dans le **tableau IV-3**.

Tableau IV-3 : Paramètres de modélisation de l'évolution de la fraction volumique solide en fonction de l'enfoncement dans le massif ($z = \text{coef dir} \cdot \Phi + \text{Cte}$) pour des mélanges de sédiments naturels et d'eau après 2, 24 et 36 semaines.

Configuration	Coefficient directeur (mm)	Constante (mm)	R ²
2 semaines	-1889,48	230,57	0,91
24 semaines	-1889,48	330,57	0,91
36 semaines	-1889,48	330,57	0,91

Finalement, nous transposons l'ensemble des résultats dans un schéma de structuration du seuil limite de cisaillement, **figure IV-20**.

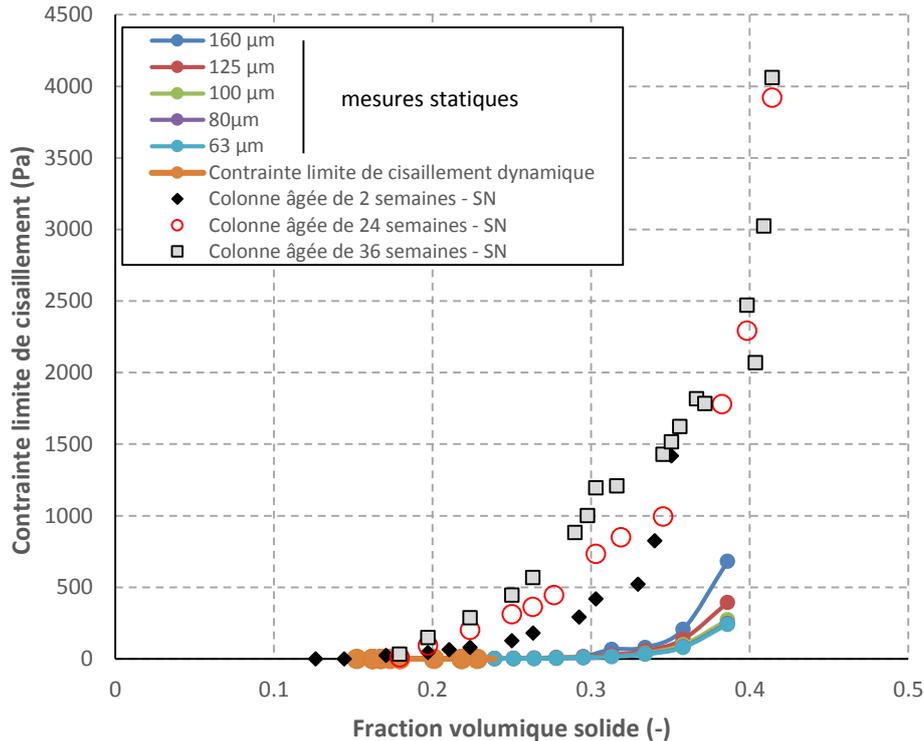


Figure IV-20 : Courbe de structuration de la contrainte limite de cisaillement (τ ; Φ) pour des suspensions au jeune âge et des suspensions formant un massif tassé-consolidé et vieilli pendant 2, 24 et 36 semaines. SN : sédiments naturels.

Ces résultats complémentaires confirment le caractère divergent du lien contrainte limite de cisaillement-fraction volumique solide et se distingue des courbes de structuration au jeune âge et après deux semaines de vieillissement. La fraction volumique minimum est au-delà de la fraction volumique solide critique de 0,17 ; ce qui indique que le massif est entièrement constitué d'un fluide visco-plastique. Par ailleurs, la notion de packing centré autour de 0,409 reste une valeur cohérente pour l'ensemble des résultats.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, les mélanges liquide-solide ont été mis en situation pour recréer un processus de sédimentation-tassement-consolidation que l'on peut retrouver au sein de l'estuaire ou dans le piège à sédiments du Lyvet avec la restriction d'une colonne fluide quasiment au repos. Les conditions d'essais favorables à l'accélération des phénomènes sont réalisées à la température ambiante mais en prenant soins de soumettre les massifs déposés et en cours de structuration au cycle diurne et nocturne. Avec l'objectif de mettre en évidence un comportement asymptotique de l'évolution de la structuration des massifs, la durée maximum de vieillissement retenue était de 9 mois. Afin de faciliter la caractérisation physique, structurale et mécanique des massifs, plusieurs colonnes ont été développées et le protocole de mise en œuvre des mélanges permet une bonne répétabilité des phénomènes de matérialisation du sol sédimentaire. Un tri sédimentaire faible est mis en évidence avec les matériaux prélevés au sein du piège du Lyvet. La multiplication des colonnes permet donc d'introduire l'effet du temps dans l'étude afin de découpler l'influence du processus de tassement-consolidation sous poids propre de processus d'ordre chimique.

La méthode de caractérisation des massifs a été présentée en s'appuyant sur une colonne s'étant structurée pendant 2 semaines. L'adaptation d'un système rhéométrique sur une presse uniaxiale a permis d'effectuer des essais de cisaillement localisés sur toute la hauteur du massif déposé et structuré afin de recréer la distribution de la contrainte de cisaillement. Le prélèvement de carottes a permis d'effectuer des mesures de la fraction volumique solide et des granulométries également le long du massif. Le traitement des données permet de proposer une courbe de structuration (τ ; ϕ) qui a été comparée à celle obtenue pour des suspensions au jeune âge. Les résultats obtenus ont confirmé la transition entre un fluide visqueux et un fluide visco-plastique pour $\phi = 0,17$ et le packing de 0,409 est non seulement représentatif mais pas atteint pour cette période de vieillissement.

Pour cette même période des essais de caractérisation ont été menés avec des sédiments lavés et donc dessalés et des sédiments calcinés, c'est-à-dire privés de sels et de la matière organique. Les essais ont montré dans ce cas que le retrait des sels accélère le processus de tassement, mais la courbe de structuration (τ ; ϕ) établie avec les sédiments non traités est globalement conservée et complétée par le fait que la structuration décale la fraction volumique solide équivalente vers le packing. La vitesse de tassement est encore augmentée dans le cas où la matière organique et les sels sont retirés, mais la courbe de structuration (τ ; ϕ) reste encore sensiblement la même qu'avec les sédiments naturels. Le décalage des données vers le packing est la tendance observée. La caractérisation des paramètres de compressibilité/consolidation confirme la tendance observée, et constitue une voie intéressante pour la poursuite de ce travail.

Après 24 et 36 semaines de vieillissement, nous avons montré que la structuration du massif sous poids propre a atteint sa limite dès la 24^{ème} semaine et l'augmentation continue de la contrainte limite de cisaillement même à 36 semaines montre que le processus de structuration se poursuit sous l'action probable des sels et de la matière organique. Le découplage entre le processus de tassement-consolidation et la réactivité des mélanges a donc été démontré.



Conclusion générale

Au terme de ce mémoire, nous rassemblons les points essentiels de ce travail doctoral dédié à la mise en évidence de quelques mécanismes de structuration de suspensions liquide-sédiments naturels au cours de la matérialisation de massifs de sols en condition laboratoire. Ces travaux représentent une contribution à la compréhension du comportement de vases d'estuaires potentiellement mobilisables et qui au cours du temps sédimentent, se tassent, se consolident et vieillissent. Le cas des matériaux de l'estuaire de la Rance est retenu et plus particulièrement ceux contenus dans le piège à sédiments du Lyvet, solution technique alternative de lutte contre l'envasement.

