# Déshydratation naturelle et mécanisée de sédiments : étude des processus mis en jeu et applications

Beatriz Boullosa Allariz

▶ **To cite this version:**

Beatriz Boullosa Allariz. Déshydratation naturelle et mécanisée de sédiments : étude des processus mis en jeu et applications. Génie civil. Normandie Université, 2018. Français. NNT : 2018NORMC285 . tel-02292209

**HAL Id: tel-02292209**
**https://theses.hal.science/tel-02292209**

Submitted on 12 Oct 2023

**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.

Normandie Université

# THÈSE

**Pour obtenir le diplôme de doctorat**

**Spécialité GENIE CIVIL**

**Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie**

# Déshydratation naturelle et mécanisée de sédiments: étude des processus mis en jeu et applications.


**Présentée et soutenue par**
**Beatriz BOULLOSA ALLARIZ**


| Thèse soutenue publiquement le 12/12/2018 devant le jury composé de | | |
|---|---|---|
| M. JEAN-PIERRE GOURC | Professeur émérite, Université Grenoble Alpes | Rapporteur du jury |
| Mme DELMA VIDAL ( DE MATTOS) | Professeur associé, instituto tecnologico de aeronautica | Rapporteur du jury |
| M. MOHAMED BOUTOUIL | Directeur de recherche, Ecole sup.d'ingénieurs ESITC Caen | Membre du jury |
| Mme IRINI DJERAN-MAIGRE | Professeur des universités, Université Lyon 1 Claude Bernard | Président du jury |
| M. ANDRY RICO RAZAKAMANANTSOA | Chargé de recherche, IFSTTAR | Membre du jury |
| M. FRANÇOIS THERY | Ingénieur, EDF | Membre du jury |
| M. DANIEL LEVACHER | Professeur émérite, Université Caen Normandie | Directeur de thèse |

**Thèse dirigée par DANIEL LEVACHER, Morphodynamique continentale et côtière**

UNIVERSITÉ CAEN NORMANDIE

ED 591 PSIME

M2C

***TITRE DE LA THÈSE :*** Déshydratation naturelle et mécanisée de sédiments. Étude des processus mis en jeu et applications

***RÉSUMÉ DE LA THÈSE***

Les opérations de dragage génèrent d'importants volumes de sédiments à teneur en eau élevée qui sont difficilement transportables. Toute opération de valorisation ou stockage des sédiments implique de réduire la teneur en eau. Le séchage naturel et la déshydratation mécanisée des sédiments répondent à cette attente. Le séchage naturel des sédiments est la technique de déshydratation la plus économique et la meilleure du point de vue environnemental. Le temps de séchage peut être réduit par des moyens techniques adaptés (retournement, scarification) mis en action par l'application de critères d'aptitude au séchage naturel. Pour ce faire, le processus de séchage naturel a été reproduit à l'échelle du laboratoire à l'aide d'essais d'Égouttage et de Séchage et d'essais de Séchage et de Retrait couplés à des essais scissométriques. Ils ont porté sur neuf sédiments : sept sédiments de barrage, deux sédiments marins et une kaolinite. Une relation $S_u=f(I_P)$ a été établie. Cette relation permet d'obtenir la cohésion non drainée $S_u$ à partir d'une mesure de teneur en eau. Elle permet aussi de définir ou cerner le moment le plus propice au retournement des sédiments à l'aide d'engins spécifiques sur site. Une autre méthode mécanique pour réduire le temps de séchage est suggérée. Il s'agit de pratiquer une scarification des sédiments à l'aide d'outils mobiles, voire robotisés, comme un rouleau scarificateur ou d'une rangée d'outils transportés par un treillis mobile adapté. En ce qui concerne la déshydratation mécanisée des sédiments, une nouvelle méthode de déshydratation en continu a été proposée à partir d'une presse à boues KDS®. Pour des raisons de conception et d'application, la presse à boues KDS® n'a jamais été utilisée pour déshydrater des sédiments. Un plan expérimental a été développé. Il est démontré que la presse KDS® est capable de déshydrater un sédiment fin sableux sans une maintenance démesurée. Des adaptations de la presse KDS® à la déshydratation de sédiments et des améliorations sont finalement proposées.

***Mots-clés :*** Sédiments, Kaolin, Séchage naturel, Déshydratation mécanisée, Processus de séchage, Critères d'aptitude, Drainage, Évaporation, Presse à boues KDS®, Floculation, Teneur en eau, Cohésion non drainée.

***PhD ABSTRACT***

Dredging operations produce large amounts of sediments with high water content, that are difficult to handle. Storage management and future reuses need to reduce the water content of sediments. Natural and mechanical dewatering of sediments meet this need. The most economic and eco-friendly method of dewatering is natural dewatering. Dewatering period can be reduced with suitable technical means such as adapted plough or scarifier for sediments, operating under defined dewatering criteria. The natural dewatering process was investigated and reproduced at the laboratory scale by performing Natural dewatering test and Shrinkage test coupled with shear measurements (vane shear testing). Nine sediments have been considered: seven dam sediments, two marine sediments and a kaolinite clay. A relationship $S_u = f(I_P)$ has been established. It allows to deduce the undrained shear strength $S_u$ from only a measurement of water content. It allows to state on the right moment to put in operation the specific tools for ploughing and returning over or scarifying sediments stored. These tools can move in the sediments (adapted plough) or roll on the sediments (scarifiying roller) or roll on banks of sediment storage basin. Another way to dewater high water content sediments concerns a mechanical device. Thus a new method of continuous dewatering has been investigated using a prototype machine patented and referenced as KDS® sludge press. This type of press was not adapted for dewater sediments. Full of dewatering tests have been undertaken and performed with this prototype concerning some of sediments (see natural dewatering testing) and sandy clayey mixtures. It has been shown that KDS® press is able to dehydrate sediments including fine sandy sediments without excessive maintenance. Some adaptations and improvements of KDS® press to dewatering sediments are finally suggested.

***Keywords:*** Sediments, Kaolin, Natural dewatering, Mechanical dewatering, Dewatering process, Dewatering ability criteria, Drainage, Evaporation, KDS® press, Flocculation, Water content, Undrained shear strength.

*SOMMAIRE*

**REMERCIEMENTS** ..... IX
**LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS**..... XI

**1. INTRODUCTION GÉNÉRALE**..... 1
1.1. PROBLÉMATIQUE ÉTUDIÉE..... 3
1.2. MÉTHODOLOGIE ET MOYENS MIS EN ŒUVRE..... 5
1.2.1. Origine des sédiments et des matériaux..... 5
1.2.2. Description et objectif des travaux de thèse..... 6
1.3. LE PROGRAMME COVASED..... 8
1.4. ORGANISATION DU MANUSCRIT ..... 11

**2. CONSIDÉRATIONS BIBLIOGRAPHIQUES**..... 13
AVANT-PROPOS..... 15
2.1. SÉCHAGE ET DÉSHYDRATATION DES SÉDIMENTS..... 16
2.1.1. Définition des paramètres utiles..... 18
2.1.1.1. Paramètres dimensionnels..... 19
2.1.1.2. Paramètres adimensionnels..... 20
2.1.2. Relations entre paramètres..... 21
2.2. LE SÉCHAGE NATUREL DES SÉDIMENTS ..... 27
2.2.1. Lagunage..... 27
2.2.2. Lits de séchage..... 28
2.2.3. Lits de séchage plantés..... 30
2.3. LA DÉSHYDRATATION MÉCANIQUE DES SÉDIMENTS ..... 33
2.3.1. Un système de travail conventionnel..... 33
2.3.1.1. Centrifugeuse ..... 33
2.3.1.2. Filtre presse ..... 34
2.3.2. Un système de travail continu..... 39
2.3.2.1. Hydrosplit® ..... 39
2.3.2.2. Décanteur dynamique Nemeau® ..... 41
2.3.2.3. Presse à boues Volute®..... 43
2.3.3. Récapitulatif des techniques de séchage et de déshydratation..... 48
2.4. LA VALORISATION DES SÉDIMENTS..... 50
2.4.1. Filières de gestion des sédiments..... 50
2.4.2. Traitements pour la réutilisation de sédiments..... 53
2.5. CONCLUSION DU CHAPITRE..... 54

**3. CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS ET MATÉRIAUX**..... 57
3.1. INTRODUCTION ..... 59
3.2. CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS..... 60
3.2.1. Caractérisation physico-chimique..... 60
3.2.1.1. Granulométrie..... 60
3.2.1.2. Texture des sédiments..... 61
3.2.1.3. Teneur en eau..... 62
3.2.1.4. Surface spécifique..... 62

3.2.1.5. Masse volumique des particules solides……...… 63
3.2.1.6. Limites d'Atterberg…… 64
3.2.1.7. Valeur au bleu de méthylène (VBS)…….……. 67
3.2.1.8. Matière organique (MO)…… 68
3.2.1.9. Perte au Feu (PF)……..... 68
3.2.2. Caractérisation minéralogique…… 69
3.2.2.1. Analyse par diffraction des rayons X (DRX) ……..... 69
3.2.2.2. Analyse chimique des éléments majeurs……..……..... 70
3.2.2.3. Teneur en carbonates ($CaCO_3$) ……..…….…… 70
3.2.3. Caractérisation hydromécanique ……... 71
3.2.3.1. Étude de la décantation…….. 71
3.2.3.2. Étude de la consolidation ……...…… 73
3.3. LES SÉDIMENTS DE BARRAGE OU DE RETENUE…….. 76
3.3.1. Lieux de prélèvements et codification…… 76
3.3.2. Contexte géologique général…….. 78
3.3.3. Analyse visuelle et descriptive des sédiments de barrage…….. 79
3.3.4. Caractérisation des sédiments……..... 80
3.3.4.1. Caractérisation physico-chimique…….. 81
3.3.4.2. Caractérisation minéralogique …..……. 88
3.3.4.3. Caractérisation hydromécanique…… 90
3.3.5. Bilan …..…… 98
3.4. LES SÉDIMENTS MARINS……..... 100
3.4.1. Lieux de prélèvements et codification……..…….. 100
3.4.2. Contexte général géologique ……..……... 101
3.4.3. Analyse visuelle et descriptive des sédiments marins …… 102
3.4.4. Caractérisation des sédiments……..... 103
3.4.4.1. Caractérisation physico-chimique…… 103
3.4.4.2. Caractérisation minéralogique ….……. 107
3.4.4.3. Caractérisation hydromécanique…… 108
3.4.5. Bilan..…….. 114
3.5. LE MATÉRIAU ARGILEUX …….. 116
3.5.1. Description de la kaolinite Speswhite…….……... 116
3.5.2. Caractérisation physico-chimique …….…… 116
3.5.3. Caractérisation minéralogique…….…….. 118
3.5.4. Caractérisation hydromécanique……..…….. 118
3.6. LE MATÉRIAU SABLEUX ……..... 122
3.6.1. Description du sable de Fontainebleau……..…. 122
3.6.2. Caractérisation physico-chimique……..… 122
3.7. CONCLUSION DU CHAPITRE……..…. 125

**4. ÉTUDE DU SÉCHAGE DES SÉDIMENTS**…….…..……..…. 127
4.1. INTRODUCTION ……..... 129
4.2. PARAMÈTRES D'ÉTAT ET AUTRES RELATIONS……..... 131
4.2.1. Teneur en eau des sédiments (w) …….. 131
4.2.2. Indice des vides (e) ……..…….. 131
4.2.3. Degré de saturation ($S_r$) …….…… 131

4.2.4. Déformation axiale ($\varepsilon_a$) …… 131
4.2.5. Contrainte de cisaillement ou cohésion non drainée ($S_u$) ……. 132
4.2.6. Coefficient d'activité (A) ……..……. 132
4.2.7. Potentiel de retrait et de gonflement des sols argileux……... 133
4.3. MÉTHODES ET MATÉRIELS……..……... 134
4.3.1. Préparation des échantillons ……..…… 134
4.3.1.1. Échantillons cylindriques de petite taille…….…….. 134
4.3.1.2. Échantillons cylindriques de moyenne et grande tailles…..……... 135
4.3.2. Essai d'Égouttage et de Séchage (EES) ……..……... 135
4.3.2.1. Principe ……..…….…….. 135
4.3.2.2. Mesures……..…… 136
4.3.3. Étude de la variation de la teneur en eau en fonction de la profondeur..... 137
4.3.3.1. Principe …….…… 137
4.3.3.2. Mesures……..…… 137
4.3.4. Essai de Séchage et de Retrait (ESR)…….…… 138
4.3.4.1. Principe …….…… 138
4.3.4.2. Mesures ……..……... 138
4.3.5. Essai mécanique……..……... 138
4.3.5.1. Principe……..…… 139
4.3.5.2. Mesures …...……..…… 140
4.4. RÉSULTATS DES ESSAIS……...……..…. 141
4.4.1. Essai d'Égouttage et de Séchage (EES)……..…. 141
4.4.1.1. Analyse des phénomènes de drainage et d'évaporation……..… 141
4.4.1.2. Autres phénomènes observés pendant le séchage naturel…..……. 148
4.4.2. Mesure de la teneur en eau selon la profondeur de la couche…… 149
4.4.3. Essai de Séchage et de Retrait (ESR)…….…… 150
4.4.3.1. Teneur en eau (w)…….…. 151
4.4.3.2. Indice des vides (e)……... 152
4.4.3.3. Degré de saturation ($S_r$)……. 154
4.4.3.4. Déformation axiale ($\varepsilon_a$)……. 155
4.4.4. Essai mécanique ……... 156
4.4.4.1. Évolution de la cohésion non drainée selon le temps de séchage.. 156
4.4.4.2. Évolution de la cohésion non drainée avec la teneur en eau…….. 158
4.4.5. Activité des sédiments……..……..…… 159
4.5. ANALYSE ET DISCUSSION……...……..……..…… 161
4.5.1. Essai d'Égouttage et de Séchage (EES)…….…… 161
4.5.1.1. Analyse des phénomènes de drainage et d'évaporation…… 161
4.5.1.2. Autres phénomènes constatés pendant le séchage naturel …..….. 162
4.5.2. Mesure de la teneur en eau selon la profondeur de la couche…… 163
4.5.3. Essai de Séchage et de Retrait (ESR)…….…. 163
4.5.3.1. Teneur en eau (w)…….. 163
4.5.3.2. Indice des vides (e)……... 164
4.5.3.3. Degré de saturation ($S_r$)……. 165
4.5.3.4. Déformation axiale ($\varepsilon_a$)……..…. 166
4.5.4. Essai mécanique ……... 167
4.5.4.1. Évolution de la cohésion non drainée selon le temps de séchage.. 167

4.5.4.2. Évolution de la cohésion non drainée avec la teneur en eau…….. 167
4.6. CONCLUSION DU CHAPITRE……..... 168

**5. ÉTUDE DE LA DÉSHYDRATATION MÉCANISÉE**……..... 171
5.1. INTRODUCTION ……..... 173
5.2. LA MACHINE D'ESSAI…….. 174
5.2.1. Description de la presse à boues KDS®……. 174
5.2.1.2. Design de la presse à boues KDS® et améliorations apportées par rapport à la presse Volute®…… 174
5.2.1.3. Caractéristiques principales de la presse à boues KDS®……... 175
5.2.1.4. Applications ...……... 176
5.2.2. Prototype en laboratoire ……...…….…… 176
5.2.2.1. Description du prototype en laboratoire ……...…..…… 176
5.2.2.2. Principe de fonctionnement ……...……..….. 177
5.3. PARAMÈTRES ÉTUDIÉS……...……..... 179
5.3.1. Paramètres de la machine …….. 179
5.3.1.1. Débit d'entrée (De) …… 179
5.3.1.2. Vitesse de rotation des disques elliptiques (V)…….. 179
5.3.1.3. Pression du vérin (P)…….. 180
5.3.2. Floculants……... 181
5.3.2.1. Processus de floculation……..... 181
5.3.2.2. Floculants polymères……..... 181
5.3.2.3. Classification des polymères…….. 181
5.3.2.4. Formes commerciales des floculants……. 182
5.3.2.5. Processus de sélection des floculants……..... 182
5.3.2.6. Jar test ……... 183
5.3.2.7. Dosage optimal du floculant ……. 183
5.4. PLAN EXPÉRIMENTAL…… 184
5.4.1. Description générale…….. 184
5.4.2. Paramètres intervenants et réalisation des essais……..…….. 185
5.4.2.1. Étape 1. Préparation du matériau……..…….. 185
5.4.2.2. Étape 2. Déshydratation mécanisée avec KDS®…….……... 186
5.4.2.3. Étape 3. Analyse et interprétation des résultats…….…… 187
5.5. RÉSULTATS DES ESSAIS ……..…… 188
5.5.1. Essais sur le matériau argileux……..…….. 188
5.5.1.1. Essai de floculation……..…... 188
5.5.1.2. Essai de déshydratation……..…. 190
5.5.2. Essais sur les matériaux argileux et sableux…….. 195
5.5.2.1. Essai de floculation…… 195
5.5.2.2. Essai de déshydratation…….. 197
5.5.3. Essais sur les sédiments de barrage…..……..…. 201
5.5.3.1. Essai de floculation ……..…….. 201
5.5.3.2. Essai de déshydratation……..…. 206
5.6. ANALYSE ET DISCUSSION……... 215
5.6.1. Matériaux argileux ……..... 215
5.6.1.1. Essai de floculation…… 215

5.6.1.2. Essai de déshydratation…….. 216
5.6.2. Matériaux argileux et sableux……..... 218
5.6.2.1. Essai de floculation…… 218
5.6.2.2. Essai de déshydratation…….. 219
5.6.3. Sédiments de barrage……. 221
5.6.3.1. Essai de floculation ……... 221
5.6.3.2. Essai de déshydratation…….. 223
5.7. INFLUENCE DU FLOCULANT EN VALORISATION MATIÈRE…….. 228
5.7.1. Matériaux utilisés pour les mélanges……. 228
5.7.1.1. Le ciment …….. 228
5.7.1.2. La chaux……..... 228
5.7.1.3. Les sédiments……..... 229
5.7.2. Formulation des mélanges et codification…….. 229
5.7.3. Préparation des échantillons……..…. 229
5.7.4. Essai de résistance en compression simple……..... 230
5.7.5. Résultats de l'essai de résistance en compression simple…….. 231
5.7.6. Discussion sur l'influence du floculant sur la résistance en compression simple……. 234
5.8. BILAN …….. 235

**6. PROPOSITION DE CRITÈRES D'APTITUDE AU SÉCHAGE ET À LA DÉSHYDRATATION DES SÉDIMENTS ET ASPECT TECHNIQUES**……. 241
6.1. INTRODUCTION……..... 243
6.2. PROPOSITION DE CRITÈRES D'APTITUDE AU SÉCHAGE NATUREL DE SÉDIMENTS ……..…. 244
6.2.1. Processus du séchage naturel des sédiments……..…. 244
6.2.1.1. Étapes du procédé de lagunage et principe de fonctionnement…. 244
6.2.1.2. Le séchage des sédiments par lagunage reproduit à l'échelle du laboratoire ……..... 247
6.2.1.3. Proposition de méthodes d'amélioration du séchage naturel……. 247
6.2.2. Principaux paramètres intervenant pendant le séchage naturel des sédiments…….……. 249
6.2.2.1. Les argiles …….…… 249
6.2.2.2. Les sables …….…… 249
6.2.2.3. La matière organique ……..….. 249
6.2.2.4. La teneur en eau initiale du sédiment ……..….. 250
6.2.2.5. Limites d'Atterberg ……..…. 250
6.2.2.6. Géométrie du casier de réception et de stockage ……..… 250
6.2.2.7. Autres paramètres intervenants pendant le séchage ……..… 251
6.2.3. Analyse et relation entre paramètres relatifs au séchage naturel des sédiments ……..… 251
6.2.3.1. Paramètres liés aux caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du sédiment à déshydrater…….…….... 252
6.2.3.2. Géométrie de la zone de séchage…….…….. 256
6.2.4. Critères d'aptitude au séchage naturel de sédiments…….……. 257
6.2.4.1. Paramètres d'état des sédiments…….……... 257

6.2.4.3. Paramètres mécaniques des sédiments……..……. 262
6.2.4.4. Paramètres liés à la vitesse de drainage (VD) et d'évaporation (VE)…….….. 265
6.2.5. Mise en œuvre de moyens ou de dispositifs d'amélioration du processus de séchage de sédiments…….…….….. 270
6.3.PROPOSITION DE CRITÈRES D'APTITUDE À LA DÉSHYDRATATION MÉCANISÉE DE SÉDIMENTS ……..……...… 273
6.3.1. Paramètres intervenant dans la déshydratation des sédiments avec la presse à boues KDS®…..…….. 273
6.3.1.1. Paramètres intervenant pendant la préparation des sédiments …. 273
6.3.1.2. Paramètres intervenant pendant la déshydratation des sédiments. 276
6.3.2. Modifications à apporter à la machine à déshydrater……. 280
6.3.2.1. Modifications dues aux dysfonctionnements pendant la prise en main de la presse…… 280
6.3.2.2.Modifications d'adaptation de la presse KDS® à la déshydratation des sédiments……..... 281
6.3.2.3. Modifications proposées pour améliorer la déshydratation des sédiments avec la presse KDS®……. 286
6.3.3. Essai de déshydratation de sédiments avec la presse à boues KDS® à l'échelle semi-industrielle : cas pratique…….…… 291
6.3.3.1. Description de la presse utilisée……. 291
6.3.3.2. Matériaux utilisés pour l'essai de déshydratation…….. 292
6.3.3.3. Protocole suivi pendant les essais de déshydratation……. 296
6.3.3.4. Résultats des essais de déshydratation……... 298
6.3.3.5. Analyse des résultats des essais de déshydratation…… 301
6.3.4. Processus de déshydratation mécanisée de sédiments avec le prototype de presse KDS® …… 302
6.4. CONCLUSION DU CHAPITRE ……..….. 305

**7. CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES**…….…..……. 309
7.1. RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA THÈSE ET MÉTHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE…….….. 311
7.2. CONCLUSIONS GÉNÉRALES …….…. 312
7.2.1. Sédiments étudiés…….….. 312
7.2.2. Séchage naturel…….…. 312
7.2.3. Déshydratation mécanisée ...…….…. 314
7.3 PERSPECTIVES …….….. 316
7.3.1. Séchage naturel …….…. 316
7.3.2. Déshydratation mécanisée…….…. 316

**LISTE DES RÉFÉRENCES** ……..… 319
Références normatives ...……... 319
Références bibliographiques ……...…….. 321
Références sitographiques ……..…….. 334

**LISTE DES PUBLICATIONS DE L'AUTEUR** …….. 337

**LISTE DES FIGURES**…….…….. 339

**LISTE DES TABLEAUX** ……...……..... 347

**ANNEXES** ……..…….. 349
A.1. EXPRESSION DES DIFFÉRENTES RELATIONS UTILES …… 351
A.1.1. Expression du poids volumique sec……..….. 351
A.1.2. Expression du poids volumique d'un échantillon……... 351
A.1.3. Expression de la concentration en matières solides…..…….. 352
A.1.4. Expression de la porosité…… 353
A.1.5. Expression de l'indice des vides…..……... 353
A.1.6. Expression de la teneur en eau…….…….. 355
A.1.7. Expression du degré de saturation…….……. 356
A.2. DÉSHYDRATATION NATURELLE DES SÉDIMENTS ET DES ARGILES……..……. 357
A.2.1. Évolution des pourcentages d'eau par rapport au temps de séchage naturel…… 357
A.2.2. Évolution de la teneur en eau par rapport à la profondeur de la couche... 365
A.2.3. Évolution des paramètres d'état lors du séchage naturel……. 367
A.2.4. Évolution de la cohésion non drainée par rapport au temps de séchage……... 387
A.2.5. Évolution de la cohésion non drainée avec la teneur en eau…….. 389
A.2.6. Aspect visuel des sédiments et de la kaolinite pendant le séchage naturel……..... 393
A.3. CRITÈRES D'APTITUDE AU SÉCHAGE NATUREL DES SÉDIMENTS.. 397
A.3.1. Relations entre les paramètres d'état des sédiments…… 397
A.3.2. Relations entre les Su mesurée et Su prédite des sédiments étudiés….. 400
A.3.3. Relations entre les paramètres et la vitesse de drainage (VD) et d'évaporation (VE)…… 402

**RÉSUMÉ DE LA THÈSE** …… 407

***REMERCIEMENTS***

## *LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS*

### *Organismes*

AAP-FUI : Appel À Projets du Fonds Unique Interministériel
ADEME. : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFNOR : Association Française de NORmalisation
AMCON : AMenity CONvenience
ARPE : Agence Régionale Pour l'Environnement
ASTM: American Society for Testing Materials
BENENV : BENenfit the ENVironment
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CEDEX : CEntre D'Études et D'EXpérimentation des travaux publics de l'état espagnol
CEREMA : Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
CIEM : Comisión Interministerial de Estrategias Marinas
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
COVASED : COVAlorisation des SEDiments
DDAF : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt
DDE : Direction Départementale de l'Équipement
DPMT : Domaine Public Maritime et Terrestre
DRX : Diffraction des Rayons X
EDF : Électricité De France
ENTE : École Nationale des Techniciens de l'Équipement
ESITC : École Supérieure d'Ingénieurs des Travaux de la Construction
ÉTS : École de Technologie Supérieure
FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
GPM : Grand Port Maritime
GPMD : Grand Port Maritime de Dunkerque
ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
ISO : Organisation Internationale de Normalisation
LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LERM : Laboratoire d'Études et de Recherches sur les Matériaux
M2C : Morphodynamique Continentale et Côtière
SEDIGATE : SEDiments Gestion A TErre
SETRA : Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements
SQP : Société Québécoise de Phytotechnologie
TEAM : Technologies de l'Environnement Appliquées au Matières et aux Matériaux
UMR : Unité Mixte de Recherche
USDA : Département de l'Agriculture des États-Unis

***Abréviations***

ACP : Analyse en Composantes Principales
AN : Anionique
CPS : Centipoise
EES : Essai d'Égouttage et de Séchage
ESR : Essai de Séchage et de Retrait
GTR : Guide des Terrassements Routiers
L : Limon
LSP : Lit de Séchage Planté
MES : Matière En Suspension
MO : Matière Organique
MS : Matière Sèche
NF : Norme Française
PF : Perte au Feu
S : Sable
SH : Super High
ST : Système de Travail
VBS : Valeur au bleu de méthylène
VHM : Very High Molecular

***Symboles***

$A_1$ et $A_2$ : Paramètres propres à chaque vase ou sédiment fin (essais de décantation)
$A_c$ : Coefficient d'activité
Al : Aluminium
B : Masse de bleu introduite
C : Concentration
$C_2S$ : Belite (Notation cimentaire)
$C_3A$ : Aluminate (Notation cimentaire)
$C_3S$ : Alite (Notation cimentaire)
$C_a$ : Indice de fluage
$CaCO_3$ : carbonate de calcium
CaO : Oxyde de calcium ou chaux vive
$C_c$ : Coefficient de courbure
$C_{co}$ : Indice de compression
CEM II/B-M : Ciment Portland composé de pourcentages de clinker compris entre 65% et 79%
$c_p$ : Capacité thermique de l'air
$C_s$ : Indice de gonflement
$C_u$ : Coefficient d'uniformité
$C_v$ : Coefficient de consolidation
d : Distance entre deux plans parallèles successifs du réseau cristallin
D : Diamètre
$D_0$ : Diamètre initial
$D_{10}$ : Diamètre des grains à 10% de passants
$D_{15}$ : Diamètre des grains à 15% de passants

$D_{30}$ : Diamètre des grains à 30% de passants
$D_{50}$ : Diamètre des grains à 50% de passants
$D_{60}$ : Diamètre des grains à 60% de passants
$D_{85}$ : Diamètre des grains à 85% de passants
$D_e$ : Débit d'entrée de la boue
$D_f$ : Diamètre final
e : Indice des vides
E : Module de Young ou module d'élasticité longitudinale
E1 : Eau dans les sédiments
E2 : Eau drainée
E3 : Eau évaporée
$e_a$ : Pression effective ou actuelle de la vapeur d'eau dans l'air
$E_p$ : Potentiel d'évaporation
$e_s$ : Pression de la vapeur d'eau à saturation à la température de la surface de l'échantillon
ETP : ÉvapoTranspiration Potentielle
$F_c$ : Force axiale de compression
f(u) : Constante de proportionnalité en fonction de la vitesse du vent
$F_{v_soc}$ : Effort vertical additionnel des socs ou disques enfouis
g : Accélération de la pesanteur (9,81 $m/s^2$)
$g_a$ : Conductance atmosphérique
H : Hauteur
$H_0$ : Hauteur initiale
$H_f$ : Hauteur finale
$H_m$ : Hauteur mesurée
$I_C$ : Indice de consistance
$I_L$ : Indice de liquidité
$I_P$ : Indice de plasticité
k : Perméabilité ou conductivité hydraulique
K : Raideur d'un ressort de torsion
K' : Constante liée à l'appareil utilisé (surface spécifique de Blaine)
$L_0$ : Longueur initiale
L : Longueur
LL : Calcaire (Notation cimentaire)
m : Pente de la courbe de la pression de vapeur saturante
M : Masse totale de l'engin, plus conducteur
$m_0$ : Masse sèche de la prise d'essai au bleu de méthylène
$m_a$ : Masse de l'air
$M_T$ : Couple maximum de torsion mesuré
$m_s$ : Masse des particules solides
$m_T$ : Masse totale
$m_w$ : Masse de l'eau
n : Porosité
N : Nombre de roues de l'engin
$n_l$ : Ordre de diffraction
$N_A$ : Nombre d'Avogadro
O : Oxygène

P : Pression du vérin
$P_a$ : Poids de l'air
$P_{r1}$ : Pression de la chambre contenant l'échantillon
$P_{r2}$ : Pression de la chambre d'expansion
$P_{ra}$ : Pression ambiante
$P_s$ : Poids des particules solides
$P_w$ : Poids de l'eau
Q : Débit volumique filtrant
$q_{engin}$ : Pression exercée par l'engin sur la couche de sédiments
$R^2$ : Coefficient de détermination
$R_c$ : Résistance en compression simple
Rl : Retrait linéaire
$R_n$ : Irradiance nette
S : Siccité
$S_{BET}$ : Surface spécifique selon la méthode BET
$S_{Blaine}$ : Surface spécifique Blaine ou finesse de Blaine
$S_c$ : Tassement de consolidation
$S_{cr}$ : Surface de contact roue/sédiments
$S_e$ : Section de sortie du réservoir
$S_{éprouvette}$ : Section de l'éprouvette
$S_f$ : Tassement de fluage
$S_{filtrante}$ : Surface filtrante
Si : Silicium
$S_r$ : Degré de saturation
$S_t$ : Tassement au temps t
$S_u$ : Cohésion non drainée
$S_{uR}$ : Cohésion non drainée à l'état remanié
t : Temps
T : Température au sein de l'enceinte
V : Vitesse
V° : Volume molaire du gaz adsorbé
$V_a$ : Volume de l'air
VD : Vitesse de drainage
VE : Vitesse d'évaporation
$V_e$ : Volume de la boue
$V_f$ : Volume final
$V_m$ : Volume adsorbé dans la première monocouche
$V_s$ : Volume des particules solides
$V_T$ : Volume total
$V_v$ : Volume des vides
$V_w$ : Volume de l'eau
w : Teneur en eau
$w_f$ : Teneur en eau finale
$w_i$ : Teneur en eau initiale
$w_L$ : Limite de liquidité
$w_P$ : Limite de plasticité

$w_R$ : Limite de retrait
$\gamma$ : Poids volumique ou poids spécifique
$\gamma_d$ : Poids volumique (ou poids spécifique) sec
$\gamma_s$ : Poids volumique (ou poids spécifique) des particules de grains
$\gamma_w$ : Poids volumique (ou poids spécifique) de l'eau
$\Delta D/D_0$ : Retrait diamétral relatif
$\delta_e$ : Variation de pression
$\Delta H$ : Tassement ou variation de hauteur
$\Delta h/h_0$ : Tassement relatif
$\Delta H/L$ : Gradient hydraulique
$\Delta V/V_0$ : Variation de volume relative
$\varepsilon$ : Porosité du lit de poudre
$\varepsilon_a$ : Déformation axiale
$\varepsilon_R$ : Allongement à la rupture
$\eta$ : Viscosité de l'air à une température donnée
$\theta$ : Différence des angles de rotation lors de l'essai scissometrique
$\theta_1$ : Angle de diffraction entre le faisceau incident et le réseau de plans
$\lambda$ : Longueur d'onde des rayons X
$\gamma_1$ : Constante psychrométrique
$\lambda_v$ : Énergie de vaporisation
$\rho$ : Masse volumique
$\rho_a$ : Masse volumique de l'air
$\rho_s$ : Masse volumique des particules solides
$\rho_d$ : Masse volumique sèche
$\rho_w$ : Masse volumique de l'eau
$\sigma$'= Contrainte effective
$\sigma_m$ : Encombrement de la couche monomoléculaire
$\varphi$ : Humidité relative

# *1. INTRODUCTION GÉNÉRALE*

## *1.1. PROBLÉMATIQUE ÉTUDIÉE*

### *Les opérations de dragage*

Les opérations de dragage ont comme objectif principal l'extraction de matériaux (sédiments, roches ou autres matériaux) situés sur le fond d'un plan d'eau dans le domaine public maritime et terrestre DPMT à savoir les lacs ou réservoirs, les ports, les voies navigables, les barrages, … (COMISIÓN INTERMINISTERIAL DE ESTRATEGIAS MARINAS – « CIEM », 2015).

Les dragages présentent un enjeu essentiel dans l'économie, l'environnement et le développement d'un pays. Ils permettent la réalisation de travaux de génie maritime et portuaire et la conservation des profondeurs de navigation dans les voies d'accès maritimes, des canaux et des fleuves ou des hauteurs d'eau de service pour les retenues hydroélectriques.

Ces opérations génèrent une importante quantité de sédiments de dragage qui deviennent des déchets dans le cas d'une gestion à terre. En comparaison aux années antérieures, une importante quantité de sédiments a été stockée à terre en 2009, un maximum de 881 910 tonnes. Ces matériaux proviennent des travaux d'aménagement de « Port 2000 » financés par le Grand Port Maritime du Havre. Pour les années suivantes, ces quantités ont fortement baissé, en 2011, un total de 262 739 tonnes de sédiments secs a été déposé à terre en France métropolitaine et territoires d'outre-mer, voir figure 1-1 (COLIN & LE GUYADER, 2012 ; LE GUYADER, 2013 ; EL FADILI & MESSAGER, 2015 ; ; MESSAGER & BOUVET, 2017.a ; MESSAGER & BOUVET, 2017.b; RAUJOUAN, 2009 ; RAUJOUAN, 2010).

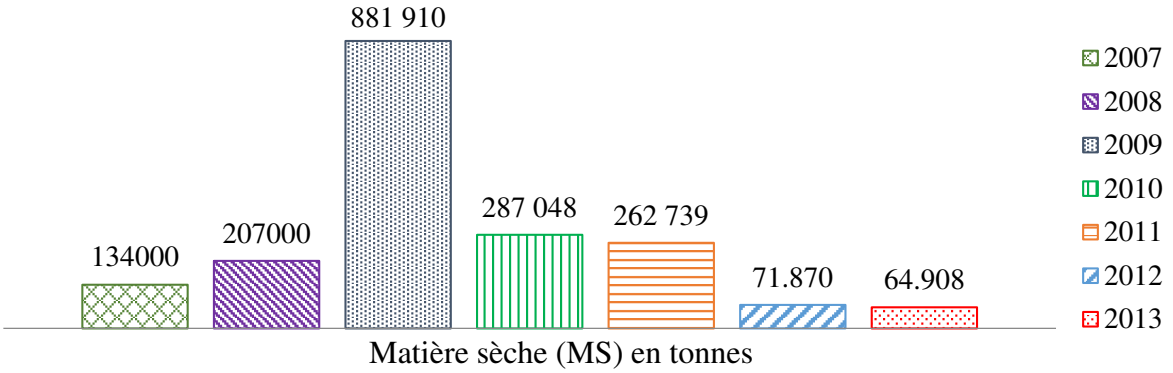



*Figure 1-1. Évolution des tonnages de sédiments dragués déposés à terre en France, de 2007 à 2013.*

### *Alternatives au stockage à terre des sédiments*

Le stockage à terre des sédiments est une solution temporaire. Il existe une alternative à cette solution qui est la valorisation et la réutilisation de ces matériaux, en fonction de leur indice de contamination, voir figure 1-2.

Diverses recherches prouvent la possibilité de réutilisation des sédiments non pollués dans le domaine du génie civil, dont celles de COLIN (2003), DUBOIS (2006), SEMCHA (2006), CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS –

CEDEX (2007), DUAN (2008) ou ANGER (2014). L'élaboration de matériaux de construction ou routiers, le remblayage, le rechargement des plages et des dunes, la réalisation d'ouvrages de protection ou de digues ou l'amélioration des sols sont quelques exemples de valorisation des sédiments dragués et/ou de barrage.

Le principal verrou, pour la plupart de ces applications, réside dans le fait que les sédiments ont une teneur en eau très élevée. Ceci implique de les déshydrater avant leur valorisation.

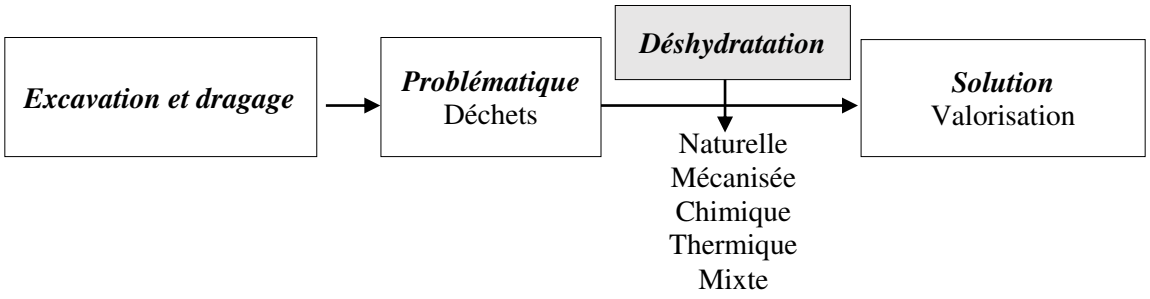



*Figure 1-2. Procédure simplifiée de valorisation des sédiments de dragage.*

## *1.2. MÉTHODOLOGIE ET MOYENS MIS EN ŒUVRE*

Les travaux de recherche menés dans le cadre de cette thèse s'intéressent à l'étude du séchage naturel et de la déshydratation mécanisée des sédiments. Pour cela, différents sédiments et matériaux commerciaux sont étudiés à l'aide de différents essais de laboratoire.

### *1.2.1. Origine des sédiments et des matériaux*

#### *Les sédiments*

Les sédiments concernés dans cette étude sont issus de deux horizons. Ils peuvent être classés en deux groupes en fonction de leur origine : les sédiments de barrage et les sédiments marins ou portuaires.

- Les sédiments de barrage

  Ces sédiments ont été choisis par l'entreprise « Électricité de France » - EDF. Ils proviennent des opérations d'entretien des barrages situés dans différentes régions de France : de la Bretagne, du Grand Est, de la Nouvelle Aquitaine, des régions alpines d'Auvergne-Rhône-Alpes et de la Provence-Alpes-Côte d'Azur.

- Les sédiments marins

  Les sédiments marins provenant des dragages d'entretien du « Grand Port Maritime de Dunkerque » - GPMD (Hauts-de-France) ont été sélectionnés dans le programme de recherche et développement « CO-Valorisation des SEDiments » - COVASED.

  Les sédiments marins de la Rance proviennent du barrage de la Rance. Ils sont classés comme des sédiments marins puisque ce barrage, géré par l'entreprise EDF, est situé à l'embouchure de l'estuaire de la Rance en Bretagne.

#### *Les matériaux commerciaux*

Les matériaux commerciaux sélectionnés dans cette étude sont une kaolinite « Speswhite » et un sable de référence. La kaolinite a été sélectionnée principalement pour sa composition physico-chimique argileuse et pour sa disponibilité dans le marché à des prix abordables. Le sable choisi pour cette étude est le sable fin de Fontainebleau. Ce sable a été utilisé dans de nombreux travaux de recherche en géotechnique et ses propriétés sont parfaitement maîtrisées. Il a été retenu dans nos travaux pour sa granulométrie uniforme et bien graduée.

### *1.2.2. Description et objectif des travaux de thèse*

Il est question dans ce projet du séchage naturel et de la déshydratation mécanisée des matériaux susmentionnés. Ces travaux comportent deux études, voir figure 1-3.

La première étude porte sur le séchage naturel des sédiments. Le but est de déterminer un ou des critères d'aptitude au séchage naturel des sédiments afin d'améliorer cette technique de déshydratation. Pour cela, une série d'essais sont réalisés en laboratoire. Ils permettent de reproduire, à plus petite échelle, le comportement des sédiments pendant le séchage naturel. Le séchage naturel dépend fortement de la surface de dépôt des sédiments et de leur composition très hétérogène. Pour optimiser ce procédé de séchage, des questions récurrentes se posent à savoir : quel est le moment le plus approprié pour retourner les sédiments de façon à accélérer la déshydratation ? À quel moment les sédiments auront-ils la capacité portante suffisante et nécessaire pour supporter le poids d'un engin circulant, par exemple celui d'une petite perforatrice afin d'augmenter la surface de drainage et de séchage ?

La deuxième étude s'intéresse à la déshydratation mécanisée des sédiments. Après une brève synthèse des différentes techniques de déshydratation en fonction du système de travail « discontinu ou continu », la presse KDS® est retenue et testée en laboratoire. Cette machine et son procédé de déshydratation n'ont jamais été appliqués sur les sédiments. Par le biais d'essais, nous avons étudié la faisabilité de déshydratation de sédiments avec cette technique. La détermination de paramètres de fonctionnement de cette machine et leur influence afin de déshydrater les sédiments d'une manière optimale a été étudiée afin de fournir une méthodologie de travail. Les objectifs principaux de cette deuxième étude ont été, d'une part, de résoudre les inconvénients du séchage naturel par une déshydratation mécanisée et d'autre part, améliorer le système de travail de cette dernière en proposant cette nouvelle technologie.

Ces deux études sont développées après une première étape de caractérisation des sédiments.

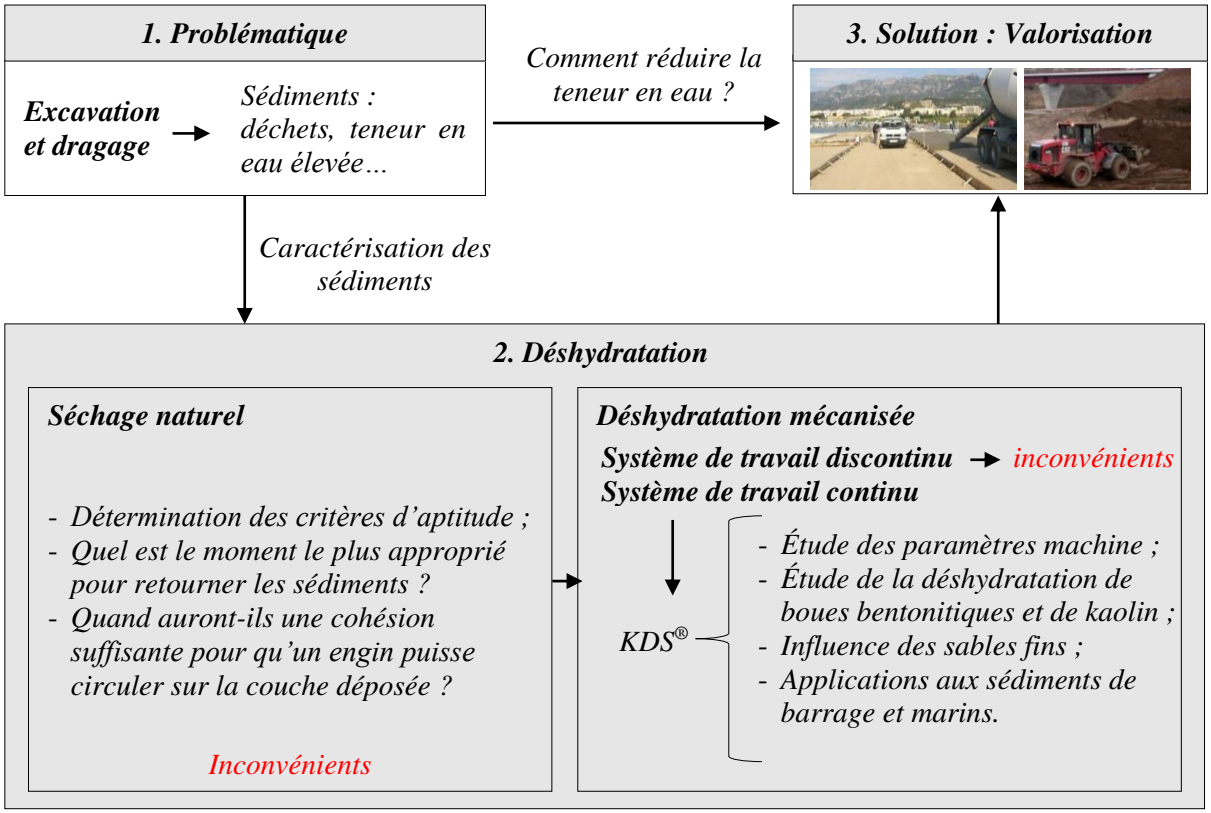



*Figure 1-3. Description des travaux envisagés.*

## *1.3. LE PROGRAMME COVASED*

Le programme COVASED (CO-VAlorisation des SÉDiments) est un programme de recherche et développement dont une expérimentation sur site est prévue dans le Grand Port Maritime de Dunkerque.

### *Objectifs du programme COVASED*

COVASED donne une solution au manque de filières de valorisation viables du point de vue économique et environnemental. Il a comme principal objectif la déshydratation de sédiments fluviaux et portuaires pour une réutilisation future en proposant un système de déshydratation « en continu » (DHERVILLY et al., 2014), voir figure 1-4.

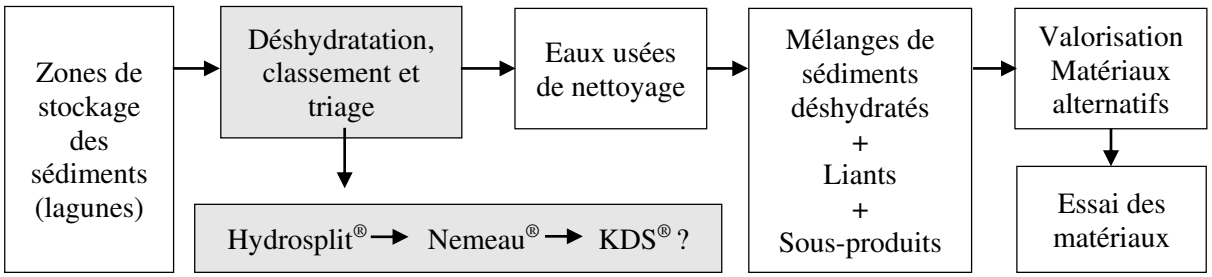



*Figure 1-4. Schéma de gestion et de traitements des sédiments proposé par le programme COVASED (BOULLOSA ALLARIZ & LEVACHER, 2016).*

Les objectifs et l'organisation de ce programme se résument ainsi (DHERVILLY et al., 2014) :

- Pilotage, coordination et suivi du programme ;
- Préparation du programme : réalisation de l'outil expérimental, caractérisation des sédiments, réalisation des essais de déshydratation…
- Ensemble des opérations unitaires de traitement, ainsi que pré - et post-traitements ;
- Études d'impacts sur l'environnement avec un bilan des avantages et des inconvénients du remplacement des matériaux traditionnels par les nouveaux matériaux créés par les procédés COVASED ;
- Plot expérimental de voiries, afin de suivre le comportement et l'évolution dans le temps des matériaux créés ;
- Rédaction d'un recueil de procédure, diffusion et actions de communication autour des résultats du programme.

***Description de la plateforme COVASED***

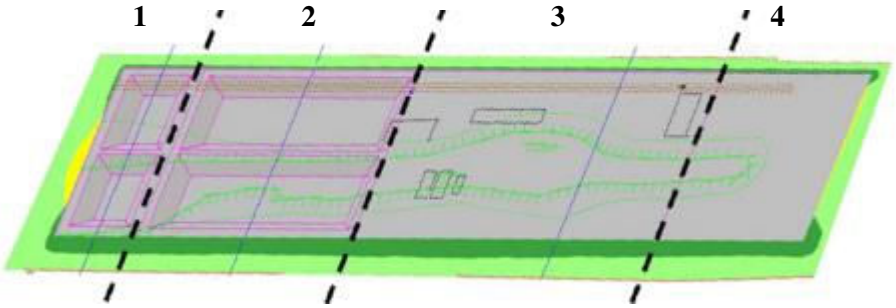
Ce programme de recherche et développement propose une plate-forme de taille moyenne (12 000 $m^2$) qui est divisée en quatre zones, voir figure 1-5 :

- La première zone est composée de deux bassins de stockage qui ont une capacité totale de 500 $m^3$ ;

- La deuxième zone est formée de deux bassins de stockage de produits bruts d'une capacité totale de 2 000 $m^3$ ;

- Ensuite, la troisième zone (zone de traitement) est destinée à la déshydratation de sédiments. Cet espace a une surface de 2 500 $m^2$ dans lequel le programme COVASED propose la combinaison des systèmes Hydrosplit® et Nemeau®. Ces systèmes sont développés dans le chapitre suivant « considérations bibliographiques ».

- Après ce processus de déshydratation, les sédiments déshydratés sont stockés et utilisés dans une zone de 2 000 $m^2$ prévue à des essais dits « pilotes ».




**1** : Bassins
**2** : Bassins de stockage du produit brut
**3** : Zone de traitement
**4** : Zone de stockage des produits traités

*Figure 1-5. Schéma de la plateforme COVASED (TRANQUILLE, 2015).*

Soulignons que si la presse KDS® fournit des résultats favorables à la déshydratation des sédiments, elle sera incorporée dans ce programme.

***Emplacement de la plateforme COVASED***

La plateforme COVASED est située entre les écluses Charles de Gaulle et Watler près de la route de l'écluse Charles de Gaulle, à côté de l'usine « Hydropale », voir figure 1-6. Le choix de son emplacement est essentiel puisque les sédiments dragués peuvent être déposés dans les bassins pour une future déshydratation.

*Figure 1-6. Localisation de la plateforme COVASED, dans le GPMD.*

***Partenaires et financement du programme COVASED***

Le programme COVASED est soutenu par deux pôles de compétitivité, deux entreprises et trois laboratoires (DHERVILLY et al., 2014) :

- Le pôle de Technologies de l'Environnement Appliquées aux Matières et aux Matériaux « TEAM$^2$ » et la Pôle Mer de Bretagne-Atlantique.

- Trois puis deux entreprises :

  - VALGO : cette entreprise est spécialisée dans la dépollution des sols et nappes. Elle est responsable du triage et de la dépollution des fractions sédimentaires (système Hydrosplit®) dans ce programme. Elle est devenue porteur du projet par la suite.

  - In Vivo Environnement : cette société a la responsabilité d'établir des dossiers liés à la réglementation environnementale.

  - SEDIGATE : « SEDIments Gestion A TErre » entreprise ayant développé le système Nemeau® et porteur du projet. Cette société a disparu fin 2016 et ne fait plus partie du projet.

- Deux laboratoires :

  - École Centrale de Lille : laboratoire spécialisé dans la caractérisation, stabilisation et valorisations des sédiments et des sols pollués dans les matériaux de Génie Civil.

- UMR CNRS M2C Morphodynamique Continentale et Côtière – « M2C » laboratoire dont l'activité de l'équipe génie civil et environnement concerne l'étude de caractérisation et traitement de sédiments pour la valorisation en technique routière et matériaux de construction.

Afin d'assurer le développement des études et bon fonctionnement de cette plateforme, le programme COVASED fait partie d'un Appel à Projets du Fonds Unique Interministériel « AAP-FUI » pour le soutien financier.

### *1.4. ORGANISATION DU MANUSCRIT*

Le présent document est composé de sept chapitres qui, d'une manière schématique sont donnés sur la figure 1.7.

Ce manuscrit débute par ce chapitre 1 « *introduction générale* » qui introduit, d'une part, la problématique étudiée dans le cadre de cette thèse et d'autre part, la méthodologie et moyens mis en œuvre pour pouvoir déshydrater les sédiments de barrage et/ou dragage. Le projet COVASED, support de ces travaux est brièvement décrit.

Il est sujet dans le chapitre 2, de « *considérations bibliographiques* », relatives aux différentes méthodes qui permettent de réduire la teneur en eau des sédiments. Il présente une récapitulation des techniques conventionnelles de déshydratation en se focalisant sur le séchage naturel et la déshydratation mécanisée. Ce chapitre définit également les paramètres nécessaires pour la caractérisation physico-mécanique des sols ainsi que les relations existantes entre ces paramètres.

Le chapitre 3, « *caractérisation des sédiments et matériaux argileux* » aborde la caractérisation des sédiments, première étape de tout processus de valorisation. Ce chapitre présente les matériaux qui font l'objet d'essais dans cette thèse. Sont détaillés les propriétés « physicochimiques » et « minéralogiques », ainsi que les lieux de prélèvement sous les sédiments et leurs références.

Le chapitre 4, « *étude du séchage des sédiments* » se focalise sur la détermination des critères d'aptitude au séchage naturel des sédiments. Pour ce faire, il est d'abord défini les paramètres d'état utiles au suivi du séchage des sédiments et il est établi une méthode de travail pour déterminer et interpréter ces paramètres. Des essais sont récapitulés dans ce chapitre ; ces essais sont analysés et discutés.

Le chapitre 5, « *étude de la déshydratation mécanisée* » concerne la déshydratation mécanique des sédiments en utilisant un mode de travail « en continu ». Une nouvelle machine pour déshydrater les sédiments en continu est utilisée en laboratoire. Elle n'a jamais été testée avec des matériaux fins comme les sédiments. Ce chapitre présente les essais réalisés pour déterminer les paramètres de la machine qui permettent de déshydrater des sédiments d'une manière optimale. En fin de chapitre, les résultats obtenus sont récapitulés et interprétés.

Le chapitre 6, « *proposition de critères d'aptitude au séchage et à la déshydratation des sédiments* », vise à définir des critères d'aptitude communs au séchage et à la déshydratation mécanisée des sédiments, en utilisant la machine d'essai KDS®. Il est proposé également une série de modifications à apporter à la machine à déshydrater afin d'améliorer le processus de déshydratation mécanisée des sédiments.

Ce manuscrit se termine par des conclusions générales et des perspectives pour de futures recherches sur la valorisation et la déshydratation des sédiments.

| | |
|---|---|
| ***Chapitre 1. Introduction générale*** | |
| ***Chapitre 2. Considérations bibliographiques*** | - Définition et relation des paramètres utiles ;<br>- Séchage naturel des sédiments ;<br>- Déshydratation mécanisée des sédiments ;<br>- Valorisation des sédiments. |
| ***Chapitre 3. Caractérisation des sédiments et matériaux argileux*** | - Sédiments de barrage ou de retenues ;<br>- Sédiments marins ;<br>- Matériau argileux ;<br>- Matériau sableux. |
| ***Chapitre 4. Étude du séchage des sédiments*** | - Paramètres d'état et autres relations ;<br>- Méthodes et matériels ;<br>- Résultats des essais ;<br>- Analyse et discussion. |
| ***Chapitre 5. Étude de la déshydratation mécanisée*** | - Machine d'essai ;<br>- Paramètres étudiés ;<br>- Plan expérimental ;<br>- Résultats des essais ;<br>- Analyse et discussion ;<br>- Influence du floculant en valorisation matière. |
| ***Chapitre 6. Proposition de critères d'aptitude au séchage et à la déshydratation des sédiments et aspects techniques*** | - Proposition de critères d'aptitude au séchage ;<br>- Proposition de critères d'aptitude à la déshydratation mécanisée. |
| ***Chapitre 7. Conclusions générales et perspectives*** | |

*Figure 1-7. Schéma de l'organisation du manuscrit.*

# *2. CONSIDÉRATIONS BIBLIOGRAPHIQUES*

## *Avant-propos*

La réalisation de travaux de génie maritime et portuaire et la conservation des profondeurs de navigation dans les voies d'accès maritimes, des canaux et des fleuves ou de la hauteur d'eau dans les retenues hydroélectriques sont des opérations indispensables pour l'économie, l'environnement et le développement d'un pays et/ou d'une région. Le produit de ces opérations sont les sédiments de dragage.

Un des principaux problèmes que présentent les opérations de dragage est le devenir des sédiments dragués ainsi que leur transport. Leurs teneurs en eau sont très élevées ce qui les rend difficilement transportables. Et les volumes à transporter sont considérables. De même, la plupart des voies de valorisation des sédiments ou leur stockage impliquent de réduire la teneur en eau des sédiments. La déshydratation se présente comme étant la solution à cette problématique.

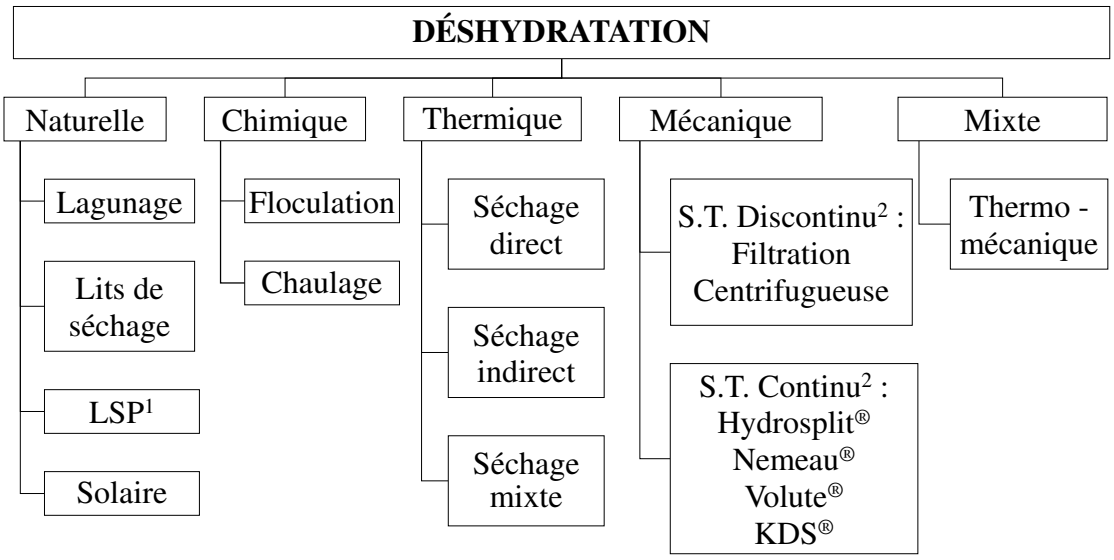
Plusieurs techniques de déshydratation peuvent être différenciées, comme la déshydratation mécanisée et le séchage naturel. Ces deux procédés de déshydratation peuvent être améliorés. Le séchage naturel peut être optimisé en suivant l'évolution de quelques paramètres physiques et mécaniques du sédiment. Le développement de machines permettant de déshydrater les sédiments en continu, rendront la déshydratation mécanisée plus avantageuse.

Ce chapitre définit et compare les différentes techniques de déshydratation en se focalisant sur le séchage naturel et la déshydratation mécanisée des sédiments. La recherche de critères d'aptitude ou d'optimisation pour le séchage naturel des sédiments s'appuie essentiellement sur les paramètres physiques des sédiments qui sont décrits dans ce chapitre. Si les moyens techniques conventionnels de déshydratation sont passés en revue, les techniques relatives à la déshydratation mécanisée en continu sont particulièrement détaillées. Un rappel des voies potentielles de valorisation des sédiments est fait en fin de chapitre.

## *2.1. SÉCHAGE ET DÉSHYDRATATION DES SÉDIMENTS*

La déshydratation peut être définie comme la réduction de la teneur en eau d'un ensemble de particules solides qui composent le sédiment.

Cette élimination partielle ou totale de l'eau peut être réalisée selon différentes méthodologies par action mécanique et/ou thermique, par ajout de composants chimiques, par combinaison d'action mécanique, thermique ou chimique. En fonction de la source d'énergie ou de l'action utilisée pour un traitement de déshydratation de sédiments, quatre techniques de déshydratation peuvent être différenciées : naturelle, mécanique, chimique et thermique. Elles peuvent être aussi combinées et aboutir à des solutions mixtes comme la déshydratation thermo-mécanique, voir figure 2-1.




**Notes :**
[1]LSP = Lit de séchage plantés
[2]S.T. = Système de travail

*Figure 2-1. Différents moyens de déshydratation existants.*

### *Déshydratation naturelle ou séchage naturel*

Le séchage est un procédé de déshydratation qui consiste à retirer l'eau par évaporation et/ou drainage. Les techniques de déshydratation naturelle les plus utilisées sont le lagunage, les lits de séchage et les lits de séchage plantés de roseaux ou de plantes pour sols frais et humides (phragmites, acores, …).

### *Déshydratation chimique*

La déshydratation chimique est un moyen de déshydratation consistant à enlever l'eau des sédiments par addition de produits chimiques.

### *Déshydratation mécanique*

Cette technique de déshydratation permet de réduire la teneur en eau des sédiments, grâce à la combinaison d'actions mécaniques résultant de la gravité, de la filtration, du cisaillement, de la compression etc. La déshydratation mécanisée peut se définir en fonction du système de travail : un système de travail discontinu ou conventionnel et un système de travail continu.

### *Déshydratation thermique*

Le séchage thermique est un moyen de déshydratation dont le séchage des sédiments est effectué en apportant de l'énergie thermique (chaleur). Les voies de séchage correspondant à cette méthode de déshydratation sont les suivantes :

- Séchage par conduction : l'énergie thermique est transmise à la boue par contact avec une paroi chauffée sur laquelle est mise la boue. Il n'y a pas un contact direct entre le gaz et la boue à sécher.

- Séchage par convection : cela consiste à mettre en contact direct un gaz chaud en mouvement avec la boue à sécher.

- Séchage par rayonnement : l'énergie thermique est apportée à la boue à sécher par des ondes électromagnétiques. Ces ondes peuvent être des ondes infrarouges ou micro-ondes.

Trois possibilités de transfert de l'énergie peuvent être considérées en fonction de ces voies de séchage. Elles sont récapitulées dans le tableau 2-1 :

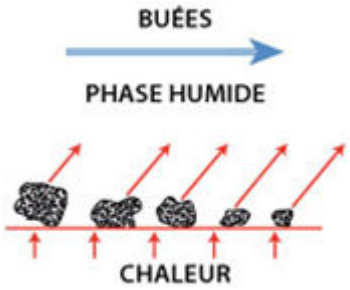
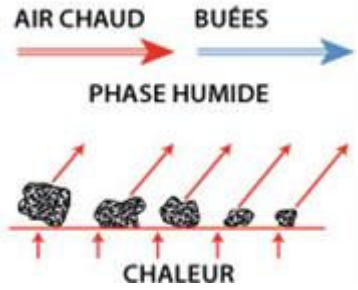
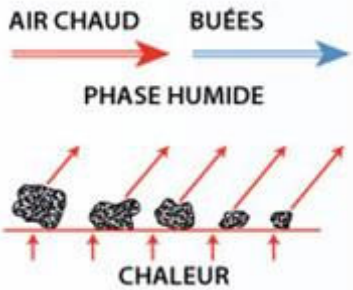
- Les sécheurs à contact direct : le séchage est réalisé par convection. Plusieurs types de sécheurs peuvent être proposés parmi lesquels les plus communs sont les tambours rotatifs et les sécheurs à bandes.

- Sécheurs à transport pneumatique : sécheurs à lit fluidisé et sécheurs « flash ».

- Les sécheurs à contact indirect : il s'agit de séchage réalisé par conduction. Parmi ces sécheurs on recense les sécheurs à disques, les sécheurs malaxeurs et les tambours rotatifs indirects.

- Les sécheurs mixtes : ils combinent des voies de séchage employant à la fois la conduction et la convection ou la convection et le séchage par rayonnement.

*Tableau 2-1. Récapitulatif des techniques de séchage thermique, (NTE, 2015).*

| ***Séchage indirect ou séchage par contact*** | ***Séchage direct ou séchage par convection*** | ***Séchage mixte : indirect / direct*** |
|---|---|---|
|  |  |  |
| La paroi chauffée en contact avec la boue humide permet l'évaporation | L'air chaud ou le gaz de combustion avec une teneur en humidité faible absorbe l'eau des boues. | La paroi est chauffée et l'air chaud permet l'évaporation de l'eau des boues. |

***Déshydratation mixte***

C'est une méthode de déshydratation qui résulte de la combinaison de plusieurs techniques de déshydratation.

### *2.1.1. Définition des paramètres utiles*

Un sédiment comme les sols, est un matériau hétérogène et triphasique. Il est composé d'une phase solide constituée de particules solides, d'une phase liquide formée d'eau interstitielle et d'eau libre et d'une phase gazeuse composée d'air, voir figure 2-2. Pour pouvoir caractériser les sols ou sédiments physiquement, il faut en définir les paramètres nécessaires.

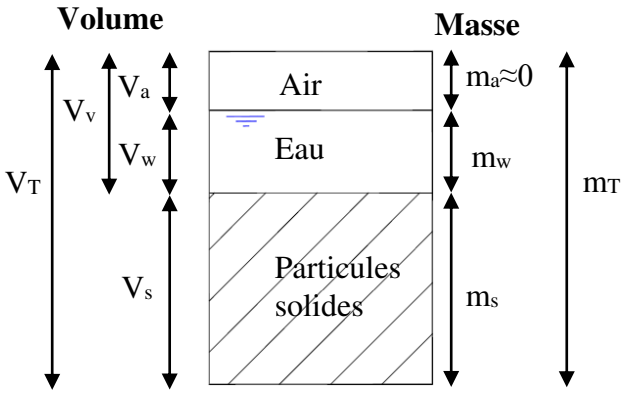



*Figure 2-2. Diagramme des phases d'un échantillon du sol ou sédiment en fonction de leur masse.*

Les notations suivantes usuellement utilisées en géotechnique ont été adoptées :
$m_a$ : Masse de l'air ;
$m_w$ : Masse de l'eau ;

$m_s$ : Masse des particules solides ;
$m_T$ : Masse totale ;
$V_a$ : Volume de l'aire ;
$V_w$ : Volume de l'eau ;
$V_s$ : Volume des particules solides ;
$V_v$ : Volume des vides ;
$V_T$ : Volume total.

#### *2.1.1.1. Paramètres dimensionnels*

***Masse volumique d'un échantillon de sol, de sédiment ou de matériau donné (ρ)***

La masse volumique d'un échantillon de sol, de sédiment ou de matériau donné (ρ) est le rapport de la masse globale des trois phases (particules solides, eau et air) ($m_T$) par unité de son volume ($V_T$).

$$\rho = \frac{m_T}{V_T} \quad [2.1]$$

***Masse volumique de l'eau ($\rho_w$)***

La masse volumique de l'eau ($\rho_w$) est le rapport de la masse d'eau ($m_w$) au volume d'eau ($V_w$).

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad [2.2]$$

***Masse volumique des particules solides ($\rho_s$)***

La masse volumique des particules solides ($\rho_s$) est le rapport de la masse des particules solides ($m_s$) à son volume ($V_s$).

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad [2.3]$$

***Poids volumique ou poids volumique apparent d'un échantillon d'un sol ou sédiment (γ)***

Le poids volumique d'un échantillon d'un sol (γ) est le rapport du poids total du sol ($P_T$) par rapport à son volume total ($V_T$).

$$\gamma = \frac{P_T}{V_T} \quad [2.4]$$

***Poids volumique de l'eau ($\gamma_w$)***

Le poids volumique de l'eau ($\gamma_w$) est le rapport du poids d'eau ($P_w$) par rapport à son volume ($V_w$). La valeur de 10 kN/m$^3$ sera considérée par la suite.

$$\gamma_w = \frac{P_w}{V_w} \quad [2.5]$$

***Poids volumique des particules solides ou poids spécifique ($\gamma_s$)***

Le poids volumique des particules solides ou poids spécifique ($\gamma_s$) est le rapport du poids des grains solides ($P_s$) par rapport à son volume ($V_s$).

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s} \quad [2.6]$$

***Poids volumique sec ($\gamma_d$)***

Le poids volumique sec ($\gamma_d$) est le rapport du poids des particules solides ($P_s$) au volume total ($V_T$).

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V_T} \quad [2.7]$$

***Concentration en matières solides (C)***

La concentration en matières solides est le rapport entre la masse des matières solides et le volume total du mélange (eau + matières solides).

$$C = \frac{m_s}{V_T} \quad [2.8]$$

***2.1.1.2. Paramètres adimensionnels***

***Teneur en eau (w)***

La teneur en eau est le rapport du poids d'eau au poids des grains d'un échantillon de sol, de sédiment ou de matériau donné.

$$w = \frac{P_w}{P_s} = \frac{m_w}{m_s} \quad [2.9]$$

***Siccité (S)***

La siccité est le pourcentage massique de matière sèche.

$$S = \frac{m_s}{m_T} \quad [2.10]$$

***Degré de saturation (Sr)***

Le degré de saturation est le volume d'eau par rapport au volume des vides d'un échantillon de sol ou sédiment.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad [2.11]$$

***Indice des vides (e)***

L'indice des vides est le volume des vides rapporté au volume des particules solides de l'échantillon.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad [2.12]$$

***Porosité (n)***

La porosité est le volume des vides rapporté au volume total de l'échantillon.

$$n = \frac{V_v}{V_T} \quad [2.13]$$

### *2.1.2. Relations entre paramètres*

***Poids d'un échantillon***

Le poids d'un échantillon d'un sol ou de sédiment peut être calculé *(i)* en multipliant le volume de leurs composants par leurs poids volumique ou spécifique respectifs *(ii)* en multipliant l'accélération de la pesanteur (g) par la masse de chaque composant. Comme la masse de l'air est pratiquement nulle, le poids d'un échantillon est la somme du poids de l'eau et des matières solides, voir figure 2-3.

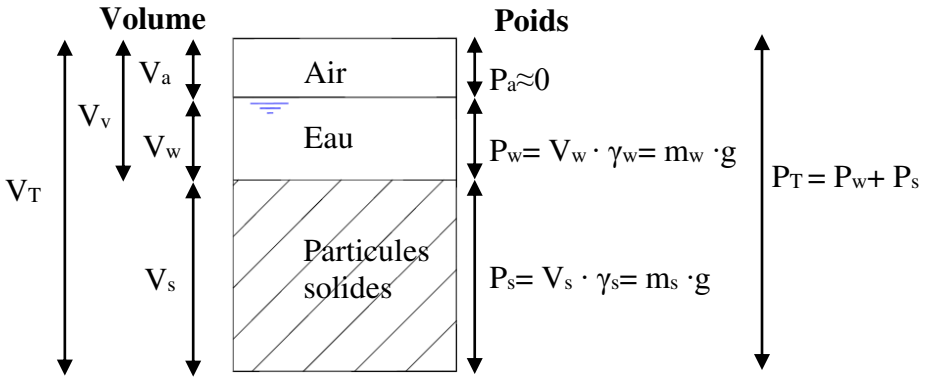



*Figure 2-3. Diagramme des phases d'un échantillon de sol ou de sédiment en fonction de leur poids.*

***Volume d'un échantillon***

Si dans le diagramme de la figure 2-3, le volume des particules solides est considéré comme unitaire et en divisant tous les volumes par $V_s$ apparaissent l'indice des vides et le degré de saturation.

- En fonction de l'indice des vides : comme l'indice des vides est le volume des vides rapporté au volume des particules solides de l'échantillon, le volume total d'un échantillon correspond à la somme de l'indice des vides plus un, voir figure 2-4.

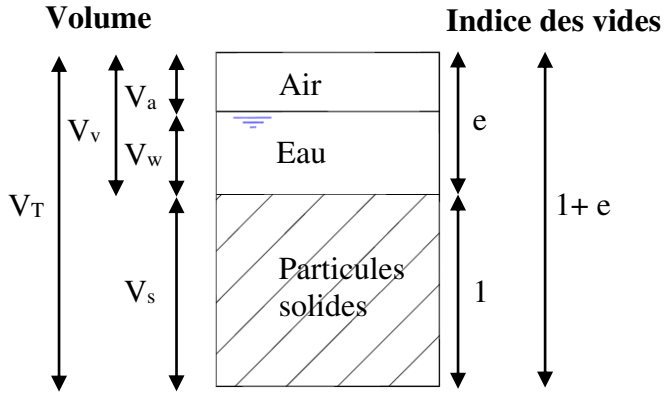



*Figure 2-4. Volume d'un échantillon de sol ou sédiment en fonction de l'indice des vides.*

- En fonction du degré de saturation : quand l'échantillon du sol est saturé, le degré de saturation est égal à l'unité. Tous les vides sont remplis d'eau. Ceci permet de relier à la fois le degré de saturation en fonction du volume de chaque composant de l'échantillon et leurs poids, voir figure 2-5.

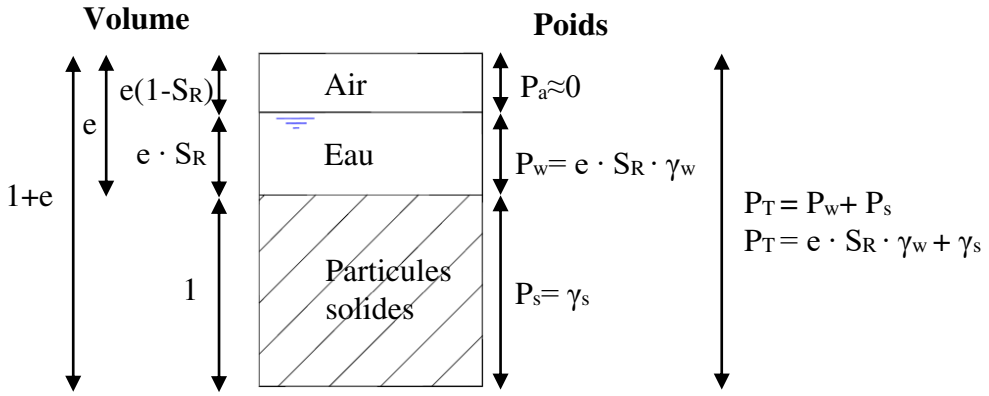



*Figure 2-5. Diagramme des phases d'un échantillon du sol ou de sédiment en fonction de l'indice des vides et du degré de saturation pour un volume unitaire.*

- En fonction de la concentration : le volume peut être calculé à l'aide de la concentration des solides :

$$V_T = \frac{m_s}{C} \qquad [2.14]$$

***Poids volumique sec***

Le poids volumique sec d'un sol ou d'un sédiment peut être calculé à l'aide de l'indice des vides ou en fonction de la porosité :

- En fonction de l'indice des vides :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} \quad [2.15]$$

- En fonction de la porosité :

$$\gamma_d = (1-n)\cdot\gamma_s \quad [2.16]$$

***Poids volumique d'un échantillon***

Le poids volumique d'un sol ou sédiment peut être calculé *(i)* en fonction du degré de saturation, de la porosité, du poids volumique de l'eau et du poids volumique sec *(ii)* en fonction de la teneur en eau, du poids spécifique des particules solides et de l'indice des vides ou *(iii)* en fonction de la teneur en eau, du poids spécifique des particules solides et de l'indice des vides :

- En fonction du degré de saturation, de la porosité, du poids volumique de l'eau et du poids volumique sec :

$$\gamma = \gamma_d + n\cdot S_R\cdot\gamma_w \quad [2.17]$$

- En fonction de la teneur en eau et du poids volumique sec :

$$\gamma = \gamma_d(1+w) \quad [2.18]$$

- En fonction de la teneur en eau, du poids spécifique des particules solides et de l'indice des vides :

$$\gamma = \frac{\gamma_s}{1+e}(1+w) \quad [2.19]$$

***Concentration en matières solides***

La concentration en matières solides s'exprime en fonction de la teneur en eau et des masses volumiques de l'eau et des particule solides.

$$C = \frac{\rho_s}{\frac{w\cdot\rho_s}{\rho_w}+1} \quad [2.20]$$

***Porosité***

La porosité d'un sol ou d'un sédiment peut être calculée à l'aide de l'indice des vides, voir figure 2-6 :

$$n = \frac{e}{1+e} \quad [2.21]$$

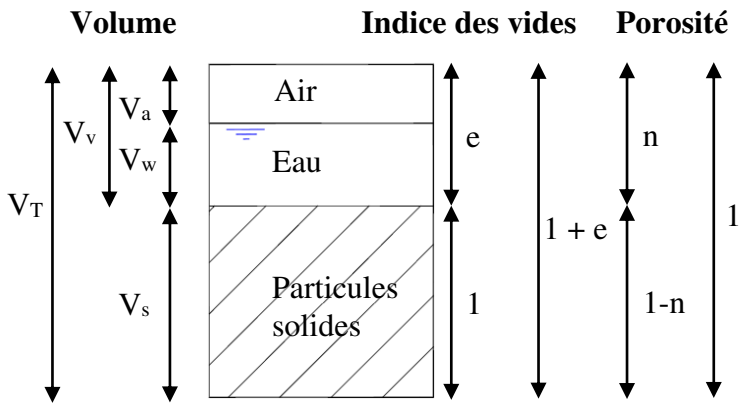



*Figure 2-6. Volume d'un échantillon de sol ou sédiment en fonction de l'indice des vides et de la porosité.*

***Indice des vides***

- En fonction de la porosité :

$$e = \frac{n}{1-n} \qquad [2.22]$$

- En fonction de la teneur en eau :

$$e = \frac{V_T \cdot \rho_S \cdot (1+w)}{m_T} - 1 \qquad [2.23]$$

- En fonction du poids volumique sec et le poids spécifique des particules solides :

$$e = \frac{\gamma_S}{\gamma_d} - 1 = \frac{\gamma_S}{\frac{gM_S}{V_T}} - 1 \qquad [2.24]$$

- En fonction de la concentration : l'indice des vides peut être calculé avec la formule suivante :

$$e = \frac{\rho_S}{C} - 1 \qquad [2.25]$$

***Teneur en eau***

- En fonction de la siccité (s) : la siccité est reliée à la teneur en eau. La courbe suivante permet de suivre l'évolution de la teneur en eau par rapport à la siccité.

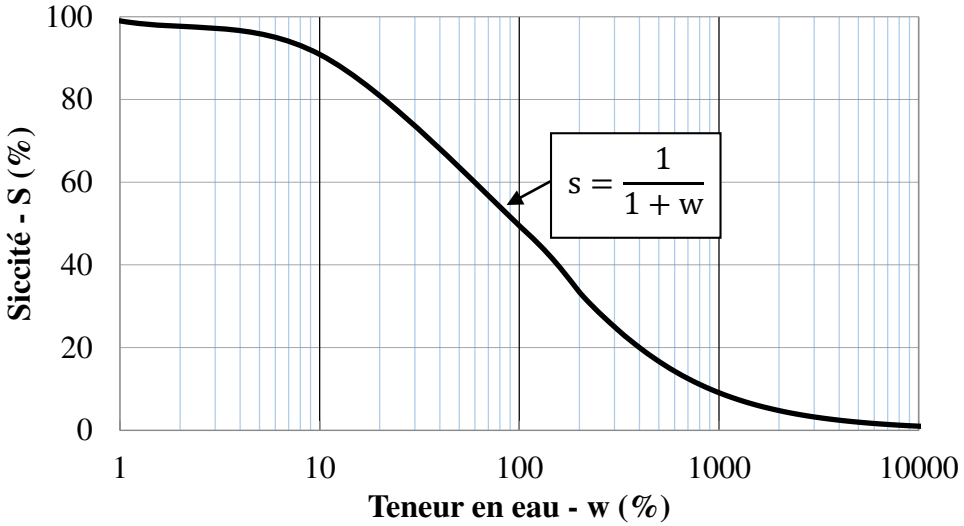



*Figure 2-7. Relation siccité et teneur en eau.*

La notion de pelletabilité et de transportabilité de sédiments a été définie à partir de cette courbe, voir figure 2-8.

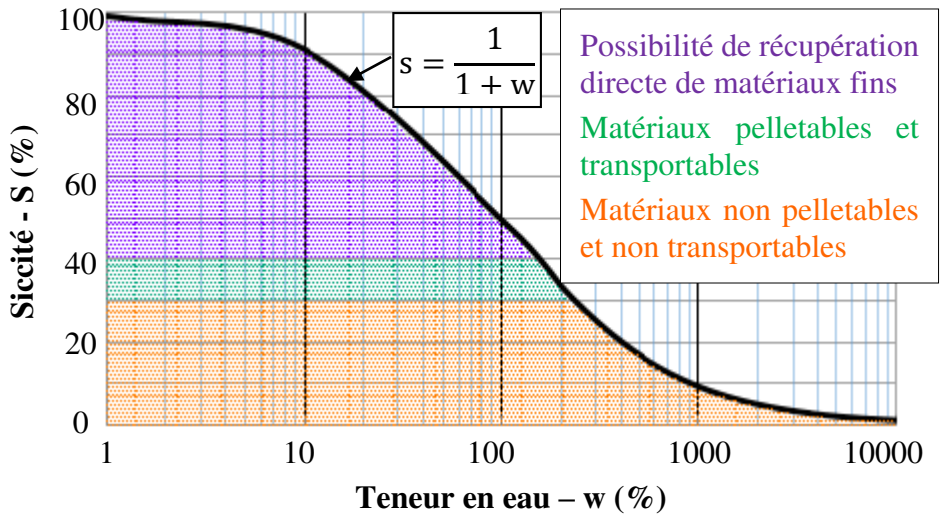



*Figure 2-8. Seuils de pelletabilité et transportabilité de sédiments (DHERVILLY, 2013).*

La teneur en eau peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$w = \frac{1-s}{s} \qquad [2.26]$$

- En fonction du poids volumique sec et du poids volumique d'un sol d'après la relation 2.1 :

$$w = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1 \qquad [2.27]$$

- En fonction du degré de saturation, des poids volumiques de l'eau, et des particules solides du sol ou sédiment :

$$w = \gamma_w \cdot S_R \cdot \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s}\right) \quad [2.28]$$

- En fonction du degré de saturation, de l'indice des vides et des poids volumiques de l'eau et des particules solides :

$$w = \frac{\gamma_w \cdot S_R \cdot e}{\gamma_s} \quad [2.29]$$

***Degré de saturation***

Ce paramètre peut être calculé à l'aide de la teneur en eau, l'indice des vides et des poids volumiques des particules solides et de l'eau :

$$S_r = \frac{w \cdot \gamma_s}{e \cdot \gamma_w} \quad [2.30]$$

## *2.2. LE SÉCHAGE NATUREL DES SÉDIMENTS*

Plusieurs modèles de séchage naturel peuvent être différenciés en fonction de la technique utilisée pour la déshydratation des boues et des sédiments. Les plus utilisées sont décrites par la suite.

### *2.2.1. Lagunage*

Le lagunage est une technique de déshydratation naturelle pouvant constituer en soi une voie de valorisation naturelle des sédiments de dragage. Les sédiments dragués sont déversés dans des cellules ou casiers de séchage, appelés aussi bassins de décantation, sur une petite profondeur de 5 mètres maximum. Ainsi la déshydratation s'opère par évaporation et vidange-surnageant par pompage ou vidange gravitaire. Cette technique est effectuée sur un terrain imperméable ou sur une couche de protection environnementale (couche d'imperméabilisation), selon des cycles d'une année (DUAN, 2008).

Chaque cycle est composé de quatre phases : aménagement du site puis réaménagement à partir du deuxième cycle ; remplissage des casiers ; déshydratation des sédiments et extraction des sédiments asséchés. Après le remplissage des casiers, commence la décantation des sédiments puis la déshydratation. La déshydratation des sédiments est possible, pour une part, grâce à l'évaporation de l'eau et d'autre part grâce à l'enlèvement de l'eau surnageant par déversoirs. L'eau surnageante et drainée (horizontalement) est envoyée vers une station de traitement par un système de tuyaux collecteurs. Le temps de séchage est fortement dépendant du climat et de la siccité souhaitée. Dans les pays de climat modéré, il est autour d'une année, mais il peut être réduit grâce à différents prétraitements comme l'épaississement des sédiments dragués dans une chambre de décantation avant le remplissage des casiers.

Le produit obtenu est souvent de consistante hétérogène puisqu'en surface il peut apparaître très sec, avec une siccité moyenne environ 65% (w = 54 %), et à profondeur de 20 ou 30 cm il peut rester semi-liquide avec une siccité comprise entre 20 à 25 % (w = 400 à 300 %), (PORT AUTONOME DU HAVRE, 2006).

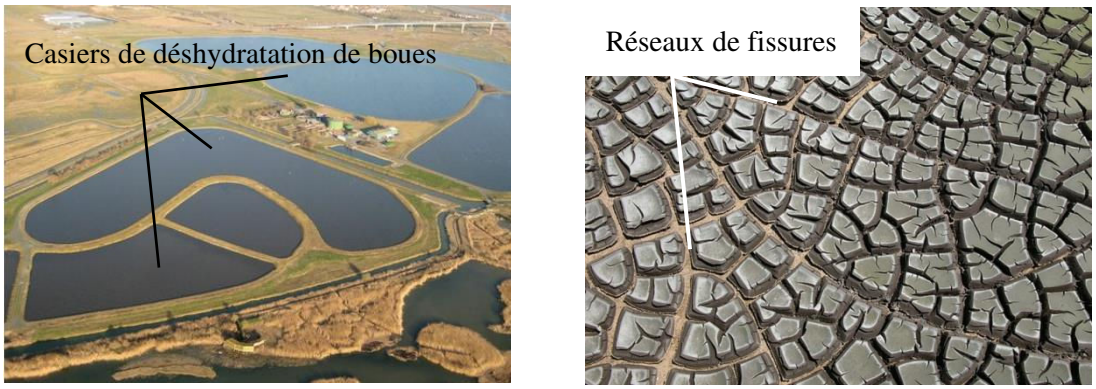
Les coûts les plus importants de cette technique sont les coûts de creusement des bassins, lesquels nécessitent beaucoup de main d'œuvre et un réseau de tuyauterie. Les coûts de l'opération du lagunage est de 11 €/$m^3$, (PERRONI, 2006).

Les avantages principaux de cette technique sont au nombre de cinq (DUAN, 2008 ; KHADRAOUI, 2012 ; PERRONI, 2006) : le lagunage est un système simple et efficace, il permet la déshydratation de tout type de sédiments, grand volume de sédiments traité par heure, une faible consommation énergétique et une bonne intégration paysagère, les coûts de cette procédure ne sont pas trop élevés.

Par contre, le lagunage possède de nombreux inconvénients, à savoir : une grande surface au sol occupée, une forte dépendance des caractéristiques du sédiment et du climat local, un important temps de déshydratation (une année en pays au climat modéré), un mode d'opération

discontinu, une qualité finale des sédiments déshydratés faible, un risque de perforation de la couche d'imperméabilisation en récupérant les boues sèches.

La figure 2-9 illustre un exemple de déshydratation par lagunage. La figure 2-9.a. montre une station de lagunage située à Rochefort (France). La figure 2-9.b. permet d'apprécier une boue sèche et les fissures formées par l'évaporation de l'eau interstitielle.




*a) Station de lagunage à Rochefort (France), (www.rochefort-ocean.com).*

*b) Boue en cours de déshydratation à l'air libre, (CERRA et al, 2014).*

*Figure 2-9. Exemples de déshydratation par lagunage.*

### *2.2.2. Lits de séchage*

Les lits de séchage correspondent à un type de séchage naturel, dans lesquels la déshydratation est possible grâce à un séchage atmosphérique par évaporation et un drainage principal vertical provoqué par les matériaux drainants qui les composent.

Les lits de séchage peuvent être définis comme un système de déshydratation naturelle modulaire composé de bassins de forme généralement rectangulaires, en béton de faible profondeur. Les lits comportent plusieurs couches drainantes pour faciliter le drainage, l'épandage et l'entretien.

Dans la partie inférieure, le massif filtrant, peut être constitué par une couche supérieure de sable épaisse de 5 à 10 cm (intervalle granulaire de 0,5 à 15 mm), par une couche intermédiaire de 10 cm d'épaisseur de gravier fin (classe granulaire 5 / 15 mm) et par une couche inférieure de 20 cm de gros graviers (classe granulaire 10 / 40 mm) reposant sur un sol imperméabilisé et nivelé (DUAN, 2008). Cette dernière couche est dotée d'un système de tuyauterie avec une pente. Ces tuyaux peuvent être en ciment ou en plastique, ils permettent d'assurer le drainage de l'eau, voir figure 2-10.

Les dimensions des lits de séchage ainsi que leur nombre sont dépendants de la quantité de boues à traiter. Au moins deux lits sont nécessaires pour alterner les étapes de remplissage et de séchage et ainsi pouvoir améliorer la production.

La procédure d'utilisation est simple : les boues sont introduites dans les lits de séchage par des équipements mécaniques, on les laisse reposer pour qu'elles sèchent naturellement et une fois l'évaporation produite, elles peuvent être enlevées manuellement.

Le nombre d'étapes de remplissage - séchage est variable en fonction du climat et de la teneur en eau des sédiments. Le temps estimé pour chaque cycle est de l'ordre de 60 à 80 jours pour des boues liquides et environ une semaine pour des boues épaissies (DUAN, 2008).

Le produit obtenu est une boue très hétérogène de type pâteux en hiver et une boue plus solide en été. La siccité moyenne attendue est de 10 à 20 % (w = 900% à 400%) en climat humide et 30 à 40% (w = 233% à 150%) en climat sec (PERRONI, 2006).

Les avantages de cette méthode sont similaires à ceux du lagunage : c'est une technique simple qui permet la déshydratation de tout type de sédiments, en grand volume traité par heure avec un coût d'investissement modéré en comparaison avec d'autres ouvrages de génie civil et une faible consommation d'énergie. L'ouvrage est semi-enterré, il présente donc une intégration paysagère et un impact environnemental réduit par rapport aux systèmes mécaniques classiques, (CONSEIL GÉNÉRAL DE SEINE ET MARNE, 2010).

Les inconvénients les plus importants du lit de séchage concernent la grande surface occupée, même si elle est moindre que celle du lagunage, une forte dépendance des caractéristiques du sédiment et du climat local, une qualité finale des sédiments déshydratés faible, des produits obtenus pâteux et hétérogènes en consistance, un temps élevé de déshydratation, un mode d'opération discontinu, un coût d'exploitation relativement élevé lié essentiellement au besoin en personnel pour l'enlèvement des boues, (DUAN, 2008).

À cause de leur efficacité qui dépend fortement du climat, et surtout le coût de main d'œuvre et de transport, les lits de séchage sont de moins en moins utilisés.

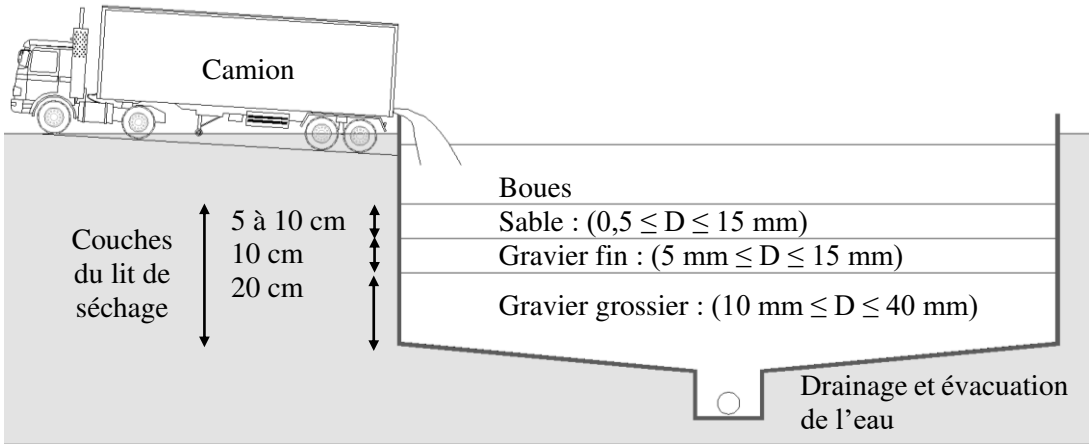



*Figure 2-10. Représentation schématique d'un lit de séchage.*

### *2.2.3. Lits de séchage plantés*

Les lits de séchage peuvent être plantés notamment de roseaux (LSPR). Ce sont des lits de séchage plantés de macrophytes utilisés pour la déshydratation des boues. Ce sont des variantes des lits de séchage classiques. Ils fonctionnent selon une technique aérobie de déshydratation naturelle. Cette technique est relativement récente, une vingtaine d'années, dont les principaux objectifs sont la déshydratation et la minéralisation des boues qui sont les mécanismes responsables de la réduction du volume et de la stabilisation des boues.

La déshydratation des boues est produite grâce aux mécanismes de drainage et d'évapotranspiration (phénomène résultant de l'évaporation et la transpiration), (MOLLE et al., 2013).

Les couches des LSPR sont constituées d'une granulométrie croissante depuis la surface vers la profondeur du filtre. Il peut être composé en couche supérieure de gros sable de 5 à 10 cm d'épaisseur (intervalle granulaire de 0,2 mm à 0,4 mm et un coefficient d'uniformité $C_u \leq 5$), puis une couche intermédiaire de gravier fin épaisse de 20 cm à 30 cm (granulométrie comprise entre 2/4 mm et 3/6 mm). En deçà, une couche de transition épaisse de 10 cm avec une granulométrie comprise entre le $d_{15}$ et $5 \cdot d_{85}$ de la granulométrie qui constitue la couche supérieure, et par une couche inférieure de 15 cm de gros graviers (granulométrie comprise entre 15/30 mm et 30/60 mm) reposant sur un sol imperméabilisé et nivelé.

Cette dernière couche est dotée d'un système de tuyauterie, avec une pente qui permet de réaliser le drainage de l'eau et l'aération du lit par le fond. Ces dimensions caractéristiques sont rapportées par LIENARD (2010), LIENARD et al., (1990), l'Agence Régionale Pour l'Environnement – « ARPE » (2015) et l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture « IRSTEA » (2015), voir figure 2-11.

Les roseaux *phragmites australis*, plantés sur les couches des LSPR, correspondent à un type de plante semi-immergée, le plus répandu sur toute la planète dans les sols frais et humides, avec des hauteurs variant entre 1,5 et 3 mètres et un diamètre de 10 mm. Ils sont constitués d'un système racinaire composé de rhizomes (tiges souterraines). Ils sont semés à la surface du lit, au sein de la couche superficielle.

Ce type de plantes joue deux rôles fondamentaux :

- Rôle mécanique : les racines et les tiges des roseaux créent un important réseau de ressuyage de l'eau interstitielle, permettant un drainage rapide de l'eau contenue dans la boue, plus de 90 % d'eau évacuée durant le premier jour suivant l'alimentation (LIENARD et al., 1990). Les jours suivants, ils permettent l'aération des boues et la stimulation des microorganismes aérobies responsables de la minéralisation de la matière organique.

- Rôle biologique : une fois que le drainage de l'eau est réalisé, l'évapotranspiration est l'unique méthode pour assurer la déshydratation des boues. Elle est fortement dépendante du climat et du stade de développement des roseaux. On peut atteindre

une évaporation correspondant à une hauteur d'eau de 2,5 cm par jour pour des roseaux bien développés et sans le phénomène de stress hydrique (MOLLE et al., 2013).

Les roseaux apportent d'autres avantages (MOLLE et al, 2013) et (DE MAESENEER, 1997) :

- Les roseaux permettent de créer une isolation thermique et ainsi diminuer le risque de gelée hivernale tout en favorisant l'efficacité de déshydratation des boues.

- Une stabilisation des boues grâce à l'apport de lignine et autres composés cellulosiques provoqués par le flétrissement des parties aériennes.

- Une stimulation du développement de biomasse aérobie autour des racines grâce au relargage d'oxygène au niveau de ces racines. Cela provoque une plus grande diversité de microorganismes sur ces types de lits de séchage.

- Une amélioration de l'hygiénisation provoqué par la sécrétion de substances antibiotiques des racines.

La procédure de mise en place de cette technique repose sur sa simplicité. Elle est composée de deux étapes :

- Une première étape appelée « étape d'alimentation » dans laquelle, la boue est déversée sur la surface de la couche supérieure et provoque la formation du dépôt des boues.

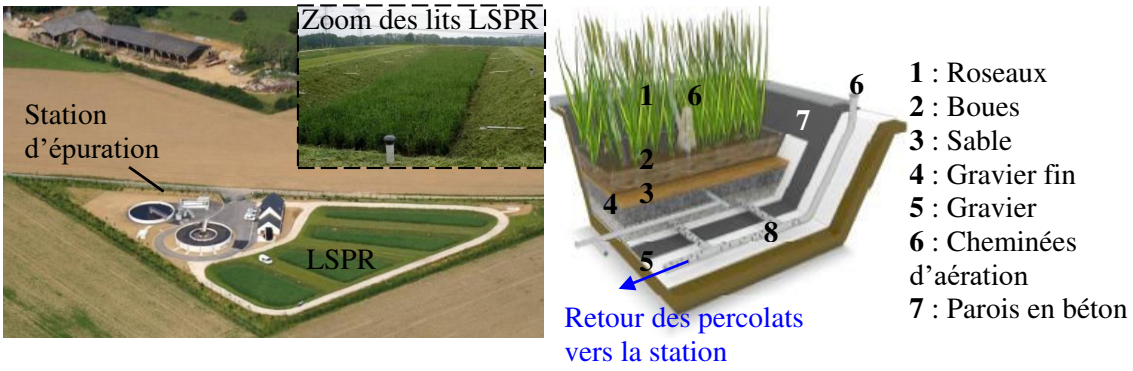
- S'ensuit une deuxième étape dite « étape de repos » avec une durée d'au moins 3 semaines, pendant laquelle le dépôt est asséché par drainage grâce à l'effet des forces de gravité et la collecte de l'eau par le système de tuyauterie. Ce dépôt est asséché aussi par l'évapotranspiration des roseaux qui améliore la déshydratation entre 10 à 15 % en permettant ainsi d'atteindre des siccités supérieures à 20 % (w = 400 %). Dans cette étape, les boues sont stabilisées sous l'effet de la minéralisation de la matière organique induite par l'activité biologique aérobie au sein du dépôt de boue, (SOCIÉTÉ QUÉBÉCOISE DE PHYTOTECHNOLOGIE - SQP, 2004).

Les dimensions des lits LSPR ainsi que leur nombre sont dépendants du volume de boues à sécher. Au moins deux lits sont nécessaires pour alterner les deux étapes et ainsi améliorer la production.

Les avantages proposés par cette méthode sont les mêmes que ceux des lits de séchage classiques, en ajoutant les avantages suivants : les boues obtenues ne présentent pas d'odeur générée si les lits fonctionnent correctement et elles peuvent être valorisées directement en épandage agricole. Il faut signaler aussi que cette technique présente une diminution des

quantités de matières sèches à évacuer puisqu'une partie de la matière organique est dégradée par minéralisation.

En revanche, les inconvénients qui se présentent par rapport aux lits de séchage classiques sont : des nuisances olfactives difficiles à contenir en cas de dysfonctionnement, des opérations de curage ponctuelles mais régulières mais celles-ci nécessitent une intervention extérieure comme par exemple celle d'une pelle mécanique. Finalement l'inconvénient majeur réside dans le besoin d'une montée en charge progressive de l'alimentation pouvant nécessiter la mise en œuvre d'un moyen de déshydratation complémentaire à la mise en service des lits. Cette méthode s'apparente à un mode d'opération discontinu (MOLLE et al., 2013).




*a) Station d'épuration de Yerville-Bourdainville, Haute – Normandie (www.siaepa-yerville.fr)*

*b) Représentation schématique des lits LSPR (MOLLE et al, 2013).*

*Figure 2-11. Exemple et schéma représentatif d'un lit de séchage planté avec des roseaux.*

## *2.3. LA DÉSHYDRATATION MÉCANIQUE DES SÉDIMENTS*

La déshydratation mécanisée se présente comme une alternative pour résoudre les inconvénients présentés par le séchage naturel. La forte dépendance des caractéristiques du sédiment et du climat local, l'obtention de produits obtenus pâteux et hétérogènes avec de faibles quantités d'eau déshydratée, les longues périodes de déshydratation qui sont nécessaires, constituent d'autant d'exemples où la déshydratation mécanisée peut apporter des solutions et jouer un rôle intéressant dans la déshydratation.

L'atout le plus important de la déshydratation mécanisée repose sur le système ou le procédé de travail envisagé. Deux systèmes ou procédés de travail peuvent être différenciés :

- Un système de travail conventionnel, « système de travail discontinu » où la machine doit être arrêtée après chaque cycle de déshydratation.

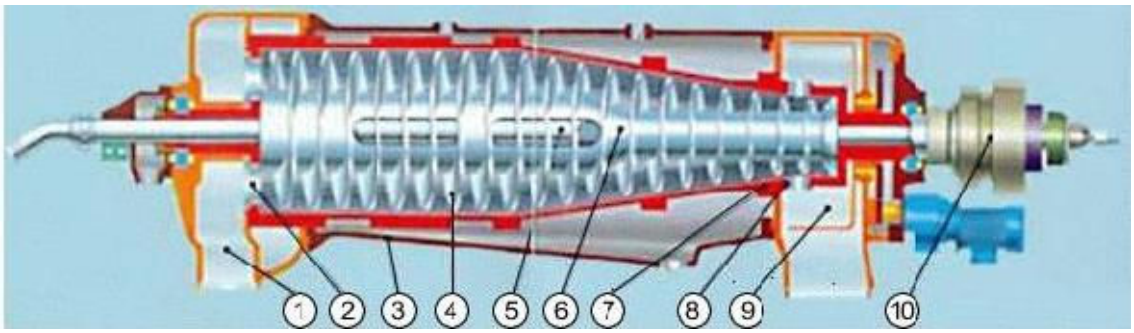
- Un système de travail continu qui permet d'appliquer une méthodologie de déshydratation 24h/24h.

### *2.3.1. Un système de travail conventionnel*

Les systèmes de travail conventionnel correspondent à l'utilisation de matériels classiques comme une centrifugeuse, un filtre à bandes ou un filtre presse pour lesquels des siccités obtenues sont de l'ordre de 20%, de 18% à 25% et approximativement de 65 %, respectivement, selon PERRONI (2006).

#### *2.3.1.1. Centrifugeuse*

La centrifugeuse est un outil de déshydratation qui permet de déshydrater des boues de différentes natures et siccités par centrifugation utilisant la force centrifuge pour provoquer la décantation accélérée des sédiments contenus dans les boues, voir figure 2-12. Les produits issus du procédé sont d'une part, une partie liquide (eau surnageant) qui fait l'objet d'un traitement postérieur et d'autre part une partie solide (boue déshydratée).




**1.** Évacuateur à liquides
**2.** Niveau de liquide réglable
**3.** Corps de la centrifugeuse
**4**. Vis sans fin
**5.** Tube d'alimentation
**6**. Pelleteuse hélicoïdale
**7**. Bol
**8**. Orifices d'évacuation des solides
**9**. Évacuateur à solide avec racleur
**10**. Réducteur épicycloïdal

*Figure 2-12. Coupe longitudinale d'une centrifugeuse (www.asserva.fr).*

La procédure d'utilisation de ce type de machine est relativement simple : les boues à traiter, additionnées de polymères floculants, sont introduites dans un rotor cylindro-conique horizontal composé d'un bol et d'une vis convoyeuse qui tournent à haute vitesse dans le même sens. Les sédiments sont déposés sur les parois internes du bol, grâce à la force centrifuge, ils sont transportés vers la sortie par la vis. En même temps, l'eau extraite des boues est collectée au centre du bol et évacuée par un déversoir à l'extrémité opposée.

L'efficacité de cette méthode de déshydratation est variable selon la qualité des sédiments, le réglage de l'alimentation de la machine (débit de l'eau de dilution, débit de la pompe à sédiments et débit de la pompe doseuse de floculant) et le réglage des vitesses de rotation de la machine (vitesse relative et vitesse du bol), (PERRONI, 2006).

Les paramètres fondamentaux d'une centrifugeuse sont liés aux caractéristiques techniques de cette machine. Le tableau 2-2 récapitule les paramètres fondamentaux d'une centrifugeuse. Ces valeurs ont été proposées par la Communauté de Communes du Val Vert du Clain (www.deshydratation-boues.com) et PERRONI (2006).

*Tableau 2-2. Récapitulatif des paramètres fondamentaux d'une centrifugeuse.*

| **Caractéristiques** | **Valeur** |
|---|---|
| Débit de boue en entrée ($m^3$/h) | 3-20 |
| Quantité de boue déshydratée (kg MS/h) | 400 |
| Siccité moyenne attendue (%) | ≈ 20 |
| Teneur en eau (%) | 400 |
| Surface pour l'installation ($m^2$) | 90 |
| Coût moyen d'opération (€/Tonnes MS) | 15 à 20 |
| Système de travail | Discontinu |
| Mobilité | Possible |

***Note** : « MS » signifie Matière Sèche*

Les principaux avantages de cette technique sont un rendement volumique élevé, un système de travail continu et automatisé, une surface occupée réduite. Elle présente une souplesse d'exploitation puisqu'elle permet la déshydratation de boues de différentes natures et siccités et des nuisances faibles avec absence d'odeurs et de bruit.

En revanche, les inconvénients des centrifugeuses sont multiples avec d'importants coûts d'investissement et d'exploitation liés à une forte consommation d'électricité, une consommation de polymères floculants élevée et une détérioration prématurée des parois internes avec la présence de sable dans les sédiments et un faible débit par unité de traitement.

#### *2.3.1.2. Filtre presse*

Le filtre presse présente une technique basée sur le principe de filtration, laquelle a pour but de séparer les constituants d'un mélange liquide - solide par passage à travers un milieu filtrant. Quatre types de filtre presse peuvent être différenciés : filtre à plateaux, filtre à bandes, filtre à membrane et presse à vis.

***Filtre presse à plateaux***

Le filtre presse à plateaux est une machine de déshydratation mécanique de boues composé de plateaux recouverts de toiles filtrantes, disposés parallèlement les uns contre les autres par les vérins hydrauliques en constituant des espaces serrés, à travers lesquels les boues à filtrer, introduites sous pression, sont contraintes de passer, voir figure 2-13. a.

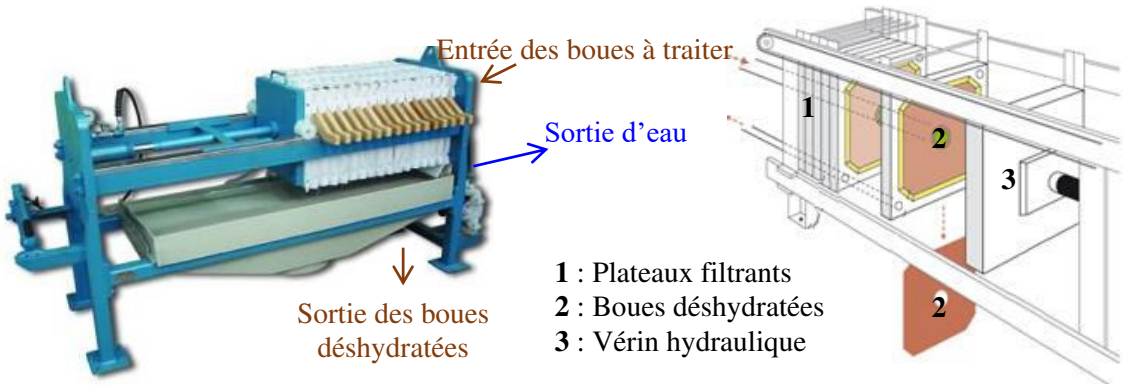
Cette machine présente une opération de déshydratation simple, dans laquelle, l'eau des boues traverse les filtres et est collectée soit par une canalisation en bout de filtre ou soit par des robinets sur chaque plateau. Les sédiments sont accumulés entre les toiles, et sont recueillis à la fin de chaque cycle par écartement successif des plateaux, voir figure 2-13. b.

Les cycles sont composés de ces phases successives : remplissage des boues à traiter, filtration, dépose et collecte des boues et de l'eau et finalement lavage des toiles. La durée de chaque cycle est fonction de la nature des boues, de l'efficacité de l'alimentation et du conditionnement.

Ce type de filtre presse possède en général une pression de filtration maximale de 5 MPa. Les siccités obtenues vont jusqu'à 65%, (w = 53,80 %), (PORT AUTONOME DU HAVRE, 2006).

Le filtre presse à plateaux a de nombreux avantages : c'est un système en continu en apparence et automatisé, d'une efficacité élevée, avec une procédure plus rapide que la déshydratation naturelle. C'est un système souple quant à l'exploitation pour des boues de différentes natures, avec des possibilités de déplacement de la machine, et n'a pas besoin de polymères floculants additionnels.

Par contre, cette technique compte aussi des inconvénients : c'est un système de travail continu mais nécessitant des arrêts multiples. Il présente d'importants coûts d'investissement et d'exploitation causés par la main d'œuvre élevée et la forte consommation d'électricité.




*a) Vue extérieure du filtre presse à plateaux (www.nrbombas.no.comunidades.net/filtro-prensa).*

*b) Représentation schématique du filtre presse à plateaux (www.alteo-environnement-gardanne.fr).*

*Figure 2-13. Vue générale et schéma représentatif du filtre presse à plateaux.*

### *Filtre à bande*

Le filtre à bande est un outil de déshydratation mécanique de sédiments composé d'une bande de toile filtrante circulant entre différents rouleaux de pressage qui permet de séparer l'eau des sédiments par filtration.

La différence principale du filtre à bande par rapport au filtre presse est que ce premier présente la nécessité de traiter chimiquement les boues par l'entremise de l'addition de polymères floculants, dont la composition et la quantité doivent être strictement dosées. En effet un sous-dosage provoque un déficit de rendement et un surdosage cause l'engraissement des toiles filtrantes. En fonction de la méthode d'utilisation employée, deux types de filtre à bande peuvent être distingués : sous pression et sous vide.

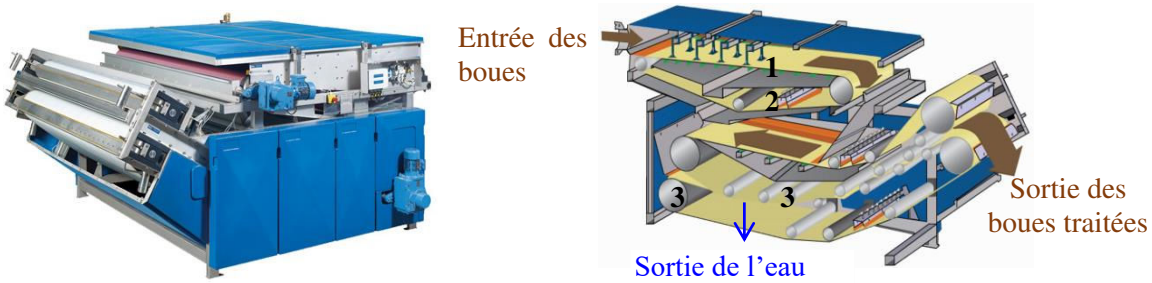
- ***Filtre à bandes sous pression***

Ce type de filtre à bande permet de déshydrater les boues en les comprimant entre deux bandes qui circulent sur des rouleaux de pressage, voir figure 2-14.a. La déshydratation est produite par l'épaississement et la filtration de boues et leur compression entre deux bandes. Cet outil est divisé en une zone d'épaississement par gravité et une zone de pressage. Il peut être classifié par rapport à la pression utilisée, voir tableau 2-3.

*Tableau 2-3. Classification de filtre presse sous pression.*

| | **Basse pression** | **Moyenne pression** | **Haute pression** |
|---|---|---|---|
| Pression moyenne (MPa) | 0,4 | 0,4-0,7 | 0,7-1 |
| Capacité maximum approchée ($m^3$/h) | 6 | 26 | 30 |

La technique adoptée par cette machine est relativement simple, elle peut être décrite ainsi : après l'addition de polymères, les boues sont mises sur une bande à l'aide d'une pompe. Les boues sont transportées le long de la bande en se déshydratant par gravité jusqu'à l'arrivée de la zone de pressage. Dans cette dernière zone, les boues sont prises entre deux bandes et commence alors la déshydratation par compression. À la fin de ce procédé, les boues traitées sont raclées de la bande et collectées dans un bac. Il faut signaler que pour obtenir une meilleure déshydratation, les boues sont retournées sur elles-mêmes avec un racleur dans la zone d'épaississement, voir figure 2-14.b.




**1**. Bande **2**. Bande inferieure **3**. Rouleaux

*(a) Vue extérieure de la machine.* *(b) Schéma de la machine.*

*Figure 2-14. Filtre presse à bandes sous pression (www.frcsystems.com).*

Les siccités obtenues sont dépendantes de la nature et de la qualité de la boue, elles se situent autour de 18 à 25% (w = 455,6% à 300%), (PORT AUTONOME DU HAVRE, 2006). Les avantages de cette technique concernent le système de travail en continu et automatisé, une consommation énergique faible et une grande productivité. En revanche, il faut souligner la rigueur du dosage de polymères nécessaire à la déshydratation.

- ***Filtre à bandes sous vide***

Le filtre à bande sous vide est un type de filtre à bandes qui permet déshydrater les boues grâce aux principes de filtration par gravité et d'aspiration. Cette machine commence avec la même procédure du filtre à bandes sous pression, néanmoins, il substitue la compression des boues pour l'aspiration de l'eau, voir figure 2-15.

Cette technologie propose les avantages d'un système en continu et automatisé avec une consommation énergétique faible et efficace et de rendement volumique élevé. En revanche, il s'avère que le filtre qui doit être de 20 à 100 µm est un facteur limitant (PERRONI, 2006) et, cette machine nécessite toujours l'usage de polymères floculants.