Dans un tel contexte, nous avons cherché à montrer ce qui peut contribuer à faciliter ou compliquer la mobilisation solide. Celle-ci peut résulter d'un processus d'érosion interfacial plus ou moins localisé à l'interface fluide-sédiments mais qui peut être représenté par une contrainte de frottement qui induit potentiellement le cisaillement de la matière. La mobilisation peut résulter d'un processus de battement de nappe qui peut contribuer au renforcement de l'ancrage des sédiments ou à leur déstructuration. Cette partie du travail a été abordée au cours de la thèse et représente une perspective intéressante. La mobilisation solide peut résulter de la combinaison des deux contributions.

Dans ce travail, nous avons néanmoins principalement investigué le cas de la mobilisation solide par cisaillement en développant une démarche expérimentale essentiellement rhéométrique et rhéologique pour différents âges caractéristiques des suspensions. Compte tenu du processus à caractériser, nous avons privilégié la matérialisation de massifs de sols en simulant un scénario de sédimentation-tassement-consolidation dans des colonnes de 150 mm de diamètre et 2,5 m de hauteur. Les massifs formés sont laissés au repos (à la température ambiante et soumis au cycle diurne et nocturne) durant une période maximum de 9 mois avec l'objectif d'établir des indications sur la cinétique de structuration en distinguant des facteurs influents et surtout pour établir une durée caractéristique nécessaire à l'émergence d'un comportement limite stable.

Dans une telle entreprise, il convenait d'être en mesure de séparer l'effet de structuration induit par le processus de tassement-consolidation de celui du vieillissement. Cet objectif est atteint au sens où nous avons montré que la consolidation s'achève et se stabilise à 24 semaines alors que le vieillissement se poursuit. Il convient à présent, au-delà de ce travail, d'identifier explicitement les mécanismes de vieillissement. Les pistes que nous avons explorées pour le moment tiennent à l'influence des sels et de la matière organique, deux facteurs influant de la structuration des mélanges, dont nous avons montré l'influence pour une période de structuration de colonnes de 2 semaines.

Pour répondre aux objectifs de l'étude, nous avons menés des travaux qui forment deux des parties du mémoire : une étude rhéologique dédiée à l'identification des propriétés des suspensions au jeune âge dont les résultats nous ont aidés à appréhender et interpréter l'évolution des principales propriétés des suspensions au temps long.

Les principales conclusions de ces deux chapitres sont les suivantes :

Confrontés à la caractérisation de suspensions composées de sédiments naturels et d'eau potentiellement réactives, nous avons débuté l'étude rhéologique au temps court par l'exposé de quelques résultats obtenus au moyen d'un protocole de caractérisation rhéométrique :

Une suspension jeune (4 min) est simplement cisailée durant 10 min à taux de cisaillement imposé.

Ce protocole complexe et chronophage avait pour but d'établir des tendances de références du comportement rhéologique des suspensions en se prémunissant d'un risque de réactivité et d'établir une durée représentative durant laquelle les suspensions restent dans une phase dormante (faiblement réactives). Dans ce protocole, les valeurs du taux de cisaillement imposées sont : 0,01 ; 0,1 ; 1 ; 10 et 100 s⁻¹. De ce travail, il ressort l'identification d'un comportement apparent rhéo-épaississant induit par le faible nombre de valeurs du taux de cisaillement retenues pour cette partie de l'étude et par le fait que les mélanges se structurent au bas taux de cisaillement. Ces essais ont montré qu'à fort taux de cisaillement, l'énergie apportée efface l'histoire de la structuration des mélanges et un comportement de type Bingham se distingue.

En complément de ces essais, les travaux ont permis de montrer que les suspensions restent en phase dormante durant au moins 50 min. Ce résultat a permis d'entreprendre une caractérisation rhéologique dynamique au moyen d'un protocole à contrainte imposée en phase de restructuration (après une phase de déstructuration des mélanges). Les courbes d'écoulement sont modélisées seulement à fort taux de cisaillement au moyen du modèle de Bingham. L'analyse de la contrainte limite de cisaillement dynamique a montré un lien assez fonctionnel avec la fraction volumique solide. Nous avons en outre montré qu'une fraction volumique solide critique ($\phi = 0,17$) se distingue et qui marque une transition d'un fluide visqueux et un fluide visco-plastique. Dans cette partie de l'étude, il ne se dégage pas de tendance marquée de l'influence des populations de grains et surtout de leur dimension caractéristique. Des conclusions similaires sont formulées lors de l'analyse de la viscosité qui est liée fonctionnellement à la fraction volumique solide via le modèle de structuration de Krieger-Dougherty. Une fraction volumique de packing est mise en évidence ($\phi_M = 0,409$) et le fluide porteur est bien représenté par l'eau.

Face au risque de structuration des mélanges à faible taux de cisaillement, un programme d'essais d'identification de la contrainte limite de cisaillement en condition quasi statique est réalisé en recourant au Vane test. Dans cette partie du travail, nous avons montré que les sédiments dont la taille n'excède pas 80 μm jouent un rôle de liant dans les suspensions, tandis qu'au-delà les sédiments jouent un rôle d'inclusions. Cependant, ces inclusions étant présentes en faible quantité, la structuration du seuil en fonction de la fraction volumique solide est dominée par la fraction fine. Au final de cette partie de l'étude, le lien ($\tau ; \phi$) est bien représenté par le modèle de structuration de Flatt.

Finalement, au jeune âge, le comportement rhéologique des suspensions est bien représenté par le modèle de Bingham et par conséquent au moyen de deux paramètres :

- La contrainte limite de cisaillement statique que nous retenons comme facteur de mobilisation solide. Ce paramètre est lié à la fraction volumique solide et à l'étendue granulométrique,
- La viscosité plastique. Ce paramètre est lié à la fraction volumique solide, mais a priori pas à l'étendue granulaire. Pour ce dernier facteur d'influence, cette conclusion tient probablement au fait de la sur-représentation du liant par rapport aux inclusions et surtout parce que la caractérisation de la viscosité est faite à fort taux de cisaillement favorable à l'émergence d'un régime de lubrification des inclusions.

En ce qui concerne la caractérisation des mélanges au temps long, les mélanges liquide-solide ont été mis en situation pour recréer un processus de sédimentation-tassement-consolidation. La méthode de caractérisation des massifs a été montée en s'appuyant sur une colonne s'étant structurée pendant 2 semaines. L'adaptation d'un système rhéométrique sur une presse uniaxiale a permis d'effectuer des essais de cisaillement localisés dans toute la hauteur du massif déposé et structuré afin de recréer la distribution de la contrainte de cisaillement. Le prélèvement de carottes a permis d'effectuer des mesures de la fraction volumique solide et des granulométries également le long du massif. Le traitement des données permet de proposer une courbe de structuration ($\tau ; \phi$) qui a été comparée à celle obtenue pour des suspensions au jeune âge. Les résultats obtenus ont confirmé la transition entre un fluide visqueux et un fluide visco-plastique pour $\phi = 0,17$ et le packing de 0,409 est non seulement représentatif mais pas atteint pour cette période de vieillissement.

Pour cette même période des essais de caractérisation ont été menés avec des sédiments lavés et donc dessalés et des sédiments calcinés, c'est-à-dire privés de sels et de la matière organique. Les essais ont montré dans ce cas que le retrait des sels accélère le processus de tassement, mais la courbe de structuration ($\tau ; \phi$) établie avec les sédiments non traités est globalement conservée et complétée par le fait que la structuration décale la fraction volumique solide équivalente vers le packing. La vitesse de tassement est encore augmentée dans le cas où la matière organique et les sels sont retirés, mais la courbe de structuration ($\tau ; \phi$) reste encore sensiblement la même qu'avec les sédiments naturels. Le décalage des données vers le packing est la tendance observée.