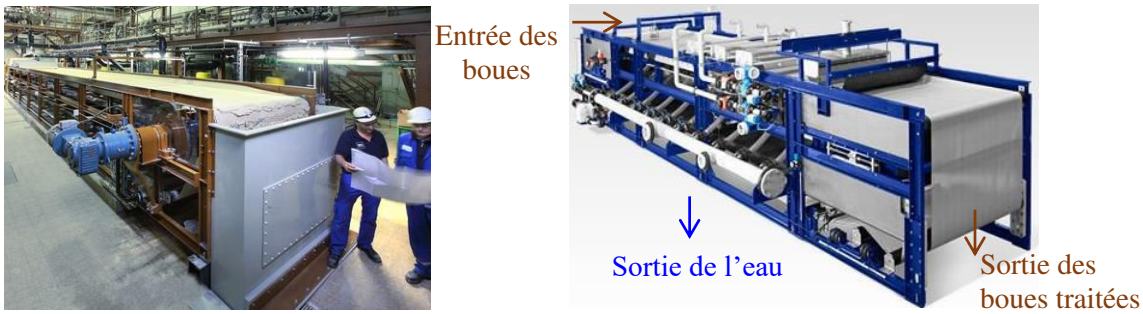



*Figure 2-15. Filtre à bandes sous vide, (www.bhs-sonthofen.de).*

- ***Filtre presse à membrane***

Le filtre presse à membrane est une machine conçue pour perfectionner le filtre presse à plateaux grâce à l'intervention d'une membrane élastique située entre la chambre de filtration

et la chambre de compression, améliorant ainsi la filtration des boues. Avec ce système, la productivité est améliorée 40% par rapport au filtre à plateaux, voir figure 2-16.

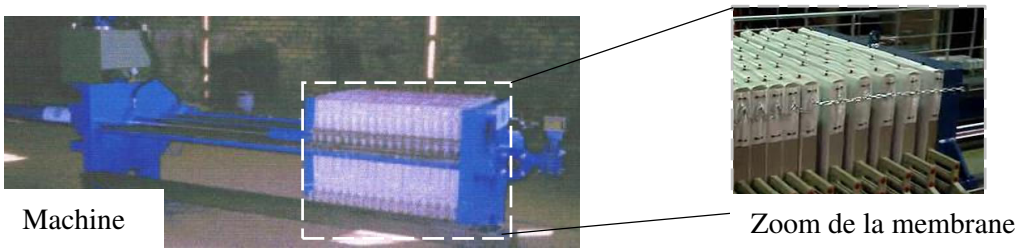


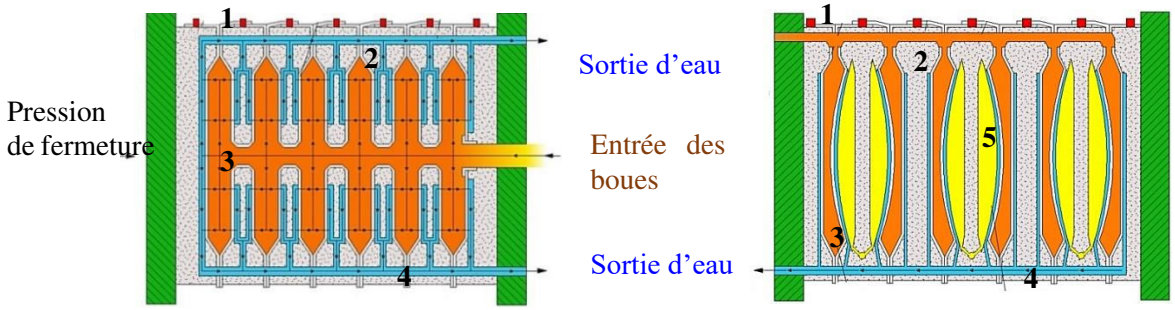

*Figure 2-16. Filtre presse à membrane (www.hidrometalica.com).*

Son fonctionnement comprend deux phases :

- Une première phase, « phase de filtration avec pompe d'alimentation », identique à la procédure suivie d'un filtre presse à plateaux, mis à part le fait que la pompe d'alimentation s'arrête à une pression de filtration maximale de 0,7 MPa, voir figure 2-17. a.

- La deuxième phase qui gère le « gonflement des membranes élastiques », concerne le gonflement des membranes avec de l'air (0,7 MPa) ou un liquide (jusqu'à 5 MPa) réduisant le volume de la chambre de filtration pour augmenter la siccité des boues déshydratées, voir figure 2-17. b.
  Ces valeurs ont été obtenues auprès de la société Welders Filtration Technology (WFT, www.wft.be).

La siccité minimale obtenue par cette procédure est d'environ 34%, soit w = 194%, (PORT AUTONOME DU HAVRE, 2006).




**1**. Toile de filtration **2**. Plateaux filtrants **3**. Boues déshydratées **4**. Collecteur d'eau **5**. Gonflage

*(a) Première phase de fonctionnement.* *(b) Deuxième phase de fonctionnement.*

*Figure 2-17. Schéma de fonctionnement du filtre presse à membrane (www.dafim.com).*

- ***Filtre presse à vis***

Cet outil de déshydratation est un type de filtre presse principalement composé d'une vis d'extrusion qui tourne et des grilles filtrantes. Il est divisé en une zone d'alimentation et de

drainage de l'eau et, en une deuxième zone de compression de boues. Son principe de fonctionnement s'appuie sur le principe de la gravitation, la filtration, la compression et le cisaillement, voir figure 2-18.

La procédure d'utilisation de cette machine consiste en l'introduction des boues floculées dans la chambre d'alimentation de la machine, laquelle permet de drainer l'eau grâce à la gravité. Les boues sont transportées par la vis autour du tambour en réduisant leur teneur en eau graduellement jusqu'à arriver à la zone de compression du tambour. Dans cette zone, les sédiments continuent leur déshydratation causée par le rétrécissement graduel de la machine vers la sortie des boues et la force de cisaillement générée par les grilles filtrantes en rotation excentrique. Ces grilles filtrantes sont spécifiques à chaque type de boue et sont autonettoyantes. La siccité moyenne attendue est environ 40%, (w = 150%), (PORT AUTONOME DU HAVRE, 2006).

Dans les avantages offerts par ce procédé, on peut souligner les points suivants : performance élevée, fonctionnement en continu et automatisé, usure minimale, entretien et maintenance faible et simple et faible consommation d'énergie (< à 10 kW pour les plus grosses machines), faible niveau sonore (< 70 dB). Ces valeurs ont été proposées par la société EMO France.

En revanche, cette technologie implique un coût d'installation important, une utilisation de polymères floculants et la siccité prévue n'est pas trop élevée.

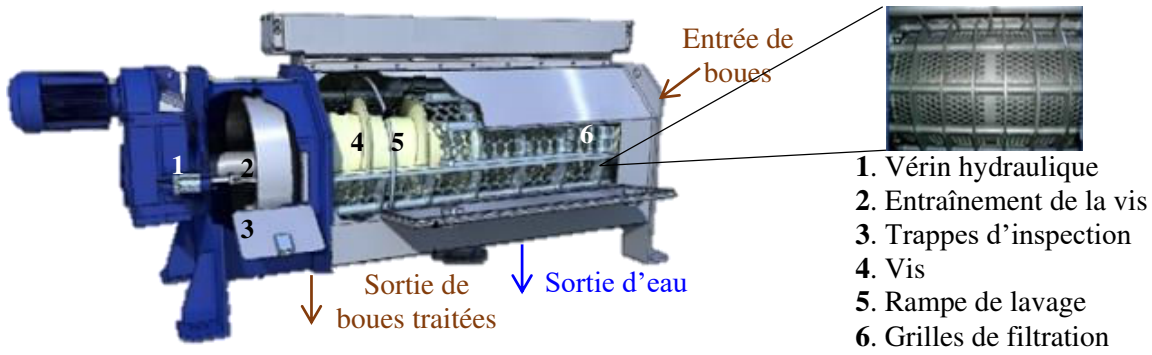



*Figure 2-18. Principe de fonctionnement du filtre presse à vis (www.emo-france.com).*

### *2.3.2. Un système de travail continu*

Les machines qui existent potentiellement en ce moment sont le système Hydrosplit®, Nemeau®, Volute® et sa version améliorée KDS®. Hydrosplit® et Nemeau® faisaient partie du programme de recherche et développement COVASED (CO-VAlorisation de SEDiments).

#### *2.3.2.1. Hydrosplit®*

***Description de la machine***

Hydrosplit® consiste en une série d'hydrocyclones qui combinent les forces de centrifugation et de gravité afin de cribler les fractions graveleuses et sablonneuses réutilisables

de la fraction de boue polluée, voir figure 2-19. Il a été développé en 2010 par la société VALGO.

***Principe de fonctionnement***

Le principe de fonctionnement d'Hydrosplit® est basé sur un système d'hydrocyclonage. Ce système est incorporé dans un processus plus complexe composé des étapes suivantes (VALGO, 2011 ; VALGO, 2015 ; THANNBERGER, 2016) :

- Une étape préliminaire de criblage de la matière solide : les cailloux avec diamètre supérieur à 80 mm sont refusés pour la protection d'Hydrosplit®.

- Alimentation d'Hydrosplit® et pulpage : la matière solide admise est introduite dans la machine avec un flux nominal de 60 T/h. Elle est mélangée avec un débit de 150 à 180 $m^3$/h d'eau en formant une pulpe homogène (pulpage).

- Criblage par un trommel rotatif sous eau de maille de 10 mm : les cailloux lavés qui ont un diamètre supérieur à 10 mm forment les refus de criblage. La pulpe composée de la matière restante et d'eau représente le passant.

- Cyclonage : ce passant est envoyé dans deux hydrocyclones de 600 en série (HC1 et HC2) qui ont un pouvoir de coupure à 80 µm et par deux pompes à sables de 250 $m^3$/h. La pulpe restante est reprise par une troisième pompe de même type et elle est introduite dans dix hydrocyclones (HC3) de 140 en parallèle qui ont une coupure de 35 µm, voir figure 2-19.

- Stockage et traitement des matériaux :

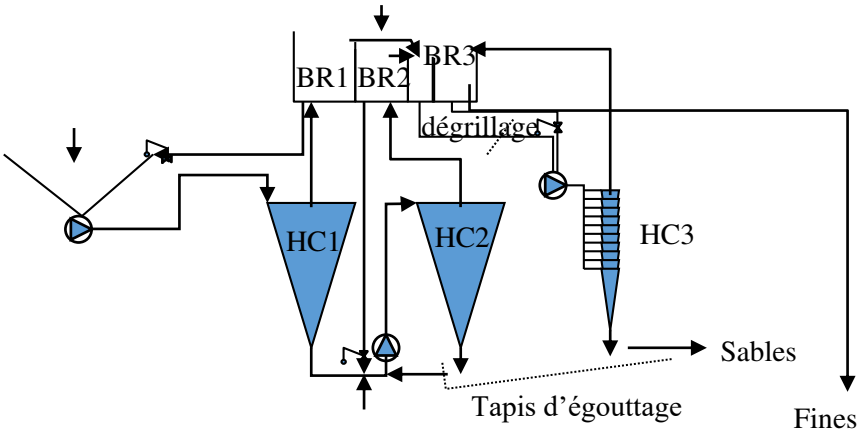
    - Les sables grossiers sont évacués à la fin du deuxième hydrocyclone. Ils sont évacués par un tapis essoreur pour atteindre une teneur en eau de 11,5% environ (siccité ≈ 8%). Les sables propres peuvent être réutilisés.

    - Les sables fins et les limons grossiers sont rejoints par tapis essoreur à la fin de l'hydrocyclone HC3. Ils sont tamisés à 1 mm afin d'éliminer les branchages et autres matières organiques de faible densité.

    - Le matériau restant est envoyé vers une filière d'épaississement, décantation floculation et/ou déshydratation.

    - Les eaux bourbeuses sont renvoyées vers le pulpage pour obtenir un pourcentage de fines de 5 à 10 %.

**Notes** :
*HC = HydroCyclone*
*BR =Boue Refusée*




*(a) Vue extérieure de la machine.* *(b) Schéma conceptuel du système Hydrosplit®.*

*Figure 2-19. Vue générale et schéma représentatif du système Hydrosplit®, (THANNBERGER, 2016).*

***Avantages et inconvénients***

La possibilité de trier des sédiments d'une manière continue avec un nombre réduit de travailleurs en poste, la capacité de mouvement, la surface nécessaire d'installation faible et son efficacité élevée, sont quelques avantages proposés par le système Hydrosplit®.

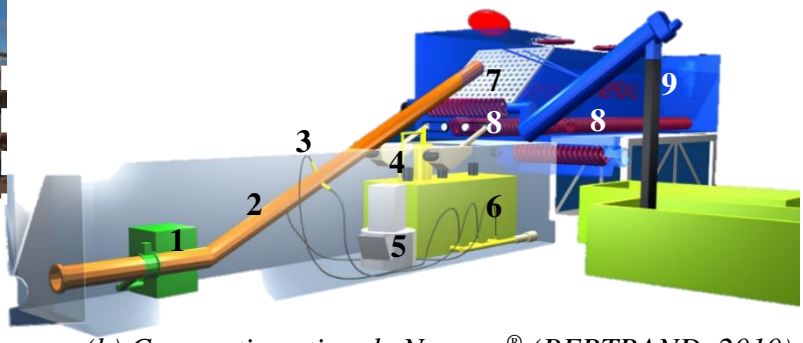
Le système Hydrosplit® ne propose pas un grand nombre d'inconvénients. Il peut présenter l'inconvénient de ne pas permettre la séparation de particules très fines qu'il faudra transporter par la suite.

### *2.3.2.2. Décanteur dynamique Nemeau®*

***Description de la machine***

Le décanteur dynamique Nemeau® est un outil de déshydratation composé de trois containers aux gabarits routiers et ferroviaires, facilement transportables, permettant l'accès à de multiples chantiers (MANCIOPPI et al., 2012). Un premier container comprend l'opération de dosage en floculants, un deuxième container permet la séparation des fractions fines et grossières, des sédiments et un troisième container est utilisé comme aire de stockage pour assurer le fonctionnement correct du Nemeau®, voir figure 2-20. Ce procédé a été développé par la société SEDIGATE (SEDIments Gestion À TErre). Il a fait l'objet d'un dépôt de brevet.

*(a) Vue extérieure de Nemeau® (BOULLOSA ALLARIZ & LEVACHER, 2016)*




*(b) Compartimention de Nemeau® (BERTRAND, 2010)*

Équipement du premier container

**1** : Surpresseur 100 $m^3$/h
**2** : Tuyau de cheminement des sédiments
**3** : Injection des floculants
**4** : Moteurs pour vis sans fin
**5** : Chargement des sacs de polymères en poudre
**6** : Unité de préparation des polymères en poudre

Équipement du deuxième container

**7** : Grille
**8** : Vis sans fin
**9** : Cuve de décantation

*Figure 2-20. Éléments constituant du décanteur dynamique Nemeau®.*

***Principe de fonctionnement***

Cette machine permet de séparer les fractions liquides et solides, présentes dans les boues en quelques minutes grâce à la technologie utilisée.

La boue est introduite dans le premier container dans une conduite dans laquelle les polymères floculants sont injectés en trois points après la préparation de polymères. Ensuite, ce mélange est conduit par un écoulement à grande vitesse sur une grille où commencent le premier tamisage dynamique et l'évacuation des particules grossières. Les particules restantes continuent en suspension et sont éliminées par décantation. Ces particules sont collectées au fond de la cuve où un mécanisme de vis sans fin les comprime et transporte vers une sortie. Au final, elles sont récoltées dans un bac (BERTRAND, 2010), voir figure 2-21.

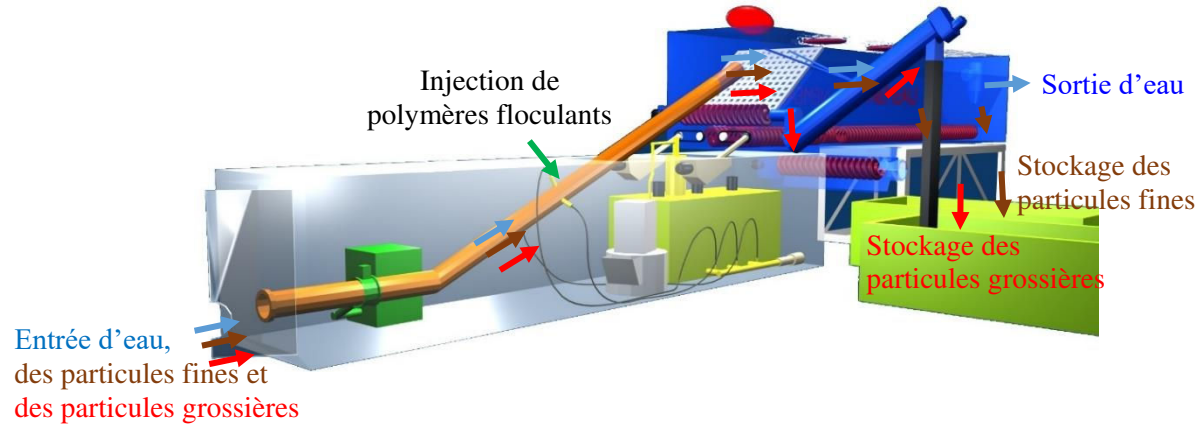



*Figure 2-21. Principe de fonctionnement du décanteur dynamique Nemeau® (BOULLOSA ALLARIZ & LEVACHER, 2016).*

### *Paramètres fondamentaux*

Les paramètres fondamentaux du décanteur dynamique Nemeau® sont synthétisés dans le tableau 2-4.

*Tableau 2-4. Récapitulatif des paramètres fondamentaux du décanteur dynamique Nemeau®. (BERTRAND et al., 2012 ; DHERVILLY, 2013).*

| Caractéristiques | Valeur |
|---|---|
| Débit maximal de sédiments traités ($m^3$/h) | 450 |
| Siccité moyenne attendue (%) | ≈ 40 - 50 |
| Teneur en eau (%) | 100 à 150 |
| Opérateurs par machine | 2 |
| Facteur de réduction des volumes traités | Variable autour de 10 |
| Coûts d'exploitation (€/$m^3$) | Variable autour de 12 |
| Consommation énergétique pour un débit de 30 kg MS/h (kW/h) | 0,8 |
| Débit de boue en entrée ($m^3$/h) | 200-500 |
| Débit de boue en sortie ($m^3$/h) | 20-50 |
| Consommation (kW/$m^3$) | ≈ 0,25 |
| Surface pour l'installation ($m^2$) | 27,2 -168 |
| Turbidité de l'eau en sortie (mg/l) | <100 à 150 |
| Système de travail | Continu |
| Mobilité | Possible |

### *Avantages et inconvénients*

Cette méthode propose de nombreux atouts, selon BERTRAND (2010), BERTRAND et al., (2012), DHERVILLY (2010), et LEVACHER & DHERVILLY (2010) : la possibilité de fonctionnement en continu, une faible consommation d'énergie, une main d'œuvre réduite, des coûts d'exploitation peu élevés, un grand volume de sédiments traités, une efficacité élevée. L'ensemble a la possibilité de se déplacer et la surface nécessaire pour son implantation est faible.

L'inconvénient que présente cette technique est l'utilisation de polymères floculants, dont la nature et le dosage doivent être ajustés.

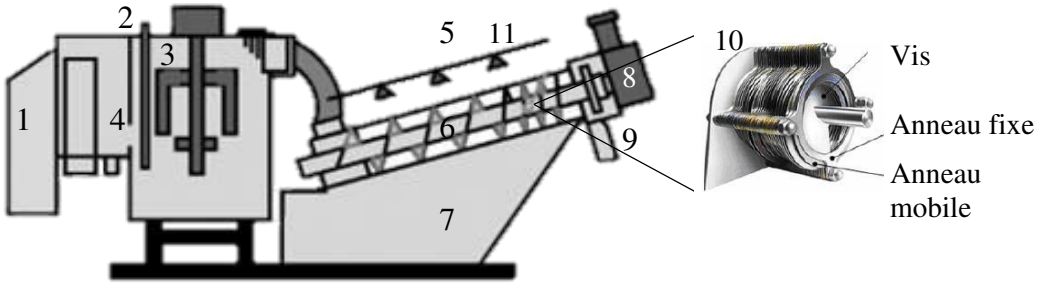
## *2.3.2.3. Presse à boues Volute®*

Les informations concernant la presse à boues Volute® ont été fournies par les sociétés AMenity CONvenience - AMCON, Atlantique-Industrie, Asio® - Traitement des eaux et BENenfit the ENVironment - BENENV.

### *Description de la machine*

La machine de déshydratation Volute® est une presse composée d'une vis qui tourne à une vitesse constante à l'intérieur d'une succession de nombreux anneaux fixes et mobiles et

d'entretoises, voir figure 2-22. Elle permet de déshydrater les boues d'une manière continue grâce à la combinaison de l'effet de cisaillement provoqué par les anneaux et la boue, de la force de compression liée à la forme tronconique du tambour, du principe de gravitation et de la filtration possible grâce aux espaces existants entre les anneaux.




**1** : Coffrage électrique : contrôle du fonctionnement, des dosages chimiques…
**2** : Chambre d'alimentation ou entrée du produit chimique : dosage de produits dans un réservoir
**3** : Réservoir de floculation : boue entrante mélangée et floculée
**4** : Boue entrante : pompe à boue
**5** : Tambour
**6** : Vis : dessiccation de la boue
**7** : Collecteur : eau collectée
**8** : Moteur
**9** : Sortie de boue
**10** : Anneaux
**11** : Jets : lavage des résidus de boue à l'eau sous pression

*Figure 2-22. Compartimention de la presse à boues Volute®, (www.asio.cz).*

***Principe de fonctionnement***

Le principe de fonctionnement de la presse à boues Volute® se fonde sur deux principes de conception :

- Un design simple et schématique :

  L'élément principal de la machine Volute® est son tambour tronconique. Cette pièce est divisée en deux zones en fonction de l'espacement des anneaux :

  - Une première zone dans laquelle les espaces se rétrécissent graduellement de 0,5 mm jusqu'à 0,3 mm appelée « zone d'épaississement ».

  - Et une deuxième zone de séchage des boues où les espaces entre anneaux diminuent de 0,3 mm jusqu'à 0,15 mm, voir figure 2-23.

- Une méthode de fonctionnement simple :

  Les boues sont introduites dans une chambre d'alimentation de la machine, où les polymères floculants sont injectés. Ensuite, cette mixture est transportée par la vis au sein du tambour dans lequel :

- Les espaces entre les hélices rétrécissent au fur et à mesure en provoquant une diminution progressive du volume de la boue grâce à l'évacuation de l'eau par le cisaillement boue-anneaux et par gravité.

- La forme tronconique du tambour provoque une diminution du volume de la boue par compression.

La combinaison de ces principes permet d'obtenir, d'une part, un produit final avec une teneur d'eau de 81% ou moins (siccité ≈ 55%), pouvant être récupéré à l'aide d'un réservoir pour sa future valorisation et d'autre part, une quantité d'eau qui est stockée dans le collecteur d'eau.

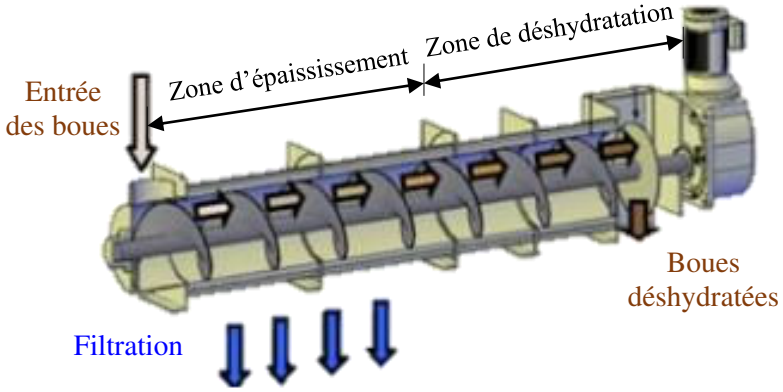



*Figure 2-23. Principe de fonctionnement de la presse à boues Volute®.*

***Paramètres fondamentaux***

Une synthèse des paramètres fondamentaux de la technique de déshydratation apportée par la presse à boues Volute® est donnée dans le tableau 2-5. Ces données ont été fournies par les sociétés AMenity CONvenience - AMCON et Atlantique-Industrie et par LEVACHER (2015).

Les caractéristiques de deux modèles Volute® « ES-101ST » et «ES-303ST » sont également données dans le tableau 2-5. Ils permettent de faire une comparaison des différents types de machines qui utilisent la technologie Volute®.

*Tableau 2-5. Récapitulatif des caractéristiques principales de la presse à boues Volute®.*

| **Caractéristiques** | **Valeur** | |
|---|---|---|
| Concentration (mg/L) | 2000 | |
| Siccité moyenne attendue (%) | ≈ 55 | |
| Teneur en eau (%) | 81 | |
| Opérateurs par machine | 2 | |
| Facteur de réduction des volumes traités | Variable autour de 12 - 20 | |
| Consommation énergétique pour un débit de 30 kg MS/h (kW/h) | 0,8 | |
| Consommation d'eau au cours du lavage par aspersion pour un débit de 30 kg MS/h ($m^3$/h) | 0,04 | |
| Système de travail | Continu | |
| Niveau de bruit très faible | 63 dB | |
| Séchage à faible concentration | Possible | |
| Mobilité | Possible | |
| Réservoir d'épaississement et réservoir de stockage | Pas nécessaire | |
| Type de sols fins à traiter | Boues non sableuses | |
| **Modèle** | **ES-101ST** | **ES-303ST** |
| Débit de boues activées en excès de la cuve d'oxydation 2000 – 4000 mg/L ($m^3$/h) | 3 | 90 |
| Débit de séparation des boues par flottation 6000 - 35000 mg/L ($m^3$/h) | 5 | 135 |
| Surface pour l'installation ($m^2$) | 1,33 | 5,65 |
| Puissance électrique (kW) | 0,2 | 1,95 |

***Avantages et inconvénients***

Plusieurs avantages ont été listés dans le tableau 2-5, on peut les dénombrer ainsi :

- Volute® permet un système de travail en continu.

- Efficacité élevée : Volute® économise le besoin en espace, la machine présente une conception compacte et une absence de stockage.

- Réduction du coût de main d'œuvre : main d'œuvre réduite à deux opérateurs nécessaires pour le fonctionnement correct de la machine Volute®.

- Design simple et efficace : Volute® ne présente pas trop de pièces soumises à usure pour la maintenance.

- Colmatage dans les anneaux inexistant : grâce à l'action du floculant les boues restent à la surface des anneaux et celui-ci empêche le colmatage dans les anneaux.

- Économie d'eau : l'eau de rinçage est uniquement utilisée pour le nettoyage des boues qui restent entre les anneaux. Pour chaque cycle de déshydratation la presse

à boues Volute® utilise 62,5 fois moins quantité d'eau que la centrifugeuse et 115 fois moins que la filtre presse à bandes.

- Réduction du bruit dans chaque cycle de déshydratation : Volute® génère 1,3 fois moins de bruit que la centrifugeuse et 1,13 fois moins que la filtre presse à bandes.

Les inconvénients principaux de la machine Volute® peuvent être les suivants :

- Le problème fondamental de cette machine est qu'elle n'est pas adaptée aux boues sableuses. Les grains de sable risquent de rester coincés entre les anneaux.

- Le design fermé du tambour présente la difficulté de suivre l'évolution de la masse des sédiments à l'intérieur de la vis. Ceci peut provoquer des problèmes techniques possibles en cas de blocage.

- Utilisation de polymères floculants pour épaissir la boue et éviter son colmatage et/ou filtration par les anneaux. L'utilisation de floculants peut amener à une considérable augmentation des coûts de déshydratation. La présence de floculants au sein des sédiments déshydratés peut poser des problèmes de valorisation.

***Applications***

La presse à boues Volute® permet de déshydrater une large gamme de boues :

- Boues biologiques ;

- Boues physico-chimiques et agroalimentaires provenant des productions laitières, des boissons et de nourriture ;

- Boues provenant des industries chimiques et pharmaceutiques ;

- Boues urbaines provenant d'usines de traitement d'eau ;

- Boues industrielles provenant de raffinages de pétrole, usines de fabrication de pulpe de papier ;

- Boues hydroxydes.

### *2.3.3. Récapitulatif des techniques de séchage et de déshydratation*

Le séchage naturel des sédiments est la technique de déshydratation la plus économique du point de vue énergétique. Le séchage permet de déshydrater en discontinu tout type de sédiments en grandes quantités et d'obtenir des teneurs en eau finales faibles. Néanmoins, le séchage naturel présente une forte dépendance des conditions climatiques locales, en empêchant ainsi de déshydrater les sédiments dans des zones à fortes précipitations. En outre, cette technique n'offre pas la possibilité de mouvement, voir tableau 2-6.

En revanche, la déshydratation mécanique permet de déshydrater les sédiments en continu et/ou en discontinu. La procédure de déshydratation mécanique est indépendante du climat. Le produit final présente des teneurs en eau faibles. La durée de déshydratation est réduite par rapport au séchage naturel.

En ce qui concerne la consommation énergétique pendant la déshydratation mécanique, elle est plus réduite dans un système de travail continu. Ceci tient au fait que le système de travail continu est actuellement le plus développé. Il tient d'une part à améliorer le système de déshydratation en permettant de déshydrater les sédiments 24h/24h et d'une autre part, à réduire les coûts de déshydratation.

Les techniques de séchage naturel et de déshydratation mécanique, et un bref résumé de chacun des paramètres les plus importants, sont récapitulés dans le tableau 2-6.

*Tableau 2-6. Récapitulatif des techniques de séchage naturel et de déshydratation mécanique, (LEVACHER, 2015).*

| Technique | Système | Type de sols fins | Consommation énergétique | Volume traité $m^3/h$ | Mobilité | Teneur en eau |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Lagunage | Continu | Tout type de sédiments | Nulle à faible | Élevé | Pas possible | Faible et fonction du temps |
| Lits de séchage | Discontinu | Tout type de sédiments | Nulle à faible | Élevé | Pas possible | Faible et fonction du temps |
| LSP | Discontinu | Tout type de sédiments | Nulle à faible | Élevé | Pas possible | Faible et fonction du temps |
| Centrifu-geuse | Discontinu | Tout type de sédiments | Très élevée | Très faible | Possible | Faible |
| Filtre presse à plateaux | Discontinu | Tout type de sédiments | Élevée | Faible | Possible | Moyenne |
| Filtre presse à membrane | Discontinu | Tout type de sédiments | Élevée | Faible | Possible | Moyenne |
| Filtre presse à vis | Pseudo-continu | Sols fins non fibreux peu sableux | Peu élevée | Faible | Possible | Faible |
| Filtre à bandes | Pseudo-continu | Tout type de sédiments | Élevée | Faible | Possible | Moyenne |
| Nemeau® | Continu | Sédiments peu organiques, non fibreux | Faible | Très élevée | Possible | Moyenne |
| Volute® | Continu | Boues non sableuses | Peu élevée | Faible à moyenne | Possible | Faible à moyenne |
| Hydrosplit® | Continu | Tout type de sédiments | Élevée | Faible à moyenne | Possible | Faible |

## *2.4. LA VALORISATION DES SÉDIMENTS*

Les sédiments de dragage peuvent être soit immergés en mer ou soit déposés à terre. Ces deux filières constituent les solutions classiques pour la valorisation des sédiments dragués. Le choix de ces deux modes de gestion des déblais s'appuie sur des aspects techniques, économiques et environnementaux.

Tout procédé de valorisation est lié aux propriétés physico-chimiques et minéralogiques des sédiments, ainsi que leurs niveaux de polluants. La valorisation des sédiments peut être classifiée soit en fonction de la filière de gestion ou soit le niveau de polluants. Soulignons que ce procédé doit suivre cinq étapes indispensables, elles sont montrées sur la figure 2-24.

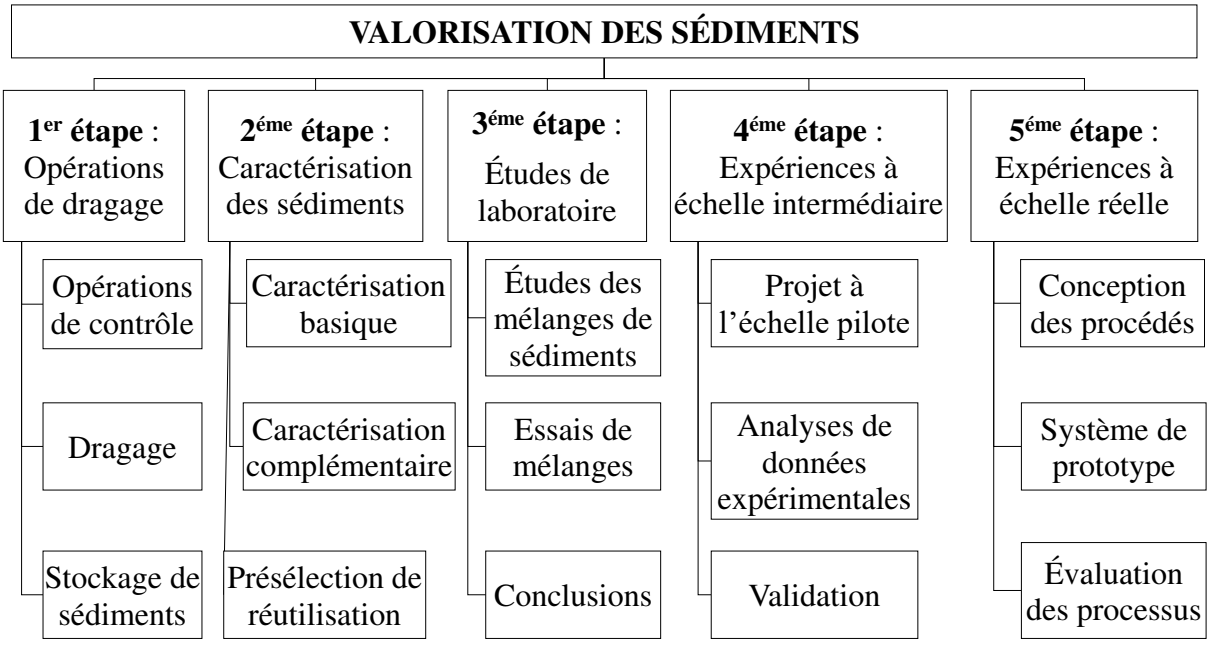



*Figure 2-24. Étapes du procédé de valorisation des sédiments (LEVACHER, 2017).*

### *2.4.1. Filières de gestion des sédiments*

#### *Voies de valorisation dans les filières maritimes et côtières*

L'immersion des sédiments reste de très loin la principale technique utilisée pour la gestion des déblais de dragage en France. En 2011, un total de 20,27 millions de tonnes de sédiments ont été immergés en mer ou en zone estuarienne, ce qui représente 95,84% de la quantité totale de sédiments dragués en 2011 (EL FADILI & MESSAGER, 2015).

- Engraissement de plages et dunes

Les sédiments dragués composés d'une fraction sableuse majoritaire (>75 %) et un niveau de contamination très léger peuvent être utilisés pour recharger des plages et dunes soumises à l'érosion (IN VIVO, 2002). L'augmentation du profil de la plage à l'aide des apports externes

de sédiments atténue l'impact des vagues sur la côte. Selon le CEntre D'Études et D'EXpérimentation de travaux publics de l'état espagnol - « CEDEX », cet apport de sédiments sur les plages donne de meilleures solutions que la construction des ouvrages de défense des côtes, (CEDEX, 2007).

- Amélioration et créations de nouvelles plages

Les sédiments dragués avec un pourcentage de sable élevé peuvent être utilisés pour la création et l'amélioration de plages à des fins récréatives. Ce matériau doit suivre les niveaux maximaux admissibles de polluants réglés par la législation relative à l'Installation Classée pour la Protection de l'Environnement - ICPE.

- Réalisation d'ouvrages de protection ou digues

Les sédiments dragués peuvent être réutilisés pour la construction d'ouvrages de protection en formant partie du noyau central de remblais ou les rechargements (DUAN, 2008 et CEDEX, 2007). Les ouvrages de protection peuvent être construits avec un seul type de matériau (des argiles ou des limons) ou par plusieurs types de sédiments : un noyau central en argile et des rechargements constitués de matériaux plus perméables comme des sables.

- Construction des ports

Une autre application des sédiments dragués peut être la construction des ports. Pour cela, les sédiments sont stabilisés avec différents liants : comme le ciment, la chaux, les cendres volantes…

Un exemple de valorisation de sédiments peut être la construction de plateformes portuaires au Port 2000 du Havre. Pour cette construction, un total de 800000 $m^3$ de sédiments ont été stabilisés avec un coproduit industriel. Ce mélange a constitué le matériau pour la réalisation des plateformes dans ce port, (DHERVILLY & GREGOIRE, 2014).

***Voies de valorisation dans les filières terrestres***

- Dans le domaine de l'agriculture

Les sédiments d'origine fluviale proviennent de l'érosion des sols végétalisés. Pourtant, la teneur en matière organique de ces sédiments est assez élevée. Cet avantage peut être exploité dans l'épandage, la reconstruction de sols, etc. (BOUAZIZ, 2016). En plus, si les sédiments ont des teneurs en carbonates élevées, cette caractéristique peut être utilisée pour améliorer le pH des sols.

Dans ce type de valorisation, la nature du terrain est choisie en fonction de la qualité agronomique et les sédiments en concertation avec la Direction départementale de l'Agriculture et de la Forêt – « DDAF » et la Chambre d'agriculture (IN VIVO, 2002 et CEDEX, 2007).

- Dans le domaine du génie civil.

Les sédiments de dragage peuvent être intégrés dans des opérations de génie civil et de construction. Pour cela, ils sont mélangés avec d'autres matériaux plus structurants.

- Bâtiment et Travaux Publics (BTP)

  Diverses études prouvent la possibilité de réutilisation des sédiments non pollués dans le domaine du Bâtiment et Travaux Publics. Selon IN VIVO (2002), SEMCHA (2006), BEN ALLAL et al., (2011) et PELLERIN LE BAS (2015), les sédiments dragués peuvent être réutilisés dans l'élaboration de matériaux de construction comme les briques, les granulats, les bordures de trottoir et les parpaings ou même l'élaboration de pavés autobloquants à partir des mélanges composés à base de ciment (BEL HADJ ALI, 2013). Une autre voie de valorisation à considérer dans le BTP, porte sur les aménagements paysagers tels que les ronds-points (DREAU et al., 2010).

  Pour toutes ces applications, les sédiments sont mélangés avec des liants et additifs : ciment, chaux, pouzzolane artificielle, etc.

- Technique routière

  En ce qui concerne la valorisation des sédiments, la filière de matériau routier est de loin la plus étudiée. Les sédiments peuvent être utilisés pour l'élaboration de mélanges composites de sédiments fins et de liants. Ces mélanges pourront être employés dans la construction des sous-couches routières (COLIN, 2003 ; DUBOIS, 2006 ; DUAN, 2008 ; LIANG, 2012 ; ANGER, 2014). Ils peuvent être appliqués dans les techniques de stabilisation et/ou solidification aux liants, (SILITONGA, 2010).

- Ciment

  Les sédiments peuvent fournir la quantité d'argile nécessaire pour la formation du clinker (ANGER, 2014 ; FAURE, 2017). Le clinker est la principale composante du ciment. Il est obtenu de la cuisson d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire et de 20 % d'argiles.

- Mortiers et bétons

  Une autre voie de valorisation des sédiments de dragage est la substitution partielle du ciment par des sédiments dans la fabrication de mortiers et de bétons (ZHAO Z. et al., 2015) ou en substituant le sable par des sédiments de dragage (LIMEIRA DE ARAUJO, 2011 ; KAZI AOUAL-BENSLAFA F et al., 2012).

- Autres applications

  D'autres applications peuvent concerner le remplissage de carrières et de cavités souterraines, la réalisation de remblais avec ou sans surcharge (DUAN, 2008 ; REKIK, 2007) ou la fabrication de matériau céramique avec des argiles (ANGER, 2014 ; HAURINE, 2015).

### *2.4.2. Traitements pour la réutilisation de sédiments*

En ce qui concerne le ou les traitements à réaliser pour la réutilisation des sédiments, trois types de valorisation peuvent être distingués :

- Sans traitement : réutilisation des sédiments *in situ*. Cela est le cas des rechargements de plages et dunes avec des sédiments non pollués ou la restauration de sols et/ou écosystèmes marins.

- Traitement économique viable : élaboration des mélanges composés de sédiments dragués et des ajouts directs, tels que de la chaux, du ciment… pour la réalisation de ce traitement, les sédiments doivent contenir des niveaux admissibles de polluants. Les voies de valorisation pour ces sédiments peuvent être dans les filières routières, les remblais, le remplissage de cavités souterraines.

- Traitement environnemental lourd : réalisation d'une série de traitements spécifiques par rapport au niveau de pollution des sédiments. Ces sédiments peuvent être réutilisés dans l'élaboration de matières cuites et matériaux à surface durcie (céramiques), de matières calcinées (clinker ou composants de ciment) ou dans le compactage et /ou stabilisation des sols (LEVACHER, 2017).

## *2.5. CONCLUSION DU CHAPITRE*

Chaque année d'importantes quantités de sédiments sont draguées en France et dans le reste du monde, résultant de la réalisation de travaux maritimes et portuaires en constante augmentation. Les matériaux dragués sont gorgés d'eau. Leurs importantes teneurs en eau compliquent leur transport et leur gestion à terre. C'est ainsi que **la déshydratation est présentée comme étant le premier et indispensable traitement à appliquer aux sédiments dragués.**

Diverses études montrent que le séchage naturel est de loin la technique de déshydratation la plus économique et acceptable du point de vue environnemental puisqu'il permet de diminuer la quantité d'eau des sédiments par évaporation et drainage

Cette technique consiste à déverser les sédiments dragués dans des cellules de séchage de moyenne profondeur (lagunage) ou dans des bassins en béton de faible profondeur (lits de séchage). Ces derniers peuvent être aussi plantés de macrophytes comme les lits de séchage plantés de roseaux.

Néanmoins, de nombreux inconvénients sont à souligner : système de travail discontinu, forte dépendance des propriétés de la matrice sédimentaire et du climat local, obtention de produits obtenus pâteux, hétérogènes et faiblement déshydratés etc. **Ces systèmes de séchage se doivent d'être améliorés en déterminant des critères d'aptitude au séchage naturel** ou en les remplaçant par d'autres méthodes de déshydratation.

Par rapport aux types de déshydratation les plus utilisés, la déshydratation mécanisée représente une alternative et peut résoudre les inconvénients évoqués à propos du séchage naturel. La déshydratation mécanisée peut jouer un rôle important dans la déshydratation des sédiments. En effet, elle se présente comme étant une solution efficace, rapide et peu dépendante des caractéristiques physico-chimiques des sédiments et de la météorologie locale.

La déshydratation mécanisée permet aussi de réduire la teneur en eau des sédiments grâce à la combinaison de forces mécaniques mises en jeu : filtration avec les filtre presses ou la centrifugation avec les centrifugeuses.

Par ailleurs, **les nouveaux systèmes de déshydratation mécanique proposent un système de travail continu** qui permet de réduire le temps de déshydratation, en travaillant 24h/24h comme cela est le cas de l'ensemble d'hydrocyclones Hydrosplit®, du décanteur dynamique Nemeau® ou de la presse à boues Volute®. Les systèmes Hydrosplit® et Nemeau® ont été recommandés dans une partie du programme de recherche et développement COVASED.

Une fois les sédiments déshydratés, avec des teneurs en eau de 30% à 50%, ils peuvent être valorisés en fonction de leurs niveaux de polluants et de leurs propriétés physico-chimiques et minéralogiques.

La valorisation se fait par rapport aux niveaux de polluants à considérer et les sédiments peuvent être valorisés sans traitement s'ils ne sont pas pollués. Néanmoins, à partir de certains taux de pollution, les sédiments doivent être traités. Ils peuvent être mélangés avec certains liants et additifs (chaux, ciments, coproduits industriels…). Pour des taux élevés de contamination, des traitements environnementaux lourds doivent être entrepris pour pouvoir valoriser ces sédiments.

Les sédiments avec des taux de pollution faibles, peuvent être valorisés dans des filières terrestres : BTP, techniques routières, agriculture, élaboration de ciment… ou dans des filières portuaires et/ou maritimes comme la construction de ports, de digues…

# *3. CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS ET MATÉRIAUX*

## *3.1. INTRODUCTION*

La caractérisation des sédiments correspond à la première étape de tout processus de valorisation. Elle permet de déterminer un ensemble de propriétés nécessaires au choix d'une filière de valorisation afin d'optimiser ce processus. Elle concerne dans nos travaux une série de sédiments d'origines diverses et des argiles.

Dans ce chapitre, un ensemble de sédiments sont caractérisés d'un point de vue physico-chimique, minéralogique et géotechnique. Ces sédiments sont classés par rapport à leurs origines : sédiments de barrage, sédiments marins, matériaux argileux et sableux.

En début de chapitre, les paramètres de caractérisation des sédiments sont détaillés avec un aspect bibliographique ainsi que la procédure à utiliser pour les déterminer. S'ensuit, la deuxième partie qui concerne l'étude de caractérisation des sédiments et des matériaux argileux et leurs prélèvements.

Les essais de caractérisation physico-chimique et hydromécanique ont été réalisés au sein du laboratoire M2C. L'information concernant la minéralogie et l'argilosité a été fournie par l'entreprise « EDF » et par le Laboratoire d'Études et de Recherches sur les Matériaux « LERM ».

L'information concernant les sédiments du Grand Port Maritime de Dunkerque a été compilée à partir de plusieurs études réalisées au sein du laboratoire du laboratoire M2C. La caractérisation minéralogique, les limites d'Atterberg et la caractérisation hydromécanique des sédiments du Rhin et de l'Isère, ont été récapitulées pour une part, à partir de l'étude réalisée par ANGER (ANGER, 2014).

## *3.2. CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS*

### *3.2.1. Caractérisation physico-chimique*

#### *3.2.1.1. Granulométrie*

***Définition***

La granulométrie est l'étude de la classification des particules des sédiments en fonction de leur taille. Les sédiments peuvent être définis granulométriquement par le coefficient d'uniformité ($C_u$) et le coefficient de courbure ($C_c$).

Le coefficient d'uniformité peut être défini comme étant la pente de la courbe granulométrique. Ce coefficient est utilisé pour caractériser la répartition en taille des éléments qui composent le type de sédiment. Si $C_u$ est supérieur à 2, la granulométrie des sédiments est bien étalée. Par contre si $C_u$ est inférieur à 2, la granulométrie est uniforme ou serrée, (NF P 94-056). Le coefficient d'uniformité est calculé par l'équation suivante :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad [3.1]$$

avec les notations suivantes :
$C_u$ : Coefficient d'uniformité ;
$D_{10}$ : Diamètre des grains à 10% de passants ;
$D_{60}$ : Diamètre des grains à 60% de passants.

Le coefficient de courbure est le paramètre qui définit la courbure de la courbe granulométrique. Les échantillons de sols ou de sédiments bien gradués possèdent un coefficient de courbure compris entre 1 et 3 et un coefficient d'uniformité inférieur à 5, (NF P 94-056). L'équation suivante permet de calculer ce coefficient :

$$C_c = \frac{{D_{30}}^2}{D_{60}.D_{10}} \qquad [3.2]$$

avec les notations suivantes :
$C_c$ : Coefficient de courbure ;
$D_{30}$ : Diamètre des grains à 30% de passants.

La norme française NF X31-107 permet de classifier les sédiments par rapport à leur taille. Le schéma de la figure 3-1 correspond à cette classification.

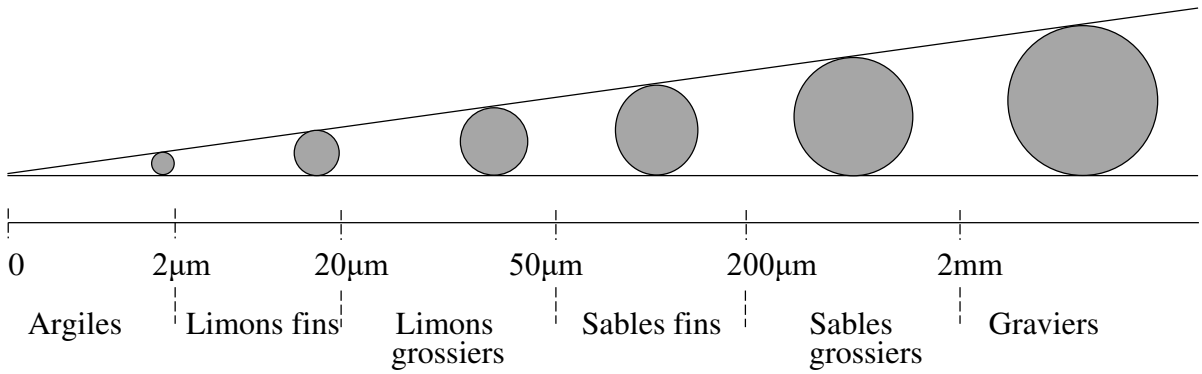



*Figure 3-1. Classification granulométrique, (NF X 31-107).*

La norme française NF P18-560 permet de définir la teneur en fines. La teneur en fines est le pourcentage de sédiments qui ont un diamètre inférieur à 80 µm.

***Principe de l'essai***

En suivant la norme ISO 13320-1, la technique d'analyse par granulométrie utilisée est celle de la « granulométrie laser ».

Cette technique permet de classer les sédiments par rapport à la taille de leurs particules. Elle est basée sur le principe de la diffraction de Fraunhofer : les rayons des particules sont mesurés à l'aide d'un faisceau laser sur des particules de sédiments en suspension dans un liquide, normalement de l'eau.

Le laser utilisé est du type Beckman Coulter LS$^{TM}$ 13 320. Cet appareil permet de mesurer des diamètres compris entre 0,02 µm et 2 mm.

### *3.2.1.2. Texture des sédiments*

La texture des sédiments exprime le pourcentage d'éléments minéraux présents dans les sédiments par rapport à la taille des particules, indépendamment de la nature et de la composition de ces minéraux. Selon le pourcentage de sables, de limons et d'argiles, les sédiments peuvent être classifiés en trois groupes de texture :

- Texture sableuse : les sédiments qui ont une texture sableuse sont pauvres en matières organiques et en éléments nutritifs. Ils ont une faible capacité d'échange anionique et cationique. Ils sont bien aérés et très drainants.

- Texture limoneuse : les sédiments qui possèdent une texture « limoneuse » sont des sédiments moyennement aérés. Ils retiennent bien l'eau et les sels minéraux.

- Texture argileuse : il s'agit de sédiments qui sont chimiquement riches, mais ils possèdent de mauvaises propriétés physiques. Ils sont mal aérés. Les sédiments qui ont un pourcentage d'argiles élevé, peuvent stocker d'importantes quantités d'eau

et provoquer le phénomène du gonflement. Pendant le séchage, les sédiments ont de forts retraits.

La texture des sédiments peut être étudiée grâce aux pourcentages d'argiles, de sables et de limons contenus au sein de la matrice sédimentaire, voir figure 3-2.

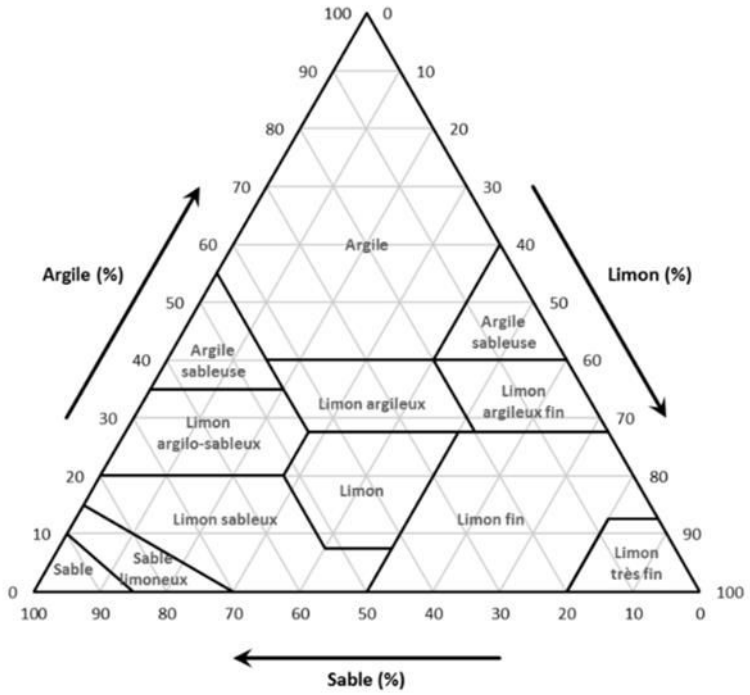



*Figure 3-2. Triangle de texture des sédiments proposé par la FAO et l'USDA, (SOIL SURVEY STAFF, 1951).*

### *3.2.1.3. Teneur en eau*

La teneur en eau est mesurée en suivant le protocole de l'étuvage de la norme NF P 94-050 où les sédiments sont mis à l'étuve pendant 24 heures, à une température constante de 60 ºC.

Elle peut être aussi calculée en suivant la norme NF P 94-049-1 où l'échantillon de sol est séché dans un four à micro-ondes et sa teneur en eau est calculée à partir des masses de l'échantillon avant et après séchage.

### *3.2.1.4. Surface spécifique*

#### *Définition*

La surface spécifique d'un sédiment peut être définie comme étant le rapport de la surface réelle de particules d'un sédiment et de la quantité de matière du sédiment. Elle s'exprime en $m^2/g$ dans le système international.

***Principe de l'essai***

- Détermination de la surface spécifique par perméabilité (technique Blaine)

La surface spécifique peut être déterminée en calculant la perméabilité du sédiment : en mesurant le temps nécessaire pour qu'un gaz de caractéristiques connues puisse traverser un lit de poudre compacté dans des conditions définies, (NF EN 196-6). La « finesse de Blaine » ou « surface spécifique Blaine » peut être calculée en suivant la relation 3.3 :

$$S_{Blaine} = K' \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho_s (1-\varepsilon) \cdot \sqrt{\eta}} \quad [3.3]$$

avec les notations suivantes :
$S_{Blaine}$ : Surface spécifique Blaine ou finesse de Blaine ;
K' : Constante liée à l'appareil utilisé ;
ε : Porosité du lit de poudre ;
t : Temps ;
$\rho_s$ : Masse volumique des particules solides
η : Viscosité de l'air à une température donnée.

- Détermination de la surface spécifique par absorption d'azote (technique BET)

Une autre méthodologie de détermination de la surface spécifique est celle de Brunauer, Emmett et Teller (BET). Cette théorie est basée sur l'adsorption d'azote sur la surface externe d'un sédiment. Elle consiste à mesurer la quantité de diazote nécessaire pour avoir une monocouche de ce gaz sur la surface du sédiment (NF EN ISO 18757). La surface spécifique peut être obtenue avec la relation 3.4 :

$$S_{BET} = \frac{\sigma_m \cdot N_A \cdot V^\circ}{V_m} \quad [3.4]$$

avec les notations suivantes :
$S_{BET}$ : Surface spécifique selon la méthode BET ($m^2/g$) ;
$\sigma_m$ : Encombrement de la couche monomoléculaire ($m^2$) ;
$N_A$ : Nombre d'Avogadro ($mol^{-1}$) ;
V° : Volume molaire du gaz adsorbé ($m^3$) ;
$V_m$ : Volume adsorbé dans la première monocouche ($m^3$).

### *3.2.1.5. Masse volumique des particules solides*

***Définition***

La masse volumique des particules solides ou masse volumique absolue ($\rho_s$), est le rapport de la masse de l'échantillon sec donné ou des particules solides par unité de volume, (volume des particules solides).

***Principe de l'essai***

La masse volumique des particules solides peut être déterminée à l'aide du pycnomètre à l'eau en suivant la norme française NF P 94-054 ou avec le pycnomètre à l'hélium selon la norme DIN 51913.

Le volume de l'échantillon sec et de masse connue, peut être calculé par différence de poids, en substituant le volume d'eau connu par celui des particules solides à l'aide du pycnomètre à l'eau (NF P 94-054). Par ailleurs, la masse volumique des particules solides peut être mesurée à l'aide du pycnomètre à hélium en suivant la méthode décrite dans la norme DIN 51913. Cette norme permet d'obtenir des résultats plus précis que ceux du pycnomètre à l'eau. Le pycnomètre à l'hélium mesure la quantité ou le volume de gaz déplacé en appliquant la loi de Mariotte :

$$V_{\text{échantillon}} = \frac{V_{\text{cellule}} - V_{\text{expansion}}}{\frac{P_{r1} - P_{r2}}{P_{r2} - P_{ra}} - 1} \quad [3.5]$$

avec les notations suivantes :
$P_{r1}$ : Pression de la chambre contenant l'échantillon ;
$P_{r2}$ : Pression de la chambre d'expansion ;
$P_{ra}$ : Pression ambiante.

### *3.2.1.6. Limites d'Atterberg*

***Définition***

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géomécaniques qui définissent la plasticité d'un sol, d'un sédiment ou d'un matériau donné : $w_L$, $w_p$, $w_R$ sont respectivement la limite de liquidité, la limite de plasticité et la limite de retrait. Ils permettent de déterminer la consistance d'un sol, voir figure 3-3.

- État solide : état dans lequel le sol, le sédiment ou le matériau donné, présente un comportement d'un solide. Dans cet état, l'application d'un effort sur le sol n'entraîne que de faibles déformations.

- État plastique : état dans lequel le sol, le sédiment ou le matériau donné est stable naturellement mais, dès qu'un effort lui est appliqué, il est le siège de déformations importantes, en grande partie non réversibles sans variation notable de volume et sans apparition de fissures. Par trituration il perd sa consistance.

- État liquide : état dans lequel le sol le sédiment ou le matériau donné se comporte comme un liquide. La résistance du sol, du sédiment ou du matériau donné, au cisaillement est nulle et il se répand lorsqu'on le déverse. Les grains du sol, du sédiment ou du matériau donné sont pratiquement séparés par l'eau.

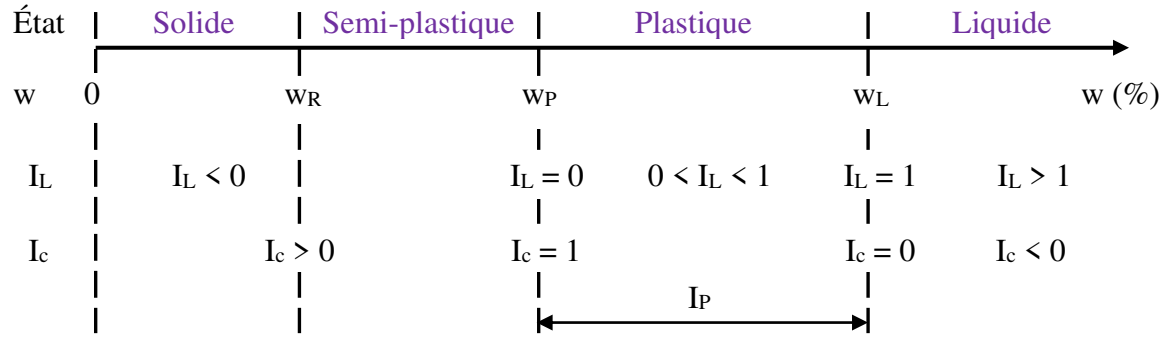



*Figure 3-3. États du sol ou du sédiment en fonction de la teneur en eau (HOLTZ & KOVACS, 1991).*

***Indicateurs de consistance d'un échantillon de sol, de sédiment ou de matériau donné***

Les limites d'Atterberg et les indices d'Atterberg permettent d'indiquer la consistance du sol, du sédiment ou d'un matériau donné :

- Limite de retrait ($w_R$) : teneur en eau d'un sol, d'un sédiment ou d'un matériau donné pour laquelle une réduction de teneur en eau ne cause plus de diminution de volume du sol, du sédiment ou du matériau donné. Elle marque la frontière entre l'état solide avec retrait et l'état solide sans retrait.

- Limite de plasticité ($w_p$) : teneur en eau d'un sol, d'un sédiment ou d'un matériau donné correspondant au point de transition entre les états solide et plastique. Elle trace la frontière entre l'état solide et l'état plastique.

- Limite de liquidité ($w_L$) : teneur en eau d'un sol, d'un sédiment ou d'un matériau donné au point de transition entre les états plastique et liquide. Elle définit la frontière entre l'état plastique et l'état liquide.

- Indice de plasticité ($I_P$) : différence entre les limites de liquidité et de plasticité du sol, du sédiment ou du matériau donné.

$$I_P = w_L - w_P \quad [3.6]$$

- Indice de liquidité ($I_L$) :

$$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P} = \frac{w - w_P}{I_P} \quad [3.7]$$

- Indice de consistance ($I_c$) :

$$Ic = \frac{w_L - w}{w_L - w_P} = \frac{w_L - w}{I_P} \quad [3.8]$$

***Principe des essais***

En suivant la norme française NF P 94-051, deux protocoles peuvent être utilisés pour la détermination des limites de liquidité et plasticité. Pour la réalisation des essais, il faut tout d'abord mettre les sédiments dans une étuve et les tamiser au tamis de 400 µm après 24h.

Le matériel nécessaire pour la détermination de la limite de liquidité comprend une coupelle de Casagrande, un outil à rainurer, une plaque en verre, une pissette d'eau et différents outils pour l'élaboration de la pâte. Pour déterminer la limite de plasticité, sont nécessaires une plaque en verre, un rouleau, une pissette d'eau ainsi que les outils nécessaires pour élaborer la pâte, voir figure 3-4.

**1** : Pissette d'eau
**2** : Plaque en verre
**3** : Rouleau
**4** : Spatule
**5** : Outil à rainurer
**6** : Mortier
**7** : Coupelle de Casagrande

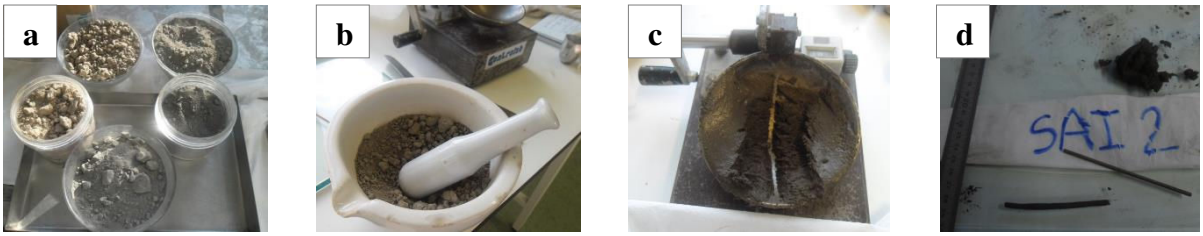
*Figure 3-4. Matériel nécessaire pour la détermination des limites d'Atterberg.*

- Détermination de la limite de liquidité

Le principe à suivre pour cet essai consiste à remplir la coupelle de Casagrande avec une pâte homogène composée d'eau distillée et des sédiments avec une granulométrie inférieure à 400 µm. Ensuite il faut, faire une rainure dans l'axe de la coupelle et finalement compter le nombre de chocs nécessaires pour que la rainure se referme sur 1 cm environ. Le but de cet essai consiste à déterminer la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1 cm de longueur en 25 chocs. Si le nombre de chocs est inférieur à 15, il faut refaire l'essai en séchant la pâte. Par contre si celui-ci est supérieur à 35, il faut répéter l'essai en humidifiant la pâte, voir figure 3-5 a. b. c.

- Détermination de la limite de plasticité

Après l'élaboration de la pâte, mélange d'eau distillée et de sédiments de granulométrie inférieure à 400 µm, voir figure 3-5. a. b. La procédure à suivre est de confectionner à la main et à l'aide d'une plaque en verre un rouleau de 3 mm ± 0.5 mm de diamètre et d'une longueur de 10 cm. La limite de plasticité peut être définie comme étant la teneur en eau en pourcentage d'un rouleau qui se fissure et se brise quand son diamètre atteint 3 mm ± 0.5 mm, voir figure 3-5.d.




*(a) Séchage.* *(b) Préparation du matériau.* *(c) Mesure de $w_L$.* *(d) Mesure de $w_P$.*

*Figure 3-5. Protocole à suivre pour la détermination des limites d'Atterberg.*

### *3.2.1.7. Valeur au bleu de méthylène (VBS)*

#### *Définition*

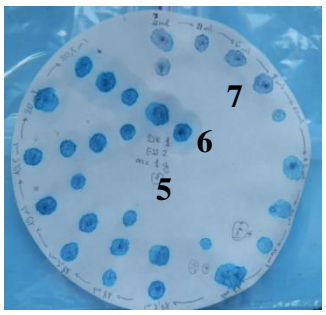
La valeur au bleu de méthylène est un essai en laboratoire qui exprime l'activité et la quantité de la fraction argileuse contenue dans un échantillon. L'objectif de cet essai est de mesurer la capacité d'absorption du bleu de méthylène *i.e.* la quantité nécessaire de bleu de méthylène pour recouvrir la surface des particules argileuses présentes dans 100 g de sol.

#### *Principe de l'essai*

En suivant la norme française NF P94-068, l'essai au bleu de méthylène consiste à injecter successivement des gouttes de solution de bleu de méthylène dans une suspension de sol ou sédiment maintenue en agitation (avec une vitesse de 400 tr/min ± 100 tr/min).

Dans cet essai, une goutte de suspension de sol ou de sédiment est prélevée périodiquement et déposée sur un papier chromatographique où une série de gouttes de solution de bleu de méthylène (5 $cm^3$ à 10 $cm^3$) lui sont injectées, voir figures 3-6.a et 3-6.b. L'essai continue jusqu'à ce qu'une auréole périphérique bleu clair apparaisse (résultat positif), voir figure 3-6.c. À partir de ce moment, cinq tâches de suspension de sol sont effectuées, sans ajout de solution, avec une fréquence d'une minute. Si la cinquième tâche est positive, l'essai est arrêté, sinon, il faut procéder à de nouvelles injections de quantité moindre de solution (2 $cm^3$ à 5 $cm^3$).

*(a) Prélèvement d'une goutte de suspension, (PORTET et al., 2011).*




*(b) Exemple d'essai au VBS pour les sédiments de Dunkerque (M2C).*

**1** : Bleu de méthylène
**2** : Agitateur
**3** : Tige
**4** : Suspension de sol et solution de bleu
**5** : Papier chromatographique
**6** : Résultat positif
**7** : Résultat négatif

*(c) Résultat positif (gauche) et négatif (droite).*

*Figure 3-6. Protocole et exemple d'essai au bleu de méthylène.*

La valeur au bleu de méthylène peut être calculée en utilisant la formule suivante. Selon la valeur obtenue, les sols ou sédiments peuvent être classifiés dans les catégories proposées dans la figure 3-7.

$$VBS = \frac{B}{m_0} \cdot 100 \qquad [3.9]$$

avec les notations suivantes :
VBS : Valeur au bleu de méthylène (g/100 g) ;
B : Masse de bleu introduite dans le bêcher (g) ;
$m_0$ : Masse sèche de la prise d'essai (g).

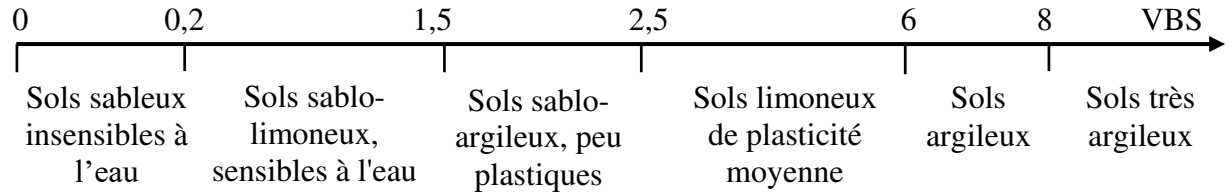



*Figure 3-7. Catégories de sols en fonction de la valeur de VBS, (GTR, 2000).*

### *3.2.1.8. Matière organique (MO)*

#### *Définition*

La matière organique d'un échantillon de sol (MO) est la matière composée d'organismes vivants, de résidus de végétaux, d'animaux et de produits en décomposition. Soulignons que la matière organique est un paramètre essentiel à déterminer puisqu'elle peut modifier considérablement le comportement des sédiments. Les sédiments avec des teneurs en matière organique élevées amènent des effets perturbateurs dans les stabilisations aux liants hydrauliques. Ils posent aussi des problèmes pour la mise en remblai sans traitement (LEVACHER et al., 2008).

#### *Principe de l'essai*

Plusieurs protocoles peuvent être utilisés pour la détermination de la matière organique. En suivant la norme française NF XP P94-047, la teneur en matière organique des sédiments peut être déterminée en calcinant les échantillons à 450°C pendant 4h. La détermination de la matière organique a été réalisée au sein du laboratoire M2C. Pour ce laboratoire, le choix s'est porté sur la norme NF XP P94-047.

### *3.2.1.9. Perte au Feu (PF)*

#### *Définition*

La Perte au Feu (PF) est la perte de masse d'un échantillon de sol ou sédiment qui résulte de la transformation du carbonate de calcium en chaux sous l'action de la chaleur. La destruction

des matières organiques, la décarbonatation et la perte de l'eau de constitution des argiles sont les principaux phénomènes intervenant dans la perte au feu. La norme française NF X31-419 propose de réaliser la perte au feu des échantillons à 550°C sur une durée de 7h.

***Principe de l'essai***

La procédure à suivre pour la détermination de la perte au feu est détaillée dans la norme française NF EN 15169. Elle peut être calculée en suivant l'équation 3.10 :

$$\text{PF}\ (\%) = \frac{\text{masse avant calcination} - \text{masse après calcination}}{\text{masse avant calcination}} \cdot 100 \qquad [3.10]$$

### *3.2.2. Caractérisation minéralogique*

#### *3.2.2.1. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)*

***Définition***

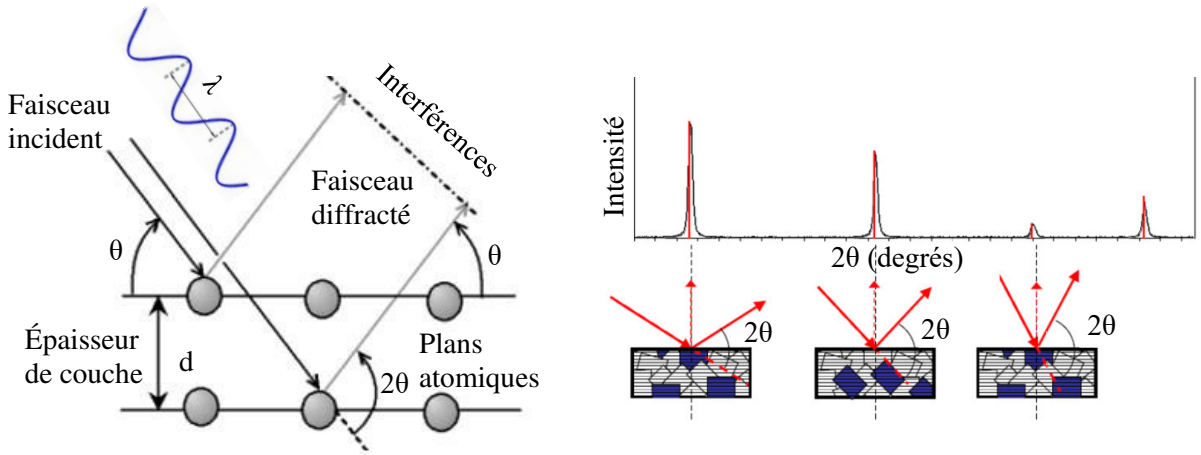
L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) est une technique d'analyse qui permet d'identifier les « phases cristallines » des minéraux qui composent les sédiments. Elle permet d'obtenir des informations physiques sur les cristaux, tels que leur taille et leur orientation. Une « phase cristalline » peut être définie comme une forme cristallographique qui a un composé chimique avec les mêmes caractéristiques physiques et chimiques.

***Principe de l'essai***

L'analyse par diffraction des rayons X consiste à envoyer des rayons X sur un échantillon de sédiment sous la forme d'une poudre ou d'une pastille solide plate. En même temps, un détecteur fait le tour de l'échantillon et il mesure l'intensité des rayons X selon la direction, voir figure 3-8.b. Cet essai est basé sur la loi de Bragg, voir figure 3-8.a. et équation [3.11] :

$$2 \cdot d \cdot \sin\theta_1 = n_1 \cdot \lambda \qquad [3.11]$$

avec les notations suivantes :
$\lambda$ : longueur d'onde des rayons X ;
d : distance entre deux plans parallèles successifs du réseau cristallin ;
$n_1$ : ordre de diffraction ;
$\theta_1$ : angle de diffraction entre le faisceau incident et le réseau de plans.




*(a) Loi de Bragg, (deuns.chez.com/sciences/drx/drx4.html).*

*(b) Diffractogramme sur poudre d'échantillons microcristallins, (HULIEN et al, 2015).*

*Figure 3-8. Principe et exemple de l'analyse par diffraction des rayons X (DRX).*

### *3.2.2.2. Analyse chimique des éléments majeurs*

#### *Définition*

Les éléments majeurs peuvent être définis comme les éléments chimiques qui composent un échantillon de sol ou sédiment. L'analyse chimique des éléments majeurs a comme objectif la détermination des éléments qui composent les sédiments. Cette analyse peut être réalisée par spectrométrie d'émission atomique à plasma inductif, du type ICP-AES Varian, après fusion alcaline ou par micro-spectrométrie de fluorescence X. Cette analyse permet à la fois de connaitre la nature des éléments majeurs et leur concentration massique.

#### *Principe de l'essai*

L'échantillon de sol ou de sédiment est placé sous un faisceau de rayons X. Ces rayons bombardent les atomes constituant l'échantillon afin de les déstabiliser. Dans cet état, les atomes libèrent de l'énergie, sous forme de photons X (fluorescence X), avec une longueur d'onde propre. La composition chimique des échantillons peut être déduite en analysant ce spectre (THIRION-MERLE, 2014).

### *3.2.2.3. Teneur en carbonates ($CaCO_3$)*

#### *Définition*

La teneur en carbonates est le pourcentage de carbonate de calcium ($CaCO_3$) que contiennent les sédiments.

***Principe de l'essai***

Le calcimètre Bernard permet de connaitre la quantité de carbonate de calcium au sein des sédiments selon la norme NF P94-048. La teneur en carbonates prend une réelle importance puisque le carbonate de calcium est le composé majeur des calcaires.

### *3.2.3. Caractérisation hydromécanique*

La caractérisation hydromécanique des sédiments comprend pour nos travaux les études de décantation et de consolidation. Ces essais sont destinés à déterminer les propriétés hydrodynamiques des sédiments.

#### *3.2.3.1. Étude de la décantation*

***Définition***

Les essais de décantation consistent à déterminer le tassement sous poids propre du sédiment. Le tassement des sédiments varie en fonction des propriétés du sédiment et des conditions initiales. Des essais en laboratoire sont menés en faisant varier ces conditions initiales, en particulier la concentration du sédiment. L'essai le plus utilisé est « l'essai de décantation en colonnes ».

***Principe de l'essai***

L'essai de décantation en colonnes consiste à mesurer le tassement d'un mélange homogène de sédiments, de concentration initiale connue $C_o$ dans un tube transparent de diamètre D et de hauteur initiale $H_0$, voir figure 3-9.

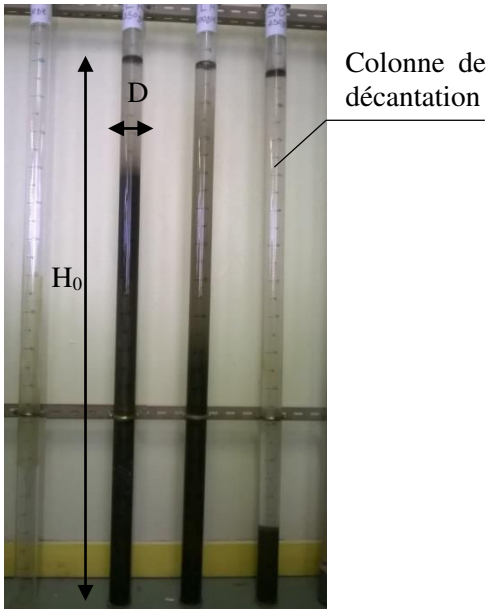
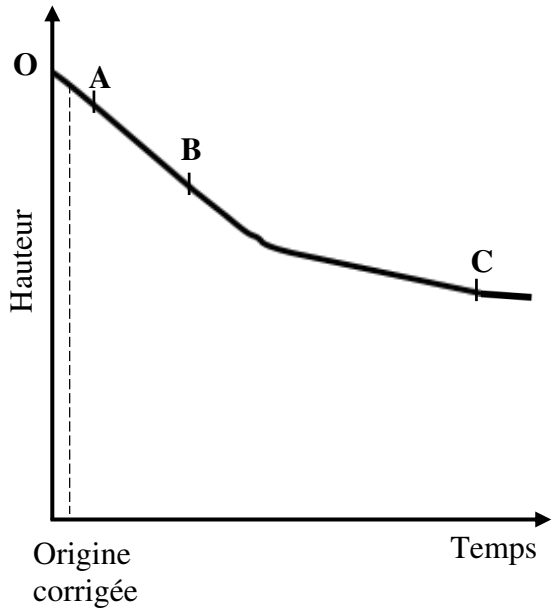



*Figure 3-9. Exemple d'un essai de décantation, (BERKAINE, 2016).*

Par ailleurs, cet essai permet de déterminer la conductivité hydraulique ou perméabilité des sédiments k. Ce paramètre établit l'aptitude d'un sédiment à se laisser traverser par un fluide. Dans le cas de vases molles, k peut être déduite avec l'équation suivante selon (SANCHEZ, 2000) et l'équation 3.12. En suivant la méthodologie décrite dans les études réalisées par SANCHEZ et GROVEL (1993), une relation peut être établie entre k, la concentration C et la masse volumique des particules solides $\rho_s$, voir figure 3-10 et équation 3.12.

$$k = A_1 \cdot \exp\left(-A_2 \cdot \frac{C}{\rho_s}\right) \qquad [3.12]$$

avec les notations suivantes :
k : Conductivité hydraulique ou perméabilité (m/s) ;
$A_1$ (m/s) et $A_2$ (adimensionnel) : Paramètres propres à chaque vase ou sédiment fin ;
C : Concentration (kg/m$^3$) ;
$\rho_s$ : Masse volumique des particules solides (kg/m$^3$).




**O-A** : la vitesse en surface augmente graduellement vers une vitesse limite associée à la concentration initiale $C_0$.

**A-B** : la concentration en surface reste sensiblement constante. La courbe de tassement est une droite, sa pente donne la vitesse de tassement associée à $C_0$.

**B-C** : la pente de la courbe de tassement diminue progressivement.

**Au-delà de C** : discontinuité de la pente de la courbe de tassement due à la présence des contraintes effectives sur toute l'épaisseur de la couche de vase.

*Figure 3-10. Représentation d'une courbe de tassement, (SANCHEZ & GROVEL, 1993).*

Selon la perméabilité k, le tableau suivant permet de classifier le sol ou sédiment et déterminer ses propretés relatives au drainage, voir tableau 3-1.

*Tableau 3-1. Relation entre l'ordre de grandeur du coefficient de perméabilité, les caractéristiques de drainage et le type de sol, (HOLTZ & KOVACS, 1991).*

| | Coefficient de perméabilité (m/s) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $10^{-1}$ | $10^{-2}$ | $10^{-3}$ | $10^{-4}$ | $10^{-5}$ | $10^{-6}$ | $10^{-7}$ | $10^{-8}$ | $10^{-9}$ | $10^{-10}$ | $10^{-11}$ |
| **Propriétés relatives au drainage** | | Bon drainage | | | | Faible drainage | | Presque imperméable | | | |
| **Types de sol** | Graviers propres | Sables propres, mélanges de sables et de graviers propres | | | Sables très fins, limons organiques, mélanges de sables, de limons et d'argile, dépôts d'argile stratifiés etc. | | | Sols « imperméables » comme les argiles homogènes sous la zone d'altération | | | |

### *3.2.3.2. Étude de la consolidation*

#### *Définition*

Si un sol saturé est soumis à des sollicitations importantes comme des chargements verticaux, une déformation verticale appelée « tassement » va être générée. Ceci s'explique par la réorganisation des particules solides provoquée par l'expulsion de l'eau. L'essai œdométrique est utilisé pour simuler ces déformations verticales en laboratoire en fournissant des valeurs sur les indices suivants : indice de compression ($C_{co}$), indice de gonflement ($C_s$) et indice de fluage ($C_a$), et le coefficient de consolidation ($C_v$). Tous ces indices ou coefficients sont nécessaires au calcul du tassement de couches réalisées à partir de sols ou de sédiments (remblais).

#### *Principe de l'essai*

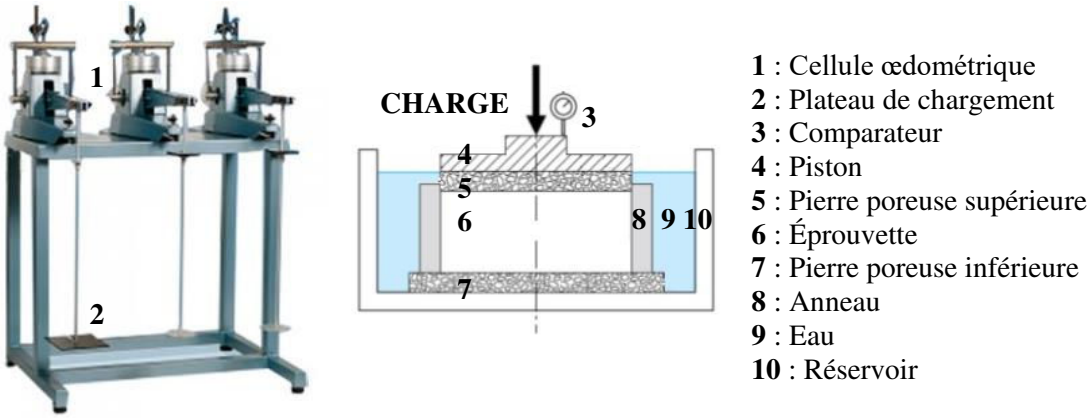
L'essai œdométrique permet d'obtenir deux types de courbes afin d'étudier le tassement du sol :

- La courbe de consolidation qui donne le tassement de l'échantillon du sol en fonction du temps sous application d'une contrainte constante.

- La courbe de compressibilité qui indique la variation de l'indice des vides en fonction du logarithme de la contrainte appliquée.

Le principe de l'essai œdométrique est établi par la norme NF XP P94-090-1. La procédure à suivre est la suivante : un échantillon de sol est mis dans la cellule œdométrique où une force verticale est appliquée sur cet échantillon à l'aide d'un piston. La cellule doit rester saturée pendant la durée l'essai, voir figure 3-11.

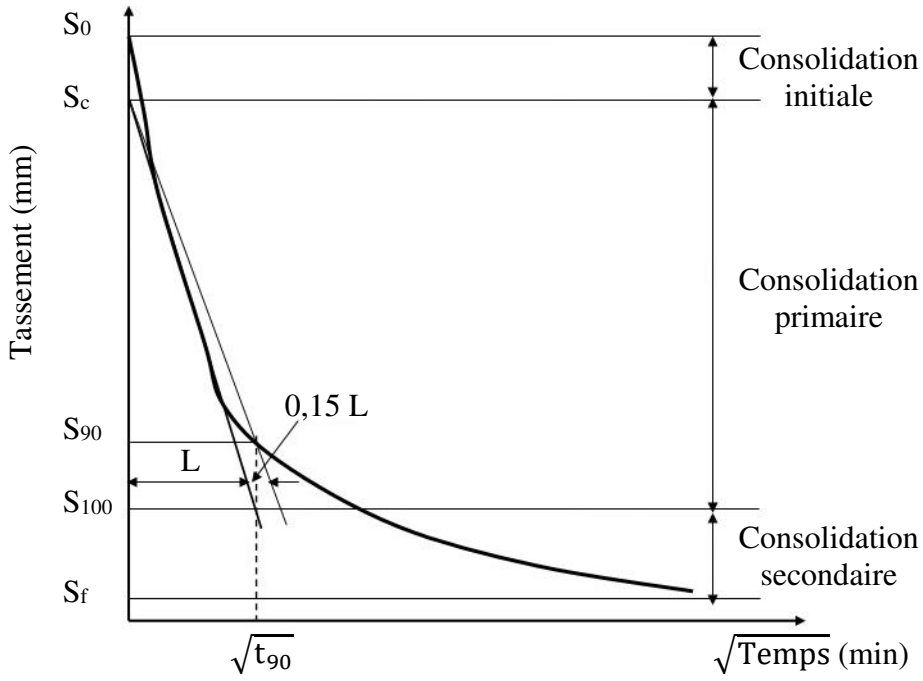
Au cours de cet essai, une succession de charges sont appliquées par paliers en suivant un protocole défini. Ces charges provoquent des variations de hauteur de l'échantillon qui sont mesurées à l'aide d'un comparateur.




*(a) Appareil œdométrique.* *(b) Cellule œdométrique.*

*Figure 3-11 . Vue générale de l'œdomètre, (BELARBI & RACHEDI, 2017).*

Soulignons que la courbe de consolidation a été analysée en suivant la méthode de Taylor. Cette méthode est la plus recommandée car elle représente jusqu'à 60% de la consolidation, voir figure 3-12. La figure 3-13 donne le comportement des sols selon leur état de consolidation.




**Notes :**
$S_t$ : Tassement au temps t ;
$S_c$ : Tassement de consolidation ;
$S_f$ : Tassement de fluage.

*Figure 3-12. Détermination de la valeur de $C_v$ par la méthode de la racine carrée mise au point par Taylor, (LI, 2011)*

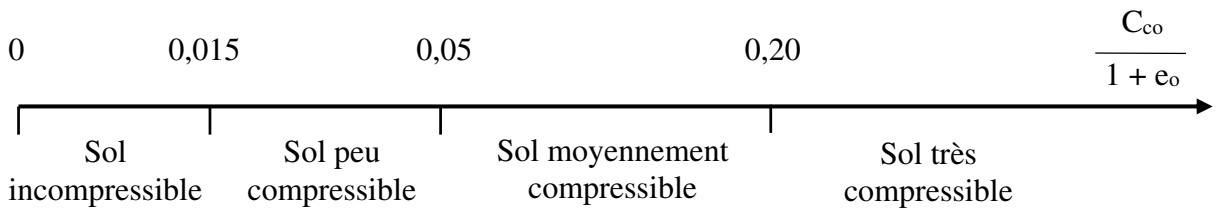



*Figure 3-13. Comportement des sols selon leur état de consolidation, (PHILIPPONNANT & HUBERT, 2000).*

## *3.3. LES SÉDIMENTS DE BARRAGE OU DE RETENUE*

Les sédiments de barrage qui font l'objet d'une partie des travaux de thèse ont été prélevés depuis sept retenues hydroélectriques d'EDF. Le choix de ces barrages a été sélectionné par cette entreprise afin que ces sédiments soient représentatifs de l'ensemble des barrages ou retenues. Ces sédiments sont répartis sur quatre zones du territoire français, voir figure 3-14.

### *3.3.1. Lieux de prélèvements et codification*

#### *Sédiments de Bretagne : St-Aignan « BR-SAI »*

Les sédiments de St-Aignan proviennent du barrage de Guerlédan. Cette retenue est située sur les communes de St-Aignan et Mûr-de-Bretagne dans la région de Bretagne. La campagne de prélèvement a été effectuée en mars de 2015 par l'entreprise ATHOS environnement. Ces sédiments ont été prélevés dans la partie aval de la retenue à une profondeur de 2 m. La technique utilisée a été une benne Van Veen (FOURVEL, 2018). Un bidon de 25 kg de sédiments de teneur en eau d'environ 10% a été livré au laboratoire M2C en décembre de 2015.

#### *Sédiments des Alpes*

Quatre types de sédiments alpins ont été étudiés. Ils sont en provenance des barrages de Flumet, Clapiers, Isère et Serre-Ponçon.

- **Flumet « AL-FLU »** : L'origine de cet échantillon est le bassin du Flumet, situé sur la commune de Saint-Pierre-d'Allevardet dans la région d'Auvergne-Rhône-Alpes. Ce sédiment a été prélevé dans la partie aval de la retenue en aout de 2015 par l'entreprise ENERGIS NAUTIC SERVICES et sous la supervision de l'entreprise IDRA Ingénierie. Les opérations de prélèvement ont été réalisées à l'aide de deux engins amphibies de type Mobitrac équipés d'une micro-pelle. Ce sédiment a été conditionné à la main dans des bidons, (FOURVEL, 2018). Un bidon de 25 kg de sédiments de teneur en eau faible environ 10% a été fourni au laboratoire M2C en décembre de 2015.

- **Clapiers « AL-CLA »** : Ces sédiments de Clapiers sont de la vallée de la Romanche. Ils sont localisés sur les communes du Freney-d'Oisans et Mizoën dans la région d'Auvergne-Rhône-Alpes. Ils ont été prélevés dans la partie aval de la retenue sous la direction des entreprises ENERGIS NAUTIC SERVICES et IDRA Ingénierie en janvier 2015. Le prélèvement a été réalisé grâce à la combinaison de deux engins amphibies de type Mobitrac équipés d'une micro-pelle et d'un conteneur. Ce sédiment a été conditionné à la main dans des bidons, (FOURVEL, 2018). Une quantité de 26 kg de sédiments d'environ 10% de teneur en eau a été expédié au laboratoire M2C en décembre de 2015.

- **Isère « AL-ISE »** : Les sédiments de la rivière Isère, ont été prélevés au barrage de Sautet. Ce barrage est situé en Isère dans la région d'Auvergne-Rhône-Alpes.

Les opérations de prélèvement ont été réalisées en juin de 2012 à l'aide d'une barge équipée d'une benne preneuse hydraulique. L'extraction a été effectuée à 50 mètres sous la surface du plan d'eau. Selon les spécialistes d'EDF, cette zone permet d'avoir des sédiments homogènes et représentatifs de ce barrage, (ANGER, 2014). Ils sont été fournis au laboratoire M2C en 2012, ils ont été conditionnés en bidons de 60L.

- **Serre-Ponçon « AL-SPO »** : Les échantillons de Serre-Ponçon ont été prélevés du lac artificiel situé au sud des Alpes françaises à la limite des départements des Hautes-Alpes et des Alpes-de-Haute-Provence dans la région de Provence-Alpes-Côte d'Azur. Ce sédiment a été prélevé dans la partie amont de la retenue en mars 2015. Les opérations de prélèvement ont été réalisées grâce à la combinaison d'une pelleteuse et d'un camion-benne routier. L'épaisseur de sédiments fins était comprise entre 1 m à 1.5 m, (FOURVEL, 2018). Un bidon de 30 kg de sédiments de Serre-Ponçon avec une teneur en eau d'environ 15% a été envoyé au laboratoire M2C en décembre de 2015.

***Sédiments de Nouvelle-Aquitaine : Artaude « NA-ART »***

Les échantillons de Nouvelle-Aquitaine sont originaires de la retenue d'Artaude, située sur la commune de Saint-Étienne-la-Geneste dans la Corrèze, dans la région de Nouvelle-Aquitaine. Ces sédiments ont été prélevés en novembre 2016. Cette action a été réalisée en bateau à l'aide d'une benne. Ces matériaux ont un important dépôt de feuilles, rendant leur carottage impossible. Environ 10 kg de sédiments avec une teneur initiale voisine à 20% ont été livrés au laboratoire M2C en décembre de 2016.

***Sédiments du Grand Est : Rhin « GE-RHI »***

Les échantillons du Grand Est proviennent du barrage de Marckolsheim, retenue située dans la commune du même nom, dans la région de Grand Est. Ces sédiments ont été prélevés en septembre 2012 à l'aide d'une embarcation motorisée et d'une benne type Van Veen. Ils ont été prélevés dans une zone de forte sédimentation. La profondeur de ces extractions était comprise entre 1,3 m et 9,0 m sous la surface du plan d'eau, (ANGER, 2014). Ils sont été expédiés au laboratoire en 2012, ils ont été conditionnés en bidons de 60L.

Les sept types de sédiments de barrage, sont codifiés par les deux premières lettres des régions où ils ont été prélevés et les trois premières lettres de leur lieu d'origine : « BR-SAI », « AL-FLU », « AL-CLA », « AL-ISE », « AL-SPO », « NA-ART » et « GE-RHI ».

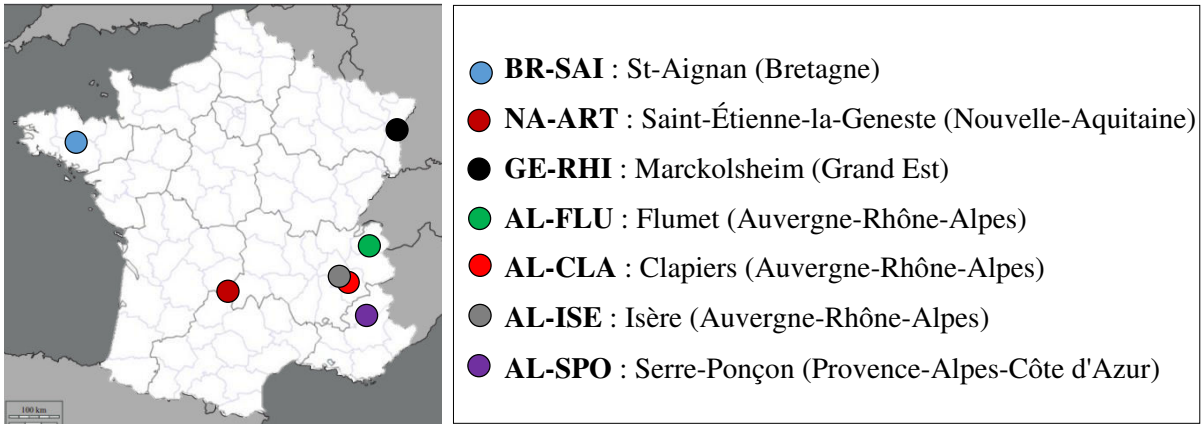



*Figure 3-14. Répartition géographique des sites de prélèvement des sédiments de barrage.*

### *3.3.2. Contexte géologique général*

Les sédiments de barrage peuvent être classés géologiquement. Les lieux de prélèvements des sédiments peuvent apporter une première approximation à leur lithologie, voir figure 3-15. Comme ils proviennent de différents cours d'eau, la liaison entre leur lithologie et leur minéralogie n'est pas si précise.

#### *Sédiments de Bretagne*

Les sédiments de St-Aignan font partie du massif armoricain. Ils sont situés dans le domaine centre de ce massif caractérisé par des roches très anciennes datées du Précambrien et du Paléozoïque (roches métamorphiques, sédimentaires et magmatiques).

#### *Sédiments des Alpes*

Les sédiments alpins font partie du massif des Alpes. Cette zone est composée principalement des roches sédimentaires du Mésozoïque et du Cénozoïque. Les sédiments provenant du barrage de Serre-Ponçon sont constitués par l'érosion des roches sédimentaires Mésozoïque.

#### *Sédiments de Nouvelle-Aquitaine*

Les sédiments de la retenue d'Artaude « NA-ART » font partie du Massif central. Ce massif est composé d'une marqueterie de roches paléozoïques.

### *Sédiments du Grand Est*

Les sédiments du Rhin font partie de la plaine d'Alsace. Cette zone est fortement marquée par une forte couverture de roches sédimentaires datées du Tertiaire.

**LÉGENDE**

**SÉDIMENTS**

- **BR-SAI** : St-Aignan (Bretagne)
- **NA-ART** : Saint-Étienne-la-Geneste (Nouvelle-Aquitaine)
- **GE-RHI** : Marckolsheim (Grand Est)
- **AL-FLU** : Flumet (Auvergne-Rhône-Alpes)
- **AL-CLA** : Clapiers (Auvergne-Rhône-Alpes)
- **AL-ISE** : Isère (Auvergne-Rhône-Alpes)
- **AL-SPO** : Serre-Ponçon (Provence-Alpes-Côte d'Azur)

**CLASSIFICATION DES ROCHES**

ROCHES SÉDIMENTAIRES

Quaternaire · Tertiaire · Crétacé · Jurassique · Permien/Trias · Paléozoïque

ROCHES PLUTONIQUES ET MÉTAMORPHIQUES

Granites · Roches métamorphiques · Roches infra paléozoïques

ROCHES VOLCANIQUES

Volcanisme tertiaire

*Figure 3-15. Contexte général de la géologie des sédiments de barrage, (d'après la carte du BRGM, 2017).*

### *3.3.3. Analyse visuelle et descriptive des sédiments de barrage*

#### *Sédiments de Bretagne : St-Aignan « BR-SAI »*

Les sédiments de St-Aignan sont fins. Ils présentent un aspect hétérogène avec une couleur marron. Une importante présence de débris végétaux et de petits cailloux peut être observée sur la figure 3-16.

***Sédiments des Alpes***

Les sédiments « AL-SPO » et « AL-CLA » sont de couleur noire. Les sédiments « AL-FLU » et « AL-ISE » présentent un aspect fin et homogène, avec une couleur gris clair. Des débris végétaux peuvent être observés dans tous les sédiments, voir figure 3-16.

***Sédiments de Nouvelle-Aquitaine***

Les sédiments « NA-ART » sont des sables grossiers fortement caractérisés par des hauts pourcentages de grains de quartz et de feldspaths et de paillettes de mica, voir figure 3-16. Les débris végétaux dans ces sédiments semblent faibles.

***Sédiments du Grand Est***

Les sédiments du Rhin présentent un aspect hétérogène de couleur marron. La présence des débris végétaux dans ces sédiments est élevée, voir figure 3-16.

*(a) Sédiments de barrage avant tamisage.*

*(b) Sédiments de barrage après tamisage à 2 mm.*

*Figure 3-16. Aspect visuel des sédiments de barrage.*

### *3.3.4. Caractérisation des sédiments*

Les sédiments ont été caractérisés en suivant des aspects physico-chimiques, minéralogiques et hydromécaniques. Le tableau suivant rassemble les essais réalisés ainsi que les laboratoires où ils ont été effectués et où cette information a été obtenue.

*Tableau 3-2. Récapitulatif des essais réalisés et sources utilisées.*

| Essai | AL-FLU | AL-SPO | AL-CLA | AL-ISE | GE-RHI | BR-SAI | NA-ART |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Analyse granulométrique | i | i | i | i | i | i | i |
| Texture | i | i | i | i | i | i | i |
| Surface spécifique (BET) | ii<br>vi | ii<br>vi | ii<br>vi | ii<br>vi | ii<br>vi | ii<br>vi | ii<br>vi |
| Surface spécifique (Blaine) | vi | vi | vi | vi | vi | vi | vi |
| Masse volumique des particules solides | iii<br>vi | iii<br>vi | iii<br>vi | iii<br>vi | iii<br>vi | iii<br>vi | iii<br>vi |
| Limites d'Atterberg | i | i | i | i | i | i | i |
| Valeur au bleu de méthylène | iv | iv | iv | v | v | iv | iv |
| Teneur en matière organique | i | i | i | i | i | i | i |
| Analyse chimique des éléments majeurs | iv | iv | iv | v | v | iv | - |
| Minéralogie (DRX) | iv | iv | iv | v | v | iv | - |
| Teneur en $CaCO_3$ | i | i | i | i | i | i | i |
| Décantation | i | i | i | v | v | i | - |
| Tassement | i | i | i | v | v | i | - |

***Note** : i = M2C ; ii = IFSTTAR ; iii = ESITC ; iv = EDF ; v = ANGER (2014) ; vi = FAURE (2017).*

### *3.3.4.1. Caractérisation physico-chimique*

#### *Granulométrie*

Tous les sédiments, à l'exception des sédiments d'Artaude contiennent une importante quantité de particules fines. Les sédiments bretons dénommés « BR-SAI » et ceux du Rhin « GE-RHI » sont des sables fins. « AL-FLU », « AL-SPO », « AL-CLA » et « AL-ISE » sont principalement composés de limons fins, voir figure 3-17 et tableau 3-3. Les sédiments bretons, alpins et du Rhin présentent une granulométrie « bien étalée ». En revanche le sédiment « NA-ART » a une taille de grains plus serrée ou uniforme. Ce dernier sédiment possède une courbe granulométrique « bien graduée ». Les autres sédiments ont des courbes « mal graduées ».

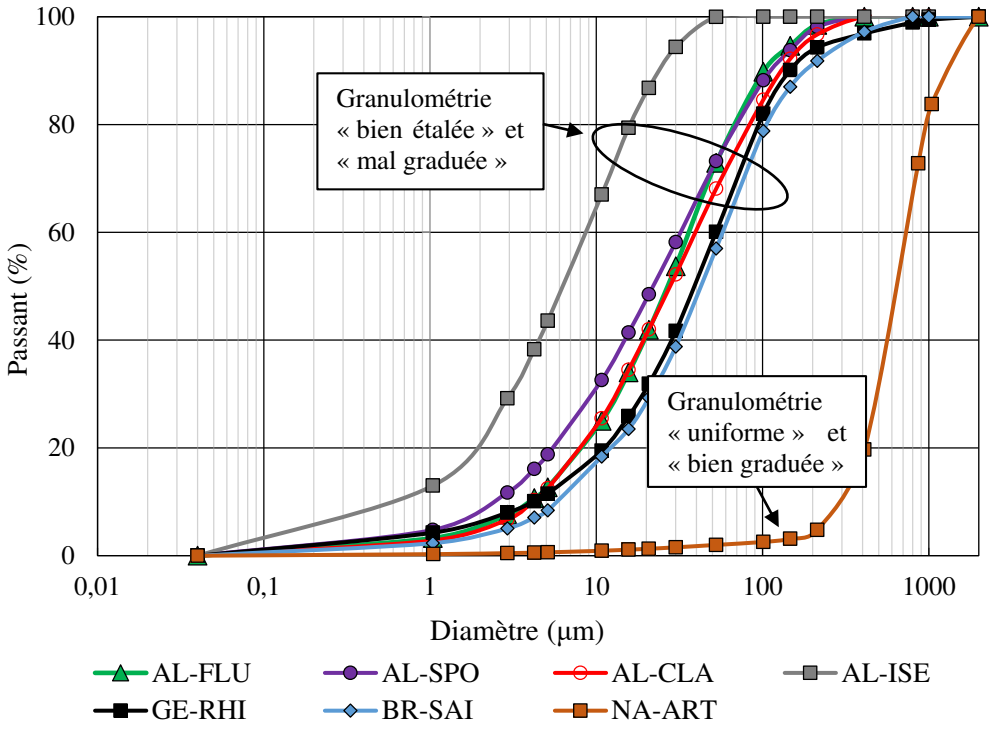



*Figure 3-17. Distribution granulométrique des sédiments de barrage.*

*Tableau 3-3. Récapitulatif des paramètres granulométriques des sédiments de barrage.*

| | AL-FLU | AL-SPO | AL-CLA | AL-ISE | GE-RHI | BR-SAI | NA-ART |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Argiles (%) | 5,00 | 8,00 | 4,80 | 22,00 | 6,38 | 3,75 | 0,41 |
| L. fins (%) | 35,00 | 40,00 | 35,20 | 63,90 | 24,72 | 24,75 | 0,86 |
| L. grossiers (%) | 30,00 | 24,00 | 27,00 | 14,00 | 27,20 | 26,00 | 0,70 |
| S. fins (%) | 28,00 | 25,50 | 29,00 | 0,10 | 35,50 | 35,50 | 2,40 |
| S. grossiers (%) | 2,00 | 2,50 | 4,00 | 0,00 | 6,20 | 10,00 | 95,63 |
| $d_{10}$ (µm) | 4,00 | 2,50 | 4,00 | 0,60 | 0,45 | 6,00 | 311,80 |
| $d_{30}$ (µm) | 14,00 | 10,00 | 13,00 | 2,10 | 10,90 | 20,00 | 488,39 |
| $d_{50}$ (µm) | 26,00 | 23,00 | 27,00 | 6,10 | 39,90 | 42,00 | 650,00 |
| $d_{60}$ (µm) | 36,00 | 31,00 | 39,00 | 8,80 | 55,00 | 58,00 | 772,90 |
| Teneur en fines | 84,60 | 82,80 | 78,60 | 100,00 | 74,60 | 71,20 | 2,66 |
| $C_u$ | 9,00 | 12,50 | 9,75 | 11,30 | 13,22 | 9,66 | 2,48 |
| $C_c$ | 1,36 | 1,29 | 1,08 | 0,64 | 0,52 | 1,14 | 0,99 |

***Note** : « L » signifie Limons et « S » signifie Sables.*

### *Texture*

En ce qui concerne la texture, les sédiments alpins, bretons et du Rhin disposent de textures « limoneuses fines ». Ceci implique qu'ils sont doux au toucher et se fragmentent

facilement en mottes. Soulignons que les sédiments « GE-RHI » et « BR-SAI » ont une texture plus sableuse que les sédiments alpins.

Les sédiments de l'Artaude possèdent une texture « sableuse », cela signifie que les particules qui composent ce matériau sont bien plus grossières en taille et espacées. Ils offrent une capacité drainante plus importante. Leur texture est rugueuse leur conférant une structure interne assez instable puisqu'ils ne sont pas cohésifs, voir figure 3-18.

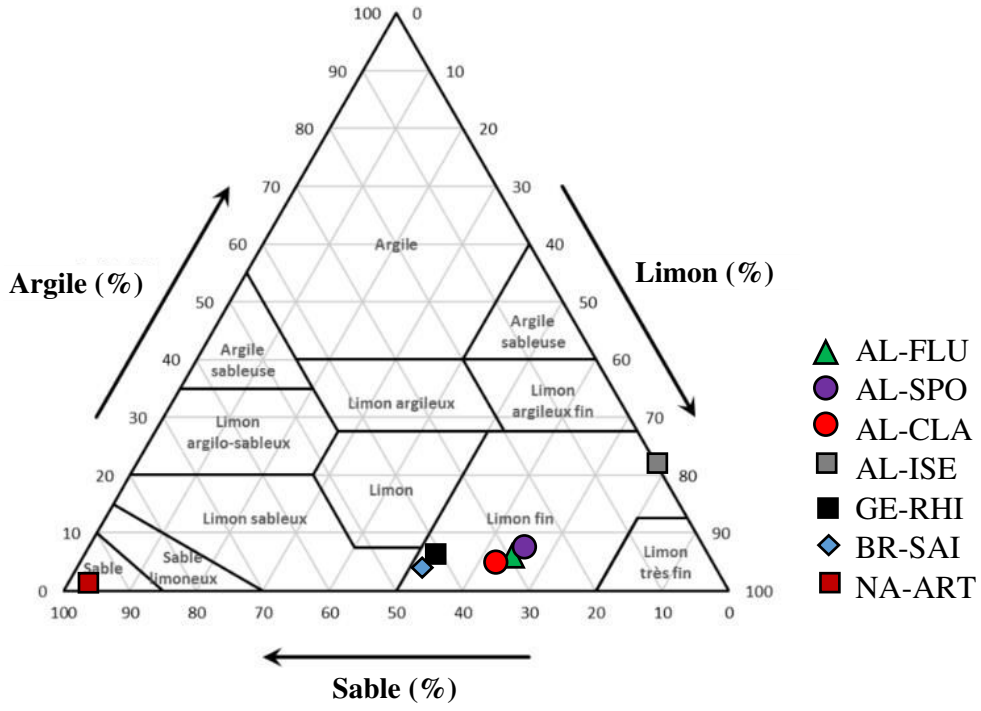



*Figure 3-18. Texture des sédiments de barrage.*

### *Surface spécifique*

Les valeurs mesurées de la surface spécifique des sédiments de barrage sont récapitulées dans le tableau 3-4. Les valeurs obtenues par la technique de Blaine sont comprises entre 0,49 et 1,25 m²/g et celles acquises par la méthode BET varient entre 0,76 et 11,94 m²/g. Le sédiment « AL-ISE » a la surface spécifique la plus importante ayant le pourcentage de particules fines le plus élevé.

La différence d'ordre de grandeur entre la méthode BET et celle de Blaine peut être liée à la surface définie dans chaque méthodologie. La technique BET englobe toutes les surfaces y compris la surface des pores et celle des microfissures qui peuvent être adsorbées par l'azote $N_2$. Tandis que la méthodologie Blaine englobe seulement les surfaces des pores puisqu'elles contribuent à l'écoulement de l'air au travers du lit de particules (FAURE, 2017).

*Tableau 3-4. Surface spécifique des sédiments de barrage.*

| Méthode | AL-FLU | AL-SPO | AL-CLA | AL-ISE | GE-RHI | BR-SAI | NA-ART |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Blaine(1) ($m^2/g$)** | 0,57 | 0,75 | - | 1,25 | 0,49 | 0,76 | - |
| **BET(1) ($m^2/g$)** | 5,88 | 5,17 | - | 11,73 | 7,82 | 8,92 | - |
| **BET ($m^2/g$)** | 2,76 | 4,62 | 2,38 | 11,94 | 5,17 | 8,17 | 0,76 |

***Note** : (1) d'après FAURE (2017).*

### *Masse volumique des particules solides*

Le tableau 3-5 rassemble les résultats des masses volumiques qui ont été déterminées à l'aide du pycnomètre à l'hélium. Rappelons que la masse volumique des particules solides moyennes pour la plupart des sols composés majoritairement de quartz est de 2,65 $g/cm^3$ puisqu'il est le minéral le plus commun (MONNIER, 1994) et celle-ci peut varier selon la composition minéralogique des sédiments. La densité du quartz, de la calcite et de la dolomite sont quelques exemples qui peuvent être cités : le quartz a une masse volumique de 2,65 $g/cm^3$, celle de la calcite est de 2,71 $g/cm^3$ et celle de la dolomite de 2,86 $g/cm^3$ (ANTHONY et al., 2003). Selon SCHLOSSER (2003) la plupart des sols ont des masses volumiques des particules comprises entre 2,60 et 2,80 $g/cm^3$, qui semblent correspondre aux sédiments de barrage étudiés, exception faite du sédiment « BR-SAI ». Les sédiments étudiés ont des masses volumiques des particules solides comprises entre 2,50 et 2,77 $g/cm^3$. Ces résultats concordent bien avec ceux de FAURE (2017). La faible masse volumique des particules solides des sédiments bretons peut être liée aux pourcentages élevés de la matière organique et aussi à leur composition minéralogique. La présence de la matière organique fait diminuer la masse volumique des particules solides, voir figure 3-19.

*Tableau 3-5. Masse volumique des particules solides des sédiments de barrage.*

| | AL-FLU | AL-SPO | AL-CLA | AL-ISE | GE-RHI | BR-SAI | NA-ART |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Masse volumique des particules ($g/cm^3$)** | 2,76 | 2,74 | 2,77 | 2,72 | 2,60 | 2,50 | 2,63 |
| **Masse volumique des particules (1) ($g/cm^3$)** | 2,79 | 2,79 | - | 2,70 | 2,59 | 2,51 | - |

***Note** : (1) d'après FAURE (2017).*

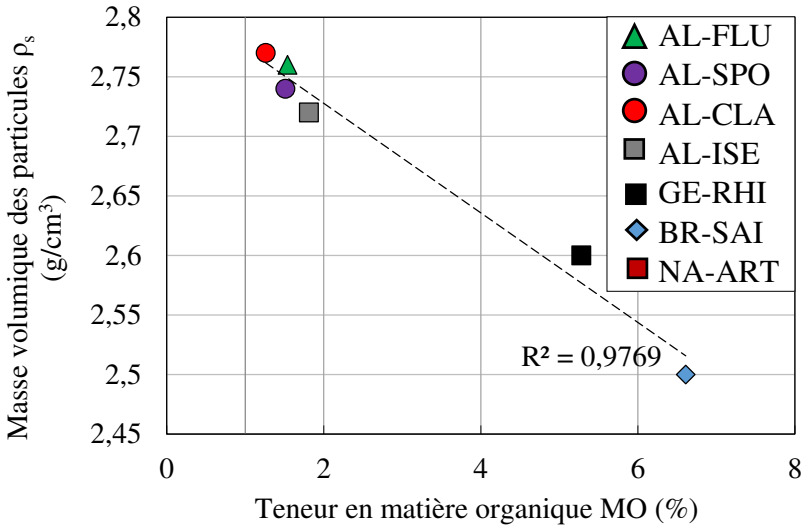



*Figure 3-19. Relation entre la teneur en matière organique et la masse volumique des particules solides des sédiments de barrage.*

### *Limites d'Atterberg*

Les sédiments alpins sont des « limons peu plastiques » alors que « BR-SAI » et « GE-RHI » sont sols ou sédiments « limoneux plastiques », voir figure 3-20. Cette figure montre les résultats obtenus après la détermination des limites d'Atterberg par la classification de Casagrande. Ils sont récapitulés dans le tableau 3-6. Soulignons que du fait du pourcentage de sable élevé dans les sédiments de la retenue d'Artaude, l'indice de plasticité n'a pas été possible à évaluer.