Après 24 et 36 semaines de vieillissement, nous avons montré que la structuration du massif sous poids propre a atteint sa limite dès la 24^{ème} semaine et l'augmentation continue de la contrainte limite de cisaillement même à 36 semaines montre que le processus de structuration se poursuit sous l'action probable des sels et de la matière organique. Le découplage entre le processus de tassement-consolidation et la réactivité des mélanges a donc été démontré.

Liste des Figures

Figure I-1 : Schématisation d'une configuration d'écoulement bi-couche composé d'un fluide visqueux newtonien et d'une paroi lisse et indéformable ou potentiellement mobilisable en cisaillement. L'écoulement est placé dans le champ de pesanteur en régime laminaire permanent. Etude en milieu isotherme.....	8
Figure I-2 : Mise en évidence des propriétés d'écoulement au voisinage d'une paroi. Cas d'une plaque plane à bord d'attaque mince. Propriétés de couche limite sans gradient de pression longitudinal.	9
Figure I-3: Évolution de la vitesse au sein de la zone interne de couche limite. Représentation semi logarithmique en coordonnées adimensionnées.	14
Figure I-4: Représentation schématique du profil de vitesse en régime pleinement rugueux.	15
Figure I-5: différentes parties d'un estuaire.	18
Figure I-6: gradient de vitesse dans un estuaire.	20
Figure I-7: Schéma des principales origines des sédiments dans un estuaire.	23
Figure I-8: Phénomène d'érosion, de transport et de sédimentation dans un cours d'eau.	24
Figure I-9: Diagramme classique de Hjulström.	24
Figure I-10: forces appliqués sur les sédiments du fonds.	25
Figure I-11: Mode de transport des particules dans un cours d'eau.	27
Figure I-12: proportions des sédiments pour chaque type de transport.	28
Figure I-13: Diagramme de Shield.	29
Figure I-14: : Théorie "DLVO".	33
Figure I-15: Evolution de la taille des floes en fonction de la concentration et de la turbulence (55).	34
Figure I-16: Evolution de la vitesse de chute en fonction de la concentration dans les travaux de Thorn (57).	34
Figure I-17: Schéma du processus de floculation/sédimentation/consolidation (43).	36
Figure I-18: L'estuaire de la Rance et les sites mentionnés.	38
Figure I-19 : usine marémotrice de La Rance.	38
Figure I-20: : Salinité avant et après la construction de l'usine.	40
Figure I-21: Evolution de la sédimentologie dans la Rance avant et après la construction de l'usine.	42
Figure I-22: mécanisme de sédimentation.	45
Figure I-23: Evolution linéaire de la sédimentation dans l'estuaire de la Rance.	48
Figure I-24: piège Lyvet- mars 2014.	49
Figure I-25 : Vue aérienne du piège. Situation des profils bathymétriques.	50
Figure I-26 : Evolution des volumes de sédiments accumulés dans le piège de Lyvet. Période avril 2001 – juin 2003.	52
Figure I-27: Présentation des 4 profils dans le piège du Lyvet.	52
Figure I-28: centre de traitement par lagunage.	53
Figure I-29: : Représentation schématique des textures de fluide sur une échelle d'évolution de la fraction volumique solide, ϕ	56
Figure I-30: présentation des rhéogrammes les plus usuels dans le plan (τ, γ)	58
Figure I-31: Valeurs de la viscosité et du seuil de Bingham en fonction de la concentration en grains (85).	62

Figure I-32: Identification du lien $\tau = f(w)$ pour des vases de la rivière Vilaine en place in situ, remanié à partir des sédiments séchés et additionnés d'eau et après une période de sédimentation en colonne de 15 jours.....	64
Figure I-33: Estimation de la distribution de la contrainte de cisaillement dans un massif de vase (matériaux prélevés dans la rivière Vilaine (35)) par l'estimation de la vitesse de frottement à l'interface découpée et par mesure du seuil limite de cisaillement, (79).....	65
Figure I-34: Ecoulement dans une veine hydrodynamique à surface libre.	66
Figure I-35: Relation entre le seuil d'écoulement et la teneur en eau, en fonction des types de sédiments mixtes (sables/vases) définis à l'aide de la rhéométrie (84).	67
Figure I-36: Illustration de la cinétique de structuration de vases (mélanges de sédiments de la baie de Quiberon et d'eau) au cours d'une période de 6 mois via l'évolution du seuil limite de cisaillement au cours du temps à une altitude fixe dans un massif de sol maquette mis en œuvre par sédimentation-tassement-consolidation en condition laboratoire.....	68
Figure II-1: Aspect du matériau après séchage à 20°C (à gauche), et après broyage et tamisage (à droite).	72
Figure II-2: Dispositif d'un essai ATG (94).	75
Figure II-3: Dispositif d'un essai DRX.....	76
Figure II-4: Emplacement des trois profils transversaux dans le piège du Lyvet- P1 (amont), P2 et P3.	77
Figure II-5: vue du carottage P ₂ centre.	77
Figure II-6: Courbes granulométriques des sédiments prélevés des profils P ₁ , P ₂ et P ₃ à 2 m.....	79
Figure II-7: Courbes granulométriques des sédiments prélevés le long du profil P ₂	79
Figure II-8: Courbes granulométriques des sédiments prélevés du profils P ₂ central à différentes profondeurs.	80
Figure II-9: Courbes granulométriques des différentes profondeurs de la carotte prélevée en mars 2014.	81
Figure II-10: Variation de la teneur en eau et du diamètre moyen le long de la profondeur de la carotte prélevée en 2014.....	81
Figure II-11: Texture des sédiments prélevés dans le piège de Lyvet au mois de novembre 2015.	82
Figure II-12: Répartition granulométrique en fréquence – sédiments naturel.	83
Figure II-13 : Courbes granulométriques des différentes franges granulaires.	84
Figure II-14: Courbes granulométriques des échantillons naturels, sans sel et sans MO de la frange 0-125 μm	84
Figure II-15: Vue générale de la matière solide – frange 0 -125 μm	86
Figure II-16: Vue générale de la matière solide – frange 0 -80 μm - Présence de spicules à droite.	86
Figure II-17: Vue générale de la matière solide – frange 0 -63 μm --Présence d'une diatomée à gauche.....	87
Figure II-18: Observations MEB et micro-analyse EDX sur les échantillons naturels, sans sel, sans MO.	88
Figure II-19: Analyse DRX du matériau naturel et thermolysé à 550°C.	89
Figure II-20: Analyse DRX des différentes franges granulométriques.	90
Figure II-21: Diffractogrammes des échantillons naturels, sans sel, et sans matières organiques.	90
Figure II-22: Analyse TD/TG des différentes franges granulométriques.	91
Figure II-23: Les différents signaux de taux de cisaillement en fonction du temps.	94
Figure II-24: Evolution de la contrainte de cisaillement pour les différents essais.	94

Figure II-25: Mise en évidence de la courbe d'écoulement obtenue avec un mélange liquide-solide (sédiments de la baie de Quiberon) – W = 80%. Essais réalisés avec un entrefer de 3mm.	95
Figure II-26: Mise en évidence de la courbe d'écoulement obtenue avec un mélange liquide-solide (sédiments de la baie de Quiberon) – W = 80%. Essais réalisés avec un entrefer de 3mm.	95
Figure II-27: Problèmes expérimentaux lors d'un essai rhéologique.	97
Figure II-28: Protocole des essais rhéologiques à taux de cisaillement fixe et simulation du vieillissement condition quasi isotherme à 20°C.	99
Figure II-29: Protocole des essais rhéologiques par palier de contraintes imposés.	100
Figure II-30: protocole expérimentale de la formulation des suspensions jusqu'à la fin de chaque essai.	101
Figure III-1: Courbes d'écoulement moyennes pour la frange granulométrique 0-40 μm à l'âge de 4 min pour W = 150% ($\phi = 27\%$).	106
Figure III-2: Courbes d'écoulement moyennes pour la frange granulométrique 0-40 μm à différents âges pour W = 150% ($\phi = 27\%$).	106
Figure III-3: <i>Courbes d'écoulement moyennes pour différentes réductions granulométriques (0-40, 0-63, 0-80, 0-125 μm) à l'âge de 4 min pour W = 150% ($\phi = 27\%$).</i>	107
Figure III-4: <i>Courbes d'écoulement moyennes pour la frange 0-125 μm naturel, sans sel et sans matières organiques.</i>	108
Figure III-5: Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du temps pour chaque essai et pour la réduction granulométrique des sédiments 0 - 63 μm . Influence de la quantité d'eau ajoutée et notion de répétabilité.	109
Figure III-6: Évolution de la contrainte moyenne de cisaillement au cours du temps pour différentes réductions granulométriques. Influence de la quantité d'eau ajoutée pour former la suspension. .	110
Figure III-7: Seuil de contrainte de cisaillement en fonction de la fraction volumique solide pour les trois essais et pour la suspension de 125 μm	111
Figure III-8: Évolution de l'écart-type adimensionné en fonction du seuil limite de cisaillement pour les essais effectués au Vane test.	112
Figure III-9: Evolution de la contrainte limite de cisaillement en fonction de la fraction volumique solide pour toutes les franges granulométriques étudiées.	112
Figure III-10 : Illustration de la modélisation de Flatt pour les réductions granulométriques de 0-63 et 0-160 microns.	114
Figure III-11: Evolution du paramètre m en fonction de la taille des tamis.	115
Figure III-12: Distance interparticulaire en fonction de la taille de frange granulométrique.	115
Figure III-13: : Analyse en restructuration d'une suspension formée au moyen de la réduction granulométrique 0-80 μm et d'eau du robinet à W = 200%. Illustration de l'évolution de la contrainte de cisaillement au cours du temps pour un palier particulier.	117
Figure III-14: Analyse en restructuration d'une suspension formée au moyen de la réduction granulométrique 0-80 μm et d'eau du robinet à W = 200%. Illustration de l'évolution du taux de cisaillement et de la moyenne au cours du temps et de l'écart type et de l'erreur pour un palier particulier.	118
Figure III-15: Vérification de la répétabilité des essais de caractérisation rhéologique des suspensions par suivi des courbes d'écoulement obtenus après deux essais similaires.	119
Figure III-16: Courbe d'écoulement moyenne obtenue à partir des deux essais rhéologiques similaires.	119

Figure III-17: Evolution de l'écart entre les deux essais en fonction de la contrainte de cisaillement appliquée.	120
Figure III-18: Mise en évidence des courbes d'écoulement moyennes pour la réduction granulométrique 0-40 μm et pour différentes fractions volumiques solides.	122
Figure III-19: Mise en évidence des courbes d'écoulement moyennes pour la réduction granulométrique 0-63 μm et pour différentes fractions volumiques solides.	122
Figure III-20: Mise en évidence des courbes d'écoulement moyennes pour la réduction granulométrique 0-80 μm et pour différentes fractions volumiques solides.	123
Figure III-21: Mise en évidence des courbes d'écoulement moyennes pour la réduction granulométrique 0-125 μm et pour différentes fractions volumiques solides.	123
Figure III-22: Evolution de la viscosité en fonction de la fraction volumique solide pour les différentes franges granulométriques et modélisation de l'ensemble des données avec le modèle de Krieger-Dougherty. $\mu_0 = 100,2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$; $\phi_m = 0,409$; $\eta = 9$	125
Figure III-23: Evolution de la contrainte de cisaillement seuil calculée à partir du modèle de Bingham en fonction de la fraction volumique solide.	126
Figure III-24: Comparaison de l'évolution du seuil limite de cisaillement dynamique et statique en fonction de la fraction volumique solide.	127
Figure IV-1: Colonnes de sédimentation.....	133
Figure IV-2: Système de caractérisation des colonnes de sédimentation	135
Figure IV-3: Essais scissométriques réalisés dans le massif sédimenté.....	136
Figure IV-4: Outil Vane test à l'interface eau-sédiments	136
Figure IV-5: Image du carottier et un exemple d'une carotte prélevée et découpée de la colonne de sédiments sans matières organiques d'âge de deux semaines.	137
Figure IV-6: Évolution du couple de torsion au cours de l'essai avec et sans effet de la tige	138
Figure IV-7: Exemple d'évolution du couple de torsion en fonction du temps de l'essai.....	139
Figure IV-8: Évolution de la contrainte de cisaillement seuil en fonction de la profondeur pour la colonne de sédiments naturels d'âge deux semaines. L'altitude 0 représente l'interface fluide-sédiments.....	140
Figure IV-9 : Modélisation de l'évolution de la contrainte limite de cisaillement en fonction de l'enfoncement au moyen d'un modèle semi logarithmique pour un massif âgé de deux semaines. L'altitude 0 représente l'interface fluide-sédiments.	140
Figure IV-10 : Modélisation de l'évolution de la contrainte limite de cisaillement en fonction de l'enfoncement au moyen d'un modèle semi logarithmique pour un massif âgé de deux semaines. Essais réalisés avec des sédiments naturels, des sédiments sans sels et des sédiments sans sels et sans matière organique. L'altitude 0 représente l'interface fluide-sédiments.	141
Figure IV-11: Évolution de la teneur en eau en fonction de la profondeur pour la colonne âgée de deux semaines. Effet de l'élimination des sels et de la matière organique. L'altitude 0 représente l'interface fluide-sédiments.	142
Figure IV-12: Évolution de la teneur en eau en fonction de la profondeur pour la colonne âgée de deux semaines. Effet de l'élimination des sels et de la matière organique. L'altitude 0 représente l'interface fluide-sédiments.	143
Figure IV-13: Carotte prélevée de la colonne d'âge deux semaines.....	144
Figure IV-14 : Courbes de compressibilité unidimensionnelle des sédiments naturels et des sédiments sans sels et sans matières organiques.	145

Figure IV-15 : Évolution de la distribution de la fraction volumique solide le long du massif et modélisation en tenant compte des trois configurations de test exprimées sous la forme d'une courbe maîtresse. L'altitude 0 représente l'interface fluide-sédiments. 146

Figure IV-16 : Illustration des distributions granulométriques mises en évidence le long des massifs. 147

Figure IV-17: Évolution du diamètre moyen probable (***d_{moy}***) (symbole plein) et du diamètre maximum (d_{max}) (symbole vide) le long du massif sans distinction d'âge et de présence de sels et de matières organiques. 148

Figure IV-18 : Courbe de structuration de la contrainte limite de cisaillement ($\tau ; \Phi$) pour des suspensions au jeune âge et des suspensions formant un massif tassé-consolidé et vieilli pendant 2 semaines. SN : Sédiments naturels ; SS : Sédiments sans sels ; SS&SMO : Sédiments sans sels et sans matière organique. 149

Figure IV-19 : Évolution de la contrainte limite de cisaillement en fonction de l'enfoncement dans les massifs pour des périodes de vieillissement de 2, 24 et 36 semaines et détail au voisinage de l'interface fluide-sédiments. L'altitude 0 représente l'interface fluide-sédiments. 150