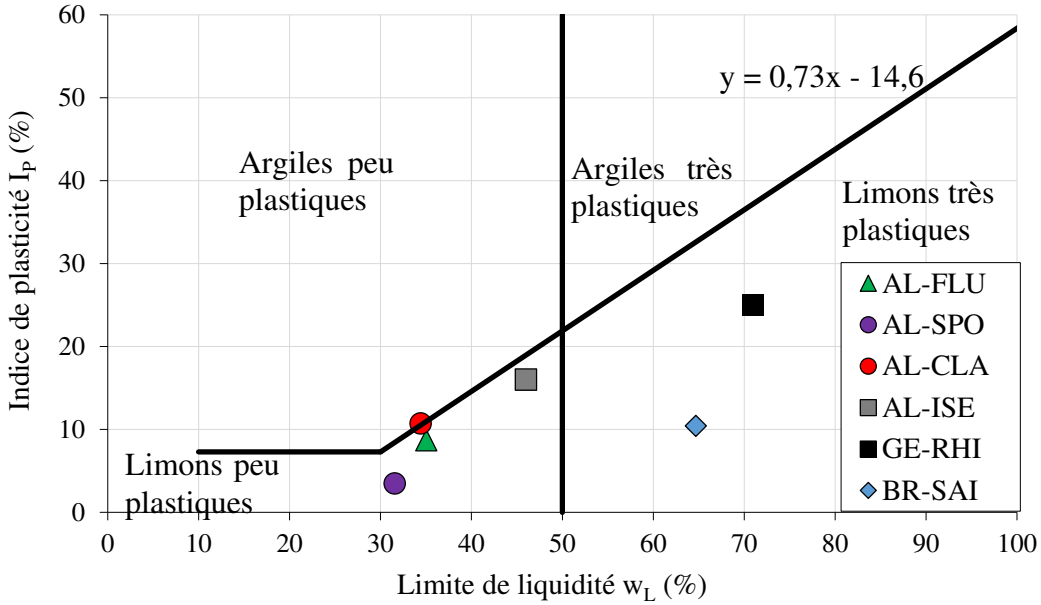



*Figure 3-20. Relation $I_P$-$w_L$ pour les sédiments de barrage.*

*Tableau 3-6 . Valeurs des limites d'Atterberg des sédiments de barrage.*

| | AL-FLU | AL-SPO | AL-CLA | AL-ISE | GE-RHI | BR-SAI | NA-ART |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $w_L$ (%) | 35,00 | 32,00 | 34,00 | 46,00 | 71,00 | 65,00 | 22,00 |
| $w_P$ (%) | 26,00 | 28,00 | 24,00 | 30,00 | 46,00 | 54,00 | - |
| $I_P$ (%) | 9,00 | 4,00 | 10,00 | 16,00 | 25,00 | 11,00 | - |

### *Valeur au bleu de méthylène*

Les sédiments de la Nouvelle Aquitaine sont insensibles à l'eau. Ils ont une valeur au bleu de méthylène de 0,07 g/100g. Néanmoins, les autres sédiments sont sensibles à l'eau. En ce qui concerne à « AL-FLU », « AL-SPO », « AL-CLA » et « BR-SAI », ils peuvent être classés comme sols sablo-limoneux. Quant aux sédiments « AL-ISE » et « GE-RHI », ce sont des sédiments sablo-argileux. Les sédiments « GE-RHI » sont les plus argileux, voir tableau 3-7.

*Tableau 3-7. Valeur au bleu de méthylène des sédiments de barrage.*

| | AL-FLU | AL-SPO | AL-CLA | AL-ISE | GE-RHI | BR-SAI | NA-ART |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **VBS (g/100g)** | 0,51 | 0,39 | 0,37 | 1,80 | 2,40 | 0,62 | 0,07 |

### *Matière organique*

Les sédiments bretons étudiés contiennent la teneur en matière organique la plus élevée (6,61%) suivis des sédiments « GE-RHI » avec 5,28% et les sédiments alpins. Ces derniers ont des pourcentages en matière organique faibles et similaires (1,26% jusqu'à 1,81%). « NA-ART » a la plus faible quantité de matière organique (0,80%). Cette différence est liée à l'origine de chaque sédiment, voir figure 3-21.

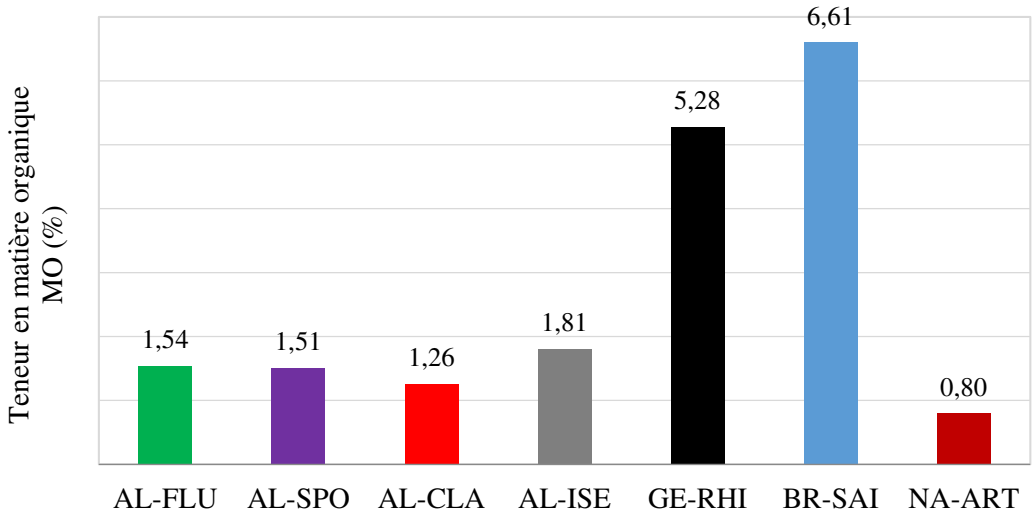



*Figure 3-21. Distribution de la matière organique dans les sédiments de barrage.*

### *Éléments majeurs*

L'analyse chimique des éléments majeurs a été réalisée par spectrométrie d'émission atomique à plasma inductif après fusion alcaline. Ces valeurs sont regroupées dans le tableau 3-8, elles sont exprimées en pourcentage massique.

Les éléments majeurs qui constituent les sédiments de barrage sont le dioxyde de silicium, l'oxyde d'aluminium, l'oxyde ferrique et l'oxyde de calcium :

- Les sédiments bretons sont composés principalement de dioxyde de silicium, avec 67,87%. Ils ont la plus faible teneur en oxyde de calcium avec 1,53%.

- Les sédiments alpins et ceux du Rhin possèdent des quantités de dioxyde de silicium similaires qui varient de 42,17% jusqu'à 47,31%.

- Les sédiments « AL-FLU » concernent les plus élevés pourcentages en oxyde d'aluminium (15,55%) et en oxyde ferrique (5,40%) par rapport aux autres sédiments de barrage. En revanche, les sédiments « GE-RHI » ont les teneurs en oxyde d'aluminium les plus faibles (7,90%) et en oxyde ferrique (3,00%).

- Les sédiments sableux de la retenue d'Artaude ont été prélevés du Massif central. Dans cette zone il y a une forte dominance du granite et des roches métamorphiques. Cela signifie qu'ils sont composés essentiellement de dioxyde de silicium, et d'oxyde d'aluminium. Ces sédiments n'ont pas fait l'objet d'analyse chimique.

Quant à la perte au feu, les sédiments « GE-RHI » ont une perte au feu de 22,80%. Les sédiments « BR-SAI » ont le plus faible pourcentage (10,01%) et les sédiments alpins ont des pertes au feu similaires, elles varient de 14,40% jusqu'à 16,17%.

*Tableau 3-8 . Composition chimique des sédiments de barrage.*

| | **AL-FLU** | **AL-SPO** | **AL-CLA** | **AL-ISE** | **GE-RHI** | **BR-SAI** | **NA-ART** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **$SiO_2$** | 42,17 | 44,39 | 44,10 | 47,31 | 43,12 | 67,87 | - |
| **$Al_2O_3$** | 15,55 | 11,27 | 13,85 | 14,16 | 7,90 | 11,56 | - |
| **$Fe_2O_3$** | 5,40 | 4,48 | 5,38 | 4,94 | 3,00 | 4,44 | - |
| **CaO** | 13,00 | 15,41 | 13,46 | 13,03 | 18,43 | 1,53 | - |
| **MgO** | 2,94 | 3,59 | 1,79 | 2,10 | 2,44 | 0,65 | - |
| **$TiO_2$** | 0,66 | 0,50 | 0,72 | 0,66 | 0,40 | 0,91 | - |
| **MnO** | 0,12 | 0,16 | 0,18 | 0,16 | 0,06 | 0,10 | - |
| **$P_2O_5$** | 0,13 | 0,17 | 0,18 | 0,17 | 0,17 | 0,23 | - |
| **SrO** | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,01 | - |
| **$Na_2O$** | 0,90 | 0,88 | 0,64 | 0,95 | 0,59 | 0,53 | - |
| **$K_2O$** | 2,92 | 2,33 | 1,87 | 2,14 | 1,16 | 1,98 | - |
| **$SO_3$** | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 0,09 | 0,06 | 0,11 | - |
| **PF** | 16,17 | 16,56 | 17,70 | 14,40 | 22,80 | 10,01 | - |
| **TOTAL** | 100,05 | 99,82 | 99,97 | 100,16 | 100,17 | 99,93 | - |

***Note** : « PF » signifie Perte au Feu.*

### *3.3.4.2. Caractérisation minéralogique*

#### *Minéralogie*

La méthodologie utilisée pour la détermination de la composition minéralogique a été l'analyse par diffraction des rayons X (DRX). Ces données montrent que les sédiments sont composés principalement de quartz, de carbonates, de phyllosilicates et de feldspaths.

Le quartz est un minéral du groupe des silicates, sous-groupe des tectosilicates. Il se présente soit sous la forme de grands cristaux incolores, colorés ou fumés, sous la forme de cristaux microscopiques d'aspect translucide. Il a un système réticulaire trigonal à basse température (quartz α) et hexagonal à haute température (quartz β). Il a une dureté de 7 sur l'échelle de Mohs. Les carbonates proviennent de roches sédimentaires carbonatées ou d'une altération de roches anciennes (feldspath calcique). Ils ont une dureté de 2,3 sur l'échelle de Mohs. Les phyllosilicates sont des minéraux du groupe des silicates. Ils sont formés par la superposition de couches de tétraèdres et de couches d'octaèdres, donnant une apparence feuilletée. Leur système de cristallisation est pseudo hexagonal. Le feldspath est une variété minérale de la famille des tectosilicates. Il est principalement composé d'aluminosilicate de sodium, de potassium ou de calcium. Nombreux feldspaths peuvent être différenciés dont les principaux sont l'albite (sodique), le microcline (potassique) et l'anorthite (calcique). Ils possèdent un système cristallin triclinique ou monoclinique. Ils ont une dureté de Mohs de l'ordre de 6 à 6,5 sur l'échelle.

Soulignons que les sédiments alpins sont riches en phyllosilicates et en carbonates. Les sédiments « AL-ISE » et « AL-CLA » sont les plus argileux. Ils ont le pourcentage le plus important de phyllosilicates : 35% et 33% respectivement. Ils ont une répartition de quartz et de carbonates relativement équilibrée. Le sédiment « AL-SPO » a une proportion relativement similaire de quartz, de carbonates et de phyllosilicates. Les sédiments « BR-SAI » et « AL-FLU » sont composés principalement de quartz. Le sédiment « BR-SAI » possède le pourcentage de quartz le plus élevé. Leurs valeurs de quartz sont de 48% et 30% respectivement. Les sédiments « AL-FLU » ont le pourcentage le plus élevé de feldspaths. Quant aux sédiments « GE-RHI », ils sont composés principalement de carbonates et quartz. La composition minéralogique de ces matériaux est présentée dans le tableau 3-9. Les sédiments de la retenue d'Artaude sont composés essentiellement de sables grossiers comprenant essentiellement des grains de quartz et de feldspaths et des paillettes de mica, dépourvues d'argiles. Ils proviennent du Massif Central, zone formée de roches métamorphiques et granitiques.

*Tableau 3-9. Composition minéralogique des sédiments de barrage.*

| Minéraux (%) | AL-FLU | AL-CLA | AL-SPO | AL-ISE | GE-RHI | BR-SAI | NA-ART |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Silice** | | | | | | | |
| Quartz - $SiO_2$ | 30 | 29 | 29 | 24 | 28 | 48 | - |
| **Carbonates** | | | | | | | |
| Calcite - $CaCO_3$ | 23 | 28 | 21 | 19 | 24 | 0 | - |
| Dolomite - $CaMg(CO_3)_2$ | 4 | 2 | 12 | 3 | 7 | 0 | - |
| **Phyllosilicates** | | | | | | | |
| Phyllosilicates | 21 | 33 | 9 | 35 | 22 | 10 | - |
| Paragonite - $NaAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$ | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | - |
| Muscovite - $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$ | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 22 | - |
| **Feldspaths** | | | | | | | - |
| Albite - $NaAlSi_3O_8$ | 11 | 4 | 5 | 3 | 2 | 6 | - |
| Microcline - $KAlSi_3O_8$ | 11 | 2 | 3 | 0 | 0 | 0 | - |
| Sanidine – $K_{0,42}Na_{0,58}Ca_{0,03}(AlSi_3O_8)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | - |
| Anorthite– $Ca_{0,66}Na_{0,34}A_{11,66}Si_{2,34}O_8$ | 0 | 0 | 0 | 4 | 5 | 0 | - |
| **Sulfures** | | | | | | | |
| Pyrite- $FeS_2$ | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| **Corps amorphe** | 0 | 1 | 2 | 12 | 11 | 9 | - |

***Note** : La composition minéralogique du sédiment NA-ART n'a pas été faite.*

### *Teneur en carbonates*

Les sédiments alpins et ceux du Rhin ont d'importantes teneurs de $CaCO_3$. Les sédiments « AL-CLA » et « AL-FLU » possèdent une teneur de $CaCO_3$ élevée (23,34% et 21,97% respectivement) comme ceux de l'Isère avec 18,19 % et ceux de Serre-Ponçon avec 11,68%.

Les sédiments « GE-RHI » présentent une valeur en carbonates de 20,26%, alors que les sédiments « BR-SAI » et « NA-ART » ont des teneurs très faibles, 0,69% et 0,41% respectivement, voir figure 3-22. La différence des pourcentages de carbonates est reliée à l'origine des sédiments : la présence de matériaux calcaires dans les Alpes et pour ceux provenant du Rhin elle peut être expliquée grâce à la formation géologique des bassins versants.

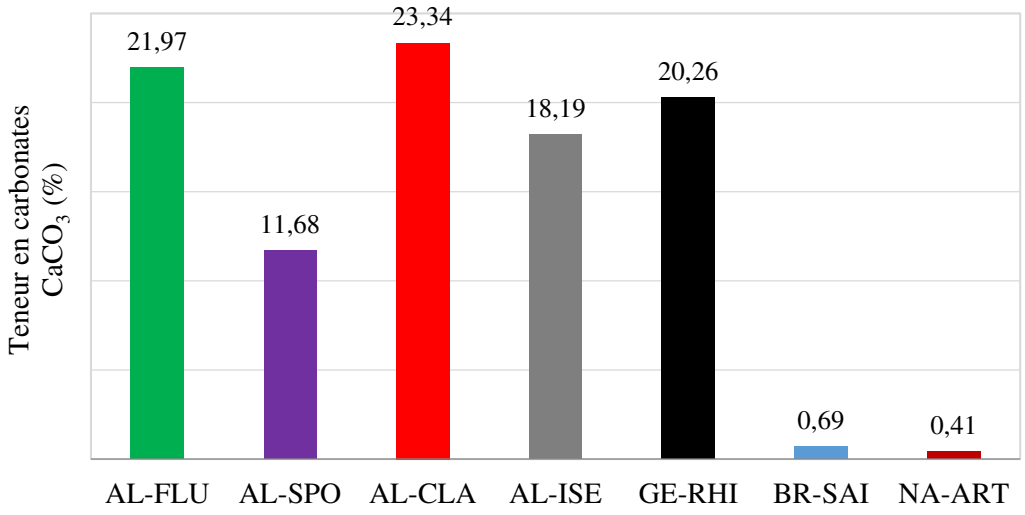



*Figure 3-22. Distribution des carbonates dans les sédiments de barrage.*

### *3.3.4.3. Caractérisation hydromécanique*

Les études de la décantation et de la consolidation des sédiments d'Isère et du Rhin ont été réalisées par KHADRAOUI (2013). La caractérisation hydromécanique des sédiments alpins « AL-SPO », « AL-FLU » et « AL-CLA » et le sédiment breton « BR-SAI » ont été conduits par BERKAINE (2016) et les caractéristiques hydromécaniques du sédiment « NA-ART » ont été déterminées par BAYONNE MAVOUNGOU (2018). Les essais ont été effectués au sein du laboratoire M2C. Une synthèse des résultats est exposée dans les paragraphes suivants.

#### *Décantation*

- Description du matériel utilisé et paramètres initiaux

Les essais de décantation ont été exécutés en utilisant deux modèles de colonnes transparentes. Le premier modèle a été utilisé pour les essais avec les sédiments « AL-ISE » et « GE-RHI », il concerne des colonnes de 2 mètres de hauteur, de 60 millimètres de diamètre externe et de 3 millimètres d'épaisseur. Le deuxième type de colonne correspond à des colonnes de 1,5 mètre de hauteur, de 41 millimètres de diamètre externe et 3 millimètres d'épaisseur. Ce dernier type de colonne a servi de support aux essais réalisés avec le sédiment « BR-SAI », les sédiments alpins « AL-SPO », « AL-FLU » et « AL-CLA » et le sédiment de Nouvelle Aquitaine « NA-ART ».

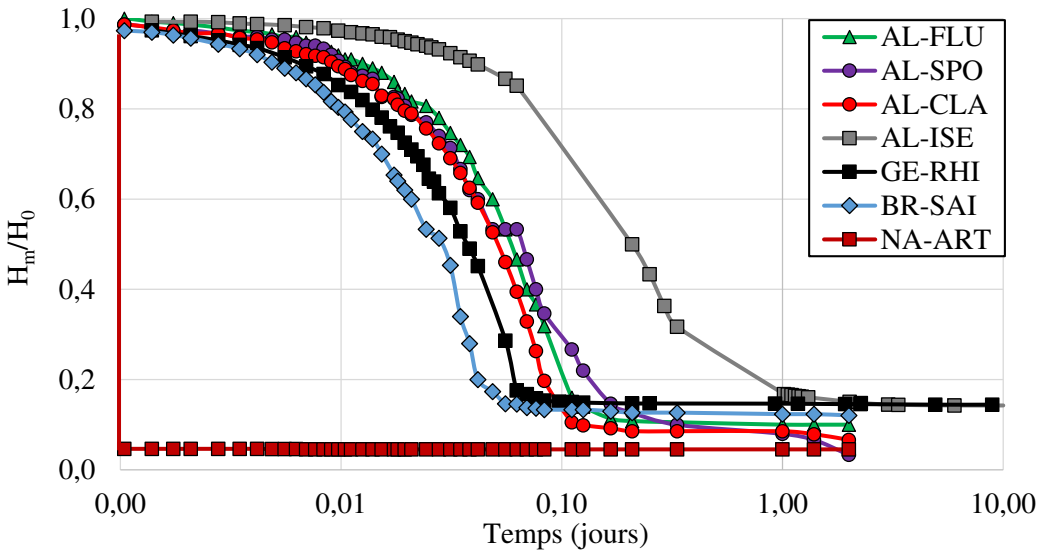
Les concentrations initiales choisies pour tous les sédiments ont été de 100 g/l (concentration correspondant à un refoulement hydraulique de sédiments dragués) et de 250 g/l (concentration obtenue lors d'un dragage mécanique). La durée des essais a été de dix jours pour les sédiments « AL-ISE » et « GE-RHI » et de deux jours pour les autres sédiments.

- Tassement en colonne des sédiments de barrage

Les courbes de décantation peuvent être observées dans les figures 3-23 et 3-24.

Pour une concentration initiale de 100 g/l, le sédiment « NA-ART » décante nettement plus rapidement que les autres sédiments de barrage, suivi du sédiment breton « BR-SAI », du sédiment du Rhin « GE-RHI » et les sédiments alpins. La vitesse de décantation est liée à la nature granulométrique : les sédiments qui ont des pourcentages de sable élevés décantent plus rapidement que ceux composés d'argiles. Du fait que le sédiment « NA-ART » est essentiellement composé de sables grossiers, le tassement est très rapide suivant l'axe $H_m/H_0$. Le sédiment « AL-ISE » a la plus faible vitesse de décantation ayant la plus importante quantité d'argiles.

Le poids et la forme des particules contribuent à cette différenciation. Remarquons aussi que la matière organique joue un rôle dans la décantation. Le sédiment de l'Artaude et les sédiments alpins « AL-FLU », « AL-CLA » et « AL-SPO » ont les plus faibles pourcentages de matière organique. Ils enregistrent les plus importants tassements à plus d'un jour. Par ailleurs, les sédiments « AL-CLA » et « AL-SPO » ont les masses volumiques les plus élevées.



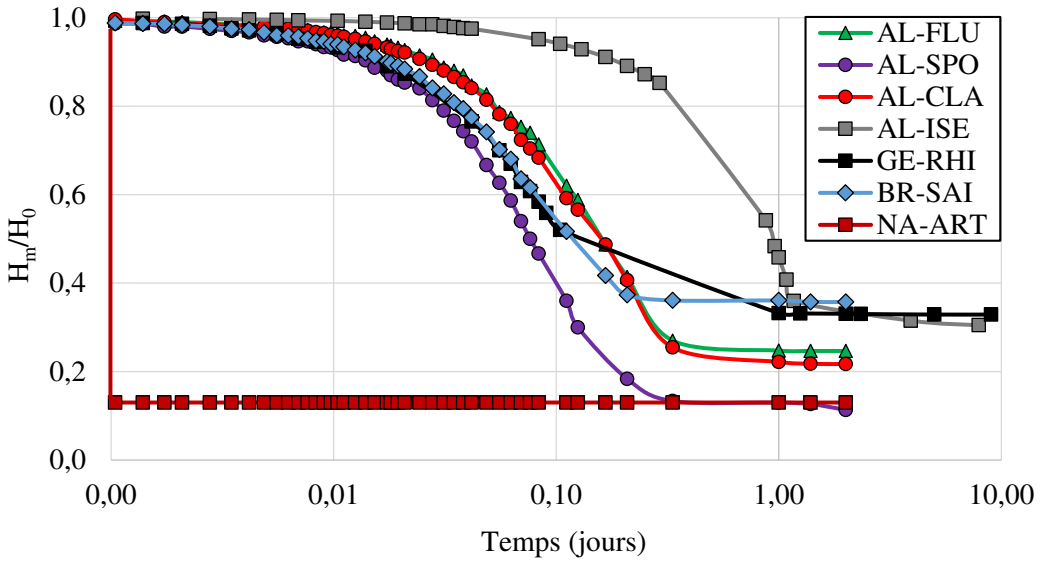

***Note** : $H_0$= hauteur de sédiment initiale ; $H_m$=hauteur de sédiment mesurée,*
*(d'après BERKAINE, 2016 ; KHADRAOUI, 2013 et BAYONNE MAVOUNGOU, 2018).*

*Figure 3-23. Courbes de tassement des sédiments de barrage (concentration initiale = 100 g/l).*

En ce qui concerne les courbes de tassement obtenues avec une concentration initiale de 250 g/l : un changement de vitesse se produit. Les sédiments décantent plus doucement quand ils ont de fortes concentrations. Ceci s'explique par le fait que, plus les concentrations augmentent, plus les indices des vides diminuent et la perméabilité diminue.

Hormis le cas du sédiment « NA-ART », le sédiment « AL-SPO » tasse plus rapidement que les autres sédiments, suivis des sédiments « GE-RHI » et « BR-SAI » et des sédiments alpins. Le sédiment « AL-ISE » décante le plus lentement, il est composé d'une importante

quantité d'argiles et de limons. Le sédiment de Nouvelle Aquitaine « NA-ART » et les sédiments alpins « AL-FLU », « AL-CLA » et « AL-SPO » présentent les tassements les plus importants au terme de un jour. Les sédiments quelle que soit leur concentration initiale, se comportent de la même manière lors de la décantation, voir figures 3-23 et 3-24.




***Note** : $H_0$= hauteur de sédiment initiale ; $H_m$=hauteur de sédiment mesurée, (d'après BERKAINE, 2016 ; KHADRAOUI, 2013 et BAYONNE MAVOUNGOU, 2018).*

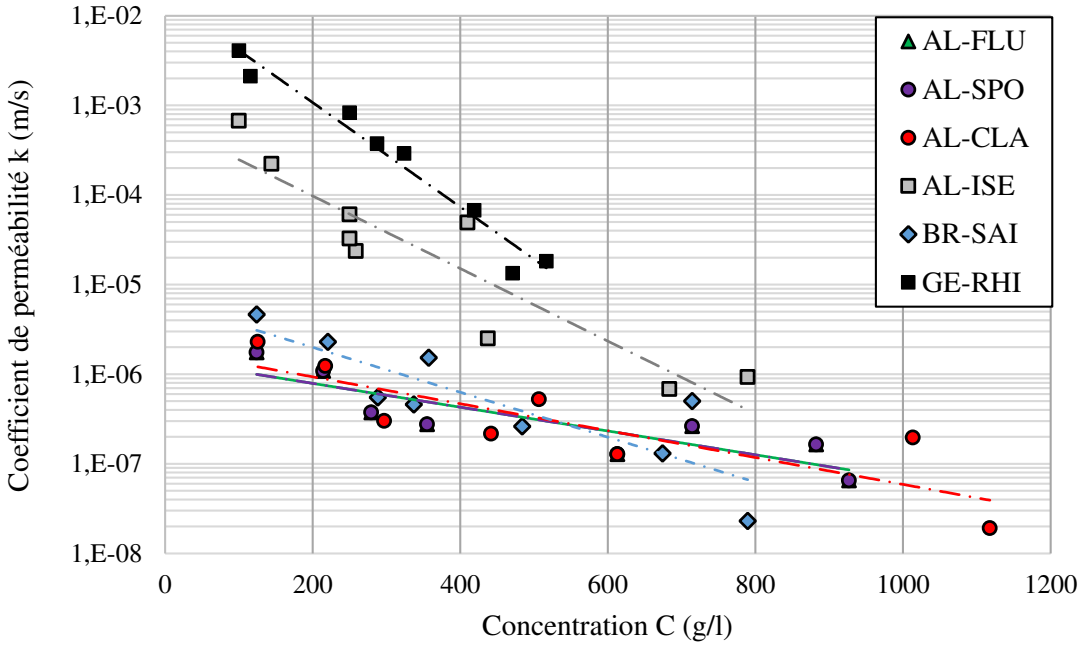
*Figure 3-24. Courbes de tassement des sédiments de barrage (concentration initiale = 250 g/l).*

- Perméabilité des sédiments de barrage

L'évolution de la perméabilité par rapport à la concentration est représentée sur la figure 3-25. Ces résultats montrent que cette évolution est presque linéaire pour l'intervalle de concentrations étudié, et la perméabilité est inversement proportionnelle à la concentration.

Les fuseaux inférieurs correspondent aux sédiments, « AL-FLU », « AL-CLA » et « AL-SPO ». Ces sédiments sont les moins organiques et ils contiennent un pourcentage de limons et d'argiles assez élevés. Leurs coefficients de perméabilité sont de l'ordre $10^{-5}$ à $10^{-8}$ m/s sur un intervalle de concentrations de 100 g/l à 950 g/l. Les sédiments « GE-RHI » ont le coefficient de perméabilité le plus élevé, allant de $10^{-2}$ à $10^{-5}$ m/s. En ce qui concerne les propriétés relatives au drainage, « GE-RHI » et « AL-ISE » présentent de bonnes capacités au drainage, selon HOLTZ & KOVACS (1991), tableau 3-1.

Le sédiment de la retenue d'Artaude est essentiellement composé de sables. Pour ce type de sédiment, la granulométrie présente un bon comportement au drainage : décantation rapide et des coefficients de perméabilité de l'ordre de $10^{-2}$ à $10^{-5}$ m/s, selon HOLTZ & KOVACS (1991), tableau 3-1.




$k_{FLU} = 1E\text{-}06e^{-0,003C}$ $R^2 = 0,7692$

$k_{CLA} = 2E\text{-}06e^{-0,003C}$ $R^2 = 0,7221$

$k_{SAI} = 6E\text{-}06e^{-0,006C}$ $R^2 = 0,7282$

$k_{SPO} = 1E\text{-}06e^{-0,003C}$ $R^2 = 0,7692$

$k_{ISE} = 0,0006e^{-0,009C}$ $R^2 = 0,8493$

$k_{RHI} = 0,0157e^{-0,013C}$ $R^2 = 0,9635$

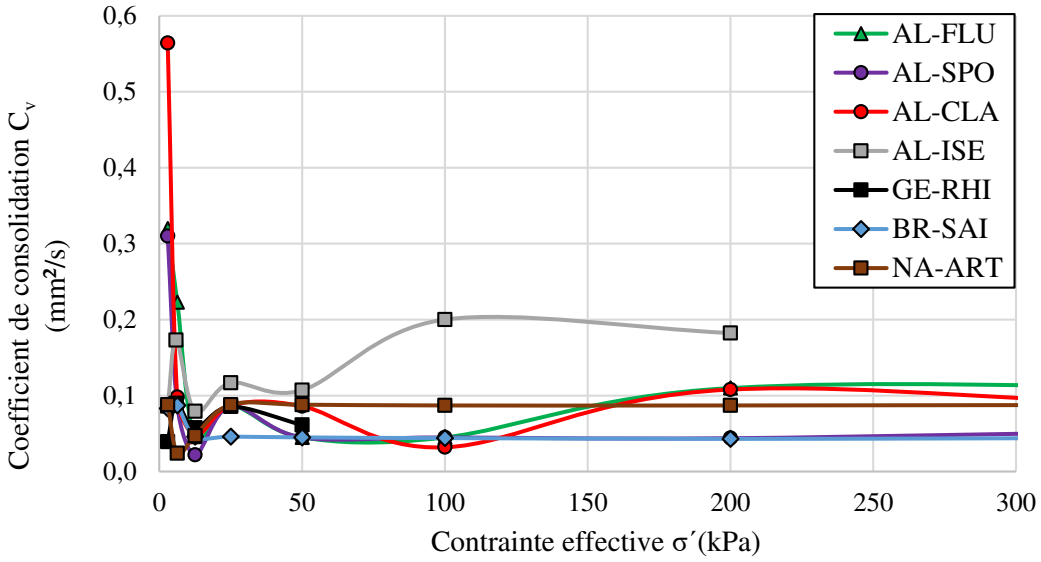
*Figure 3-25. Relation entre le coefficient de perméabilité et la concentration des sédiments de barrage.*

***Consolidation***

- Tassement

Les résultats de l'essai œdométrique montrent des coefficients de consolidation ($C_v$) en fluctuation pour des niveaux de contrainte appliquée faibles. Ceci peut être expliqué par l'irrégularité du phénomène de tassement en début de chargement et par le tassement instantané généré par la charge.

Pour les sédiments alpins « AL-CLA » et « AL-FLU », les coefficients de consolidation deviennent stables à partir de l'application d'une surcharge de 200 kPa, pour les sédiments « AL-SPO » et « AL-ISE » cette stabilisation devient effective à partir de 50 et 100 kPa respectivement. Pour les sédiments « BR-SAI » et « NA-ART », les coefficients de consolidation deviennent stables à partir de 25 kPa. Le maximum de chargement appliqué pour le sédiment « GE-RHI » a été de 50 kPa. Les différentes évolutions de $C_v$ sont montrées à la figure 3-26.



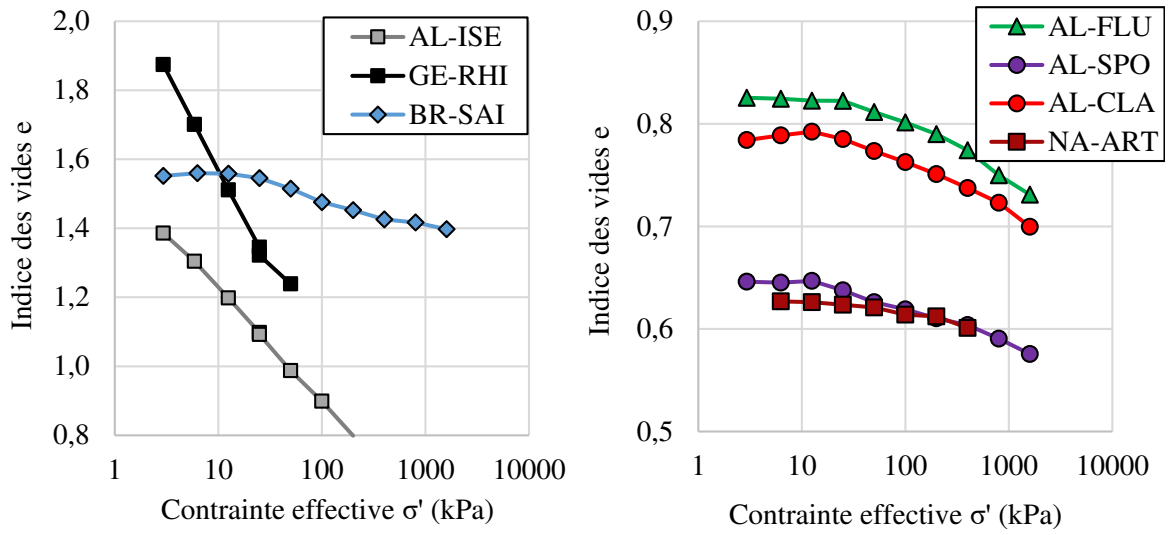

***Note** : Relations obtenues d'après BERKAINE, 2016 ; KHADRAOUI, 2013 et BAYONNE MAVOUNGOU, 2018.*

*Figure 3-26. Coefficient de consolidation des sédiments de barrage en fonction de la contrainte appliquée.*

- Courbes œdométriques

Les courbes œdométriques des sédiments de barrage sont représentées sur la figure 3-27. Ces courbes permettent d'exprimer la variation du volume en fonction de la charge appliquée en montrant l'évolution de l'indice des vides en fonction du logarithme de la contrainte appliquée.

D'après HOLTZ & KOVACS (1991) tous ces sédiments de barrage étudiés ont des courbes œdométriques aux allures classiques. Les sédiments « BR-SAI », « AL-CLA », « AL-SPO », « AL-FLU » et « NA-ART » ont des variations d'indices des vides faibles par rapport à la contrainte effective appliquée, ceci peut être expliqué par le fait que les indices des vides initiaux étaient faibles. Les sédiments « GE-RHI » et « AL-ISE » présentaient des teneurs en eau initiales élevées *i.e.* des indices des vides élevés, ceci implique des variations importantes des indices des vides selon la charge appliquée.




*(a) Sédiments : AL-ISE, GE-RHI et BR-SAI*

*(b) Sédiments : AL-FLU, AL-SPO, AL-CLA et NA-ART*

***Note** : Relations obtenues d'après BERKAINE, 2016 ; KHADRAOUI, 2013 et BAYONNE MAVOUNGOU. 2018.*

*Figure 3-27. Courbes œdométriques des sédiments de barrage.*

- Fluage

La présence de la matière organique tend à augmenter l'indice de fluage, voir figure 3-28. Par conséquent, ces sédiments avec des teneurs en matière organique élevées posent des problèmes pour la mise en remblai sans traitement. La charge ou contrainte constante de fluage est de 400 kPa.

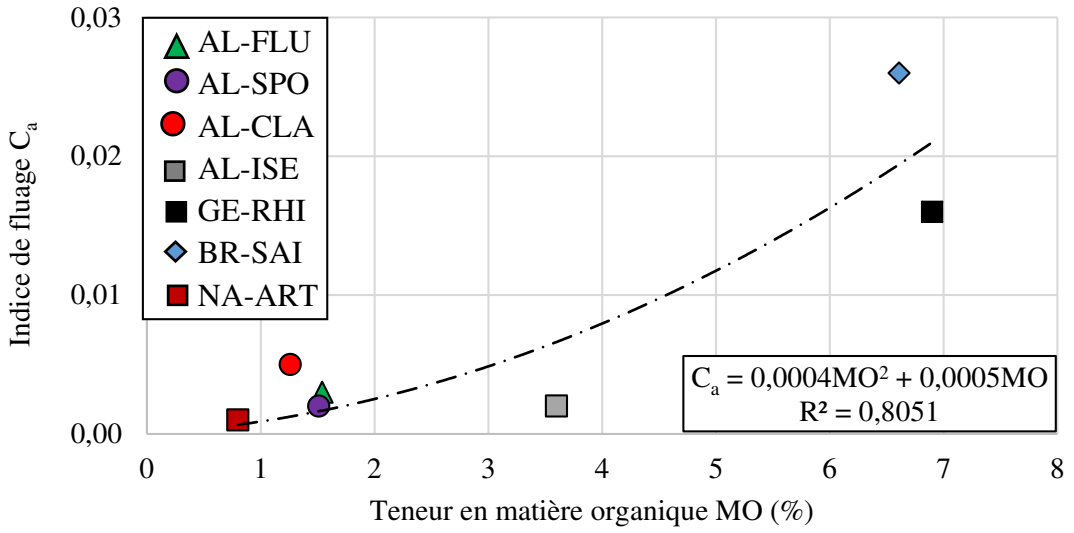
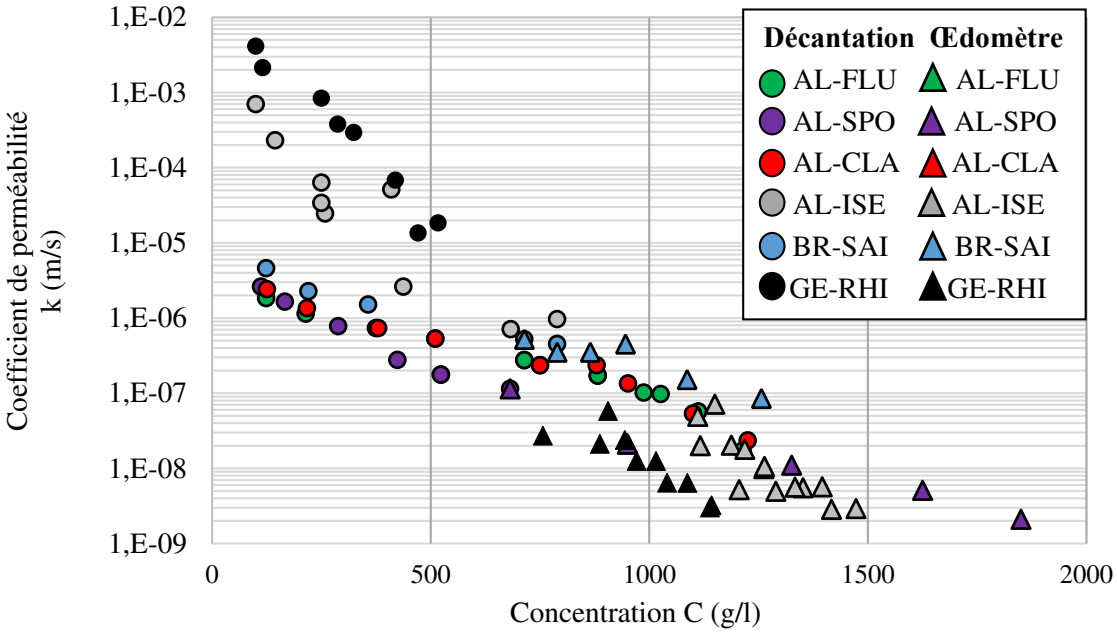



*Figure 3-28. Relation de l'indice de fluage et la teneur en matière organique des sédiments de barrage.*

- Perméabilité

Les perméabilités des sédiments estimées à partir des essais avec les colonnes de décantation peuvent être complétées avec celles déduites des essais œdométriques, voir figure 3-29. Sur cette figure concernant les essais œdométriques, deux groupes peuvent être différenciés par rapport à la nature granulométrique : les sédiments les plus sableux « BR-SAI », « GE-RHI », « AL-CLA » et « AL-FLU » ont des concentrations au cours de l'essai qui vont de 600 à 1300 g/l. Pour les sédiments les plus fins « AL-SPO » et « AL-ISE » leurs concentrations varient de 500 à 1800 g/l. Les sédiments « BR-SAI », « AL-FLU » et « AL-CLA » peuvent être classifiés comme sédiments « peu perméables », avec des coefficients de perméabilité k de l'ordre de $10^{-6}$ à $10^{-7}$ m/s obtenus en fin de l'essai œdométrique. Alors que les sédiments « GE-RHI », « AL-SPO » et « AL-ISE » sont « très peu perméables » avec des coefficients de perméabilité de l'ordre de $10^{-7}$ à $10^{-9}$ m/s.




***Note** : Essais œdométriques et colonnes de décantation. Relations obtenues d'après ANGER, 2014 et BERKAINE, 2016.*

*Figure 3-29. Relation entre le coefficient de perméabilité et la concentration des sédiments de barrage.*

- Récapitulatif des paramètres de consolidation

Les paramètres de consolidation sont rassemblés dans le tableau 3-10. Les sédiments de barrage « AL-FLU », « AL-SPO », « AL-CLA », « GE-RHI » et « BR-SAI » sont moyennement compressibles puisque leurs valeurs de $C_{co}/(1+e_o)$ sont comprises entre 0,05 et 0,20. Tandis que le sédiment « AL-ISE » avec une valeur de $C_{co}/(1+e_o)$ égale à 0,047 est considéré comme « peu compressible » ($0{,}015 < C_{co}/(1+e_o) < 0{,}050$). Par ailleurs, le sédiment « NA-ART » est classé comme « incompressible » puisque sa valeur de $C_{co}/(1+e_o)$ est inférieure à 0,015.

*Tableau 3-10. Paramètres de consolidation des sédiments de barrage.*

| | Référence | AL-FLU | AL-SPO | AL-CLA | AL-ISE | GE-RHI | BR-SAI | NA-ART |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Consolidation** | $C_{co}/(1+e_o)$ | 0,114 | 0,115 | 0,122 | 0,047 | 0,080 | 0,190 | 0,004 |
| | $C_a$ | 0,003 | 0,002 | 0,005 | 0,002 | 0,016 | 0,026 | 0,001 |
| | k (m/s) | $10^{-6}$ - $10^{-7}$ | $10^{-7}$ - $10^{-9}$ | $10^{-6}$ - $10^{-7}$ | $10^{-6}$ - $10^{-9}$ | $10^{-7}$ - $10^{-9}$ | $10^{-6}$ - $10^{-7}$ | $10^{-2}$ - $10^{-5}$ |
| | $C_v$ ($10^{-6}$ $m^2/s$) | 0,08 | 0,05 | 0,084 | 0,18 | 0,06 | 0,021 | 0,088 |

### *3.3.5. Bilan*

Les caractéristiques physico-chimiques, minéralogiques et hydromécaniques des sédiments de barrage sont regroupées dans les tableaux suivants, de 3-11 à 3-13.

*Tableau 3-11. Récapitulatif des caractéristiques physico-chimiques des sédiments de barrage.*

| | Référence | AL-FLU | AL-SPO | AL-CLA | AL-ISE | GE-RHI | BR-SAI | NA-ART |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Granulométrie** | Argiles (%) | 5,00 | 8,00 | 4,80 | 22,00 | 6,38 | 3,75 | 0,41 |
| | L. fins (%) | 35,00 | 40,00 | 35,20 | 63,90 | 24,72 | 24,75 | 0,86 |
| | L. grossiers (%) | 30,00 | 24,00 | 27,00 | 14,00 | 27,20 | 26,00 | 0,70 |
| | S. fins (%) | 28,00 | 25,50 | 29,00 | 0,10 | 35,50 | 35,50 | 2,40 |
| | S. grossiers (%) | 2,00 | 2,50 | 4,00 | 0,00 | 6,20 | 10,00 | 95,63 |
| | $d_{10}$ (µm) | 4,00 | 2,50 | 4,00 | 0,60 | 0,45 | 6,00 | 311,80 |
| | $d_{30}$ (µm) | 14,00 | 10,00 | 13,00 | 2,10 | 10,90 | 20,00 | 488,39 |
| | $d_{50}$ (µm) | 26,00 | 23,00 | 27,00 | 6,10 | 39,90 | 42,00 | 650,00 |
| | $d_{60}$ (µm) | 36,00 | 31,00 | 39,00 | 8,80 | 55,00 | 58,00 | 772,90 |
| | Teneur en fines | 84,60 | 82,80 | 78,60 | 100,00 | 74,60 | 71,20 | 2,66 |
| | $C_u$ | 9,00 | 12,50 | 9,75 | 11,30 | 13,22 | 9,66 | 2,48 |
| | $C_c$ | 1,36 | 1,29 | 1,08 | 0,64 | 0,52 | 1,14 | 0,99 |
| **Surface spécifique** | BET ($m^2/g$) | 2,76 | 4,62 | 2,38 | 11,94 | 5,17 | 8,17 | 0,76 |
| | BET[(1)] ($m^2/g$) | 5,88 | 5,17 | - | 11,73 | 7,82 | 8,92 | - |
| | Blaine[(1)] ($m^2/g$) | 0,57 | 0,75 | - | 1,25 | 0,49 | 0,76 | - |
| **Masse volumique des particules** | $\rho_s$ ($g/cm^3$) | 2,76 | 2,74 | 2,77 | 2,72 | 2,60 | 2,50 | 2,63 |
| **Limites d'Atterberg** | $w_L$ (%) | 35,00 | 32,00 | 34,00 | 46,00 | 71,00 | 65,00 | 22,00 |
| | $w_P$ (%) | 26,00 | 28,00 | 24,00 | 30,00 | 46,00 | 54,00 | - |
| | $I_P$ (%) | 9,00 | 4,00 | 10,00 | 16,00 | 25,00 | 11,00 | - |
| **Argilosité** | VBS (g/100g) | 0,51 | 0,39 | 0,37 | 1,80 | 2,40 | 0,62 | 0,07 |
| **MO** | MO (%) | 1,54 | 1,51 | 1,26 | 1,81 | 5,28 | 6,61 | 0,80 |
| **Éléments majeurs (en % massique)** | $SiO_2$ | 42,17 | 44,39 | 44,10 | 47,31 | 43,12 | 67,87 | - |
| | $Al_2O_3$ | 15,55 | 11,27 | 13,85 | 14,16 | 7,90 | 11,56 | - |
| | $Fe_2O_3$ | 5,40 | 4,48 | 5,38 | 4,94 | 3,00 | 4,44 | - |
| | CaO | 13,00 | 15,41 | 13,46 | 13,03 | 18,43 | 1,53 | - |
| | MgO | 2,94 | 3,59 | 1,79 | 2,10 | 2,44 | 0,65 | - |
| | $TiO_2$ | 0,66 | 0,50 | 0,72 | 0,66 | 0,40 | 0,91 | - |
| | MnO | 0,12 | 0,16 | 0,18 | 0,16 | 0,06 | 0,10 | - |
| | $P_2O_5$ | 0,13 | 0,17 | 0,18 | 0,17 | 0,17 | 0,23 | - |
| | SrO | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,01 | - |
| | $Na_2O$ | 0,90 | 0,88 | 0,64 | 0,95 | 0,59 | 0,53 | - |
| | $K_2O$ | 2,92 | 2,33 | 1,87 | 2,14 | 1,16 | 1,98 | - |
| | $SO_3$ | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 0,09 | 0,06 | 0,11 | - |
| | PF | 16,17 | 16,56 | 17,70 | 14,40 | 22,80 | 10,01 | - |

***Note** : (1) FAURE (2017).*

*Tableau 3-12. Récapitulatif des caractéristiques minéralogiques des sédiments de barrage.*

| | Référence | AL-FLU | AL-SPO | AL-CLA | AL-ISE | GE-RHI | BR-SAI | NA-ART |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Calcimétrie** | $CaCO_3$ (%) | 21,97 | 11,68 | 23,34 | 18,19 | 20,26 | 0,69 | 0,41 |
| **Minéralogie** | Quartz | 30 | 29 | 29 | 24 | 28 | 48 | - |
| | Calcite | 23 | 28 | 21 | 19 | 24 | 0 | - |
| | Dolomite | 4 | 2 | 12 | 3 | 7 | 0 | - |
| | Phyllosilicates | 21 | 33 | 9 | 35 | 22 | 10 | - |
| | Paragonite | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | - |
| | Muscovite | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 22 | - |
| | Albite | 11 | 4 | 5 | 3 | 2 | 6 | - |
| | Microcline | 11 | 2 | 3 | 0 | 0 | 0 | - |
| | Sanidine | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | - |
| | Anorthite | 0 | 0 | 0 | 4 | 5 | 0 | - |
| | Pyrite | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| | Corps amorphe | 0 | 1 | 2 | 12 | 11 | 9 | - |

*Tableau 3-13. Récapitulatif des paramètres de consolidation des sédiments de barrage.*

| | Référence | AL-FLU | AL-SPO | AL-CLA | AL-ISE | GE-RHI | BR-SAI | NA-ART |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Consolidation** | $C_{co}/(1+e_o)$ | 0,114 | 0,115 | 0,122 | 0,047 | 0,080 | 0,190 | 0,004 |
| | $C_a$ | 0,003 | 0,002 | 0,005 | 0,002 | 0,016 | 0,001 | 0,001 |
| | k (m/s) | $10^{-6}$ - $10^{-7}$ | $10^{-7}$ - $10^{-9}$ | $10^{-6}$ - $10^{-7}$ | $10^{-6}$ - $10^{-9}$ | $10^{-7}$ - $10^{-9}$ | $10^{-6}$ - $10^{-7}$ | $10^{-2}$ - $10^{-5}$ |
| | $C_v$ ($10^{-6}$ $m^2/s$) | 0,080 | 0,050 | 0,084 | 0,18 | 0,06 | 0,021 | 0,088 |

## *3.4. LES SÉDIMENTS MARINS*

Les sédiments marins étudiés dans ces travaux proviennent du Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD) et du barrage de la Rance. Les sédiments du GPM de Dunkerque ont été retenus dans le programme COVASED et ceux du barrage de la Rance complètent la gamme des sédiments de barrage choisis par l'entreprise EDF.

### *3.4.1. Lieux de prélèvements et codification*

#### *Sédiments du Grand Port Maritime de Dunkerque*

Le Grand Port Maritime de Dunkerque est situé sur la Mer du Nord (Hauts - de - France). Il est le 3ème port français, réputé comme port de grands vracs destinés à ses nombreuses implantations industrielles.

Un ensemble de six échantillons provenant de ce port maritime ont été prélevés le 24 mars 2015 de manière manuelle par blocs desséchés et à la pelle. Ils ont été préalablement déposés et déshydratés dans de grands bassins de décantation (casier 1 et casier 2) afin de réduire leur teneur en eau initiale. Cette méthode de déshydratation a permis de diminuer la teneur en eau des sédiments à 70% (MUNCK (2015), voir figure 3-30.

La caractérisation de ces échantillons ont fait l'objet d'études au sein du laboratoire M2C : IDJRAOUI (2014), BAGAMBOULA (2015), BERKAINE (2015) et PELLERIN LE BAS (2015), et à IFSTTAR : MUNCK (2015). Une partie des résultats de ces études est rappelée dans les sections suivantes. Les sédiments du Grand Port Maritime de Dunkerque sont référencés par les lettres « HF-DK ».

*(a) Bassins de décantation remplis.* *(b) Sédiments décantés.*

*Figure 3-30. Bassins du Grand Port Maritime de Dunkerque (MUNCK, 2015).*

#### *Sédiments du barrage de la Rance*

Les sédiments de la Rance proviennent du bassin de la Rance. Ce barrage, géré par l'entreprise EDF, se trouve à l'embouchure du fleuve côtier de la Rance, entre les communes de La Richardais et de Saint-Malo, voir figure 3-31. Ce sédiment a été prélevé par pompage

pendant novembre 2014 et mars 2015. Avec un premier objectif de valorisation dans le domaine de l'agriculture, ces sédiments ont été déposés dans deux lagunes afin d'abaisser la concentration en sels et la teneur en eau. Ils ont été dessalés par le lessivage provoqué par des précipitations naturelles. Ils ont été prélevés à la pelle, (FOURVEL, 2018). Un bidon de 10 kg de matière sèche a été fourni au laboratoire M2C en avril de 2017.

Les deux premières lettres de leur région (Bretagne) et les trois premières lettres de leur lieu origine (Rance) définissent l'appellation choisie pour dénommer ces sédiments.

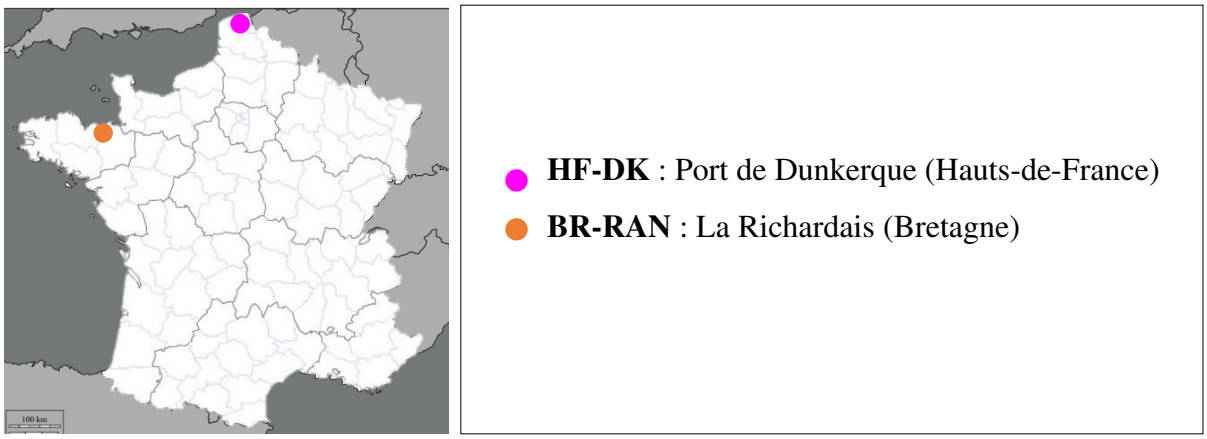



*Figure 3-31. Répartition géographique des sites de prélèvement des sédiments marins.*

### *3.4.2. Contexte général géologique*

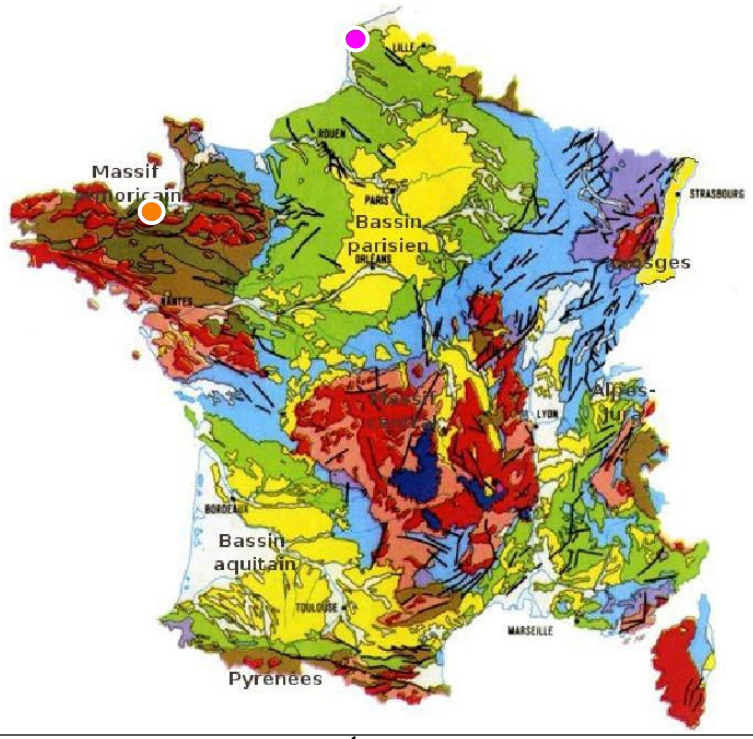
Les sédiments marins peuvent être classifiés par rapport à leur lithologie. En fonction des lieux de prélèvements, une première approximation à la lithologie des sédiments peut être apportée grâce à la carte géologique, voir figure 3-32. La diversité de rivières qui se jettent dans le GPMD et dans le barrage de la Rance, la liaison entre la lithologie et la minéralogie des sédiments n'est pas aussi précise.

#### *Sédiments du Grand Port Maritime de Dunkerque*

Les sédiments portuaires de Dunkerque font partie du bassin des Flandres. Ce port est construit dans des roches sédimentaires de l'âge Jurassique.

#### *Sédiments du barrage de la Rance*

Ces sédiments bretons font partie du Massif Armoricain. Ils sont situés dans le domaine Nord-Armoricain. Cette zone est caractérisée par des roches métamorphiques et des roches de granites précambriens.




**LÉGENDE**

**SÉDIMENTS**

- **BR-RAN** : La Richardais (Bretagne)
- **HF-DK** : Port de Dunkerque (Hauts-de-France)

**CLASSIFICATION DES ROCHES**

ROCHES SÉDIMENTAIRES

Quaternaire | Tertiaire | Crétacé | Jurassique | Permien/Trias | Paléozoïque

ROCHES PLUTONIQUES ET MÉTAMORPHIQUES

Granites | Roches métamorphiques | Roches infra paléozoïques

ROCHES VOLCANIQUES

Volcanisme tertiaire

*Figure 3-32. Information géologique des sédiments marins (d'après la carte du BRGM, 2017).*

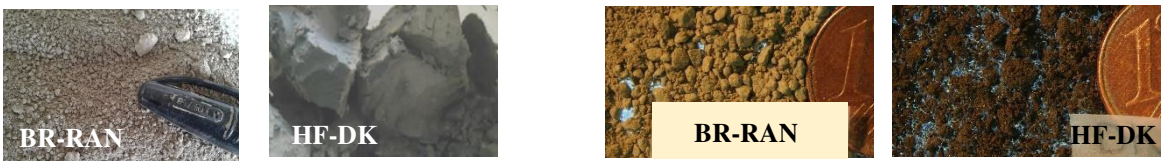
### *3.4.3. Analyse visuelle et descriptive des sédiments marins*

#### *Sédiments du Grand Port Maritime de Dunkerque*

Les sédiments portuaires de Dunkerque « HF-DK » sont sous forme de blocs d'une couleur grise en surface et noire à l'intérieur. Ceci est un indicateur d'une présence en matière organique élevée et d'une teneur en eau présente assez élevée, voir figure 3-33.