Figure IV-20 : Évolution de la fraction volumique solide en fonction de l'enfoncement dans les massifs pour des périodes de vieillissement de 2, 24 et 36 semaines. L'altitude 0 représente l'interface fluide-sédiments. 151

Figure IV-21 : Courbe de structuration de la contrainte limite de cisaillement ($\tau ; \Phi$) pour des suspensions au jeune âge et des suspensions formant un massif tassé-consolidé et vieilli pendant 2, 24 et 36 semaines. SN : sédiments naturels. 152

Liste des Tableaux

Tableau II-1: Classification granulométrique utilisée.	73
Tableau II-2: Caractéristiques des sédiments prélevés en novembre 2015.	78
Tableau II-3: Nom des courbes granulométriques en fonction de la profondeur.	80
Tableau II-4: Mirco analyses EDX sur les échantillons (% pondéral d'éléments).....	89
Tableau IV-1 : Estimation de la teneur en eau (W (-)) et de la fraction volumique solide (ϕ (-)) à l'interface fluide-sédiments ($z = 0$) pour un massif âgé de deux semaines. Influence de la présence des sels et de la matière organique dans les sédiments.	144
Tableau IV-2 : Paramètres de modélisation de l'évolution de la fraction volumique solide en fonction de l'enfoncement dans le massif ($z = \text{coef dir.}\phi + \text{Cte}$) en distinguant l'emploi de sédiments naturels, de sédiments sans sels et de sédiments sans sels et sans MO.	146
Tableau IV-3 : Paramètres de modélisation de l'évolution de la fraction volumique solide en fonction de l'enfoncement dans le massif ($z = \text{coef dir.}\Phi + \text{Cte}$) pour des mélanges de sédiments naturels et d'eau après 2, 24 et 36 semaines.	151

Références Bibliographiques

1. **Melinge, Y.** *Méthodologie expérimentales de caractérisation de mélanges complexes en écoulement*. s.l. : Mémoire d'HDR, Université de Rennes, 1, 2007.
2. **Société de la faune et des parcs du Québec. Direction de l'aménagement de la faune de Montréal, de Laval et de la Montérégie.** *L'envasement des cours d'eau: processus, causes, effets sur les écosystèmes avec une attention particulière aux Catostomidés donc le chevalier cuirvé (Moxostoma hubbsin)*. [Québec]: Société de la faune et des parcs du Québec, Direction de l'aménagement de la faune de Montréal, de Laval et de la Montérégie. : s.n., 2003.
3. **Pritchard, D.W.** *What is an estuary: physical viewpoint*. s.l. : American Association for the Advancement of Science, 1967.
4. **Dyer, KR.** *Estuaries: A physical introduction*. 1997.
5. *Sea tide effects on downstream Amazon river flow*. **Kosuth, P., et al.** s.l. : communication présentée lors du symposium Manaus 99 (Hydrologie et géochimie des grands bassins fluviaux tropicaux) , novembre 1999.
6. **SHOM.** *www.Shom.fr*. [Online] 2017. <http://www.shom.fr/les-activites/activites-scientifiques/maree-et-courants/marees/marnage-et-types-de-marees/>.
7. *Impact of an invasive species, Crepidula fornicata, on the hydrodynamics and transport properties of the benthic boundary layer*. **Moulin, F.Y.** 2007, Aquatic Living Resources.
8. *A morphogenetic approach to world shorelines*. **Davies, J.H.** s.l. : Z. Geomorphol.,8,127-142, 1964.
9. *Morphology of sand accumulation in estuaries: an introduction to the symposium*. **Hayes, M.O.** s.l. : Estuarine research, 2,3-22, 1975.
10. **Furgerot, L.** *Propriétés hydrodynamiques du mascaret et de son influence sur la dynamique sédimentaire: Une approche couplée en canal et in situ (estuaire de la Sée, Baie du Mont Saint Michel)*. s.l. : Thèse de doctorat, Caen, 2014.
11. **Peters.** *Les mécanismes de mélange des eaux dans l'estuaire de l'Escaut*. s.l. : In Annales des Travaux Publics de Belgique (No. 2)., 1975.
12. **Pritchard.** *Estuarine circulation pattern*. s.l. : Proc. Am. Soc. Civ. Engin., N. Y., vol. 81, p. 1-11, 1955.
13. **Stoukov, A.** INPT - ENSEEIHT. [Online] <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD9598/travaux/optsee/hym/nome55/hydromar/lehadjar/sol.htm>.
14. **Simmons.** *Some effects of upland discharge on estuarine hydraulics*. s.l. : Proceedings of the American Society Civil Engineering, 81, No. 792., 1955.
15. **Hansen, D. V. and Rattray, M.** *New dimensions in estuary classification*. s.l. : Limnology and Oceanography, 11(3), 319-326., 1966.

16. **Fischer, H. B.** *Mixing and dispersion in estuaries*. s.l. : Annual review of fluid mechanics, 8(1), 107-133., 1976.
17. **Le Floch, P.** *Propagation de la maree dans l'Estuaire de la Seine et en Seine Maritime*. s.l. : These,Univ. Paris, 507pp., 1961.
18. **Hutton, J.** *Theory of the Earth with proofs and illustrations*. s.l. : 2 vol., W. Creech,Edinburgh, 1795.
19. **Coques, R. and Jauzein, A.** « ROCHES (Formation) - Érosion et sédimentation ». *Encyclopædia Universalis [en ligne]*. [Online] <http://www.universalis.fr/encyclopedie/roches-formation-erosion-et-sedimentation/>.
20. **Partheniades, E.** *A study of erosion and deposition of cohesive soils in salt water*. s.l. : Thèse de doctorat- University of california, Berkeley. 15, 21, 1962.
21. **Schofield, A. and Wroth, P.** *Critical state soil mechanics* . s.l. : (Vol. 310), London: McGraw-Hill., 1968.
22. *Erosion threshold of sand–mud mixtures*. **Jacobs, W. et al.** 2011, Continental Shelf Research, pp. 31(10), S14-S25.
23. **Winterwerp, J. C. and Van Kesteren, W. G.** *Introduction to the physics of cohesive sediment dynamics in the marine environment (Vol. 56)*. s.l. : Elsevier, 2004.
24. **Pouv, K. S.** *Vers un lien entre propriétés mécaniques de sédiments cohésifs et leur érodabilité-- Etude macroscopique et locale du comportement en rhéométrie et en érosion de matériaux modèles*. s.l. : Thèse de doctorat, Université de Caen, 2011.
25. *Assessing the paradigm of mutually exclusive erosion and deposition of mud, with examples from upper Chesapeake bay*. **Sanford, L. P. and Halka, J.P.** s.l. : Marine Geology, 114, 37-57., 2001, Marine Geology, 179(1), 9-23.
26. **Partheniades, E.** *Erosion and deposition of cohesive soils*. s.l. : Journal of Hydraulic Division, 91, 105- 137, 1965.
27. *Sediment erodability in sediment transport modelling: Can we account for biota effects?* **Le Hir, P., Monbet, Y. and Orvain, F.** 2007, Continental Shelf Research, 27(8), 1116-1142.
28. *Hydraulic erosion of cohesive soils*. **Kandiah, A. and Arulanandan, K.** 1974, Transportation Research Record, (497).
29. **Bouvlain, F.** Une introduction aux processus sédimentaires. [Online] 1 17, 2017. <http://www.geolsed.ulg.ac.be/processus/processus.htm#EROSION%C2%A0EOLIIENNE>.
30. **Sautonie-Laguionie, L.** *La fraude paulienne*. s.l. : Thèse de doctorat- Université de Bordeaux 4, 2006.
31. **Le Normant, C.** *Modélisation numérique tridimensionnelle des processus de transport des sédiments cohésifs en environnement estuarien*. s.l. : Thèse de doctorat, 1995.

32. **Le Gall, A.** Erosion et sédimentation des surfaces avec atmosphère. *Sciences pour exoplanètes et systèmes planétaires*. [Online] 2017. http://sesp.esep.pro/fr/pages_sphere-surface/ErosionFluviale2.html.
33. **Abbott, F. E. and Francis, J.R. D.** *Saltation and suspension trajectories of solid grains in a water stream*. s.l. : Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 284(1321), 225-254., 1977.
34. **Shields, A.** *Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement*. s.l. : CalTech library, 1936.
35. *Modélisation du tassement sous poids propre des couches de vase molle et saturée, sur un fond imperméable.* **Sanchez, M. and Grovel, A.** 1993, La Houille Blanche, (1), 29-34.
36. **Le Hir, P.** *Aide mémoire de dynamique sédimentaire*. 2008.
37. **Zanke, U.** *Berechnung der Sinkgeschwindigkeiten von Sedimenten*. s.l. : Mitt. des Franzius-Instituts für Wasserbau, Heft 46, Seite 243, Technical University, Hannover, Germany, 1977.
38. **Van Rijn, L. C.** *Handbook sediment transport by currents and waves*. s.l. : Delft Hydraulics Laboratory., 1989.
39. **Soulsby, R.** *Dynamics of marine sands: a manual for practical applications*. s.l. : Thomas Telford, 1997.
40. **Kynch, G. J.** *A theory of sedimentation*. s.l. : Transactions of the Faraday society, 48, 166-176., 1952.
41. **Hernando, L.** *Sédimentation de suspensions non-colloïdales poly-disperses et concentrées*. s.l. : Thèse de doctorat, Bordeaux 1, 2012.
42. **Pane, V. and Schiffman, R. L.** *The permeability of clay suspensions*. s.l. : Geotechnique, 47(2), 273-288., 1997.
43. **Pedroni, L.** *Étude expérimentale et numérique de la sédimentation et de la consolidation des boues de traitement des eaux acides*. s.l. : Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 2011.
44. *Erosions, dépôts et transits sédimentaires associés dans le bassin de Marennes-Oléron.* **Le Hir, P., et al.** 2010, La Houille Blanche, pp. (5), 65-71.
45. **Capo, S.** *Hydrodynamique et dynamique sédimentaire en milieu tropical de mangrove, observations et modélisation de l'estuaire du Konkouré, République de Guinée*. s.l. : Thèse de doctorat, Bordeaux 1, 2006.
46. **Gratiot, N.** *Impact des sédiments cohésifs sur l'écosystème*. s.l. : (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I), 2010.
47. **Migniot, C.** *Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques*. s.l. : La houille blanche, (7), 591-620, 1968.

48. **Van Leussen, W.** *Estuarine macroflocs and their role in fine-grained sediment transport*. s.l. : Thèse de Doctorat- University of Utrecht, 1994.
49. *Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions*. **Dyer, K.R. and Manning, A.J.** s.l. : Journal of sea research, 41(1), 87-95., 1999.
50. **Berlamont J., Ockenden M., Torrman E., Winterwerp J.** *The characterisation of cohesive sediment properties*. s.l. : Coastal Engineering, 21(1-3), 105-128., 1993.
51. *A Molecular Approach*. **McQuarrie, D. A. and Chemistry, J. P.** 1997, University Science Books: USA.
52. **Hunter, R. J.** *Introduction to modern colloid science*. s.l. : Oxford University Press., 1993.
53. **Stuble, L. J. and Schultz, M. A.** *Using creep and recovery to study flow behavior of fresh cement paste*. s.l. : Cement and concrete research, 23(6), 1369-1379., 1993.
54. **D'Orlyé, F.** *Caractérisation physicochimique par électrophorèse capillaire de nanoparticules magnétiques, anioniques et cationiques : distribution de taille, densité de charge et coefficient de diffusion collectif*. s.l. : Thèse de Doctorat- Chemical Sciences. Chimie ParisTech., 2008.
55. *Sediment processes in estuaries : future research requirements*. **Dyer, K.R.** s.l. : Journal of Geophysical, 1989, Journal of Geophysical Research : Oceans (1978–2012). Vol. 94. no. C10, p. 14327–14339.
56. **GRATIOT, N.** *Etude expérimentale de la formation des couches de crème de vase turbulents*. s.l. : Thèse de Doctorat- L'Université Joseph Fourier- Grenoble 1, 2000.
57. *Physical Processes of siltation in tidal channels. Proceedings of Hydraulic modelling applied to maritime Engineering problems*. **Thorn, M.F.C.** s.l. : ICE, London, pp. 47-55, 1981.
58. **Migniot, C.** *Etude de la dynamique sédimentaire, marine, fluviale et estuarienne*. s.l. : Thèse de doctorat d'état. 340p., 1982.
59. *Controlling factors in estuarine flocculation processes: experimental results with material from the Seine Estuary, Northwest France*. **Mikes, D., et al.** s.l. : Journal of Coastal Research, Special Issue 41, 82-89, 2002.
60. *Rhéologie des vases estuariennes. Application à la dynamique des sédiments fins dans l'estuaire aval de la Seine*. **Lesourd, S., et al.** s.l. : 41ème Colloque du Groupe Français de Rhéologie, 2006.
61. *Sédimentation et consolidation des sédiments cohésifs estuariens : influence des propriétés rhéologiques*. **Thiébot, J., et al.** s.l. : 41ème Colloque du Groupe Français de Rhéologie, 2006.
62. **Migniot, C.** *Tassement et rhéologie des vases*. s.l. : La Houille Blanche, n 1 et 2, pp. 11-29 et 95-111, 1989.
63. **Dreal, P.** *Les estuaires. Patrimoine naturel de Picardie*. [Online] 2013. <http://www.patrimoine-naturel-picardie.fr/milieus/les-estuaires>.

64. *Les estuaires européens: une organisation en constante évolution.* **Lecoquierre, B.** 1998, L'information géographique, 62(1), 3-11.
65. **Caude, G., et al.** *Gestion sédimentaire de l'estuaire de la Rance.* s.l. : Rapport CGEDD n° 010860-01, CGE n° 2016-30, 2017.
66. **Morales, P. R.** *La marée de salinité, la turbidité et les sédiments de la Rance maritime.* s.l. : Thèse de doctorat, Université de Paris, Faculté de sciences, 1956.
67. **Rétière, C. and Richard, O.** *Conséquences écologiques de 10 années de fonctionnement de l'usine marémotrice de La Rance.* s.l. : Rapport Electricité de France et Laboratoire Maritime de Dinard: 71 pp. , 1980.
68. **Stratakis, S.** *L'environnement du bassin maritime de La Rance. Impacts de l'usine marémotrice et potentialités actuelles de mise en valeur.* s.l. : Rapport de stage. Maitrise Sciences et Technique d'Aménagement. Université de Rennes I., 1986.
69. **Lorin, J.** *Modélisation hydraulique et sédimentaire du bassin de la Rance – Campagnes de mesures en nature.* s.l. : Fascicule 1, Rapport Hydroexpert / SOGREAH ingénierie / LNH / COEUR, 54 p., 1999.
70. **Bonnot-Courtois, C. and Marchandd, Y.** *La baie du Mont-Saint-Michel et l'Estuaire de la Rance: Environnements sédimentaires, aménagements et évolution récente.* s.l. : CNRS, 2002.
71. **Thibault, H.** *Estuaire Rance- Gestion des sédiments Proposition 2015.* s.l. : COMMISSION ESTUAIRE RANCE, 2015.
72. *Gestion expérimentale des apports sédimentaires dans l'estuaire de la Rance.* **Jigorel, A. and Pitois, F.** s.l. : 8th International Congress – International Association for Engineering Geology and the Environment, 7 p., 1998.
73. **Jigorel, A., Metayer, J.L. and Brossault, J.Y.** *Synthèse du suivi de la sédimentation dans les vasières de la Rance.* 2012.
74. *Modèle de viscosité multi-échelle: de la pâte de ciment au micro-béton.* **Toutou, Z., et al.** s.l. : revue Rhéologie, éditée par le Groupe Français de Rhéologie, Vol.5, pp 1-9, 2004.
75. *Ueber die geschwindigkeitsfunktion der viskosität disperser systeme.* **Ostwald, W.** s.l. : i. Colloid & Polymer Science, 36(2), 99-117., 1925.
76. **Coussot, P. and Ancy, C.** *Rhéophysique des pâtes et des suspensions.* s.l. : Les Ulis Cedex A., France: EDP Sciences., 1999.
77. **Mueller, S., Llewelin, E. W. and Mader, H. W.** *The rheology of suspensions of solid particles.* s.l. : In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (p. rspa20090445). The Royal Society., 2009.
78. **Einstein, H.A.** *The bed load function for sediment transportation in open channel flows.* s.l. : Technical Bulletin 1026, U. S. Department of Agriculture, 1950.