#### *Sédiments du barrage de la Rance*

Ces sédiments marins présentent un aspect homogène. Ils sont caractérisés par une couleur marron, indicateur d'une teneur en matière organique probablement élevée, voir figure 3-33.




*(a) Sédiments marins avant tamisage.* *(b) Sédiments marins après tamisage à 2mm.*

*Figure 3-33. Aspect visuel des sédiments marins.*

### *3.4.4. Caractérisation des sédiments*

Les essais de caractérisation effectués sur les sédiments marins ont été récapitulés dans le tableau 3-14. Ce tableau indique les sources utilisées et les laboratoires où ces essais ont été réalisés.

*Tableau 3-14. Récapitulatif des essais réalisés et sources utilisées.*

| Essai | BR-RAN | HF-DK |
|---|---|---|
| Analyse granulométrique | i | i |
| Texture | i | i |
| Surface spécifique (BET) | ii | ii |
| Surface spécifique (Blaine) | vi | - |
| Masse volumique | iii | iii |
| Limites d'Atterberg | iv | i |
| Valeur au bleu de méthylène | iv | i |
| Matière organique | i | i |
| Analyse chimique des éléments majeurs | iv et vi | v |
| Minéralogie (DRX) | iv | - |
| Teneur en $CaCO_3$ | i | i |
| Décantation | - | i |
| Tassement | - | i |

***Note** : i = M2C ; ii = IFSTTAR; iii =ESITC ; iv = LERM; v = MUNCK (2015); vi = FAURE (2017).*

#### *3.4.4.1. Caractérisation physico-chimique*

***Granulométrie***

Les sédiments du Grand Port Maritime de Dunkerque « HF-DK » et ceux du barrage de la Rance sont composés essentiellement de particules fines, voir figure 3-34. Les limons fins sont les composants principaux de ces deux sédiments : avec 50% et 38,15% respectivement. Quant à la distribution granulométrique, ces deux sédiments possèdent des gammes de diamètres « bien étalées ». Les courbes obtenues sont « mal graduées », voir la figure 3-34 et le tableau 3-15.

*Tableau 3-15. Récapitulatif des paramètres granulométriques des sédiments marins.*

| Sédiment | Argiles (%) | Limons fins (%) | Limons grossiers (%) | Sables fins (%) | Sables grossiers (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| BR-RAN | 8,15 | 38,15 | 27,40 | 24,60 | 1,70 |
| HF-DK | 1,00 | 50,00 | 20,00 | 24,00 | 5,00 |

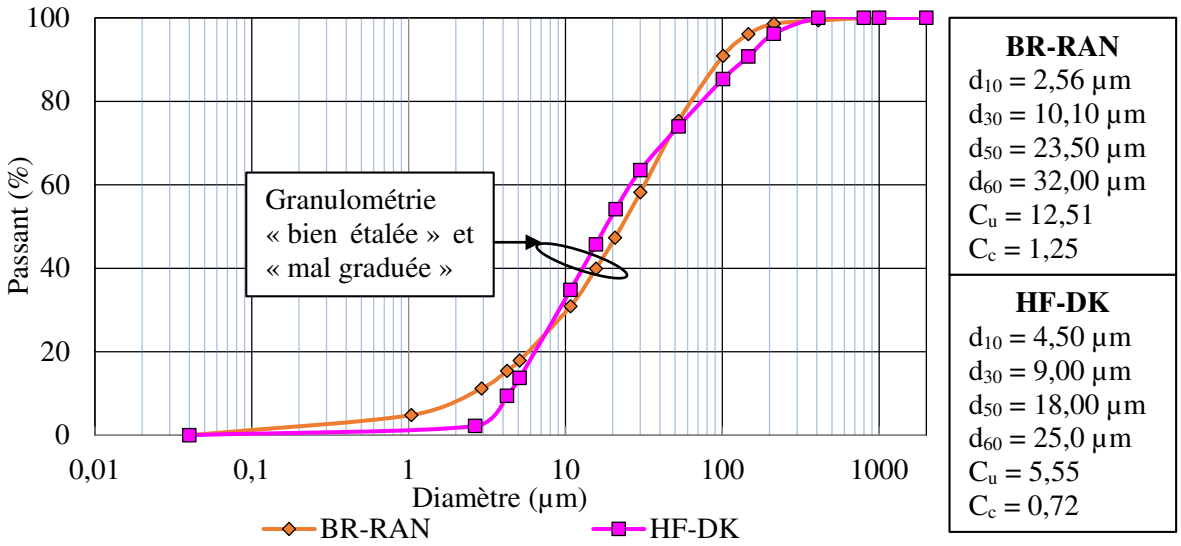



*Figure 3-34. Distribution granulométrique des sédiments marins.*

### *Texture*

Ces deux sédiments marins présentent une texture « limoneuse fine », voir figure 3-35. Ils sont moyennement aérés, cela implique qu'ils retiennent bien l'eau et les sels minéraux.

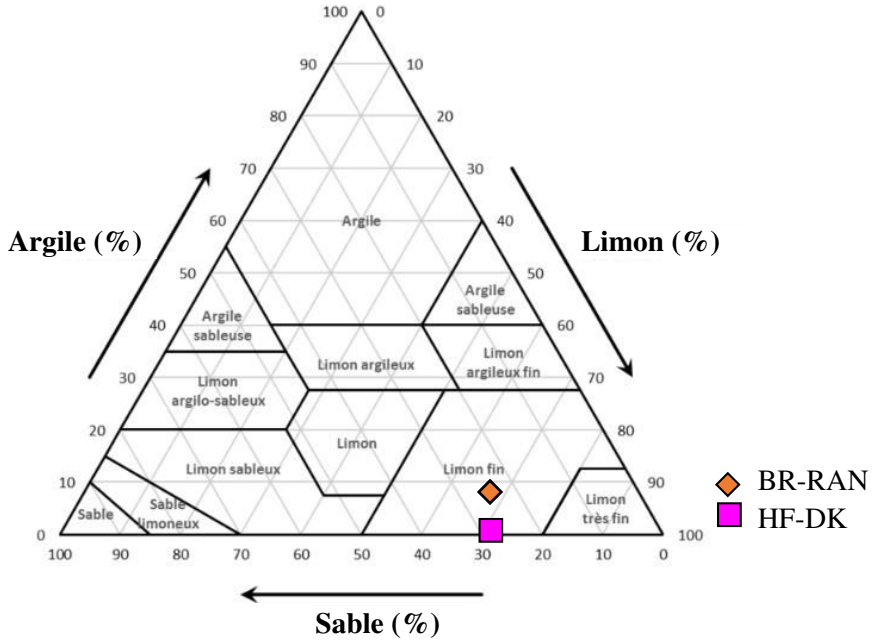



*Figure 3-35. Texture des sédiments marins.*

### *Surface spécifique*

Le sédiment portuaire de Dunkerque a une surface spécifique de 14,33 $m^2/g$ et celle du barrage de la Rance est de 13,28 $m^2/g$ selon la méthode BET. Le sédiment « HF-DK » a une surface spécifique plus importante, il possède un pourcentage de particules fines plus élevé. Les valeurs obtenues sont inférieures à celles de FAURE (2017), voir tableau 3-16. Cette différence de résultats peut être due à la méthode de préparation de l'échantillon. Dans les travaux réalisés par FAURE, les sédiments ont été séchés dans une étuve à 40 °C, ensuite les particules des sédiments ont été désagglomérées dans un concasseur à mâchoires et de manière manuelle et finalement ces sédiments ont été tamisés à 2 mm. Pour nos essais les sédiments ont été mis à l'étuve à 60 °C jusqu'à la stabilisation de leur masse, ensuite ils ont été broyés avec un rouleau et passés au tamis de 2 mm afin d'obtenir des particules avec un diamètre inférieur à cette valeur. Notons que la différence d'ordre de grandeur entre la méthode BET et celle de Blaine est aussi observée avec les résultats obtenus avec ces sédiments marins. Elle résulte de la méthodologie pour définir la surface spécifique.

*Tableau 3-16. Surface spécifique des sédiments marins.*

| Méthode | BR-RAN | HF-DK |
|---|---|---|
| **Blaine(1) ($m^2/g$)** | 0,71 | - |
| **BET(1) ($m^2/g$)** | 17,85 | - |
| **BET ($m^2/g$)** | 13,28 | 14,33 |

***Note** : (1) d'après FAURE (2017).*

### *Masse volumique des particules solides*

La masse volumique des particules solides du sédiment de Dunkerque est de 2,47 $g/cm^3$ et celle des sédiments de la Rance, de 2,58 $g/cm^3$. Ces résultats sont inférieurs à la masse volumique des particules solides moyennes qui est de 2,65 $g/cm^3$ (MONNIER, 1994). Ceci est pour une part dû à la teneur en matière organique élevée des sédiments marins, voir figure 3-36.

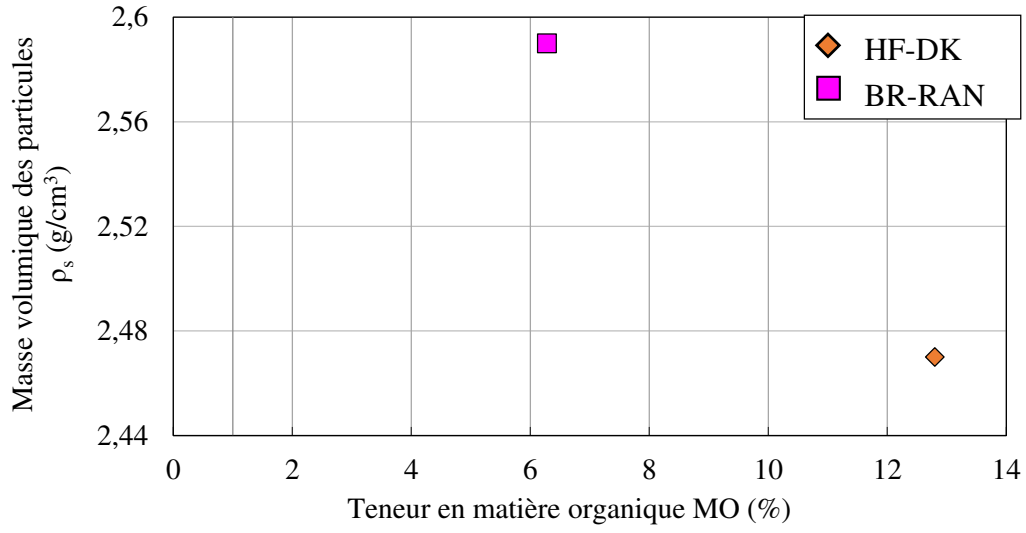



*Figure 3-36. Relation entre la teneur en matière organique et la masse volumique des particules solides des sédiments marins.*

### *Limites d'Atterberg*

Les sédiments du Grand Port de Dunkerque et ceux de la Rance sont des « limons plastiques », voir figure 3-37. Le sédiment « BR-RAN » est moins plastique que celui de Dunkerque « HF-DK ». Les valeurs des limites d'Atterberg sont récapitulées dans le tableau 3-17. Dans ce tableau on peut apprécier que l'indice de plasticité du sédiment « HF-DK » est presque quatre fois plus important que celui du sédiment « BR-RAN ». Ceci peut être dû au fait que le sédiment de Dunkerque a une limite de liquidité plus importante que celle du sédiment « BR-RAN ». Rappelons que la limite de liquidité augmente avec la matière organique. La limite de liquidité est aussi liée à la minéralogie des sédiments.

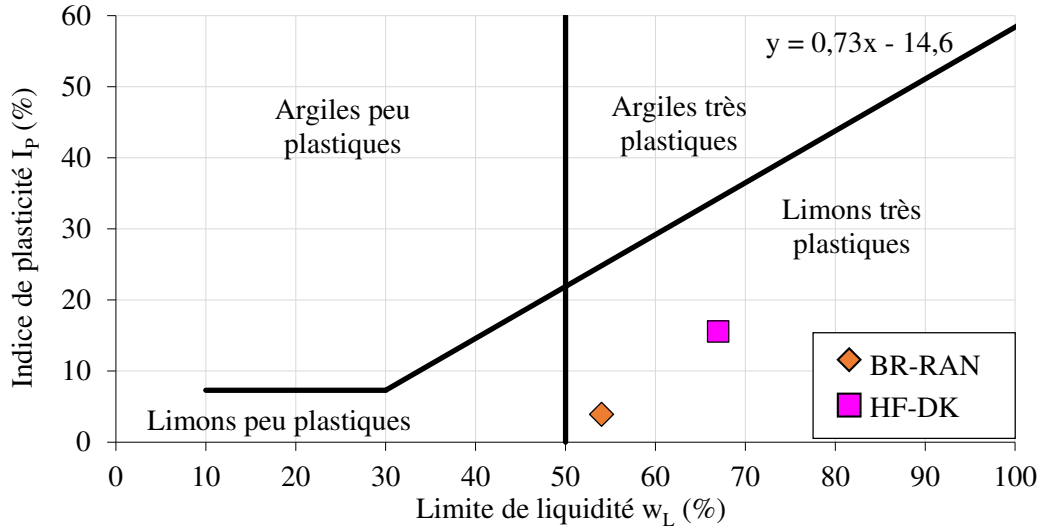



*Figure 3-37. Relation $I_P$-$w_L$ pour les sédiments marins.*

*Tableau 3-17. Valeurs des limites d'Atterberg des sédiments marins.*

| **Sédiment** | **Limite de liquidité $w_L$ (%)** | **Limite de plasticité $w_P$ (%)** | **Indice de plasticité $I_P$ (%)** |
|---|---|---|---|
| BR-RAN | 54,00 | 50,00 | 4,00 |
| HF-DK | 67,00 | 51,00 | 16,00 |

### *Valeur au bleu de méthylène*

Ces deux sédiments marins ont un comportement de sols limoneux de plasticité moyenne. Ils ont des teneurs en argiles du même ordre, le sédiment « HF-DK » est le plus argileux, voir tableau 3-18.

*Tableau 3-18. Valeur au bleu de méthylène des sédiments marins.*

| | **BR-RAN** | **HF-DK** |
|---|---|---|
| **VBS (g/100g)** | 3,09 | 3,17 |

### *Matière organique*

Les sédiments marins « HF-DK » ont le double de matière organique que ceux de la Rance, avec 12,80 % et 6,28 % respectivement.

### *Éléments majeurs*

Les éléments majeurs qui constituent les sédiments « HF-DK » sont le dioxyde de silicium avec 39,50% et l'oxyde de calcium avec 30,80%, voir tableau 3-19. L'analyse chimique des éléments majeurs a été réalisée par micro-spectrométrie de fluorescence X. Ces résultats sont exprimés en pourcentage massique.

*Tableau 3-19. Composition chimique des sédiments « HF-DK » par micro-spectrométrie de fluorescence X, (MUNCK, 2015).*

| | $SiO_2$ | CaO | $Fe_2O_3$ | $Al_2O_3$ | $K_2O$ | MgO | $TiO_2$ | MnO | $ZrO_2$ | Zn | Cr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (%) | 39,50 | 30,80 | 12,30 | 8,10 | 2,20 | 1,60 | 0,60 | 0,20 | 0,10 | - | - |
| ppm | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1384 | 348 |

En ce qui concerne les éléments majeurs des sédiments de la Rance, il faut souligner qu'ils sont composés notamment de dioxyde de silicium, avec un pourcentage de 44,77%, suivis des oxydes d'aluminium et de calcium avec 12,03% et 11,00% respectivement, voir tableau 3-20. Ces résultats ont été obtenus à l'aide des analyses chimiques des éléments majeurs par spectrométrie d'émission atomique à plasma inductif. Les valeurs de la composition chimique des sédiments de la Rance sont semblables à celles de FAURE (2017). La petite différence des valeurs observées (moins de 2,5% de différence), peut être due à la sélection de l'échantillon.

*Tableau 3-20. Composition chimique des sédiments « BR-RAN » exprimée en pourcentage massique.*

| | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $P_2O_5$ | MnO | $Cr_2O_3$ | SrO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $SO_3$ | $TiO_2$ | PF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 44,77 | 12,03 | 5,69 | 11,00 | 1,98 | 0,24 | 0,05 | 0,01 | 0,06 | 1,35 | 1,61 | 0,59 | 0,67 | 19,43 |
| (1) | 46,96 | 11,97 | 5,79 | 12,13 | 1,72 | 0,64 | 0,05 | 0,29 | 0,08 | 0,75 | 2,08 | 0,30 | 0 | 17,05 |

***Note** : « PF » signifie Perte au Feu. (1) d'après FAURE (2017).*

### *3.4.4.2. Caractérisation minéralogique*

### *Minéralogie*

Les sédiments « BR-RAN » sont composés principalement de quartz, de calcite, de kaolinite et de muscovite, voir tableau 3-21.

*Tableau 3-21. Composition minéralogique des sédiments marins.*

| Minéraux (%) | BR-RAN | HF-DK |
|---|---|---|
| **Silice** | | |
| Quartz - $SiO_2$ | 22 | - |
| **Carbonates** | | - |
| Calcite - $CaCO_3$ | 13 | - |
| Aragonite - $CaCO_3$ | 5 | - |
| Dolomite - $CaMg(CO_3)_2$ | 0 | - |
| **Silicates** | | |
| Illite - $KFeMg_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ | 8 | - |
| Kaolinite - $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ | 13 | - |
| **Phyllosilicates** | | |
| Phyllosilicates | 0 | - |
| Paragonite - $NaAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$ | 0 | - |
| Muscovite - $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$ | 11 | - |
| **Feldspaths** | | |
| Albite - $NaAlSi_3O_8$ | 6 | - |
| Microcline - $KAlSi_3O_8$ | 4 | - |
| Sanidine – $K_{0,42}Na_{0,58}Ca_{0,03}(AlSi_3O_8)$ | 0 | - |
| Anorthite– $Ca_{0,66}Na_{0,34}A_{11,66}Si_{2,34}O_8$ | 0 | - |
| **Sulfures** | | |
| Pyrite- $FeS_2$ | 0 | - |
| Gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ | 2 | - |
| **Corps amorphe** | 17 | - |

***Note** : Information fournie par le laboratoire LERM.*

***Teneur en carbonates***

Ces deux sédiments marins possèdent d'importantes teneurs de $CaCO_3$. Le sédiment de la Rance a la teneur en carbonates la plus élevée avec 17,91 % mais le sédiment du port de Dunkerque a un pourcentage moindre de 9,34%.

### *3.4.4.3. Caractérisation hydromécanique*

L'étude de la décantation et de la consolidation des sédiments de Dunkerque a été effectuée par IDJRAOUI (2014), BAGAMBOULA (2015), BERKAINE (2015) et BERKAINE (2016) et celle de la Rance a été réalisée avec la collaboration de BAYONNE MAVOUNGOU (2018). Les sections suivantes font un rappel d'une partie des résultats obtenus.

***Décantation***

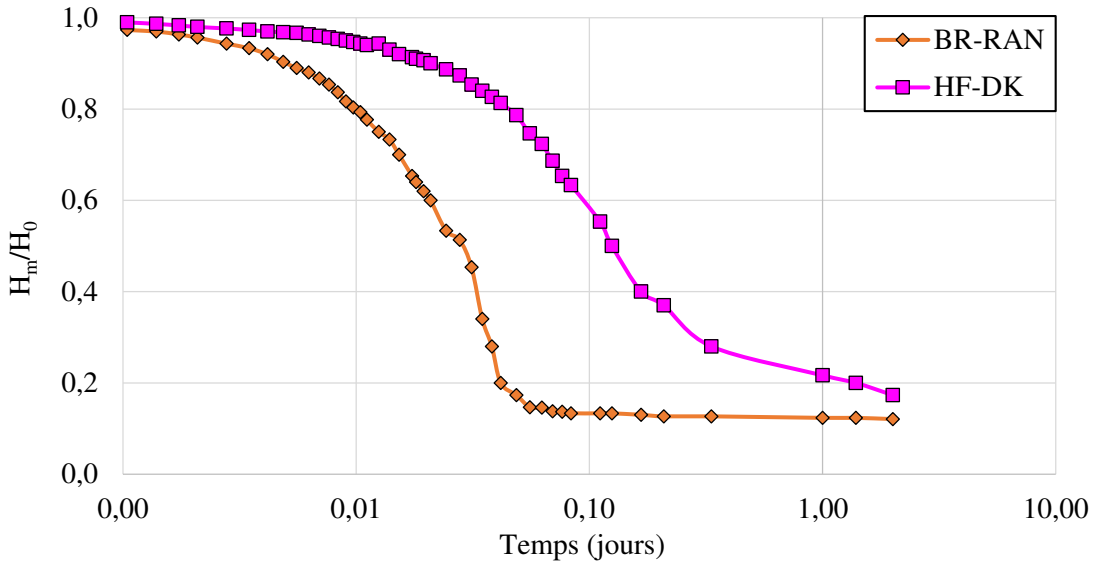
- Description du matériel utilisé et les paramètres initiaux

Les essais de décantation ont été réalisés à l'aide de colonnes transparentes de 1,5 mètre de hauteur, de 41 millimètres de diamètre externe et 3 millimètres d'épaisseur. Deux

concentrations initiales ont été choisies pour ces sédiments : 100 g/l et 250 g/l. Les essais ont été réalisés pendant deux jours.

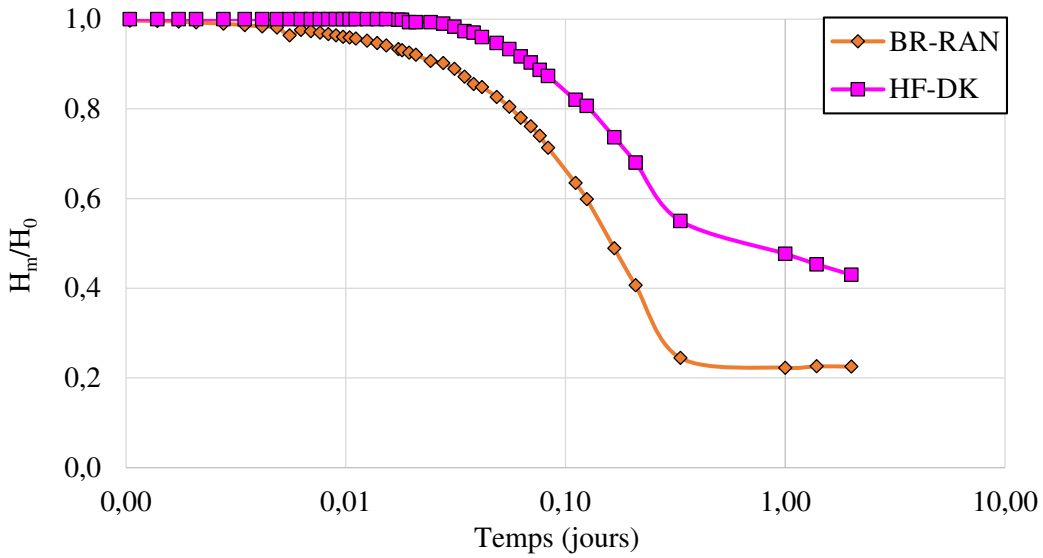
- Tassement en colonne des sédiments marins

Les sédiments marins étudiés sont caractérisés avec une importante teneur en matière organique et une forte quantité de particules fines. Pour cette raison, ils décantent très doucement. Du fait que les sédiments marins du GPMD ont le double de matière organique que ceux de la Rance, les sédiments « HF-DK » présentent les plus faibles vitesses de décantation. Les courbes de décantation peuvent être observées sur les figures 3-38 et 3-39.




***Note** : $H_0$= hauteur de sédiment initiale ; $H_m$=hauteur de sédiment mesurée, (d'après BERKAINE, 2016 et BAYONNE MAVOUNGOU, 2018).*

*Figure 3-38. Courbes de tassement des sédiments marins pour une concentration initiale de 100 g/l.*

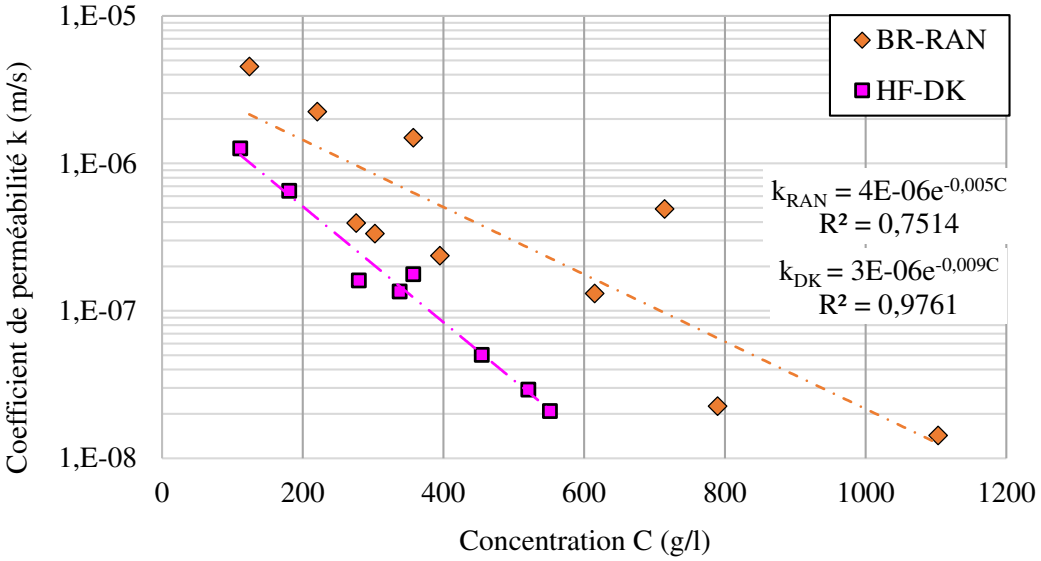



***Note** : $H_0$= hauteur de sédiment initiale ; $H_m$=hauteur de sédiment mesurée, (d'après BERKAINE, 2016 et BAYONNE MAVOUNGOU, 2018).*

*Figure 3-39. Courbes de tassement des sédiments marins pour une concentration initiale de 250 g/l.*

- Perméabilité des sédiments marins

L'évolution de la perméabilité par rapport à la concentration de ces deux sédiments marins est presque linéaire sur les intervalles de concentration considérés 100-550 g/l pour les sédiments du GPMD et 100-1100 g/l pour les sédiments de la Rance. La perméabilité est inversement proportionnelle à la concentration. Pour ces intervalles de concentrations, les coefficients de perméabilité sont de l'ordre $10^{-6}$ à $10^{-8}$, voir figure 3-40. Cela correspond à des sédiments qui présentent de faibles capacités au drainage, selon HOLTZ & KOVACS (1991).



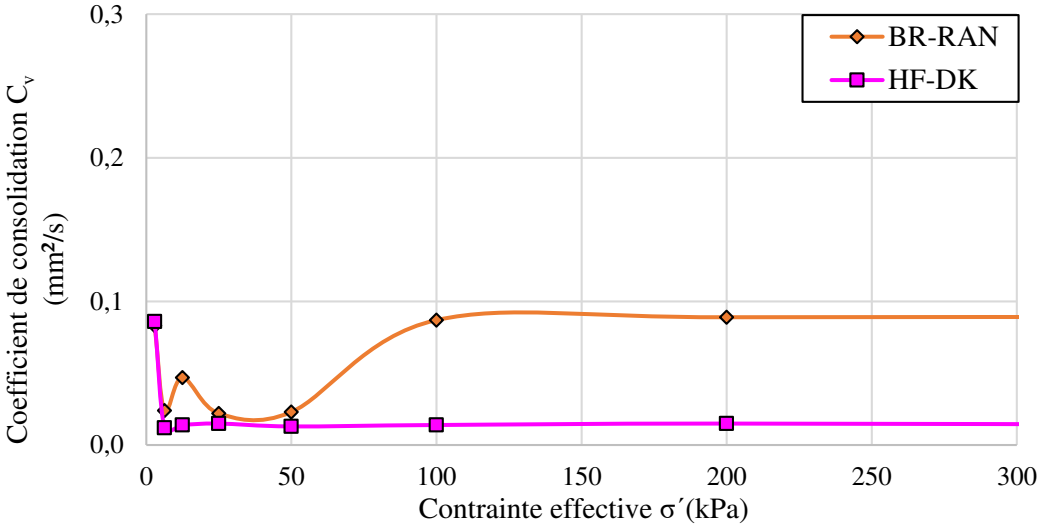

***Note** : Relations obtenues d'après BERKAINE, 2016 et BAYONNE MAVOUNGOU, 2018.*

*Figure 3-40. Relation entre le coefficient de perméabilité et la concentration des sédiments marins.*

***Consolidation***

- Tassement

Le coefficient de consolidation ($C_v$) des sédiments marins fluctue pour des niveaux de contrainte appliquée faibles et se stabilise par la suite. Ces fluctuations peuvent être dues au tassement en début de chargement et par le tassement instantané généré par la charge. Le coefficient de consolidation devient stable à partir de 50 kPa pour le sédiment « HF-DK », et vers 100 kPa pour le sédiment « BR-RAN ». L'allure de ces courbes est semblable aux sédiments de barrage étudiés, voir figure 3-41.

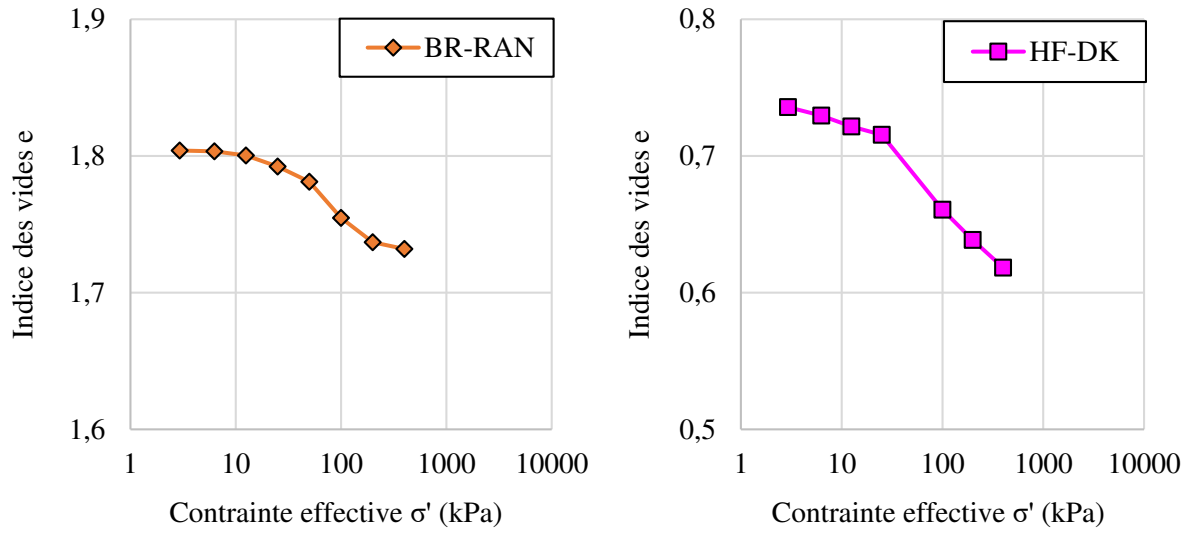



***Note** : Relations obtenues d'après BERKAINE, 2016 et BAYONNE MAVOUNGOU, 2018.*

*Figure 3-41. Coefficient de consolidation des sédiments marins en fonction de la contrainte appliquée.*

- Courbes œdométriques

Les courbes œdométriques des sédiments marins sont représentées sur la figure 3-42. Ces sédiments présentent une courbe œdométrique avec une allure classique. Les variations d'indices des vides selon la contrainte appliquée sont faibles, ceci peut être expliqué par le fait que les indices des vides initiaux étaient faibles.



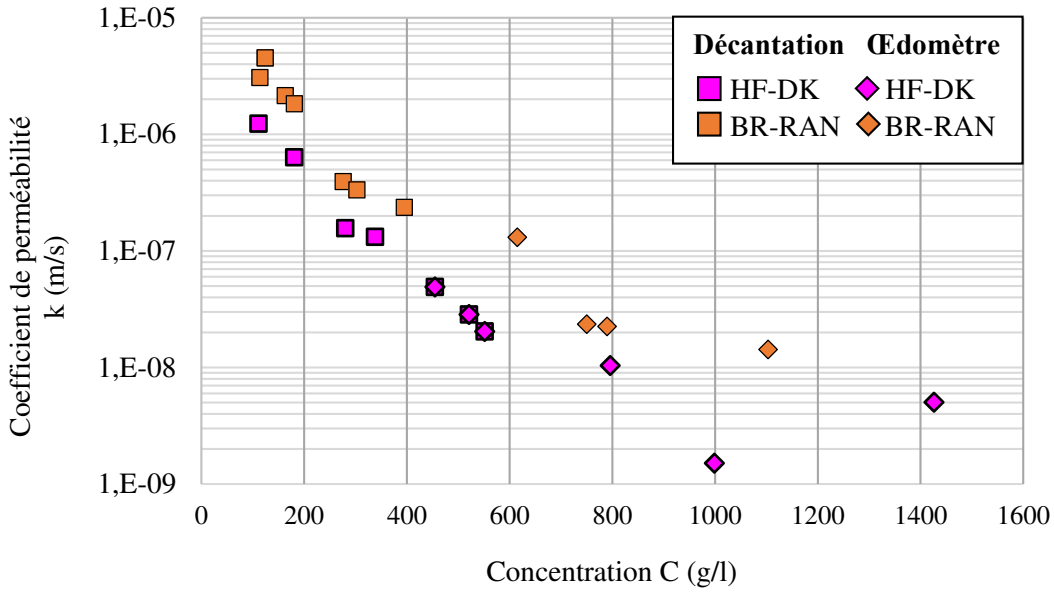

*(a) BR-RAN* *(b) HF-DK*

***Note** : Relations obtenues d'après BERKAINE, 2016 et BAYONNE MAVOUNGOU, 2018.*

*Figure 3-42. Courbes œdométriques des sédiments marins.*

- Perméabilité

Les sédiments du GPMD lors des essais œdométriques ont une concentration au cours de l'essai qui varie de 500 à 1450 g/l. Les coefficients de perméabilité issus de l'essai œdométrique sont de l'ordre de $10^{-7}$ à $10^{-9}$, ce qui correspond à des sédiments « très peu perméables ». Néanmoins, les sédiments de la Rance ont des coefficients de perméabilité de l'ordre de $10^{-5}$ à $10^{-8}$, ce qui correspond à des mélanges de sables très fins, de limons et d'argile, voir figure 3-43.




***Note** : Résultats obtenus à partir de l'essai œdométrique et des colonnes de décantation, (d'après BERKAINE, 2016 et BAYONNE MAVOUNGOU, 2018).*

*Figure 3-43. Relation entre le coefficient de perméabilité et la concentration des sédiments marins.*

- Récapitulatif des paramètres de consolidation

Les sédiments du GPMD sont très compressibles puisque la valeur de $C_{co}/(1+e_o)$ est supérieure à 0,20, voir tableau 3-22.

*Tableau 3-22. Récapitulatif des paramètres de consolidation des sédiments marins.*

| | **Référence** | **BR-RAN** | **HF-DK** |
|---|---|---|---|
| **Consolidation** | $C_{co}/(1+e_o)$ | 0,016 | 0,289 |
| | k (m/s) | $10^{-5}$ -$10^{-8}$ | $10^{-7}$ -$10^{-9}$ |
| | $C_v$ ($10^{-6}$ $m^2/s$) | 0,089 | 0,014 |

### *3.4.5. Bilan*

Les tableaux suivants (3-23 à 3-25) rassemblent les caractéristiques physicochimiques, minéralogiques et hydromécaniques des sédiments marins.

*Tableau 3-23. Récapitulatif des caractéristiques physico-chimiques des sédiments marins.*

| | Référence | BR-RAN | HF-DK |
|---|---|---|---|
| **Granulométrie** | Argiles (%) | 8,15 | 1,00 |
| | Limons fins (%) | 38,15 | 50,00 |
| | Limons grossiers (%) | 27,40 | 20,00 |
| | Sables fins (%) | 24,60 | 24,00 |
| | Sables grossiers (%) | 1,70 | 5,00 |
| | $d_{10}$ (µm) | 2,56 | 4,50 |
| | $d_{30}$ (µm) | 10,10 | 9,00 |
| | $d_{50}$ (µm) | 23,50 | 18,00 |
| | $d_{60}$ (µm) | 32,00 | 25,00 |
| | Teneur en fines | 85,00 | 82,00 |
| | $C_u$ | 12,51 | 5,55 |
| | $C_c$ | 1,25 | 0,72 |
| **Surface spécifique** | BET ($m^2/g$) | 13,28 | 14,33 |
| | Blaine ($m^2/g$) | 0,71 | - |
| **Masse volumique des particules solides** | $\rho_s$ ($g/cm^3$) | 2,59 | 2,47 |
| **Limites d'Atterberg** | $w_L$ (%) | 54,00 | 67,00 |
| | $w_P$ (%) | 50,00 | 51,00 |
| | $I_P$ (%) | 4,00 | 16,00 |
| **Argilosité** | VBS (g/100g) | 3,09 | 3,17 |
| **MO** | MO (%) | 6,28 | 12,80 |
| **Éléments majeurs (en % massique)** | $SiO_2$ | 44,77 | 39,50 |
| | $Al_2O_3$ | 12,03 | 8,10 |
| | $Fe_2O_3$ | 5,69 | 12,30 |
| | CaO | 11,00 | 30,80 |
| | MgO | 1,98 | 1,60 |
| | $TiO_2$ | 0,67 | 0,60 |
| | MnO | 0,05 | 0,20 |
| | $P_2O_5$ | 0,24 | - |
| | SrO | 0,06 | - |
| | $Na_2O$ | 1,35 | - |
| | $K_2O$ | 1,61 | 2,20 |
| | $SO_3$ | 0,59 | - |
| | $ZrO_2$ | - | 0,10 |
| | $Cr_2O_3$ | 0,01 | - |
| | PF | 19,43 | 4,60 |

*Tableau 3-24. Récapitulatif des caractéristiques minéralogiques des sédiments marins.*

| | Référence | BR-RAN | HF-DK |
|---|---|---|---|
| **Calcimétrie** | $CaCO_3$ (%) | 17,91 | 9,34 |
| **Minéralogie** | Quartz | 22 | - |
| | Calcite | 13 | - |
| | Dolomite | 0 | - |
| | Aragonite - $CaCO_3$ | 5 | - |
| | Illite | 8 | - |
| | Kaolinite | 13 | - |
| | Phyllosilicates | 0 | - |
| | Paragonite | 0 | - |
| | Muscovite | 11 | - |
| | Albite | 6 | - |
| | Microcline | 4 | - |
| | Sanidine | 0 | - |
| | Anorthite | 0 | - |
| | Pyrite | 0 | - |
| | Gypse | 2 | - |
| | Corps amorphe | 17 | - |

*Tableau 3-25. Récapitulatif des paramètres de consolidation des sédiments marins.*

| | Référence | BR-RAN | HF-DK |
|---|---|---|---|
| **Consolidation** | $C_{co}/(1+e_o)$ | 0,016 | 0,289 |
| | k (m/s) | $10^{-5}$ -$10^{-8}$ | $10^{-7}$ -$10^{-9}$ |
| | $C_v$ ($10^{-6}$ $m^2/s$) | 0,089 | 0,014 |

## 3.5. LE MATÉRIAU ARGILEUX

### 3.5.1. Description de la kaolinite Speswhite

La kaolinite Speswhite dénommée « KAO » est une argile blanche, d'aspect homogène, composée principalement de dioxydes de silicium et d'aluminium. Elle se trouve dans les roches argileuses, comme le kaolin, ou dans les roches magmatiques comme résultat de l'altération des feldspaths et des granites (KOGEL et al., 2006). Cette argile peut être utilisée *(i)* dans l'industrie du papier comme charge dans la masse du papier et comme revêtement de surface afin de réduire la quantité de pâte à papier, d'améliorer les propriétés optiques et de réduire le coût de production ; *(ii)* dans l'industrie céramique pour la fabrication de porcelaines ou *(iii)* dans l'industrie alimentaire.

### 3.5.2. Caractérisation physico-chimique

Les caractéristiques physico-chimiques de cette argile ont été fournies par LE, (2014) et la société « IMERYS performance minerals ».

#### Granulométrie

La kaolinite Speswhite est composée de particules fines, 98,10% de ses particules ont un diamètre inférieur à 80 µm. Ce matériau a un pourcentage élevé de limons fins du point de vue granulométrique. Il possède une taille de grains « bien étalée » et une courbe granulométrique « mal graduée », voir figure 3-44 et tableau 3-26.

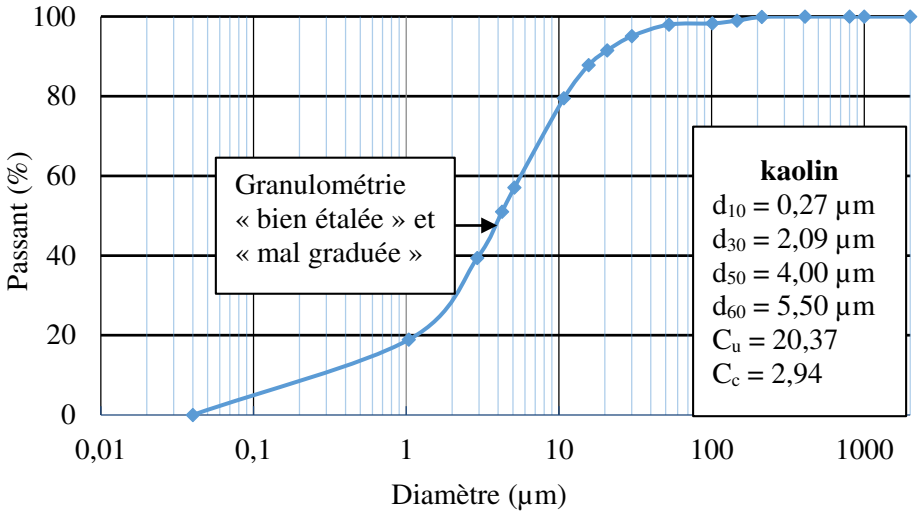



*Figure 3-44. Distribution granulométrique de la kaolinite Speswhite.*

*Tableau 3-26. Récapitulatif des paramètres granulométriques de la kaolinite Speswhite.*

| Argiles (%) | Limons fins (%) | Limons grossiers (%) | Sables fins (%) | Sables grossiers (%) |
|---|---|---|---|---|
| 29,80 | 61,30 | 6,80 | 1,90 | 0,20 |

### *Texture*

La kaolinite Speswhite a une texture « limoneuse argileuse fine », voir figure 3-45.

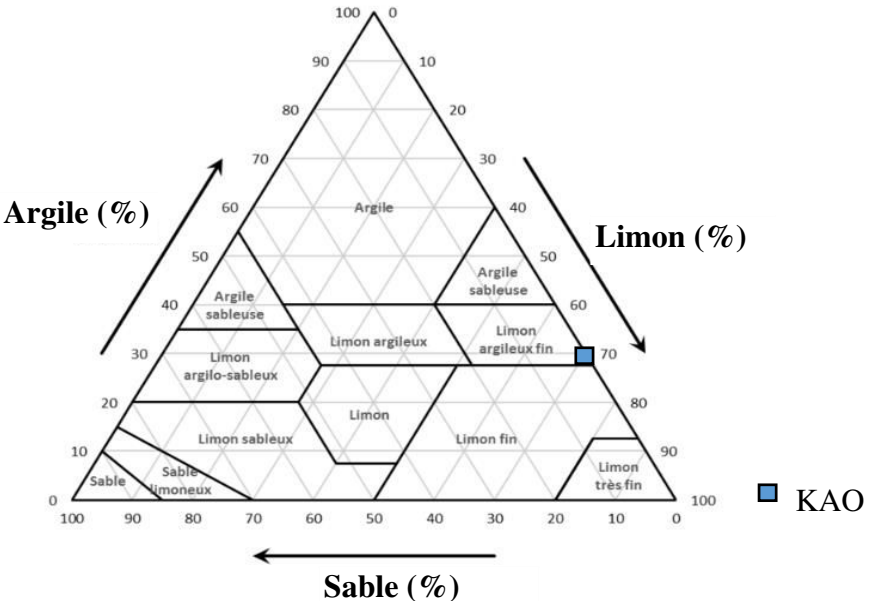



*Figure 3-45. Texture de la kaolinite Speswhite.*

### *Surface spécifique*

La surface spécifique de la kaolinite Speswhite est 30 $m^2/g$.

### *Limites d'Atterberg*

La kaolinite Speswhite peut être classifiée comme « limon ou argile très plastique », voir figure 3-46. Les valeurs des limites d'Atterberg sont répertoriées dans le tableau 3-27.

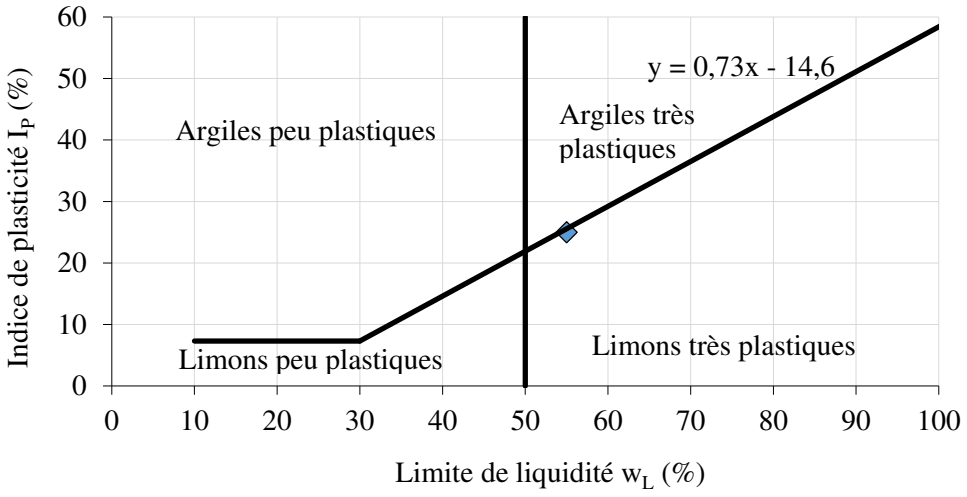



*Figure 3-46. Relation $I_P$-$w_L$ pour la kaolinite Speswhite.*

*Tableau 3-27. Valeurs des limites d'Atterberg de la kaolinite Speswhite.*

| Limite de liquidité $w_L$ (%) | Limite de plasticité $w_P$ (%) | Indice de plasticité $I_P$ (%) |
|---|---|---|
| 55 | 30 | 25 |

***Poids spécifique***

Le poids spécifique ou des particules solides de la kaolinite Speswhite ($\gamma_s$) est 26 kN/m$^3$.

***Potentiel hydrogène***

Le potentiel hydrogène (pH) de la kaolinite Speswhite est de 5,5. Cette mesure de l'activité chimique des ions hydrogène $H^+$ est classée comme « acide ».

### *3.5.3. Caractérisation minéralogique*

Les caractéristiques minéralogiques de la kaolinite Speswhite ont été fournies par LE, (2014) et la société « IMERYS performance minerals ».

***Minéralogie***

La kaolinite Speswhite est essentiellement composée de 47% de dioxyde de silicium ($SiO_2$) et de 38% d'oxyde d'aluminium ($Al_2O_3$). Elle appartient au groupe des silicates et sous-groupe des phyllosilicates.

***Teneur en carbonates***

Ce matériau a une teneur en carbonates très faible de 0,45%.

### *3.5.4. Caractérisation hydromécanique*

L'étude de la décantation et de la consolidation de la kaolinite Speswhite a été réalisée par BAYONNE MAVOUNGOU (2018) au laboratoire M2C. Un résumé des résultats obtenus est donné dans les sections suivantes.

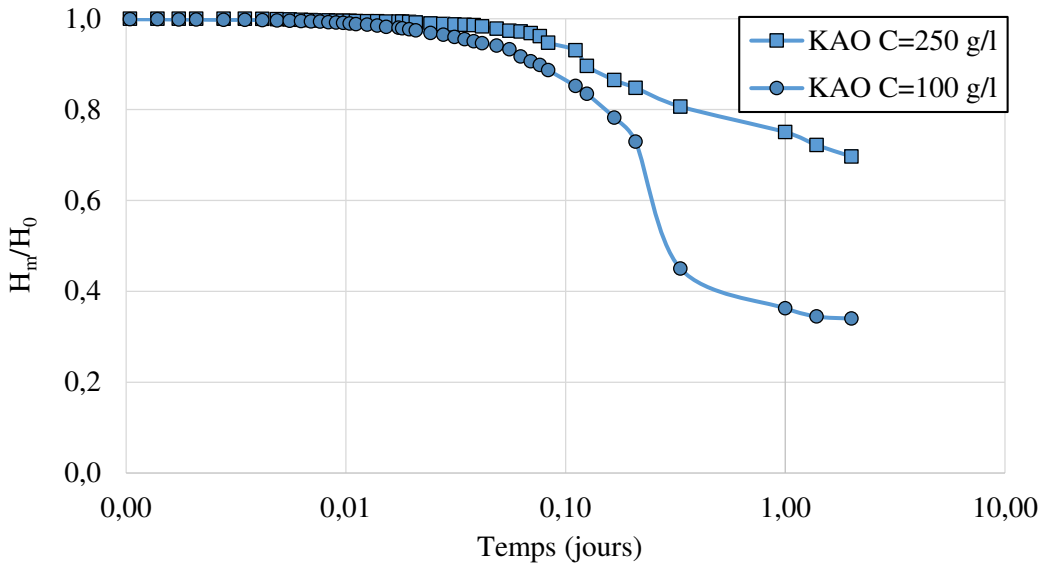
***Décantation***

- Description du matériel utilisé et les paramètres initiaux

Les colonnes utilisées pendant les essais de décantation ont 1,5 mètre de hauteur, 41 millimètres de diamètre externe et 3 millimètres d'épaisseur. Les essais de décantation ont été réalisés pendant deux jours avec des concentrations initiales de 100 g/l et 250 g/l.

- Tassement en colonne de la kaolinite Speswhite

Les faibles vitesses de décantation obtenues dans la réalisation des essais de décantation résident dans le fait que le matériau étudié est une argile. Les allures des courbes de décantation peuvent être observées sur la figure 3-47.

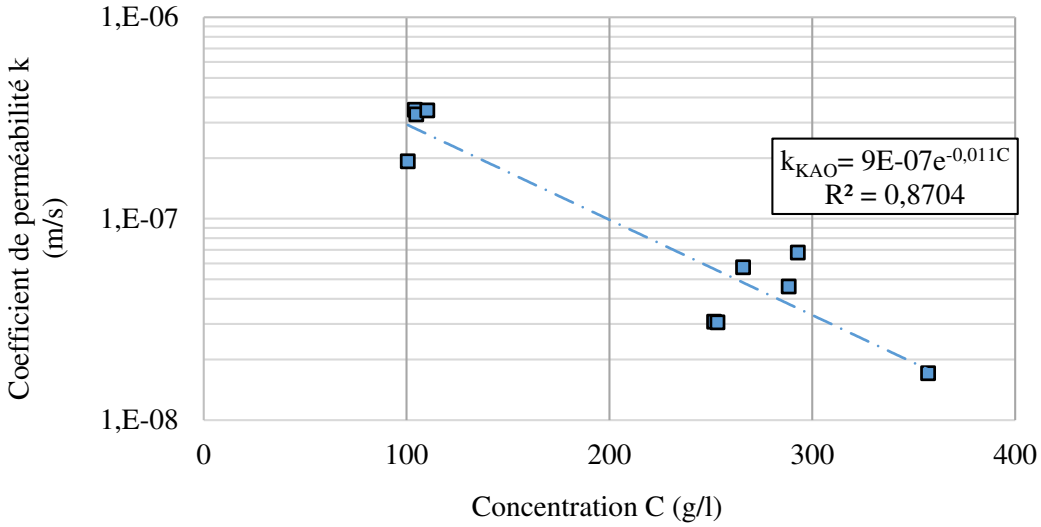



***Note** : $H_0$= hauteur de sédiment initiale ; $H_m$=hauteur de sédiment mesurée, (d'après BAYONNE MAVOUNGOU, 2018).*

*Figure 3-47. Courbes de tassement du kaolin pour des concentrations initiales de 100 g/l et de 250 g/l.*

- Perméabilité de la kaolinite Speswhite

L'évolution de la perméabilité selon la concentration de la kaolinite est presque linéaire sur les intervalles de concentration de 100-350 g/l, et la perméabilité est inversement proportionnelle à la concentration. Pour les intervalles de concentrations étudiés, les coefficients de perméabilité sont de l'ordre $10^{-6}$ à $10^{-8}$, voir figure 3-48. Cela correspond à des sols qui présentent de faibles capacités au drainage, selon HOLTZ & KOVACS (1991).



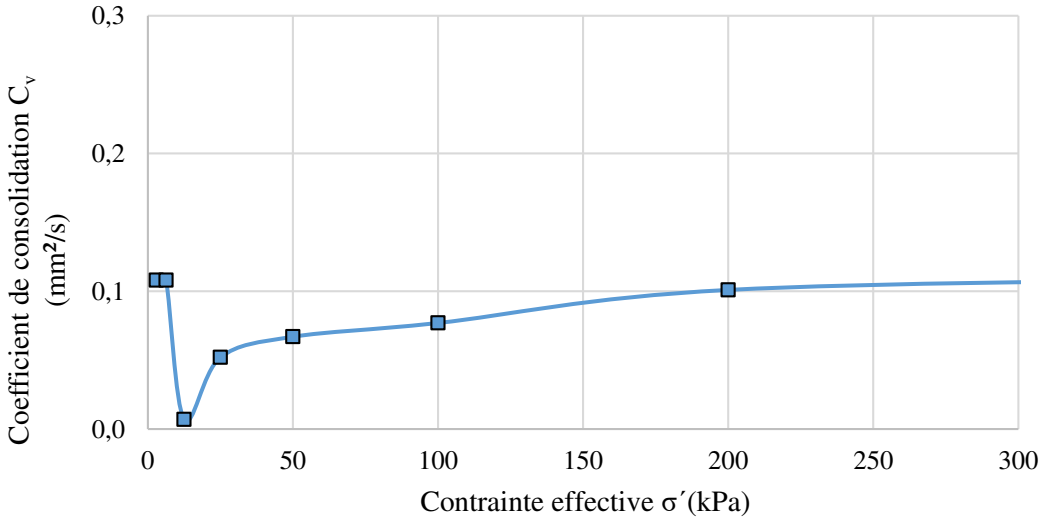

***Note** : Relation obtenue d'après BAYONNE MAVOUNGOU, 2018.*

*Figure 3-48. Relation entre le coefficient de perméabilité et la concentration de la kaolinite.*

### *Consolidation*

- Tassement

Le coefficient de consolidation ($C_v$) de la kaolinite fluctue pour des niveaux de contrainte appliquée faibles et se stabilise par la suite. Ces fluctuations peuvent être dues au tassement en début de chargement et par le tassement instantané généré par la charge. Le coefficient de consolidation se stabilise lentement mais régulièrement, voir figure 3-49.

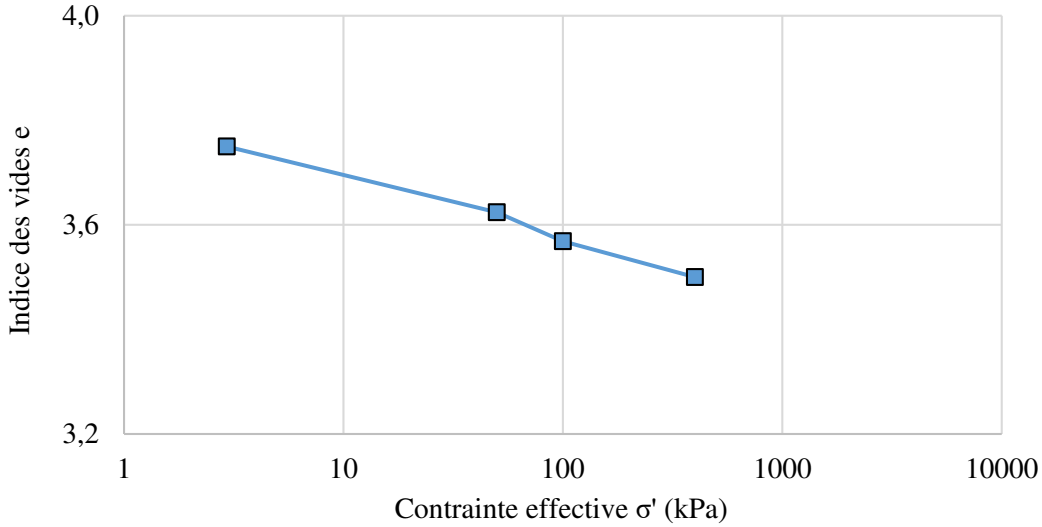



***Note** : Relation obtenue d'après BAYONNE MAVOUNGOU, 2018.*

*Figure 3-49. Coefficient de consolidation de la kaolinite en fonction de la contrainte appliquée.*

- Courbes œdométriques

La courbe œdométrique de la kaolinite est représentée sur la figure 3-50. Elle présente une allure classique. Du fait que la kaolinite a été hydratée pour obtenir une teneur en eau élevée de 1,5$w_L$, il est possible que des petits « grumeaux » se soient formés, ce qui peut expliquer la présence de points décalés en début d'essai.