79. **Quentin, X.** *Etude de la probabilité de transport solide dans un bief de la Vialine- Validité d'une étude en laboratoire- Transposition des résultats laboratoire au cas réel.* s.l. : Mémoire de fin d'étude- INSA de Rennes, 2005.
80. **Nguyen, H.M.** *Comportement rhéologique des suspensions concentrés.* s.l. : Rapport de master recherche- INSA de Rennes, 2003.
81. *Application d'un modèle de viscosité à la coulée d'explosifs: Modélisation du temps de coulée.* **Guillemin, J.P., et al.** s.l. : 18ème Congrès Français de Mécanique (Grenoble 2007), 2006.
82. **Micaelli, F., Levita, G. and Lanos, C.** *Caractérisation rhéologique de pâtes de ciment et cendres volantes extrudables.* s.l. : Thèse de doctorat, thèse INSA Rennes-Université de Pise, 2008.
83. **Legrand, C.** *Le comportement rhéologique des suspensions de ciment. Le béton hydraulique, connaissance et pratique.* 1982.
84. **Kervella, S.** *Dynamique des sédiments fins et mixtes des zones intertidales de la baie de Marennes-Oléron.* s.l. : Thèse de Doctorat- Université de la Rochelle, 2009.
85. *Mécanique de l'érosion des vases.* **Périgaud, C.** s.l. : La houille blanche, (7-8), 501-512., 1983.
86. *Sedimentological and rheological properties of the water–solid bed interface in the Weser and Ems estuaries, North Sea, Germany: implications for fluid mud classification.* **Papenmeier, S., et al.** s.l. : Journal of Coastal Research, 29(4), 797-808, 2012.
87. *Study of the sedimentological and rheological properties of fluid mud in the fluvio-estuarine system of the Gironde estuary.* **Granboulan, J., et al.** 1989, Ocean and Shoreline Management, 12(1), 23-46.
88. *Characterisation of the evolution of activated sludges using rheological measurements.* **Guibaud, G., et al.** 2004, Process Biochemistry, 39(11), 1803-1810.
89. *Etude du comportement rhéologique multi-échelles de mélanges liquide–solide issus du milieu naturel marin.* **Laguionie, P., et al.** s.l. : 41ème Colloque du Groupe Français de Rhéologie, 2006.
90. **Jigorel, A. and Brossault, J.Y.** *Prélèvements et analyses des sédiments déposés dans le piège de Lyvet, Estuaire de la Rance.* s.l. : LGCGM- INSA de Rennes, 2011.
91. **Metayer, J.L. and Rangeard, D.** *Étude bathymétrique- Caractérisation des sédiments.* s.l. : INSA de Rennes- LGCGM, 2017.
92. **Fall, M.** *Traitements des sédiments en vue d'une utilisation dans le génie civil.* s.l. : Thèse de l'INSA de Rennes, 2012.
93. **Fournier, J., et al.** *Analyses granulométriques, principes et méthodes.* s.l. : CNRS, Dinard, 2012.
94. **Stievano, L. and Habas, J.P.** *La technique TG/ATG/DSC et le couplage avec la spectrométrie de masse.* s.l. : Plateforme d'analyse et de caractérisation Balard.

95. *De l'intérêt d'une caractérisation rhéologique empirique et relative.* **Estelle, P., et al.** 2011, *Rhéologie*, 21, 10-35.
96. **Fall, A.** *Rhéophysique des fluides complexes: écoulement et blocage de suspensions.* s.l. : Thèse de doctorat, Université Paris-Diderot-Paris VII, 2008.
97. **Macosko, C. H.** *Rheology : Principles, Measurements, and Applications.* s.l. : Wiley, New-York, 1994.
98. **Pierre, A.** *Rhéologie de suspensions concentrées de sulfate de calcium.* s.l. : Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 2013.
99. **Bird, R. B., et al.** *Dynamics of polymeric liquids.* s.l. : New York: Wiley, 1977.
100. **Barnes, H. A.** *A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers: its cause, character, and cure.* s.l. : *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 56(3), 221-251, 1995.
101. **Azouz, K. B.** *Relation entre propriétés rhéologiques et structure microscopique de dispersions de particules d'argile dans des dispersions de polymères.* s.l. : Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2010.
102. **Chevalier, C.** *Dynamique et instabilités des interfaces grains/fluide dans les suspensions non-Browniennes.* s.l. : Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2006.
103. *Rotating vane rheometry – a review.* **Barnes, H.A and Nguyen, Q.D.** s.l. : *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 98 1-14, 2001.
104. **Perrot, A.** *Conditions d'extrudabilité des matériaux à base cimentaire.* s.l. : Thèse de l'INSA Rennes, 2006.
105. **Toutou, Z.** *Rhéologie et formulation des géosuspensions concentrées : évaluation des conditions d'extrudabilité.* s.l. : Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 2002.
106. *Multi-Scale Analysis to Study the Rheological Behavior of Natural Mud Suspensions.* **Melinge, Y., et al.** Monterey, California : the XVth International Congress on Rheology , August 3 - 8, 2008.
107. *A yield stress model for suspensions.* **Flatt, R. J.** s.l. : *J. Am. Ceram. Soc.*, 89 [4] 1244–1256, 2006.
108. *Steady state flow of ciment suspensions: A micromechanical state of the art.* **Roussel, N., et al.** s.l. : *Cement and Concrete Research*, 40(1), 77-84., 2010.
109. *Nondestructive soil bulk density measurements by X-ray attenuation.* **Been, K.** s.l. : *Geotech Test Journal*, 4(4), 169-176., 1981.
110. *Development of structure in sedimenting soils.* **Sills, G.C.** s.l. : *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*,356(1747), 2515-2534., 1998.
111. *Caractérisation du début de consolidation des sols de très forte teneur en eau.* **Nguyen, Q.D., et al.** s.l. : 25e rencontres de l'AUGC, Bordeaux, 2007.

112. *The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. II. Finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers.* **Gibson, R. E., Schiffman, R. L. and Cargill, K. W.** s.l. : Canadian Geotechnical Journal, 18(2), 280-293, 1981.
113. *Sedimentation and self-weight consolidation: Constitutive equations and numerical modelling.* **Toorman, E. A.** 1999 : Geotechnique, 49(6), 709-726.
114. **Merckelbach, L. M.** *Consolidation and strength evolution of Dollard mud.* s.l. : Technical report no. 4-99, Hydromechanics Section, Delft University of Technology, 1999.
115. *Physical processes of siltation in tidal channels.* **Thom.** London : ICE, 1981. Proc. Hydraulic Modeling Applied to Maritimne Eng. Problems. pp. 47-75.
116. *Mesure de la vitesse de chute des sédiments fins en laboratoire et in situ.* **Sanchez, M. and Delanoe, Y.** Anglet, France : s.n., 2002. VIIèmes Journées Nationales Génie civil- Génie Cotier.
117. **Dubois, V.** *Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière.* s.l. : thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de DOUAI, 2006.
118. *Propriétés physiques et hydrauliques de sédiments marins en vue de réutilisation en remblais.* **Levacher, D., et al.** s.l. : Xèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, Sophia Antipolis, 14-16., 2008.
119. **Chiodi, F.** *Approche multi-échelle à la morphodynamique des rivières: transport des sédiments, barres et méandres.* s.l. : Thèse de doctorat, Paris 7, 2014.
120. **Estrade, L. and Fintz, Ch.** *Les accumulations vaseuses littorales.* s.l. : issue du site internet: <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0001/travaux/optsee/hym/13/index.htm>., 2000-2001.
121. *Salinity effects on sedimentation behavior of kaolin, bentonite and soda ash mine tailings.* **Gorakhki, M. and Bareither, A.** juillet 2015, Elsevier, pp. page 593-602.
122. **Barnes, A.** *Thixotropy—a review.* s.l. : Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 70(1-2) :1–33, 1997.
123. *Viscosity equation for fresh concrete.* **Murata, J. and Kikukawa, H.** s.l. : ACI Materails Journal, 1992.

INSA de RENNES
Service des Formations

AVIS DU JURY SUR LA REPRODUCTION DE LA THESE SOUTENUE

Titre de la thèse:

Etude des propriétés de structuration de matériaux mixtes et fins. Application à l'emvasement des systèmes naturels

Nom Prénom de l'auteur : SERHAL SALY

Membres du jury :

- Monsieur COMAIR Fadi
- Monsieur ASSAF Rawad
- Monsieur JARNY Sébastien
- Monsieur RANGEARD Damien
- Madame PANTET Anne
- Monsieur PIERRE Alexandre
- Monsieur EL OMAR Fawaz
- Monsieur HAGE CHEHADEH Fadi

Président du jury : Madame Anne PANTET

Date de la soutenance : 21 Décembre 2017

-19

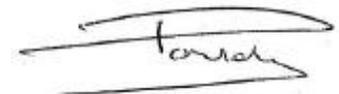
Reproduction de la these soutenue

- Thèse : Thèse pouvant être reproduite en l'état
 Thèse pouvant être reproduite après corrections suggérées

Fait à Rennes, le 21 Décembre 2017

-19

Signature du président de jury



Le Directeur,

M'hamed DRISSE



Les estuaires sont généralement soumis à des phénomènes de comblement sédimentaires. Dans cette partie des systèmes fluviaux du territoire, l'accumulation des matériaux fins modifie radicalement la morphologie de l'estuaire, et conditionne la présence des espèces animales et végétales et on distingue un impact fort sur le plan économique, social et industriel. Les comblements compliquent la circulation dans les estuaires, compliquent les activités de pêches, de loisirs, modifient les propriétés des écoulements et constituent un facteur risque sur les zones d'habitations voisines. Des solutions temporaires consistent à curer les estuaires et des solutions d'aménagement des estuaires peuvent être envisagées. Néanmoins, il ressort de la littérature un manque important sur la caractérisation des mélanges liquides-solides et sur les mécanismes de structuration.

Ce travail s'inscrit dans le contexte de l'étude des mécanismes de structuration des matériaux sédimentaires dans les estuaires afin de mieux comprendre les remplissages des zones estuariennes et surtout d'envisager des solutions durables de « nettoyage » de ces zones. L'estuaire de la Rance est particulièrement ciblé par notre étude. Le but est de donner des éléments de réponse sur le comportement rhéologique des vases naturelles en distinguant les échelles les plus significatives afin de détecter les facteurs structurants qui influencent les paramètres rhéologiques.

La rhéologie des sédiments est ainsi étudiée à l'aide du rhéomètre Kinexus, géométrie plan-plan. On a pu alors détecter un comportement visco-plastique Binghamien. L'influence du diamètre moyens et de la fraction volumique solide sur la viscosité et le seuil de la contrainte de cisaillement dynamique du modèle de Bingham sont ainsi analysés. Ensuite, nous avons étudié grâce à des sédiments sans sel et sans matière organique, l'influence de ces deux composés chimiques sur le comportement rhéologiques des sédiments et puis leurs influences sur le vieillissement des sédiments. Une étude statique est également réalisée à l'aide du Vane test permettant le calcul de la contrainte de cisaillement seuil.

Enfin, une assimilation du piège du Lyvet est réalisée grâce à des colonnes de sédimentation dans des conditions assez proches des conditions naturelles. Un processus de sédimentation-tassement-consolidation sous poids propre est recréé en laboratoire. Les sédiments sont amenés à vieillir cette fois pour des longues durées allant jusqu'à 9 mois. Au terme des périodes de vieillissement retenues, le massif créé est caractérisé depuis l'interface fluide-sédiments. Cela nous a permis d'étudier la répartition granulaire des sédiments après structuration et la variation de la contrainte de cisaillement seuil selon la profondeur de la colonne et la durée du vieillissement. Ce type d'essai est aussi réalisé pour les sédiments sans sel et sans matières organiques.

Estuaries are generally subject of sedimentary filling phenomena that alter their morphology and affect subsequently the economic, social and industrial plans. In this part of the fluvial systems of the territory, the accumulation of fine materials radically modifies the morphology of the estuary, and conditions the presence of animal and plant species and cause a strong impact on the economic, social and industrial. Filling complicates navigation in estuaries, fishing, recreational activities and modifies flow properties and is a risk factor in neighboring housing areas. Temporary solutions consist of cleaning estuaries and estuarine management solutions can be considered. Nevertheless, the literature shows a significant lack of characterization of liquid-solid mixtures and structuring mechanisms.

This work is in the context of the study of structuring mechanisms of sedimentary materials in estuaries to better understand the fillings estuarine areas and specially to consider sustainable solutions of "cleansing" of these areas. The Rance estuary is particularly targeted by the study. The aim is to provide answers on the rheological behavior of natural vessels by distinguishing the most significant scales to detect structural factors influencing the rheological parameters.

The rheology of the sediments is studied using the Kinexus rheometer, plan-plan geometry. A Binghamian visco-plastic behavior was then detected. The influence of the mean diameter and the solid volume fraction on the viscosity and the threshold of the dynamic shear stress of the Bingham model are thus analyzed. Then, using sediments without salt and organic matter, we studied the influence of these two chemical compounds on the rheological behavior of the sediments and their influence on the aging of the sediments. A static study is also carried out using the Vane test allowing the calculation of the threshold shear stress.

Finally, an assimilation of the natural filling phenomenon is achieved in columns under conditions similar to natural conditions. These columns are then filled with natural sediments, washed sediments and sediments free of organic material and left for ages ranging from one week to 9 months. Then, the columns will be disassembled and rheological tests with the Brookfield Rheometer will be performed throughout the depth of the columns as well as measurements of water content and grain size. These tests allow us to study sediment structuring in the long term and also to identify the effect of salt and organic matter on sedimentation.