***Note** : Relations obtenues d'après BAYONNE MAVOUNGOU, 2018.*

*Figure 3-50. Courbe œdométrique de la kaolinite.*

- Fluage

La kaolinite présente un indice de fluage égale à 0,001.

- Récapitulatif des paramètres de consolidation

Les paramètres de consolidation sont rassemblés dans le tableau 3-28. La kaolinite avec une valeur de $C_{co}/(1+e_o)$ égale à 0,347 est considérée comme « très compressible » puisque son valeur de $C_{co}/(1+e_o)$ est supérieur à 0,20.

*Tableau 3-28. Paramètres de consolidation de la kaolinite.*

| **Référence** | $C_{co}/(1+e_o)$ | $C_a$ | $C_v$ ($10^{-6}$ $m^2/s$) |
|---|---|---|---|
| | 0,347 | 0,001 | 0,101 |

## *3.6. LE MATÉRIAU SABLEUX*

### *3.6.1. Description du sable de Fontainebleau*

Le sable de Fontainebleau est un sable très fin, d'aspect homogène, de couleur marron très clair. Il est composé de 97 à 99 % de silice et il est caractérisé pour avoir des grains ronds à sub-anguleux. Ce type de sable peut être utilisé *(i)* en verrerie, *(ii)* en fonderie, *(iii)* dans l'industrie du béton et aussi *(iv)* pour des filières sportives.

### *3.6.2. Caractérisation physico-chimique*

Les caractéristiques physico-chimiques du sable de Fontainebleau ont été fournies par la carrière SIFRACO.

***Granulométrie***

Le sable fin de Fontainebleau est composé de 0,94% de limons fins, 0,16% de limons grossiers, 27,60% de sables fins et 71,30% de sables grossiers. Il possède une granulométrie uniforme et une courbe granulométrique bien graduée, voir figure 3-51.

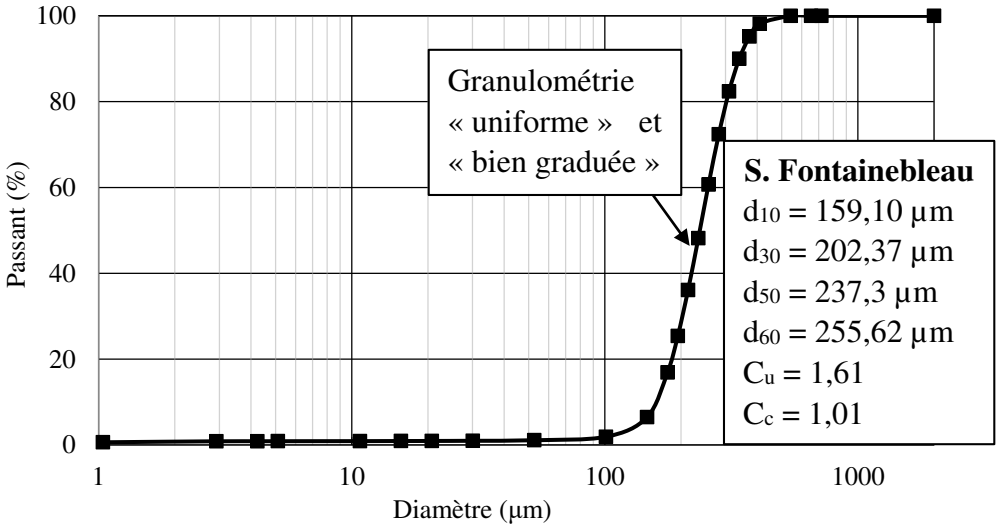



*Figure 3-51. Distribution granulométrique du sable de Fontainebleau.*

***Texture***

Le sable de Fontainebleau possède une texture « sableuse ». Ce type de texture correspond aux matériaux qui sont bien aérés et très drainants et pauvres en matières organiques, voir figure 3-52.

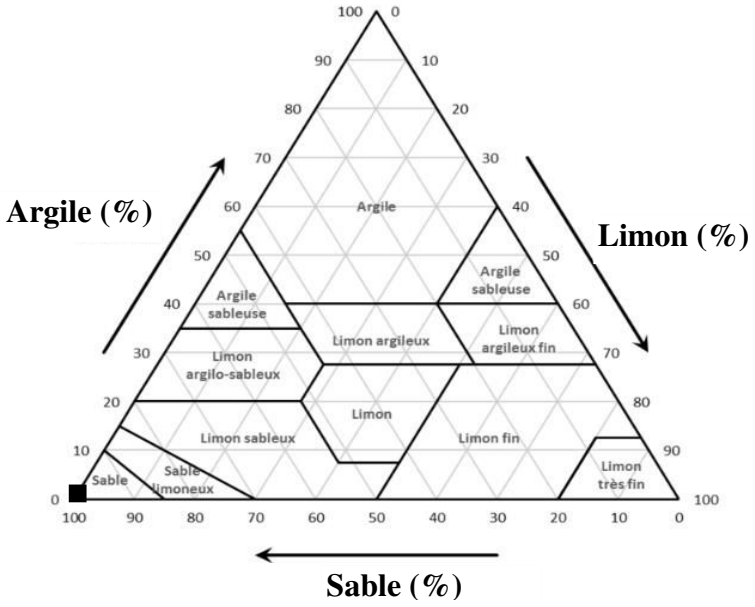



*Figure 3-52. Texture du sable de Fontainebleau.*

***Poids spécifique***

Le poids spécifique des particules solides du sable de Fontainebleau ($\gamma_s$) est égal à 26,4 kN/m$^3$.

***Poids volumique sec***

Son poids volumique sec ($\gamma_d$) est de 15 kN/m$^3$.

***Dureté***

Ce type de sable a une dureté de 7 mesuré selon l'échelle de Mohs.

***Potentiel hydrogène***

Le potentiel hydrogène (pH) du sable de Fontainebleau est de 7. Cette valeur correspond à un potentiel hydrogène « neutre ».

***Éléments majeurs***

Le sable de Fontainebleau est essentiellement composé de dioxyde de silicium avec 97,20%. Il contient aussi de l'oxyde d'aluminium avec 1,60% et l'oxyde de potassium avec 1,00%, voir tableau 3-29. Les éléments majeurs de ce type de sable sont exprimés en pourcentage massique.

*Tableau 3-29. Composition chimique du sable de Fontainebleau exprimée en pourcentage massique.*

| **Élément** | **%** |
|---|---|
| $SiO_2$ | 97,2 |
| $Al_2O_3$ | 1,60 |
| $K_2O$ | 1,00 |
| $TiO_2$ | 0,08 |
| $Fe_2O_3$ | 0,04 |
| CaO | 0,02 |

### *3.7. CONCLUSION DU CHAPITRE*

Un ensemble de sept sédiments de barrage, deux sédiments marins, un matériau argileux et un matériau sableux ont été étudiés et caractérisés au sein des laboratoires : M2C, IFSTTAR, LERM et ESITC afin de déterminer leurs propriétés physico-chimiques, minéralogiques et hydromécaniques.

Les sédiments de barrage et ceux de la Rance ont été choisis par l'entreprise EDF. Les sédiments du GPMD ont été sélectionnés par le programme de recherche et développement COVASED. Tous ces sédiments, exception faite des sédiments du port de Dunkerque (DPMD), ont été codifiés par les deux premières lettres de leur région et les trois premières lettres de leur lieu d'origine. Les sédiments provenant du GPMD ont été dénommés par l'acronyme « HF-DK ». Les résultats obtenus à partir des essais de caractérisation physico-chimique, minéralogique et hydromécanique sont fortement liés aux origines des sédiments. Ils permettent d'établir les conclusions suivantes :

Concernant les sédiments de barrage, les sédiments alpins montrent un exemple de la formation des Alpes pendant les systèmes géologiques Trias, l'Éocène, et l'Oligocène. Ils ont des teneurs en carbonates assez élevées et des teneurs en matière organique faibles. Ils sont riches en phyllosilicates et en carbonates. Ils sont essentiellement composés de dioxyde de silicium, d'oxyde d'aluminium, d'oxyde ferrique et d'oxyde de calcium.

**Les sédiments alpins étudiés sont constitués de particules fines, ils sont principalement composés de limons fins.** Ils présentent une granulométrie « bien étalée » et « mal graduée ». Ces sédiments disposent de textures « limoneuses fines ». Ils ont une consistance « peu plastique » et ils sont moyennement compressibles. Ils possèdent des masses volumiques des particules solides comprises entre 2,72 et 2,77 g/cm$^3$. En ce que concerne la décantation, **les sédiments alpins enregistrent les plus importants tassements** à plus d'un jour par rapport aux autres sédiments étudiés. Néanmoins, quelques différences peuvent être apportées :

- **Les sédiments « AL-FLU »** concernent les plus élevés pourcentages en oxyde d'aluminium (15,55%) et en oxyde ferrique (5,40%). Ils **sont composés principalement de quartz et ils ont le pourcentage le plus élevé de feldspaths.**

- **Les sédiments « AL-ISE » et « AL-CLA » ont le pourcentage le plus important de phyllosilicates** : 35% et 33% respectivement. **Les sédiments « AL-ISE » sont les sédiments alpins les plus argileux** (VBS = 1,80 g/100g).

- **Les sédiments « AL-SPO »** ont une portion relativement similaire de quartz, de carbonates et de phyllosilicates. **Ce sont les sédiments les moins plastiques** ($I_P$=3,48). Du point de vue hydromécanique, **ce sont des sédiments les moins imperméables.** Pour une concentration initiale de 250 g/l, ils ont le tassement en colonne le plus élevé.

**Les sédiments bretons « BR-SAI » ont un pourcentage assez élevé de sables fins** (35%). Ils disposent d'une courbe granulométrique « mal graduée » et une taille de grains « bien étalée ». Ils présentent des textures « limoneuses fines ». L'analyse des limites d'Atterberg souligne, une fois de plus, les différences d'origine des sédiments, les sédiments bretons ont une consistance « plastique ». Par rapport aux autres sédiments de barrage, **ceux prélevés en Bretagne ont la plus importante teneur en matière organique et un faible pourcentage de $CaCO_3$. Leur pourcentage de quartz est le plus élevé** et le dioxyde de silicium est leur élément majoritaire. Ils présentent une masse volumique des particules solides faible (2,50 g/cm$^3$).

**Les sédiments du Rhin ont un important pourcentage de sable fin** (35,50%). Ils ont aussi une courbe granulométrique « mal graduée » et « bien étalée ». Leur texture est « limoneuse fine » mais elle est plus sableuse que les sédiments alpins. **Ce sont les sédiments de barrage les plus argileux** (VBS = 2,40 g/100g) **et les plus plastiques** ($I_P$=25). Le quartz et les carbonates sont les minéraux les plus importants des sédiments du Rhin. Du point de vue chimique, ils ont les teneurs les plus élevées en oxyde d'aluminium et en oxyde ferrique.

En ce qui concerne **les sédiments provenant de la Nouvelle Aquitaine, ils sont essentiellement composés de sables grossiers**. Ils possèdent une taille de grains plus serrée ou uniforme. Ils ont une courbe granulométrique « bien graduée ». Leur texture est « sableuse ». Ils ont des faibles surfaces spécifiques. La masse volumique des particules solides est assez proche de la valeur de densité moyenne usuelle de 2,65 g/cm$^3$ ($\rho_{s.NA\text{-}ART}$ = 2,63 g/cm$^3$). **Les sédiments de la Nouvelle Aquitaine ont les plus faibles pourcentages de matière organique, de carbonates et d'argilosité.**

Quant aux **sédiments marins, « HF-DK » et « BR-RAN », ils sont composés de particules fines, principalement des limons fins**. Ils présentent une granulométrie « bien étalée » et « mal graduée ». Leur texture est « limoneuse fine ». Le dioxyde de silicium est leur élément majoritaire. Ils ont des masses volumiques des particules solides plus faibles (2,47 et 2,59 g/cm$^3$ respectivement) et des surfaces spécifiques élevées 14,33 et 13,28 m$^2$/g respectivement). Les différences existantes entre les caractéristiques sont fortement liées à leurs origines. Les sédiments du GPMD sont les plus plastiques et les plus organiques. Du point de vue minéralogique, les sédiments de la Rance ont le plus important pourcentage de carbonates.

Concernant le matériau argileux, il faut souligner que **la kaolinite Speswhite est une argile blanche composée notamment de dioxydes de silicium** (47%) **et d'aluminium** (37%). Elle présente une texture « limoneuse argileuse fine ». Elle a une teneur en carbonates très faible. Du point de vue chimique, elle peut être classifiée comme acide avec un pH de 5,5.

Quant au **sable de Fontainebleau**, c**'est un sable très homogène**, clair, composé essentiellement par de la silice (97,2%). Il a un poids spécifique des particules solides égale à 26,4 kN/m$^3$, une dureté de 7 mesuré selon l'échelle de Mohs et un pH neutre.

# *4. ÉTUDE DU SÉCHAGE DES SÉDIMENTS*

## *4.1. INTRODUCTION*

Le séchage naturel des sédiments consiste à éliminer l'eau présente dans le sédiment ce qui se traduit par un abaissement de la teneur en eau du sédiment. Cette diminution entraîne une variation de volume pouvant être plus ou moins importante en fonction des caractéristiques physico-chimiques, hydrauliques et minéralogiques des sédiments et par conséquence de l'épaisseur de la couche considérée. La déformation verticale due à cette perte d'eau est parfois dénommée « retrait » (SERRATRICE, 1995).

Considérons l'abaissement de la teneur en eau de sédiments ayant un comportement liquide. La teneur en eau supérieure à la limite de liquidité ($w>w_L$) constitue l'état initial, voir figure 4-1.a. Pour cet état où la teneur en eau est élevée, les sédiments sont saturés ($S_r=1$), l'indice des vides est aussi élevé. Les particules solides des sédiments ont une totale liberté de mouvement occupant un volume initial important. Au fur et à mesure, l'indice des vides des sédiments diminue progressivement entraînant les particules à s'agglomérer ensemble. Leur volume se réduit. Dans le cas d'échantillons cylindriques ceci peut être caractérisé par l'apparition de tassements verticaux et de diminutions du diamètre. Quand les sédiments ont une teneur en eau égale ou voisine de la limite de liquidité ($w\approx w_L$), ils tendent vers un comportement plastique, voir figure 4-1.b. À l'état plastique, le volume, l'indice des vides et le degré de saturation continuent à diminuer doucement. Lorsque les sédiments atteignent la limite de retrait ($w\approx w_R$), ils arrivent à l'état solide, voir figure 4-1.c. et le volume reste constant.

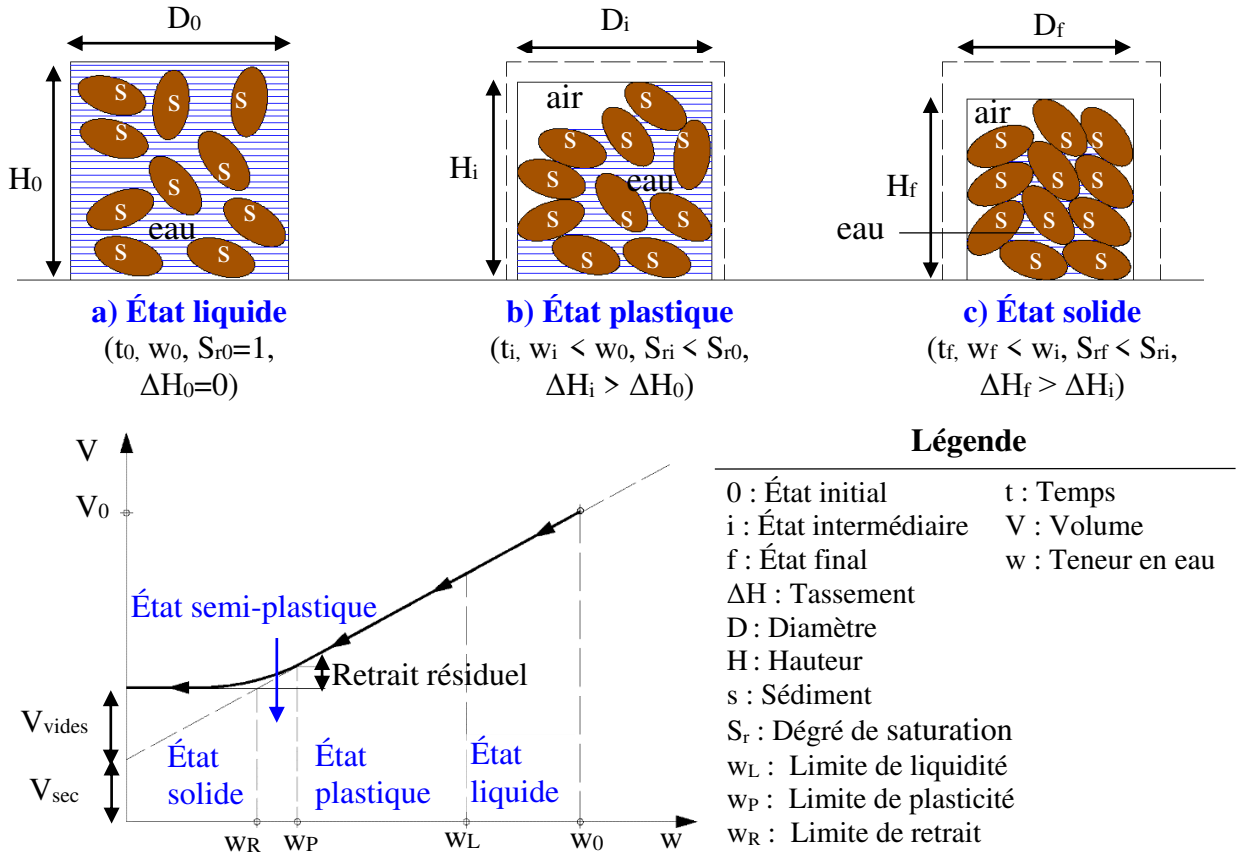



*Figure 4-1. États du sol et comportement du sol en fonction de la teneur en eau d'après HOLTZ & KOVACS (1991).*

La recherche et l'établissement de critères d'aptitude au séchage naturel reposent sur :

- l'observation des courbes relatives au séchage-retrait et à l'égouttage des sédiments,
- l'analyse des paramètres d'état mis en jeu,
- les caractéristiques géotechniques, minéralogiques et chimiques des sédiments.

Le présent chapitre comprend les résultats et l'analyse des Essais de Séchage - Retrait (ESR), d'Égouttage et de Séchage (EES) et des essais scissométriques sur les sédiments étudiés. Ces essais ont pour principal objectif la détermination des paramètres d'état des sédiments pendant le séchage naturel. Ils permettent d'observer le comportement de ces sédiments par rapport au temps de séchage et de suivre l'évolution des déformations provoquées par le séchage et le retrait des sédiments. Les résultats sont exprimés sous la forme de courbes de séchage-retrait en fonction du temps et des paramètres d'état. L'analyse de ces essais a permis de montrer les mécanismes mis en jeu lors d'un processus de séchage et d'autre part a servi de support à l'optimisation de tout type de séchage naturel et à la définition des critères d'aptitude pour contrôler l'évolution comportementale des sédiments.

## *4.2. PARAMÈTRES D'ÉTAT ET AUTRES RELATIONS*

Les paramètres d'état peuvent être définis comme étant les paramètres qui indiquent dans quelles proportions sont les différentes phases d'un sol ou d'un sédiment, comme la teneur en eau (w), l'indice des vides (e), le degré de saturation ($S_r$). La déformation axiale ($\varepsilon_a$) et la contrainte de cisaillement ou cohésion non drainée ($S_u$) complètent les principaux paramètres qui permettent d'étudier le comportement au séchage naturel des sédiments.

### *4.2.1. Teneur en eau des sédiments (w)*

La teneur en eau est le rapport du poids d'eau au poids des grains d'un échantillon de sédiments. Elle varie de 0% pour les sols secs à plus de 500% pour des sols d'origine marine et organique. La teneur en eau naturelle de la plupart des sols se situe bien en deçà de 100% (HOLTZ & KOVACS, 1991). La quantité d'eau peut être calculée avec la formule 2.9. Pendant l'étude du séchage naturel, la teneur en eau se détermine une fois que la masse sèche est connue. La masse sèche ou masse des grains composant un sédiment $M_s$ peut être calculée à la fin d'un essai d'égouttage ou de séchage-retrait avec la formule 4.1. Cette formule, provenant de l'équation 2.18 peut être utilisée si la teneur en eau initiale et le volume de l'échantillon $V_T$ sont des paramètres connus (SERRATRICE, 1995 et SERRATRICE, 2015).

$$\frac{M_T}{V_T} = \frac{M_S}{V_T} \cdot \left(1 + \frac{w}{100}\right) \qquad [4.1]$$

### *4.2.2. Indice des vides (e)*

L'indice des vides est le volume des vides rapporté au volume des particules solides de l'échantillon. Il peut être calculé en utilisant le poids volumique des particules solides constituant les sédiments $\gamma_s$ et l'accélération de la pesanteur g, voir formule 2.24.

### *4.2.3. Degré de saturation ($S_r$)*

Le degré de saturation est le volume d'eau par rapport au volume des vides de l'échantillon de sol ou de sédiment. Il peut être calculé en utilisant le poids volumique de l'eau $\gamma_w$, voir formule 2.30.

### *4.2.4. Déformation axiale ($\varepsilon_a$)*

Tout échantillon de sol ou de sédiment subit une variation de hauteur $\Delta H$ pendant le séchage naturel lié à la perte d'eau. Cette variation de hauteur en fonction de la hauteur initiale $H_0$ est appelée « déformation axiale ». Elle est calculée avec la formule suivante et s'exprime parfois en pourcentage.

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta H}{H_0} \qquad [4.2]$$

### *4.2.5. Contrainte de cisaillement ou cohésion non drainée ($S_u$)*

Considérons un volume cylindrique de sédiment soumis à un moment de torsion suivant son axe vertical. La contrainte de cisaillement ou cohésion non drainée $S_u$ est définie comme étant la contrainte appliquée dans le plan des faces horizontales (supérieure et inférieure) et tangentiellement sur le cylindre vertical du volume de sol ou de sédiment cisaillé. Ce paramètre mécanique est déduit de l'essai scissométrique en suivant les normes françaises NF P94-072 et/ou NF P94-112. Elle dépend du moment de torsion $M_T$, des dimensions de la pale et des hypothèses faites sur la répartition de la contrainte de cisaillement $S_u$. Dans le cas d'une répartition uniforme de la contrainte, la formule 4.3 permet de calculer $S_u$. Le moment de torsion est calculé en multipliant la raideur du ressort par la différence des angles de rotation observée lors de l'essai scissométrique selon la formule 4.4. Cette raideur est préalablement étalonnée.

$$S_u = \frac{2M_T}{\pi D^2\left(H+\frac{D}{3}\right)} \quad [4.3]$$

$$M_T = K\theta \quad [4.4]$$

avec les notations suivantes :
D : Diamètre de la pale ;
H : Hauteur de la pale ;
K : Raideur du ressort de torsion ;
$M_T$ : Couple maximum de torsion mesuré ;
$S_u$ : Cohésion non drainée ;
$\theta$ : Différence des angles de rotation lors de l'essai.

### *4.2.6. Coefficient d'activité (A)*

Le coefficient d'activité est défini comme étant l'indice de plasticité $I_P$ rapporté à la fraction argileuse du sédiment (SKEMPTON, 1953). Il est calculé avec la formule suivante dans laquelle la fraction argileuse s'exprime par le pourcentage pondéral des particules de taille inférieure à 2 µm.

$$A = \frac{I_P}{\text{fraction argileuse}<2\mu m} \quad [4.5]$$

Ce paramètre est fortement relié aux phénomènes de retrait puisqu'il dépend du pourcentage d'argiles que contiennent les sols fins *i.e.* sédiments. Les argiles qui ont un coefficient d'activité compris entre 0,75 et 1,25 sont considérées comme « normales ». En revanche, si le coefficient d'activité est inférieur à 0,75 elles sont dites « inactives » et, s'il est supérieur à 1,25, elles sont « actives ». Ce paramètre permet d'établir des corrélations applicables dans le cas des argiles actives et des argiles inactives (SKEMPTON, 1953).

### *4.2.7. Potentiel de retrait et de gonflement des sols argileux*

En ce qui concerne les changements de volume des argiles, plusieurs méthodes d'analyse et d'essais ont été proposées afin de pouvoir établir des comportements typiques de sols. À titre d'exemple et d'approche concernant les saturations de volume de sols, l'étude du gonflement peut être citée. L'aptitude au gonflement des argiles a été étudiée par de nombreux scientifiques dont SEED (SEED et al., 1962) et VAN DER MERWE (VAN DER MERWE, 1964).

Ces deux chercheurs ont étudié l'aptitude au gonflement des argiles à l'aide de l'essai Proctor normalisé sur des mélanges artificiels composés de différents pourcentages de sable et d'argile. Grâce à ces essais, ils ont démontré qu'il existe une relation entre le coefficient d'activité et le pourcentage d'argiles (VAN DER MERWE, 1964) et une autre relation entre l'indice de plasticité et le pourcentage d'argiles (SEED et al, 1962). Avec les résultats obtenus à partir de l'essai Proctor normalisé, ils ont élaboré deux abaques, voir figures 4-2 et 4-3.

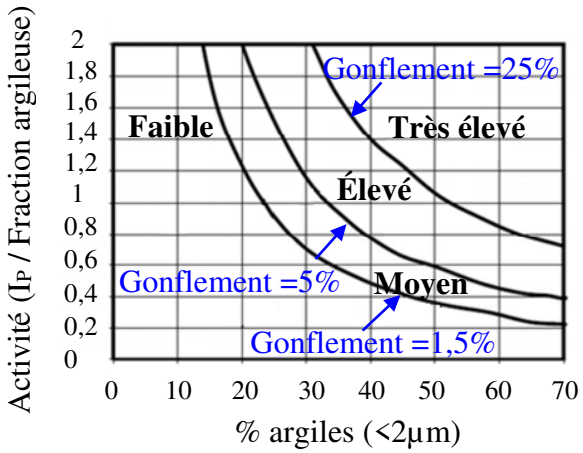



*Figure 4-2. Abaque du potentiel de gonflement proposé par SEED et al., (1962).*

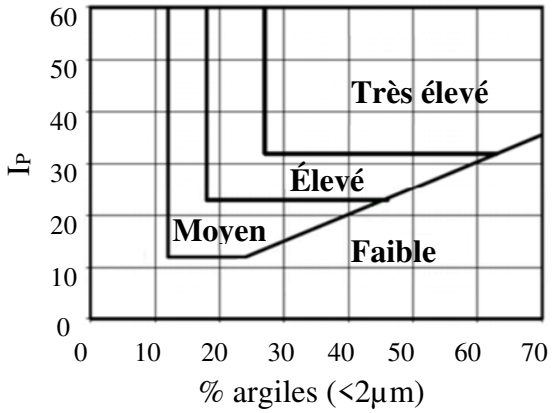



*Figure 4-3. Abaque du potentiel de gonflement proposé par VAN DER MERWE, (1964).*

Ces abaques permettent de classifier le potentiel de gonflement pour tout type de sol. Sur le même concept, ils pourraient être adaptés dans le cas du séchage et/ou retrait de sols fins ou sédiments. Ils pourraient aussi servir d'aide la décision pour identifier le potentiel de retrait durant le séchage de sols argileux ou sédiments.

## *4.3. MÉTHODES ET MATÉRIELS*

Les essais de séchage naturel des sédiments menés dans le cadre de ces travaux et l'élaboration des échantillons pour leur réalisation sont décrits dans les paragraphes suivants. Il s'agit d'essais non conventionnels.

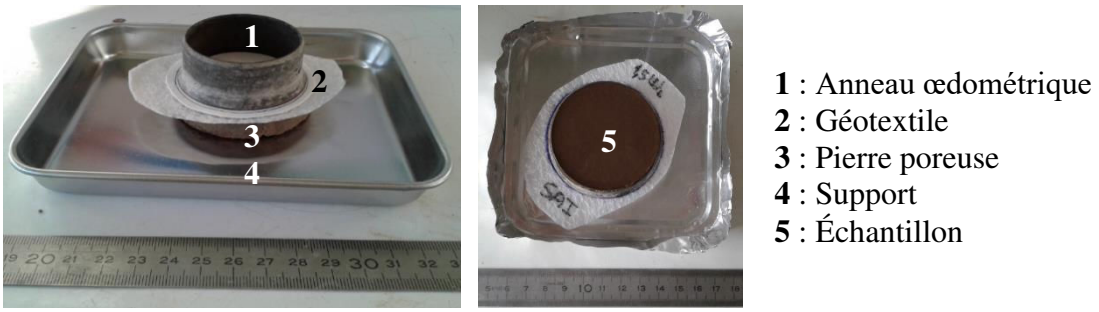
### *4.3.1. Préparation des échantillons*

Pour la mise en œuvre et la réalisation des essais de séchage naturel, trois modèles d'échantillons de différente taille ont été confectionnés. Les variations en taille ont été nécessaires afin d'assurer des mesures complémentaires : détermination de la résistance au cisaillement, et mesures des paramètres d'état.

Ces échantillons ont été réalisés avec des sédiments qui ont été préalablement mis à l'étuve pendant 24 heures, à une température constante de 60 ºC. Ensuite, ils ont été broyés à l'aide d'un rouleau et tamisés à 2mm et conditionnés en bidons fermés. Ceci a permis d'obtenir un mélange uniforme.

#### *4.3.1.1. Échantillons cylindriques de petite taille*

Les échantillons cylindriques de petite taille, ceux de 5,05 cm de diamètre et 2,00 cm de hauteur, ont été élaborés pour la réalisation des Essais de Séchage - Retrait (ESR) et ceux d'Égouttage et de Séchage (EES). Pour la confection de ces échantillons, l'anneau œdométrique a été posé sur un géotextile drainant non tissé, lui-même disposé sur une pierre poreuse de 6,55 cm de diamètre et 1,00 cm de hauteur, voir figure 4-4. Ainsi le bon comportement au drainage est assuré. Par ailleurs, ces échantillons ont été confectionnés avec une quantité d'eau connue. Lorsque le mélange est considéré comme homogène, il est introduit dans l'anneau œdométrique. Notons que l'anneau œdométrique a été badigeonné avec de l'huile de décoffrage pour éviter des fissures causées par l'adhérence du sédiment sur la paroi de l'anneau pendant le séchage et/ou démoulage.



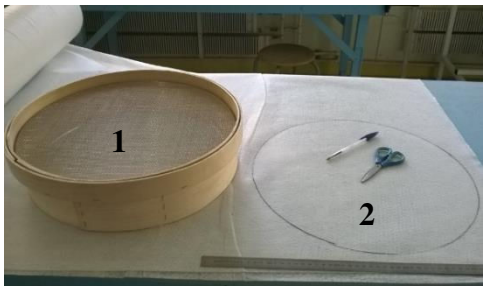

*(a) Matériels de base nécessaire pour un essai ESR/EES*

*(b) Échantillon de sédiment*

*Figure 4-4. Confection d'un échantillon cylindrique de petite taille.*

#### *4.3.1.2. Échantillons cylindriques de moyenne et grande tailles*

Des échantillons cylindriques de moyenne taille, de 22,00 cm de diamètre et 6,50 cm de hauteur et de grande taille de 40,00 cm de diamètre et de 7,00 cm d'hauteur, ont été confectionnés pour la réalisation des essais scissométriques et des Essais d'Égouttage et de Séchage (EES). Ces deux types d'échantillons ont été réalisés avec des tamis de 10 mm de maillage, un géotextile de filtration en polypropylène non tissé de 160 g/m$^2$ et l'ensemble disposé sur des couvercles en PVC, voir figure 4-5. La différence de diamètre entre les deux tamis est liée à la nécessité de réaliser des mesures scissométriques. Les tamis de moyenne taille permettent de mesurer la cohésion non drainée jusqu'au centre de l'échantillon. Ceux de grande taille, permettent d'obtenir plus de points de mesure, mais ces points de mesures ne peuvent être exécutés qu'en couronne périphérique de l'échantillon. La préparation des échantillons commence par la mise en place du géotextile découpé à la taille du tamis. Il est disposé au fond du tamis. Cet ensemble est posé sur le support en PVC. Alors les sédiments sont mélangés à une teneur en eau choisie. Ils sont introduits dans le tamis pour une hauteur définie.




*(a) Matériels de base nécessaire pour les essais EES et scissométriques*

*(b) Échantillon de sédiments*

**1** : Tamis en bois
**2** : Géotextile filtrant
**3** : Échantillon de sédiments
**4** : Support en PVC

*Figure 4-5. Confection d'un échantillon cylindrique de grande taille.*

### *4.3.2. Essai d'Égouttage et de Séchage (EES)*

L'Essai d'Égouttage et de Séchage (EES) déjà utilisé par DUAN (2008) et MIRAOUI (2010) est un essai de laboratoire non conventionnel. Il a pour objet la détermination des paramètres d'état du sédiment et le suivi de l'évolution des quantités d'eau présente dans le sédiment et sortie de l'échantillon. Les quantités d'eau concernent, la quantité d'eau qui reste dans le sédiment à déshydrater (E1), la quantité d'eau drainée (E2) et l'eau évaporée (E3) en fonction du temps de séchage.

#### *4.3.2.1. Principe*

La première étape à suivre pour la réalisation de cet essai, est la pesée séparée des éléments. Par la suite, l'anneau œdométrique ou le tamis, est rempli avec le mélange composé de sédiments et d'eau à la teneur initiale désirée $w_i$. Il est alors laissé à sécher à la température ambiante 20°C± 2°C. S'ensuit le suivi en fonction du temps et le calcul de la teneur en eau des sédiments, de la quantité d'eau évaporée et de l'eau drainée à partir des pesées successives. Rappelons que si les sédiments présentent une teneur en eau supérieure à la limite de liquidité, leur comportement en cours de séchage naturel peut être schématisé selon trois phases : initiale,

intermédiaire et finale. Elles correspondent à trois états : initial ou saturé, plastique et de retrait. Au début de l'essai une fois le remplissage de l'anneau ou du tamis effectué, le mélange est dans son état initial défini par sa teneur initiale $w_i$ où toute la quantité d'eau est contenue dans le sédiment, voir figure 4-6.a. Au temps $t_0$, la quantité d'eau drainée et évaporée est nulle. Au fur et à mesure du temps ($t > t_0$), les sédiments commencent à expulser l'eau principalement par drainage et la quantité d'eau évaporée est faible. Cette phase est nommée « phase intermédiaire », voir figure 4-6.b. Au début de cette phase intermédiaire, le drainage augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale. Cette phase est dénommée « état plastique », voir figure 4-6.c. Puis, à un moment, le drainage s'arrête et le phénomène d'évaporation prédomine et devient de plus en plus important. On atteint la « phase finale » dans laquelle w tend vers $w_R$ limite de retrait, voir figure 4-6.d. Elle se termine quand les sédiments sont complètement secs.

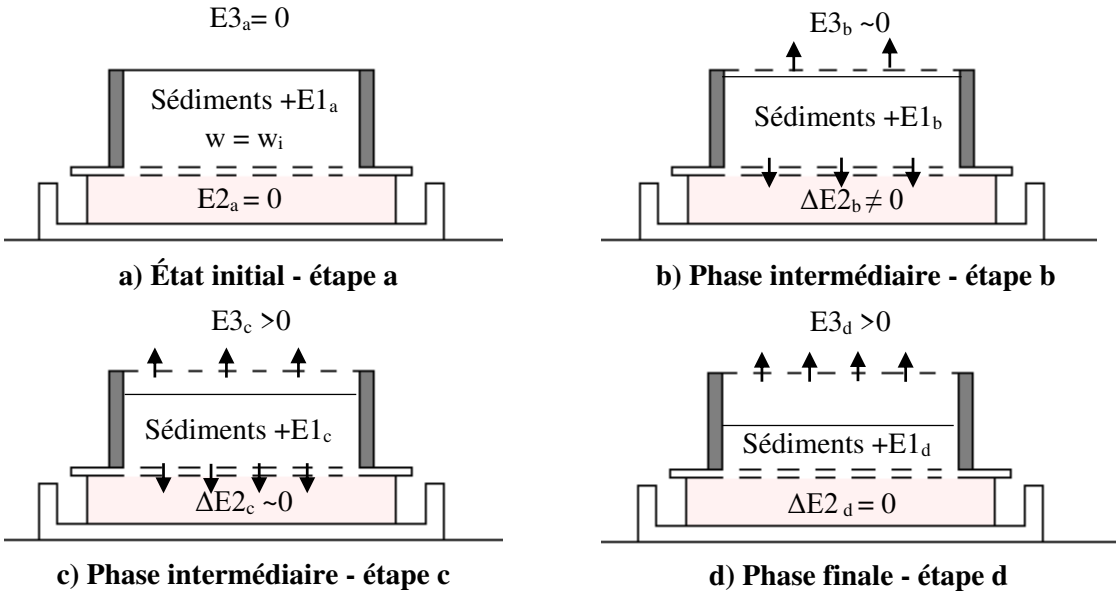



*Figure 4-6. Phases de séchage naturel des sédiments (BOULLOSA ALLARIZ et al, 2017).*

### *4.3.2.2. Mesures*

Les mesures réalisées durant l'essai d'égouttage permettent de suivre l'évolution de l'eau en fonction du temps de séchage. Rappelons que différentes parties constituant l'essai ont été pesées séparément au début de l'essai, à savoir : le géotextile, la pierre poreuse, le support et l'anneau œdométrique ou le tamis. La quantité d'eau évaporée, ou eau drainée ou qui reste dans les sédiments est déduite à partir des pesées successives. Elles concernent le poids total, le poids de l'anneau œdométrique, ou du tamis, rempli et du géotextile et le poids soit de la pierre poreuse et du support ou soit le poids du support dans le cas des échantillons de moyenne et grande taille. Soulignons que la fréquence de ces pesées est déterminée en fonction de la taille des échantillons de chaque essai. Pour les échantillons de moyenne et grande taille, elles sont réalisées chaque jour. Pour ceux de petite taille, elles sont effectuées toutes les dix minutes jusqu'au drainage maximum et, à partir de ce moment-là, elles sont faites toutes les 30 minutes, puis toutes les heures en fonction de la variation de E1. Par ailleurs, toutes les pesées sont faites jusqu'à ce que la teneur en eau finale des sédiments soit inférieure à 10 % ± 5% pour les

éprouvettes de petite taille et pour des teneurs en eau finales inférieures à 20 % ± 10% pour celles de moyenne et grande taille. À la fin de l'essai les sédiments sont mis à l'étuve à 60 °C pendant 48 heures au moins pour obtenir la masse sèche $M_s$ des sédiments. (SERRATRICE, 1995 et SERRATRICE, 2015). Cette donnée permet de calculer les paramètres d'état décrits dans le paragraphe 4.2.

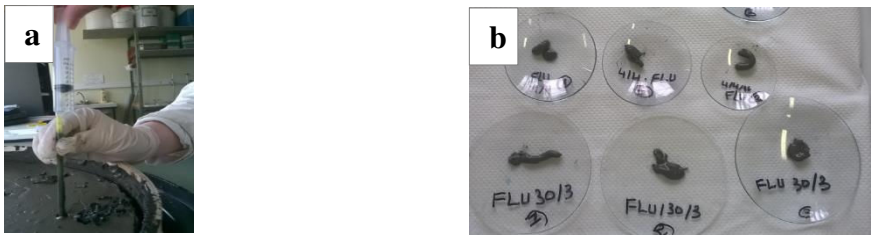
### *4.3.3. Étude de la variation de la teneur en eau en fonction de la profondeur*

Le séchage naturel des sédiments est fortement caractérisé par l'obtention d'un produit hétérogène (MIRAOUI, 2010). Dans la couche de sédiment, la teneur en eau est fortement liée à la profondeur (DUAN, 2008 ; SANO, 2012). L'étude de la distribution de la teneur en eau au sein de la couche est importante. Elle peut se faire à partir du suivi du drainage dans la couche inferieure et de l'évaporation dans la couche supérieure et l'évaluation de la teneur en eau au milieu de la couche pendant le processus du séchage.

#### *4.3.3.1. Principe*

La variation de la teneur en eau en fonction de l'épaisseur de la couche a nécessité la mise au point d'une procédure spécifique réalisée en laboratoire. Elle s'inspire de la méthode de prélèvements obtenus par carottage.

Ces prélèvements sont obtenus par succion en utilisant des pailles en plastique, voir figure 4-7.a. Une fois que les carottes sont réalisées, elles sont fermées hermétiquement et mises dans un congélateur jusqu'à la solidification du mélange. Ensuite, elles sont découpées en trois morceaux, voir figure 4-7.b. Les teneurs en eau respectives en fonction de la hauteur sont alors calculées.




*(a) Carottes* *(b) Découpage de la carotte*

*Figure 4-7. Protocole à suivre pour le carottage et la mesure de la teneur en eau.*

#### *4.3.3.2. Mesures*

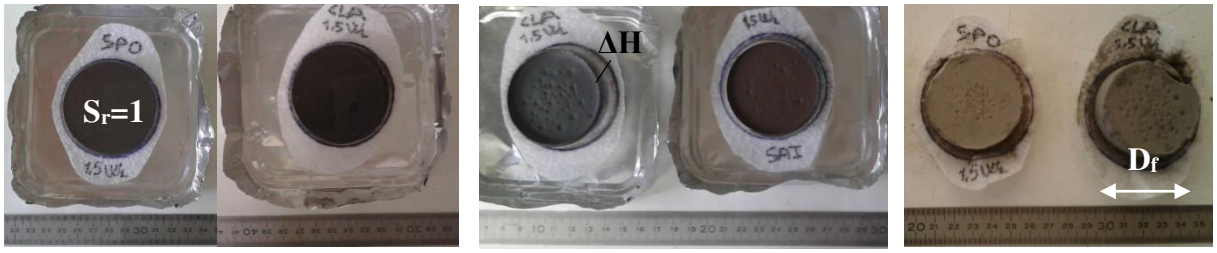
Les prélèvements par carottage sont donc réalisés par aspiration à l'aide d'une seringue et des pailles de 8 mm de diamètre. Les mesures sont effectuées en même temps que les mesures au scissomètre en laboratoire et à proximité. Pour être représentatif et mieux reproduire le comportement du sédiment au séchage, les prélèvements sont effectués sur toute la hauteur de l'échantillon et dans tout le volume.

### *4.3.4. Essai de Séchage et de Retrait (ESR)*

L'Essai de Séchage et de Retrait (ESR) est un essai en laboratoire, déjà imaginé par Atterberg (HOLTZ & KOVACS, 1991). Il est dédié à l'analyse du comportement d'un sol pendant le séchage naturel et veut compléter les données obtenues par l'essai d'égouttage. Il a été utilisé dans le cas de nos sédiments. L'Essai de Séchage et de Retrait se différencie de l'Essai de Retrait par sa teneur initiale qui est très élevée. Les teneurs en eau élevées, nettement supérieures à la limite de liquidité, sont choisies afin d'être représentatives de la teneur en eau des sédiments dragués mis en chambre de dépôt ou en lagunes.

#### *4.3.4.1. Principe*

Le principe de l'Essai de Séchage et de Retrait est une variante de la norme française NF P94-060-2. Afin d'étudier le retrait pendant le séchage naturel, cet essai a fait objet de plusieurs études et recherches, SERRATRICE (2007 et 2015), ZERHOUNI et al. (1998) et MAKKI et al. (2008). Par ailleurs, la norme ASTM D-427 recommande de démarrer l'essai à une teneur initiale égale à $w_L$ alors que Casagrande préconisait de débuter à une teneur en eau voisine de $w_P$ (HOLTZ & KOVACS, 1991). Ces études montrent que l'évolution de la teneur en eau par rapport au temps de séchage s'accompagne de déformations volumiques, voir figure 4-8.c. Le suivi des paramètres d'état des sédiments en cours de séchage se fait à l'aide d'une série de graphiques mettant en relation la déformation axiale, la teneur en eau, l'indice des vides et le temps de séchage. Pour se faire, il est nécessaire de mesurer : le diamètre et la hauteur des échantillons après leur pesage.




*(a) État initial : état liquide* | *(b) Phase intermédiaire : état plastique* | *(c) Phase finale : état solide*

*Figure 4-8. Essais de séchage et de retrait : cas de sédiments alpins « AL-SPO » et « AL-CLA ».*

#### *4.3.4.2. Mesures*

Le diamètre de l'échantillon est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse en réalisant trois mesures dans la partie supérieure, centrale et inferieure de l'échantillon. La variation de la hauteur ou tassement (ΔH) est mesurée à l'aide d'un comparateur. Pour cela, six mesures sont effectuées à la surface de l'échantillon ; elles sont réalisées chaque 60°.

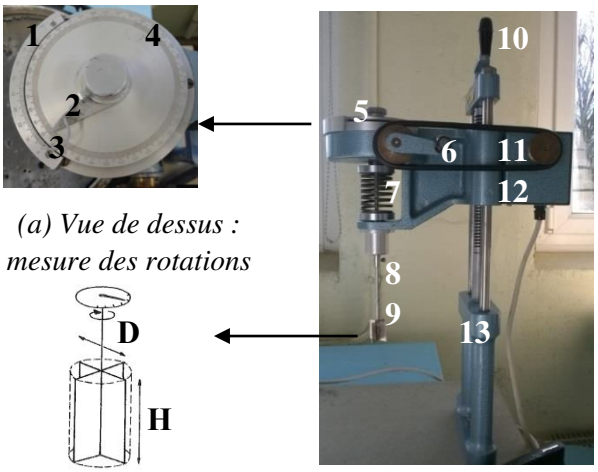
### *4.3.5. Essai mécanique*

L'essai scissométrique est un des essais les plus largement utilisés pour déterminer la résistance au cisaillement ou cohésion non drainée d'un sol ou d'un sédiment, ($S_u$)

(AMERATUNGA et al., 2016). Cet essai permet de déduire $S_u$ en calculant le moment de torsion $M_T$ maximal correspondant aux efforts de cisaillement résistants au sein de l'échantillon de sol ou d'un sédiment. Deux types d'essais scissométriques sont proposés indifféremment : l'essai scissométrique en laboratoire dont la procédure est régie par la norme NF P94-072 et l'essai scissométrique en place pratiqué selon la norme NF P94-112.

### *4.3.5.1. Principe*

Le scissomètre de laboratoire suit le même principe que l'essai scissométrique en place. C'est un modèle réduit de l'essai *in situ*. Il est composé de l'appareil scissométrique proprement dit, voir figure 4-9.c, d'une panoplie composée de ressorts de différentes raideurs et d'un ensemble de pales de différentes dimensions. L'essai scissométrique consiste à positionner une tige munie à son extrémité d'un croisillon formé de quatre pales verticales et de même largeur, dans un échantillon de sol sans vitesse initiale, voir figure 4-9.b, puis de lui imposer un mouvement de rotation à vitesse angulaire constante jusqu'au cisaillement du sol, voir figure 4-9.a.




*(a) Vue de dessus : mesure des rotations*

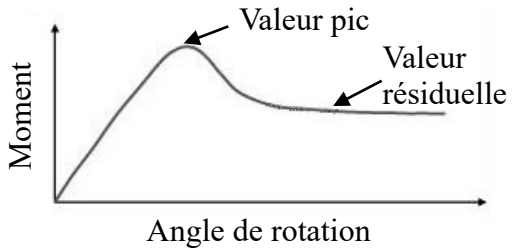
**1** : Angle extérieur
**2** : Index
**3** : Aiguille
**4** : Angle intérieur
**5** : Tête de rotation
**6** : Manivelle de rotation des pales
**7** : Ressort
**8** : Tige
**9** : Pales
**10** : Manivelle de positionnement en hauteur
**11** : Guidage en translation verticale
**12** : Moteur
**13** : Bâti

*(b) Dimensions de la pale* *(c) Le bâti scissométrique*

*Figure 4-9. Scissomètre de laboratoire.*

Rappelons que la cohésion non drainée dépend du moment de torsion $M_T$, des dimensions de la pale (D, H) et des hypothèses faites sur la répartition de la contrainte de cisaillement $S_u$, voir figure 4-10.

Le moment de torsion (valeur pic ou valeur résiduelle) est calculé en multipliant la raideur du ressort K par la différence des angles de rotation observée lors de l'essai scissométrique, cette raideur est préalablement étalonnée. Dans le cas d'une répartition uniforme de la contrainte, la formule 4.3 permet de calculer $S_u$. Le moment de torsion est calculé en suivant la formule 4.4.




*(a) Moment en fonction de l'angle de rotation*

Résistance au cisaillement non drainé

$$S_u = \frac{2M_T}{\pi D^2\left(H+\frac{D}{3}\right)} \qquad [4.3]$$

Moment de torsion

$$M_T = K\theta \qquad [4.4]$$

*(b) Procédure de calcul*

*Figure 4-10. Essai scissométrique : mesures et formules.*

### *4.3.5.2. Mesures*

L'angle de rotation est mesuré toutes les quinze secondes jusqu'à la rupture du sol. Dans cet essai, le scissomètre de laboratoire utilisé correspond au modèle Wykeham Farrance (WF-23500). Trois types de pales de dimensions différentes ont été utilisées (diamètre x hauteur) : des petites pales de 12,70 mm x 12,70 mm ; des pales moyennes de 12,70 mm x 19,00 mm et des grandes pales de 25,40 mm x 25,40 mm. Les courbes d'étalonnage relatives aux cinq ressorts utilisés sont données à la figure 4-11.

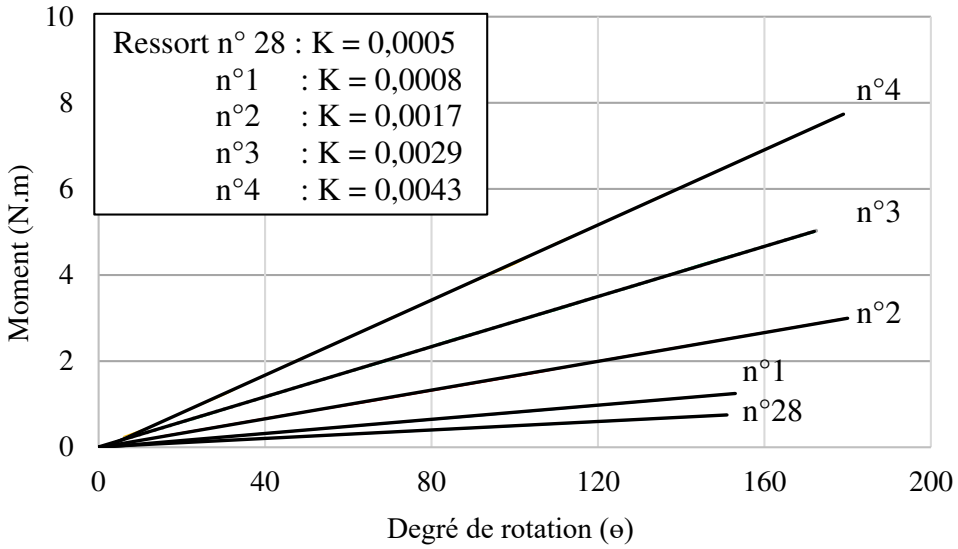



*Figure 4-11. Courbes d'étalonnages des ressorts utilisés.*

## *4.4. RÉSULTATS DES ESSAIS*

Les résultats issus des essais de séchage naturel sont reportés dans l'annexe « A.2. Déshydratation naturelle des sédiments et des argiles ». Afin d'analyser ces résultats et le comportement au séchage naturel des sédiments et sols étudiés, seuls ceux du sédiment « AL-CLA » sont exposés à titre d'exemple.

### *4.4.1. Essai d'Égouttage et de Séchage (EES)*

Les essais d'Égouttage et de Séchage ont été réalisés sur des sédiments ayant des teneurs en eau égales à deux fois la limite de liquidité. Ainsi l'analyse du processus de séchage débute avec des sédiments et des argiles à l'état liquide. L'ensemble des données et résultats des essais EES est fourni dans l'annexe A.2.1 intitulée « Évolution des pourcentages d'eau par rapport au temps de séchage naturel ».

#### *4.4.1.1. Analyse des phénomènes de drainage et d'évaporation*

Les Essais d'Égouttage et de Séchage montrent au début du séchage naturel que les sédiments commencent à évacuer l'eau essentiellement par drainage, voir figure 4-12. Le phénomène de drainage permet de réduire d'importantes quantités d'eau pendant des périodes de temps réduits, voir figure 4-13. Dès que le drainage se stabilise, le phénomène d'évaporation devient de plus en plus prépondérant et s'accélère. En effet un changement de pente est observé correspondant au point d'inflexion de la courbe de séchage *i.e.* variation d'eau dans le sédiment. La limite de liquidité au moment où les sédiments passent de l'état liquide à l'état plastique apparaît au voisinage de ce changement de comportement avec une augmentation de la vitesse d'évaporation.

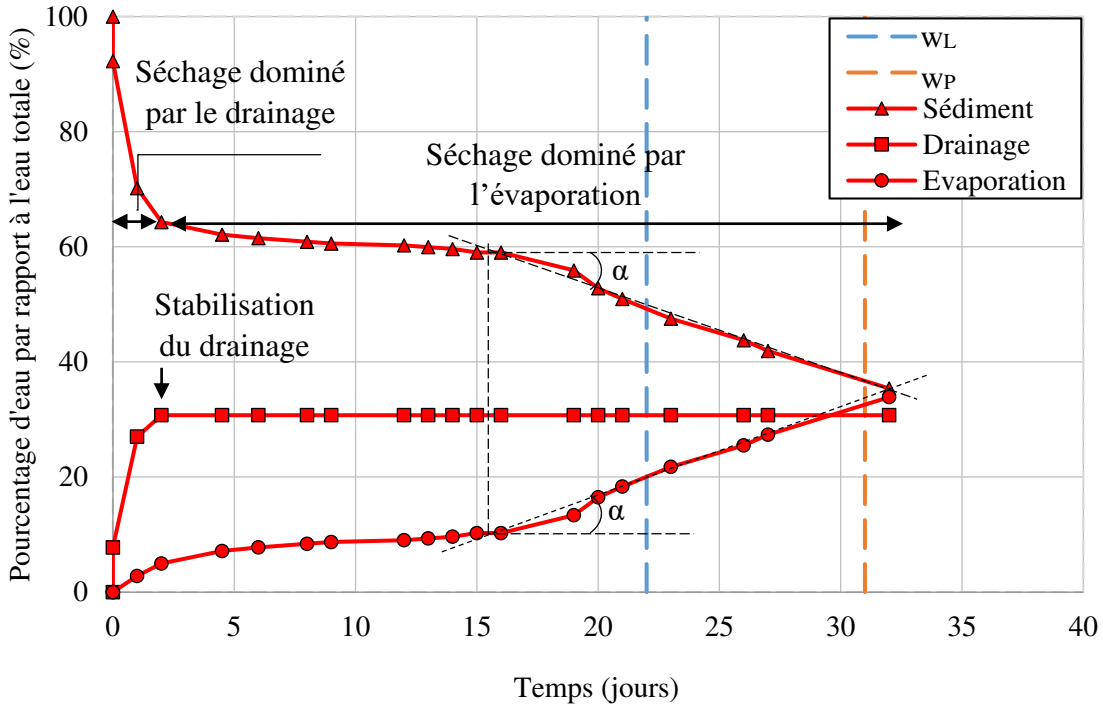



*Figure 4-12. Pourcentages d'eau selon le temps de séchage pour le sédiment « AL-CLA ».*

Plus précisément le phénomène de drainage permet d'éliminer l'eau libre des sédiments. La durée du séchage par drainage varie principalement en fonction du type de sédiment et de la quantité d'eau initiale. Durant le drainage, une partie de l'eau « surnageante » est évaporée.

Les sédiments alpins sont capables de drainer des pourcentages d'eau compris entre 24% et 40% pour des périodes de temps comprises entre 1 et 3,5 jours. Dans ce groupe, les sédiments « AL-ISE » sont les sédiments qui drainent l'eau le plus rapidement : 33% les premières 22 heures d'essai. Les sédiments « AL-FLU » ont eux besoin de 3 jours de séchage pour drainer 24% d'eau, voir figure 4-14.

Pour les sédiments bretons, les sédiments « BR-SAI » sont capables de drainer 24% d'eau pendant une journée de séchage alors que les sédiments « BR-RAN » en drainent un peu plus, 28%, dans les deux premières heures d'essai.

Les sédiments du Rhin sont les sédiments qui drainent la plus importante quantité d'eau (47%) après un jour de séchage. Notons que les sédiments du port de Dunkerque « HF-DK » drainent seulement 12% d'eau pendant les premiers 4 jours, voir figure 4-14. La valeur minimale de drainage est obtenue avec de la kaolinite, cette argile draine 9% d'eau pendant 2 jours, voir figure 4-16.

Quant à l'évacuation d'eau par évaporation, il faut souligner qu'elle est plus régulière dans le temps. Elle prédomine dès que le drainage prend fin. La déshydratation complète des sédiments par évaporation nécessite du temps. Si on analyse les pourcentages d'eau évaporée à 32 jours de séchage naturel, on peut remarquer que les sédiments étudiés ont des pourcentages d'eau évaporée compris entre 30% et 60% par rapport à l'eau totale. Ce sont les sédiments « AL-ISE » qui ont éliminé la plus importante quantité d'eau par évaporation, suivent les sédiments « HF-DK » avec 53%, et les sédiments « AL-FLU », « BR-RAN » et « AL-SPO » avec 44%, 43% et 40% d'eau évaporée respectivement. Le pourcentage d'eau évaporée pour le reste de sédiments est légèrement inférieur à 40%, avec des pourcentages d'eau évaporée de 37% et 34% pour les sédiments « BR-SAI » et « AL-CLA » respectivement. Les sédiments du Rhin sont capables seulement d'évaporer 30% d'eau, comme le kaolin, voir figures 4-15 et 4-16.

.

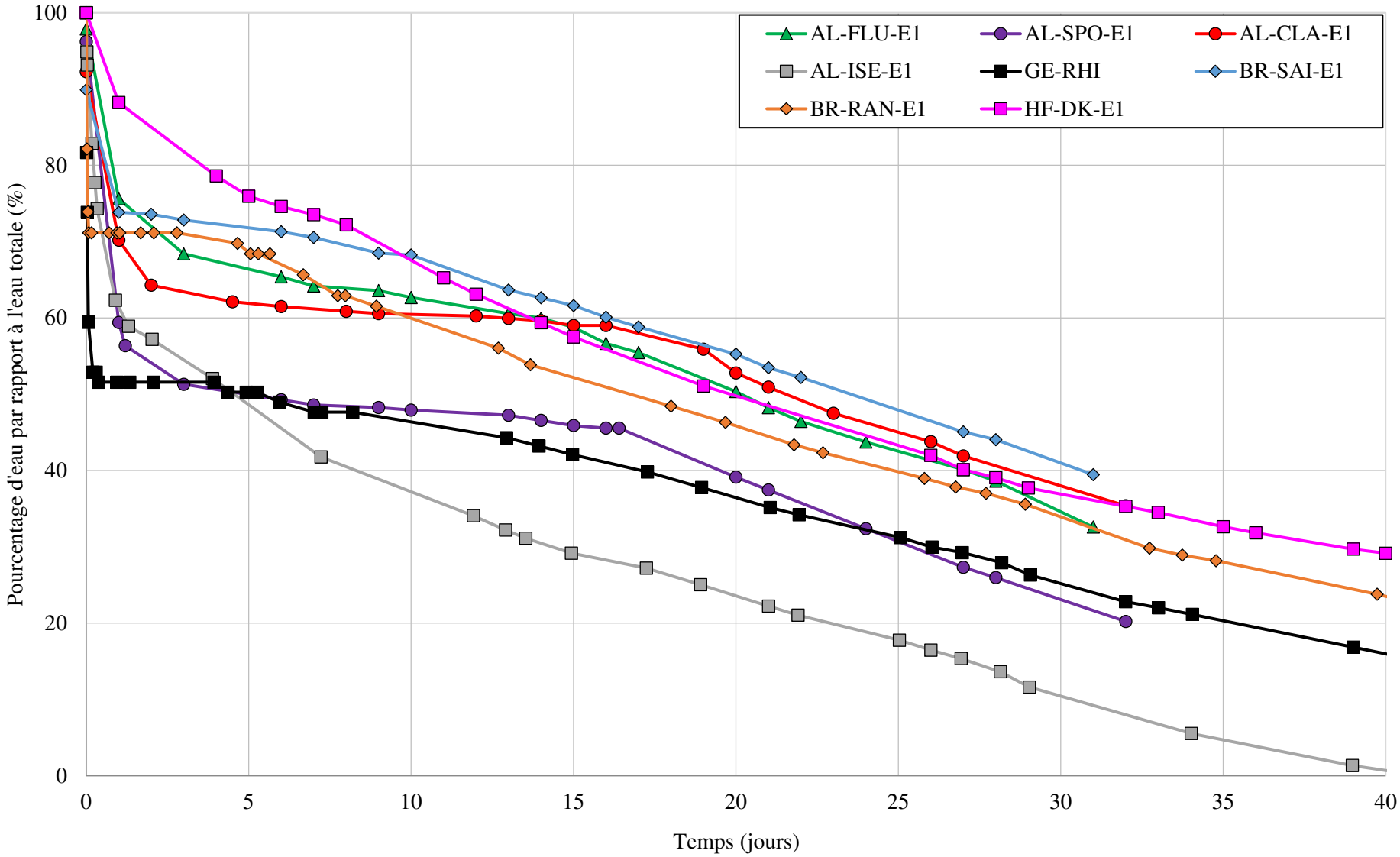



*Figure 4-13. Évolution des pourcentages d'eau (E1) dans les sédiments selon le temps de séchage.*

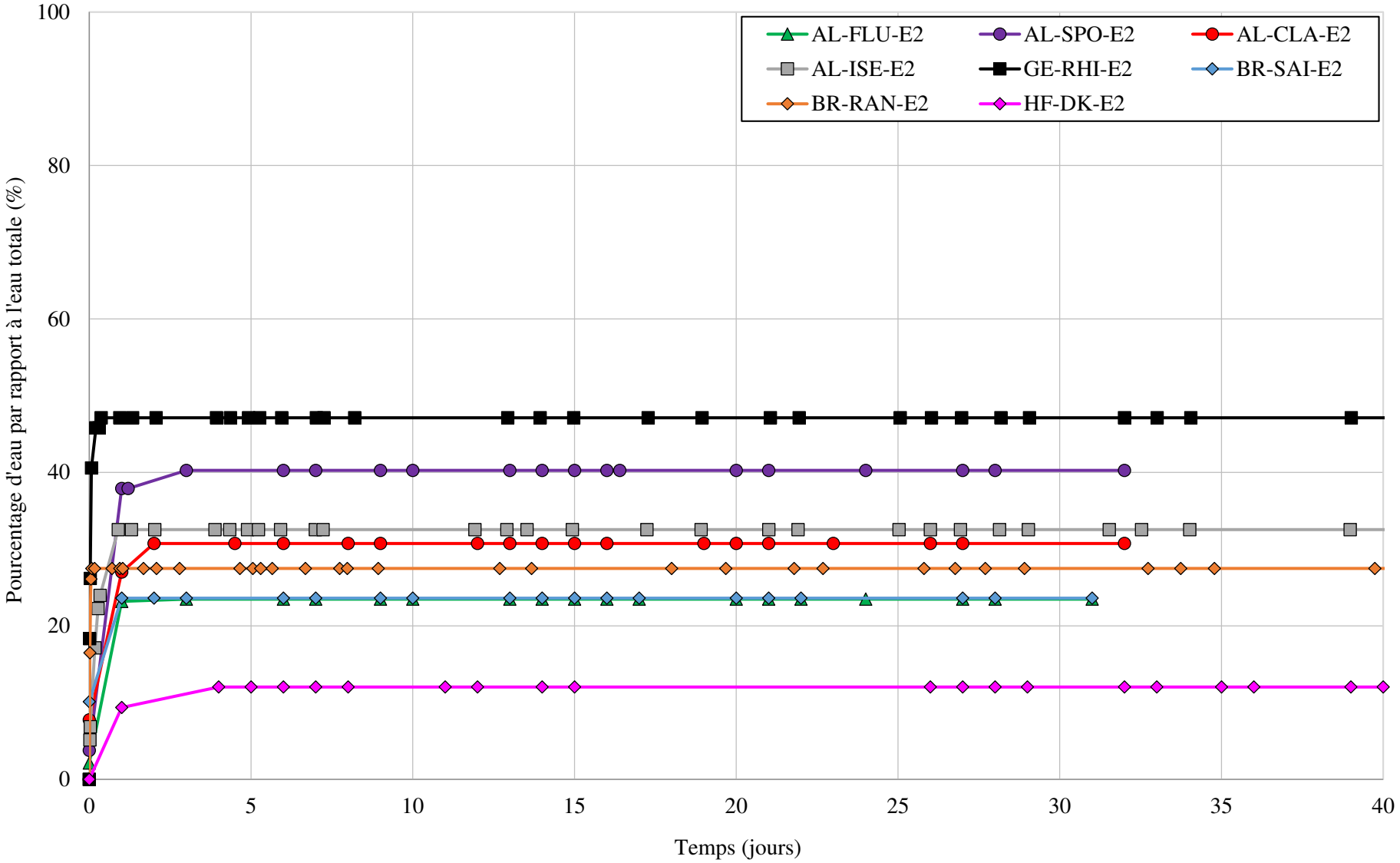



*Figure 4-14. Évolution des pourcentages d'eau drainée (E2) des sédiments selon le temps de séchage.*

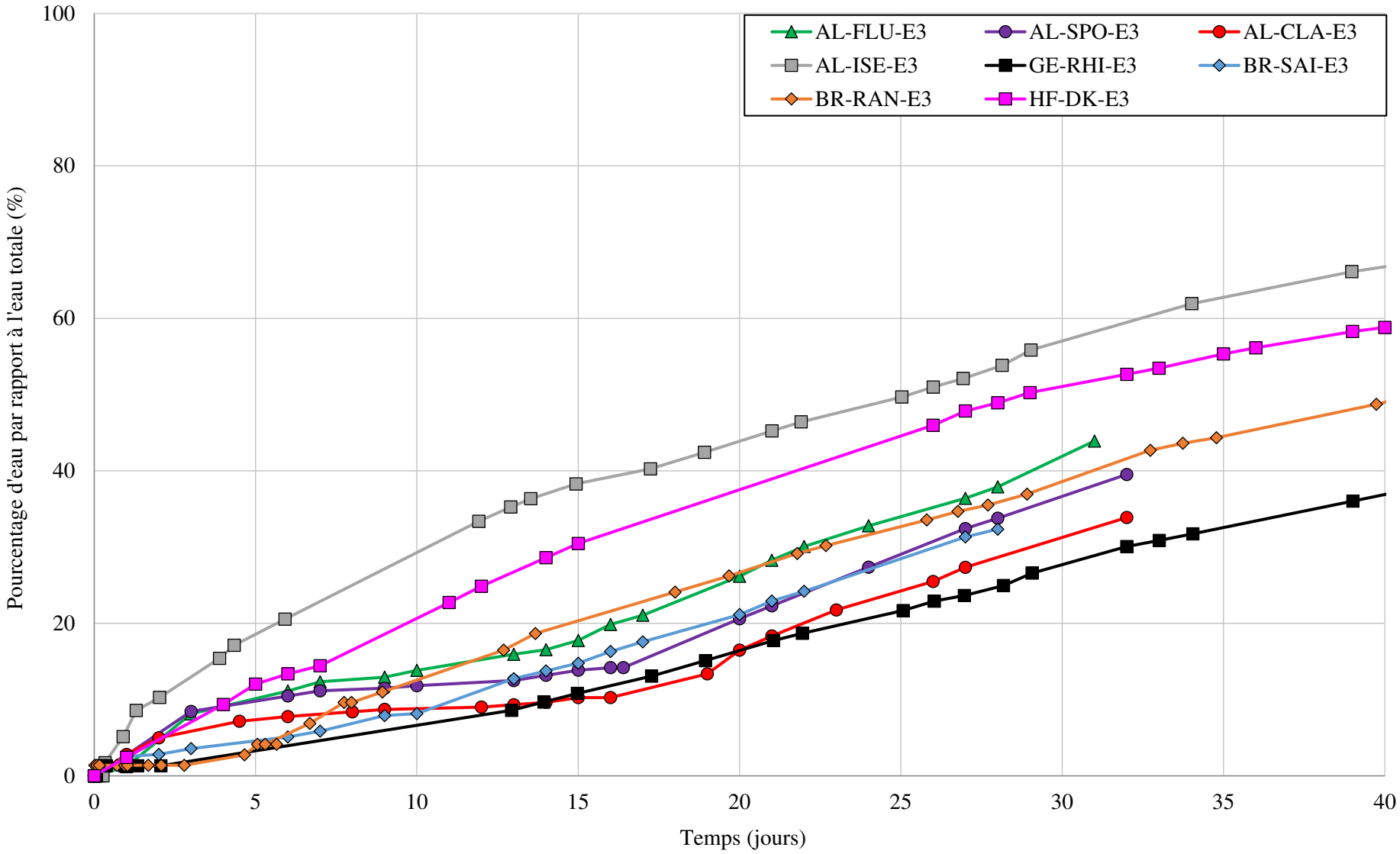



*Figure 4-15. Évolution des pourcentages d'eau évaporée (E3) des sédiments selon le temps de séchage.*

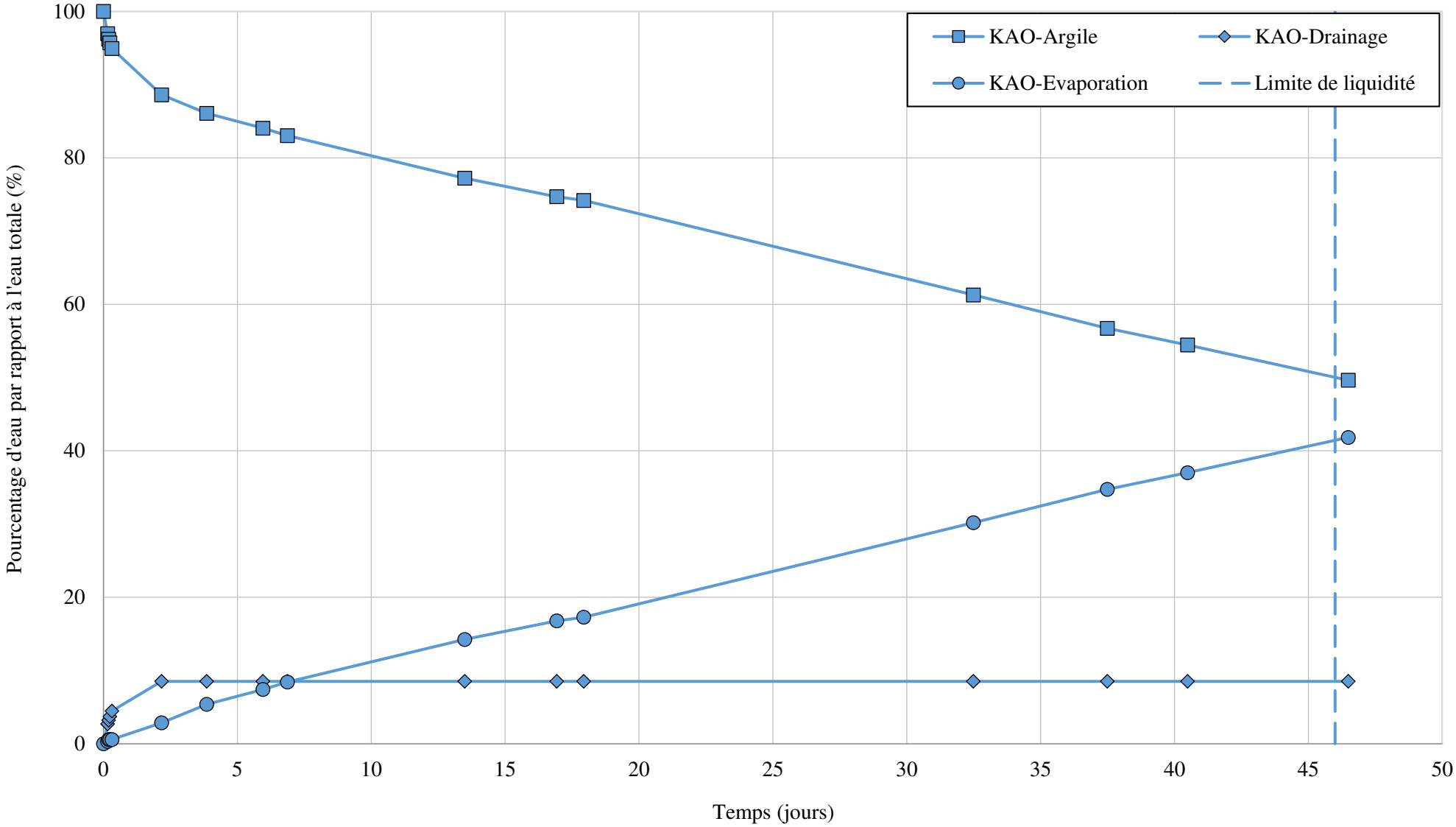



*Figure 4-16. Évolution des pourcentages d'eau pour le kaolin.*

En ce qui concerne l'évolution des courbes d'évaporation, deux tendances peuvent être appréciées. Les sédiments alpins « AL-FLU », « AL-CLA » et « AL-SPO », présentent une augmentation de la vitesse d'évaporation quand les teneurs en eau tendent vers la limite de liquidité puis la limite de plasticité. Cette tendance se situe vers le 17ème jour de séchage, voir figure 4-17. L'évolution de l'évaporation selon le temps de séchage pour le reste des sédiments étudiés présente une allure plutôt linéaire, voir figure 4-18. Ces changements de tendance durant l'évaporation se manifestent aussi sur les courbes de déshydratation des sédiments, voir figures 4-19 et 4-20.

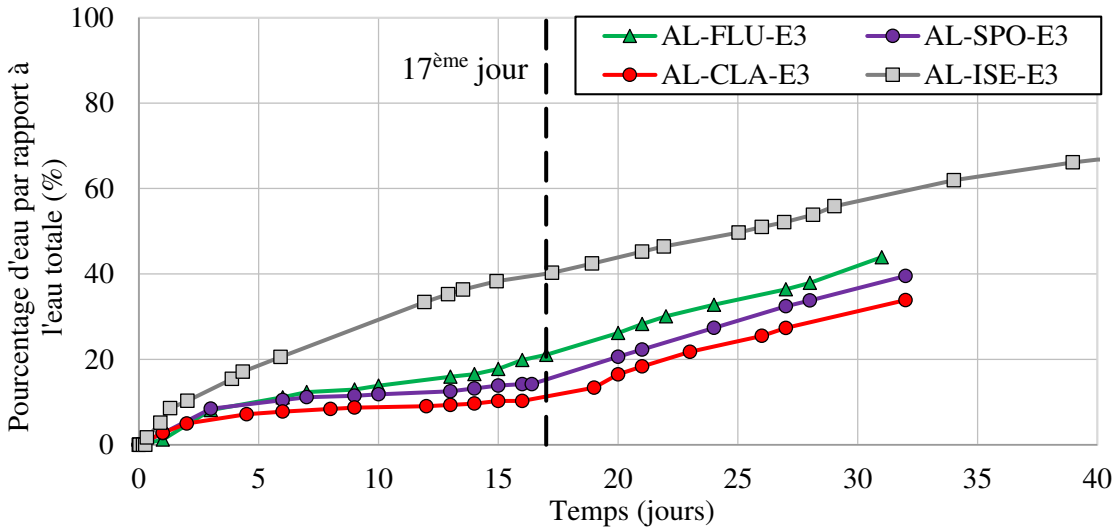



*Figure 4-17. Évolution de l'eau évaporée (E3) des sédiments alpins selon le temps de séchage.*

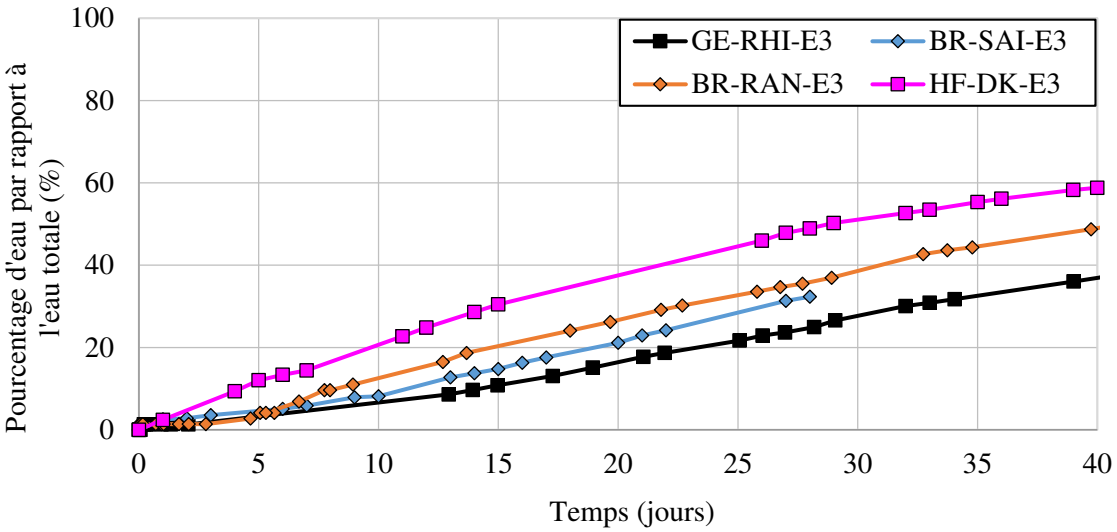



*Figure 4-18. Évolution de l'eau évaporée (E3) des sédiments bretons, de Dunkerque et du Rhin selon le temps de séchage.*

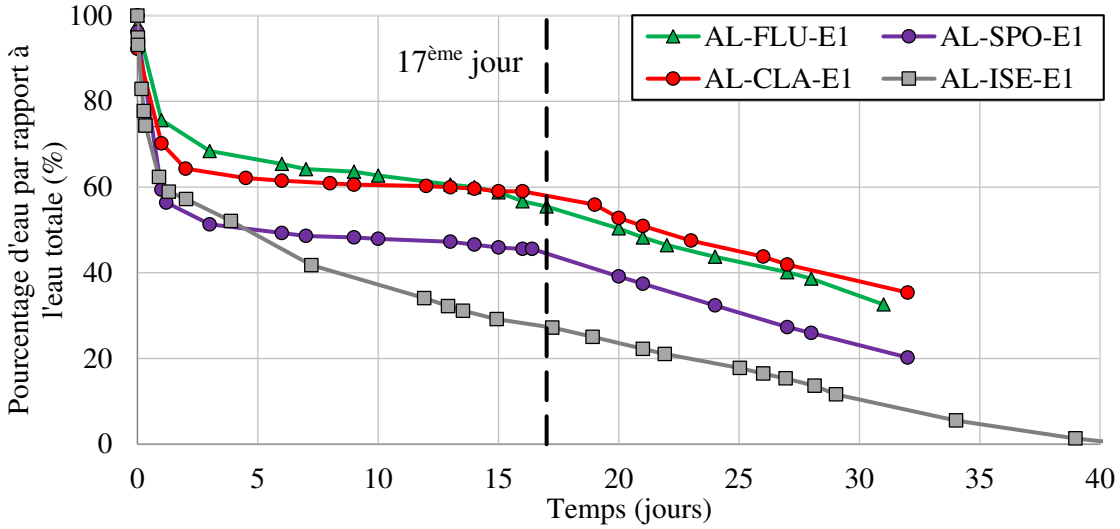



*Figure 4-19. Évolution des pourcentages d'eau (E1) dans les sédiments alpins selon le temps de séchage.*

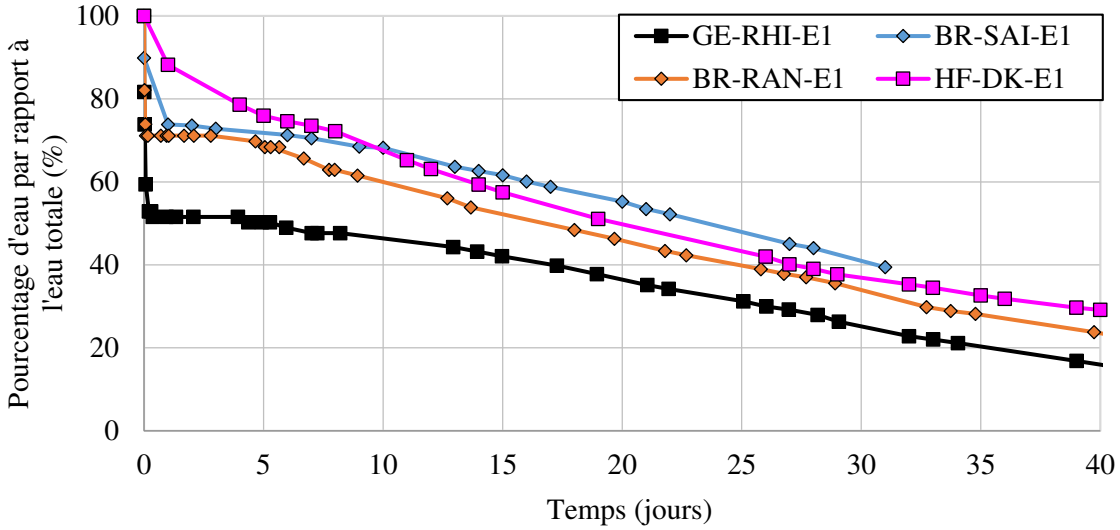



*Figure 4-20. Évolution des pourcentages d'eau (E1) dans les sédiments bretons, de Dunkerque et du Rhin selon le temps de séchage.*

### *4.4.1.2. Autres phénomènes observés pendant le séchage naturel*

Hormis le drainage et l'évaporation, d'autres phénomènes ont été observés dans le comportement de mélanges eau-sédiments pendant le séchage naturel. Ce sont le tassement, le retrait et la fissuration. Quelques mesures et données sont rassemblées dans le tableau 4-1. L'apparence visuelle des sédiments pendant le séchage naturel a été suivie. Un ensemble de photos est montré dans l'annexe A.2.6., « Aspect visuel des sédiments et de la kaolinite pendant le séchage naturel ».

Pour les tassements, le sédiment portuaire du GPMD « HF-DK » présente le tassement le plus élevé comparé aux autres sédiments étudiés. Les tassements relatifs sont de 44%, 40%, 38% et 35% respectivement pour les sédiments alpins « AL-SPO » et « AL-ISE » et le sédiment

du Rhin. À un degré moindre, les sédiments bretons ont les plus faibles tassements autour de 26% et 27%.

En ce qui concerne le retrait diamétral, les sédiments de la Rance « BR-RAN » et du Rhin « GE-RHI » et de Dunkerque « HF-DK » présentent les plus importants retraits, de l'ordre de 15% à 16% en valeurs relatives. Les sédiments alpins enregistrent les plus faibles diminutions de diamètre relatif avec des valeurs comprises entre 2,5% et 4,5%. De fait, les sédiments de la Rance, du Rhin et de Dunkerque ont des diminutions de volume conséquentes allant de 85,5% à 54,3%.

Le phénomène de fissuration a pu être observé nettement sur les sédiments de Dunkerque « HF-DK », du Rhin « GE-RHI », de la Rance « BR-RAN » et d'Isère « AL-ISE », voir annexe A.2.6.

*Tableau 4-1. Données relatives au tassement et au retrait des sédiments pendant le séchage naturel.*

| | **AL-FLU** | **AL-SPO** | **AL-CLA** | **AL-ISE** | **GE-RHI** | **BR-SAI** | **BR-RAN** | **HF-DK** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $w_0 = 2w_L$(%) | 70,1 | 63,1 | 68,8 | 92,0 | 142,0 | 134,3 | 108,0 | 134,8 |
| $H_0$ (cm) | 7,0 | 7,0 | 7,0 | 6,5 | 6,5 | 7,0 | 6,5 | 7,0 |
| $H_f$ (cm) | 4,9 | 4,2 | 4,5 | 4,1 | 4,2 | 5,18 | 4,8 | 3,9 |
| $\Delta H/H_0$ (%) | 30,0 | 40,0 | 35,7 | 37,7 | 35,4 | 26,0 | 26,9 | 43,9 |
| $D_0$ (cm) | 40,0 | 40,0 | 40,0 | 22,0 | 22,0 | 40,0 | 22,0 | 40,0 |
| $D_f$ (cm) | 39,0 | 38,9 | 38,8 | 21,0 | 18,5 | 37,0 | 18,5 | 33,9 |
| $\Delta D/D_0$ (%) | 2,5 | 2,8 | 3,0 | 4,5 | 15,9 | 7,5 | 15,9 | 15,3 |
| $V_0$ ($cm^3$) | 8796,5 | 8796,5 | 8796,5 | 2470,9 | 2470,9 | 8796,5 | 2470,9 | 8796,5 |
| $V_f$ ($cm^3$) | 5853,5 | 4991,6 | 5320,7 | 1402,8 | 1129,0 | 5569,6 | 1276,8 | 3543,0 |
| $\Delta V/V_0$ (%) | 33,5 | 43,3 | 39,5 | 43,2 | 54,3 | 36,7 | 85,5 | 59,7 |

***Note** : $H_0$ = hauteur initiale ; $H_f$ = hauteur finale ; $D_0$ = diamètre initial ; $D_f$ = diamètre final ; $\Delta D/D_0$ = retrait diamétral relatif ; $V_f$ = volume final. Le tassement relatif $\Delta H/H_0$ est égale à $(H_0 - H_f) / H_0$ et la variation de volume relative $\Delta V/V_0$ à $(V_0 - V_f) / V_0$.*

### *4.4.2. Mesure de la teneur en eau selon la profondeur de la couche*

L'ensemble des graphiques relatifs à la mesure de la teneur en eau selon la profondeur de la couche est donné dans l'annexe A.2.2. « Évolution de la teneur en eau par rapport à la profondeur ». Les graphes montrent la teneur en eau des sédiments évoluant avec la hauteur de la couche du sédiment.

Au début de chaque essai la teneur en eau initiale des sédiments est homogène sur toute la hauteur de la couche. Dès que les sédiments commencent à éliminer l'eau par drainage et par évaporation, des différences de teneur en eau apparaissent, voir figure 4-21. Sur cette figure, on peut observer que les sédiments présentent des profils de teneur en eau en fonction de la hauteur de la couche, d'allure parabolique et dissymétrique. Ces profils sont plus accentués pendant les

premiers jours de séchage, comme montré à la 2ème journée d'essai pour les sédiments « AL-CLA ». Au fur et à mesure que les sédiments éliminent l'eau, la teneur en eau devient de plus en plus homogène sur toute la couche, voir les jours 5 et 6. Il est à noter qu'après avoir atteint une valeur proche de la limite de liquidité, la teneur en eau est presque homogène dans toute la couche, en formant des profils rectilignes verticaux aux jours 23 et 30.

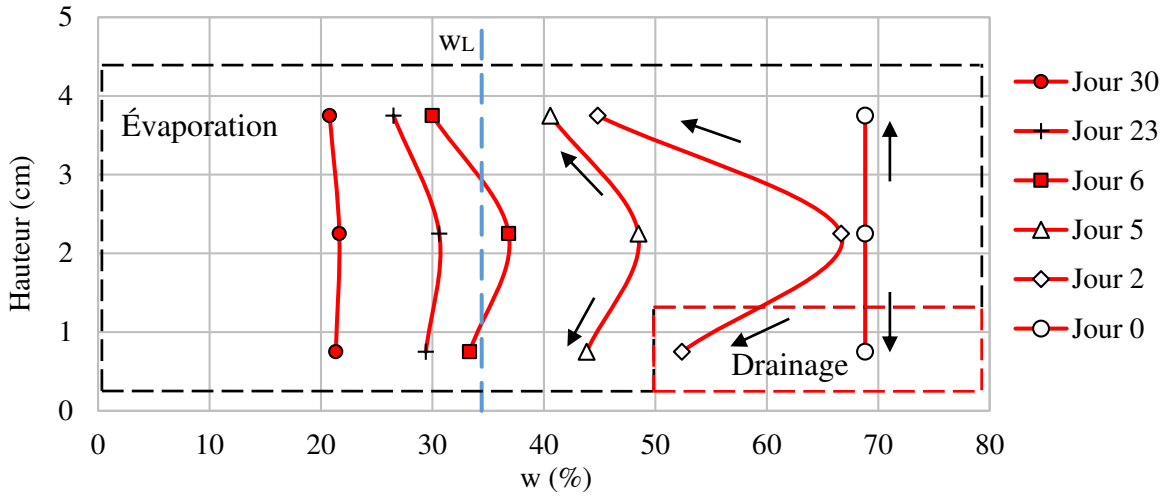



*Figure 4-21. Évolution de la teneur en eau selon la profondeur de la couche du sédiment « AL-CLA ».*

### *4.4.3. Essai de Séchage et de Retrait (ESR)*

Les données et résultats relatifs aux Essais de Séchage et de Retrait sont consignés dans l'annexe A.2.3. intitulée « Évolution des paramètres d'état lors du séchage naturel ». Selon las recommandations de la norme ASTM D-427 (1991), la limite de liquidité $w_L$ a été le paramètre choisi pour la réalisation de ces essais. Ainsi, les échantillons ont été confectionnés avec des quantités d'eau initiales correspondant à 1,5$w_L$, 2$w_L$ et 2,5$w_L$.

Les sédiments utilisés pour la réalisation de ces essais sont les sédiments bretons, les sédiments d'Artaude et les sédiments alpins « AL-CLA », « AL-ISE » et « AL-SPO ». En raison d'une pénurie de matériau, l'étude du séchage et du retrait des sédiments « HF-DK » et « GE-RHI » a été écartée. De même, les sédiments « AL-FLU » qui ont des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques très semblables à celles de « AL-CLA » n'ont pas fait l'objet d'essais. Il a été supposé qu'ils présentaient sensiblement les mêmes critères d'aptitude au séchage naturel.

Dans cette section, l'analyse des résultats de l'Essai de Séchage et de Retrait porte sur des sédiments ayant une teneur en eau initiale égale à 1,5 $w_L$. L'influence de la teneur en eau initiale sur le comportement au séchage naturel des sédiments est présentée et illustrée à partir des Essais de Séchage et Retrait effectués sur les sédiments « AL-CLA ». Ces sédiments ont été codifiés selon le pourcentage de teneur en eau initiale comme suit : nom du sédiment + facteur de multiplication de la limite de liquidité.

### *4.4.3.1. Teneur en eau (w)*

La teneur en eau des sédiments diminue rapidement pendant les premières heures de séchage grâce au phénomène de drainage. Il est noté que les sédiments voient leurs teneurs en eau diminuer plus lentement dès que le drainage s'arrête. Ce comportement est indépendant de la teneur en eau initiale, voir figure 4-22.b. Des différences de comportement en fonction du type de sédiment peuvent être observées sur la figure 4-22.a.

Les sédiments « NA-ART » commencent le processus de séchage avec la plus faible teneur en eau. Pour ces sédiments, le drainage est terminé dès les premières minutes de séchage. Ils sont complètement secs au troisième jour de séchage.

Pour les sédiments bretons, à savoir les sédiments « BR- RAN » et « BR-SAI », les teneurs en eau initiales sont de 80% et 100% respectivement. Si l'on considère le volume étudié soit 40,06 $cm^3$, 20% d'eau sont drainés pendant le premier jour de séchage. Ensuite, le séchage par évaporation amène à l'obtention des pourcentages d'eau de 35% et 37% respectivement au sixième jour de séchage.

Concernant les sédiments alpins de Clapiers et de Serre-Ponçon, ils ont des teneurs en eau initiales d'environ 50%, correspondant à 1,5 $w_L$. Pour les volumes étudiés, ils drainent 15% et 20% d'eau respectivement pendant les premières heures de séchage. Puis par évaporation, les sédiments sont complètement secs au septième jour et demi d'essai. Les sédiments d'Isère, pour une teneur en eau initiale égale à 70%, environ 15% d'eau sont drainés pendant le premier jour de séchage et présentent une teneur en eau de 20% au septième jour et demi d'essai.

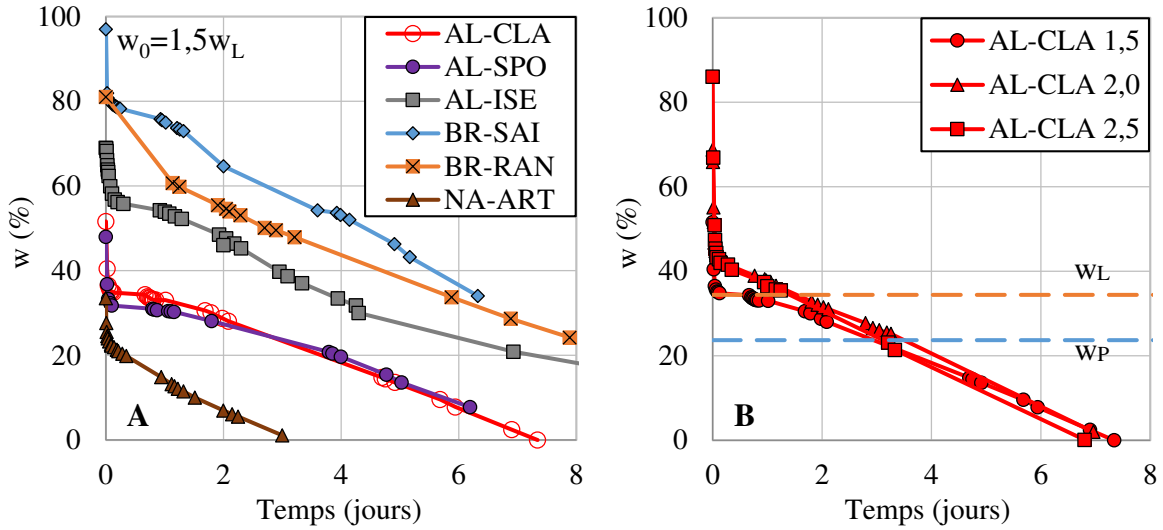



*Figure 4-22. Évolution de la teneur en eau par rapport au temps de séchage des sédiments de barrage (à gauche) et des sédiments « AL-CLA » (à droite).*

En ce qui concerne l'influence de la teneur en eau initiale sur le séchage naturel des sédiments « AL-CLA », 15%, 27% et 35% d'eau sont drainés pour des teneurs en eau initiales respectives de 1,5 $w_L$, 2 $w_L$ et 2,5 $w_L$, pendant les premières heures de séchage. Le processus de séchage se poursuit par évaporation. Les sédiments avec une teneur en eau initiale de 2 $w_L$,

ont des teneurs en eau finales de 15% au 7ème jour de séchage. Les sédiments avec $w_0$=1,5 $w_L$, sont secs au 7ème jour et demi d'essai et ceux qui ont des teneurs en eau initiales de 2,5 $w_L$ sont complétement secs le 7ème jour, voir figure 4-22.b.

#### *4.4.3.2. Indice des vides (e)*

L'indice des vides est directement lié à la teneur en eau des sédiments et évidemment, ces deux paramètres sont reliés au temps de séchage.

***Selon le temps de séchage***

Au début de l'Essai de Séchage et de Retrait, les indices des vides des sédiments sont élevés. Il est observé que les sédiments qui ont les quantités d'eau initiale les plus élevées ont les plus importants indices des vides initiaux et finaux. Pour les sédiments étudiés, les sédiments « BR-SAI », « BR-RAN » et « AL-ISE », ont des valeurs des indices des vides initiaux de 2,5 ; 2,1 et 1,9 respectivement, pour des teneurs en eau initiales de 1,5 $w_L$. Ces sédiments présentent aussi les plus importants indices de vides finaux de 1,3 ; 1,1 et 0,7 respectivement, voir figure 4-23.A.

De même, il est observé que l'indice des vides diminue très rapidement pendant les premières heures de séchage, période correspondant au drainage, et il tend à se stabiliser au fil du temps. L'indice des vides des sédiments « BR-SAI » se stabilise au 4ème jour de séchage, ceux de « AL-SPO » et de « AL-CLA » tendent à devenir constants au 4ème jour et demi d'essai. Pour les sédiments de « BR-RAN » il faut attendre le 6ème jour et le 7ème jour de séchage pour celui d'Isère. Notons que l'indice des vides des sédiments « NA-ART » est stabilisé à la fin du drainage.

Par ailleurs, il est remarqué que tous les sédiments suivent des évolutions de l'indice des vides par rapport au temps de séchage assez similaires pour un même type de sédiment à différentes teneurs en eau, voir figure 4-23.B. dans le cas du sédiment « AL-CLA ». Sensiblement, ceux qui ont les plus importantes teneurs en eau, dans ce cas 2,5 $w_L$ et 2 $w_L$, présentent les plus importants indices des vides initiaux et finaux.

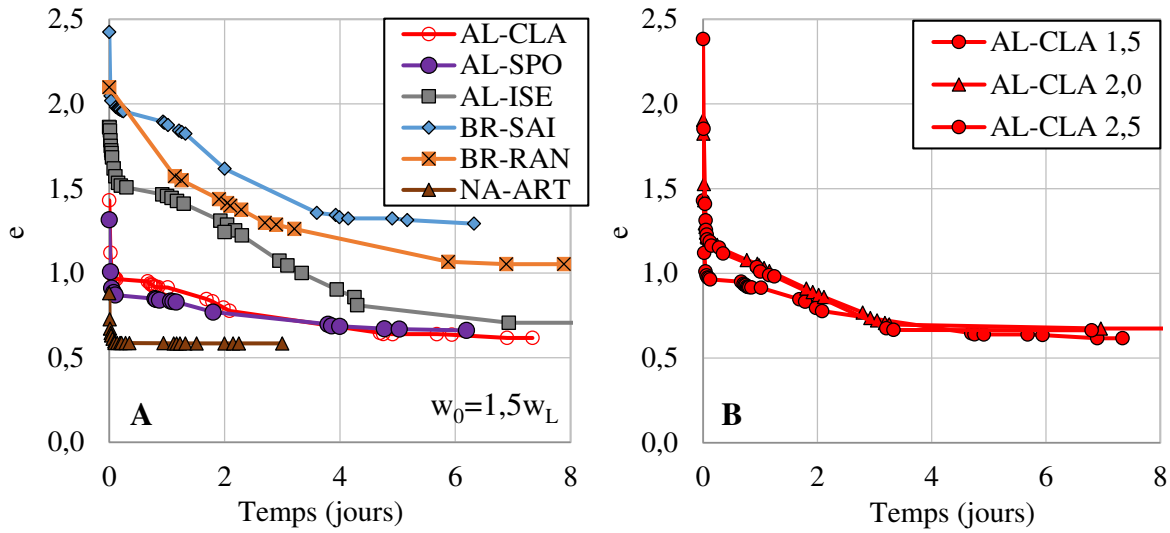



*Figure 4-23. Évolution de l'indice des vides par rapport au temps de séchage des sédiments de barrage (à gauche) et des sédiments « AL-CLA » (à droite).*

### *Selon la teneur en eau*

Les sédiments étudiés commencent le processus de séchage à partir de l'état liquide ($w_0 > w_L$), dans cet état, les sédiments sont saturés (Sr=1) et leurs indices des vides sont élevés. Quand les sédiments sont saturés, leurs indices des vides sont positionnés sur la droite de saturation. Rappelons que cette droite a pour équation :

$$e = \rho_s \cdot w \qquad [4.6]$$

En début de séchage, il est noté que les indices des vides diminuent grandement pendant le drainage et dès que le phénomène de drainage s'arrête, l'indice des vides tend à se stabiliser. On remarque que l'indice des vides tend à devenir constant quand les teneurs en eau s'approchent des limites de plasticité, voir ligne orange sur la figure 4-24.

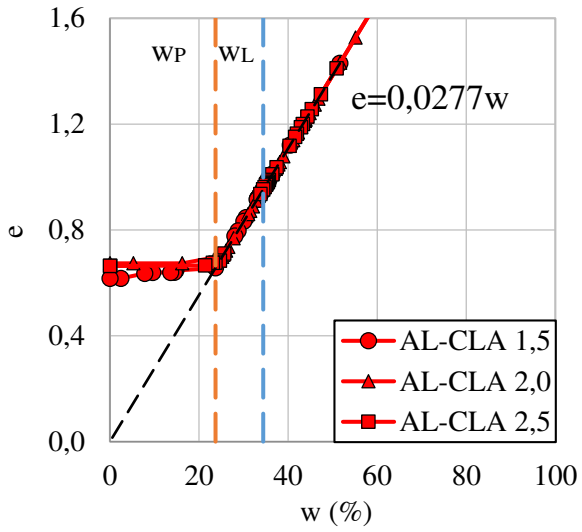



*Figure 4-24. Évolution de l'indice des vides par rapport à la teneur en eau des sédiments « AL-CLA ».*

#### *4.4.3.3. Degré de saturation ($S_r$)*

L'évolution du degré de saturation s'exprime aussi selon le temps de séchage des sédiments ou selon la teneur en eau.

En ci que concerne l'évolution du degré de saturation par rapport au temps de séchage, il faut distinguer deux types de comportement pour nos sédiments étudiés : celui des sédiments bretons et alpins et celui des sédiments de la Nouvelle Aquitaine.

Tout d'abord, les sédiments alpins et bretons durant l'Essai de Retrait et de Séchage restent saturés pendant les premiers jours de séchage, leur degré de saturation est constant et égal à 1. Au fil du temps, la teneur en eau décroit et ceci implique la diminution de la valeur du degré de saturation. Dès que les sédiments cessent d'être saturés, le degré de saturation évolue plus ou moins linéairement. À cet égard, les sédiments « AL-ISE » et bretons présentent les pentes les plus faibles. Ces sédiments sont les plus argileux et contiennent des teneurs en matière organique plus élevées que les autres sédiments étudiés. Pour les sédiments alpins « AL- SPO » et « AL-CLA » les pentes sont plus prononcées, ils ont de faibles quantités de matière organique et présentent une composition granulométrique plus homogène.

On note que les points d'inflexion de ces droites correspondent aux limites de plasticité des sédiments à savoir au 2$^{ème}$ jour pour les sédiments « AL-SPO » et « AL-CLA », au 3$^{ème}$ jour pour les sédiments de la Rance et au 4$^{ème}$ jour pour les sédiments « AL-ISE » et « BR-SAI », voir figure 4-25. Sur cette figure, la limite de plasticité est en trait pointillé en orange.

Quant à l'évolution du degré de saturation selon le temps de séchage pour les sédiments « NA-ART », elle est complètement différente des autres sédiments testés. Le degré de saturation initial égal à 1 sera maintenu un très court temps. En effet, ces sédiments drainent l'eau rapidement pendant la première heure de séchage, provocant des diminutions brusques du degré de saturation. La pente de la droite $S_r$=f(temps) est la plus raide comparativement à celle des sédiments bretons et alpins étudiés. Ce comportement est typique des sédiments très sableux ayant des capacités drainantes plus élevées et de faibles teneurs en matière organique.

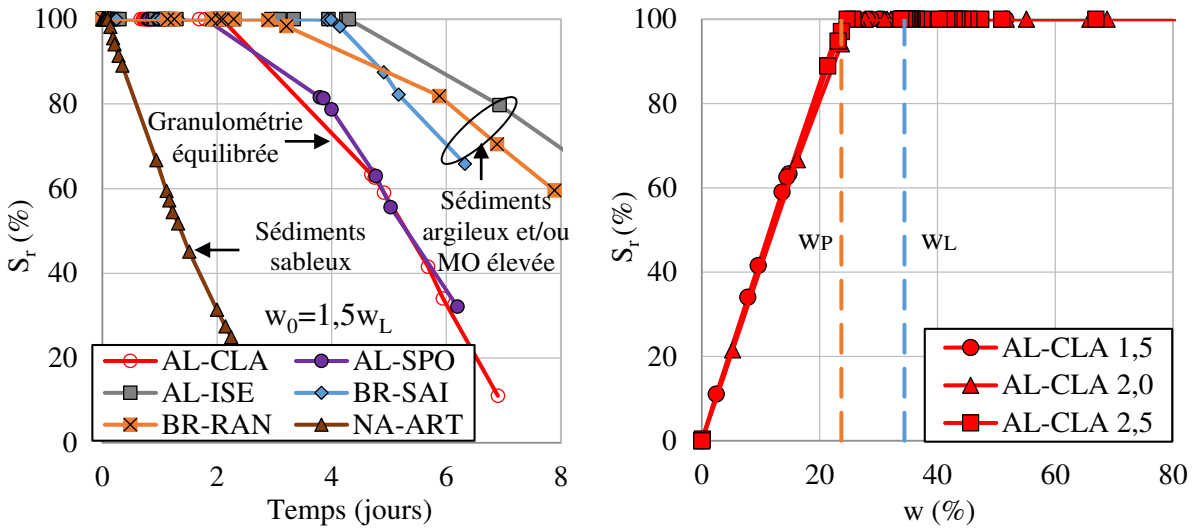



*Figure 4-25. Évolution du degré de saturation par rapport au temps de séchage (à gauche) et en fonction de la teneur en eau des sédiments (à droite).*

### *4.4.3.4. Déformation axiale ($\varepsilon_a$)*

La déformation axiale des échantillons de sédiments est un paramètre d'état lié à la teneur en eau des sédiments. Les plus importantes déformations axiales se manifestent au début du séchage, quand les sédiments sont saturés, voir figure 4-26. Sur cette figure, les déformations tendent à se stabiliser quand les teneurs en eau des sédiments s'approchent des limites de liquidité, ligne bleue sur la figure, et elles sont presque constantes après la limite de plasticité, ligne orange de la figure 4-26.b. De même, on observe que pour le même type de sédiment, ceux qui ont les teneurs en eau initiales les plus élevées ont les plus importantes déformations axiales.

En ce qui concerne, les déformations axiales par rapport au type de sédiment, on observe que les sédiments « NA-ART » présentent les plus faibles déformations axiales de l'ordre de 5%. Les sédiments bretons « BR-SAI » et « BR-RAN » enregistrent 20% de déformation axiale, et les déformations observées pour les sédiments alpins « AL-SPO », « AL-CLA » et « AL-ISE » passent à 21%, 25% 31% respectivement. Ce sont les sédiments «AL- ISE » qui présentent la plus forte déformation axiale, voir figure 4-26.b.

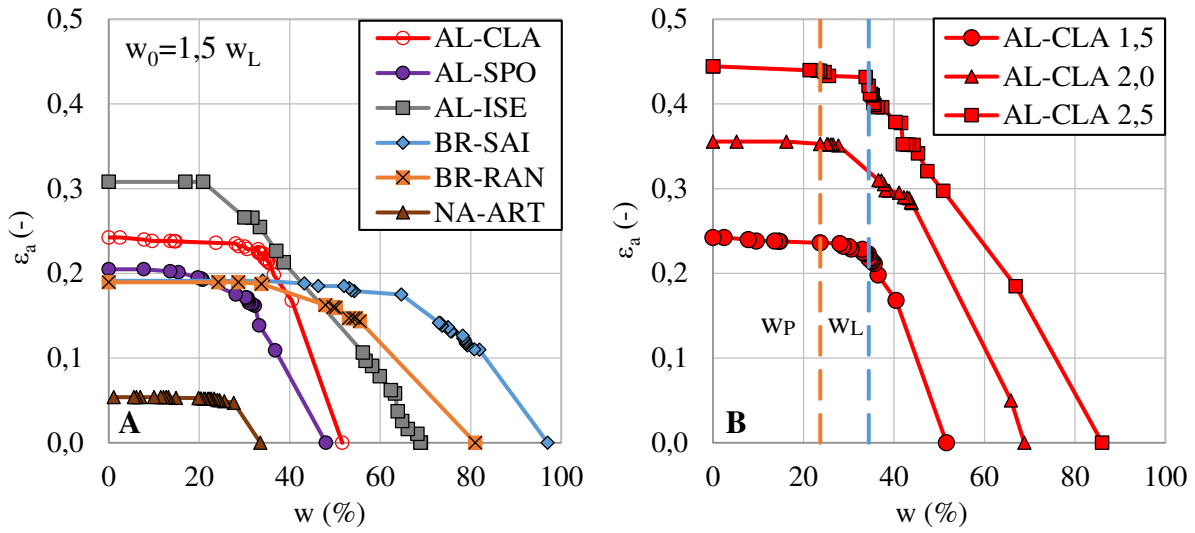



*Figure 4-26. Évolution de la déformation axiale par rapport à la teneur en eau des sédiments de barrage (à gauche) et des sédiments « AL-CLA » (à droite).*

### *4.4.4. Essai mécanique*

L'ensemble des résultats obtenus à partir des essais scissométriques en laboratoire est détaillé dans les annexes A.2.4 intitulée « Évolution de la cohésion non drainée par rapport au temps de séchage » et A.2.5 relative à l'« Évolution de la cohésion non drainée par rapport à la teneur en eau ». Dans ces annexes, la cohésion non drainée est exprimée en fonction du temps et de la teneur en eau.

#### *4.4.4.1. Évolution de la cohésion non drainée selon le temps de séchage*

Les résultats des essais scissométriques en laboratoire montrent que la cohésion non drainée augmente avec le temps de séchage. Au début du séchage naturel, les sédiments ont des cohésions non drainées très faibles voire nulles, à la limite de l'utilisation de l'appareil. Au fur et à mesure, les sédiments voient augmenter leur résistance au cisaillement.

Après la réalisation de ces essais, il est observé que l'évolution de la cohésion non drainée selon le temps de séchage est fortement liée à la nature des sédiments. Les sédiments alpins acquièrent les plus fortes résistances au cisaillement, avec des valeurs voisines de 190 kPa, 207 kPa et 180 kPa au 31$^{ème}$ jour de séchage respectivement pour les sédiments « AL-FLU », « AL-SPO » et « AL-CLA ». Les sédiments « AL-ISE » montrent des résistances égales à 130 kPa au 27$^{ème}$ jour de séchage. Quant aux sédiments bretons, ceux de St-Aignan ont une résistance au cisaillement de 139 kPa au 31$^{ème}$ jour de séchage et, ceux de la Rance, une résistance de 110 kPa au 30$^{ème}$ jour de séchage. Concernant les sédiments de Dunkerque et du Rhin, ces sédiments ont les plus faibles résistances obtenues au 29$^{ème}$ jour, avec des résistances au cisaillement voisines de 34 kPa et 20 kPa respectivement, voir figure 4-27.

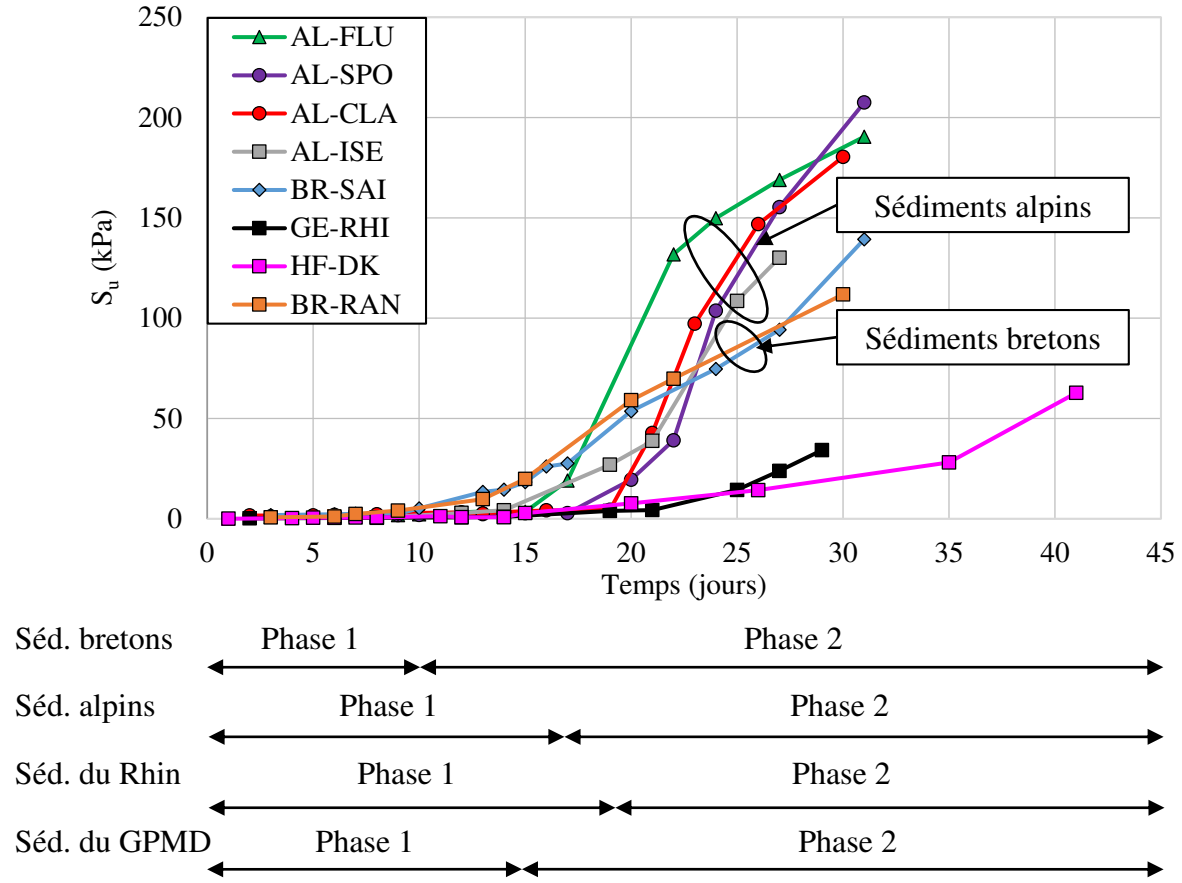



*Figure 4-27. Évolution générale de $S_u$ en fonction du temps de séchage pour l'ensemble des sédiments.*

Dans l'évolution de la cohésion non drainée avec le temps de séchage, on peut distinguer deux phases ou comportements. Une première phase caractérisée par des variations très faibles de la cohésion non drainée pendant des périodes de temps relativement longues et une deuxième phase où la résistance de cisaillement augmente considérablement avec des légères variations du temps de séchage. La frontière entre ces deux comportements est marquée par la limite de liquidité, voir figure 4-28.

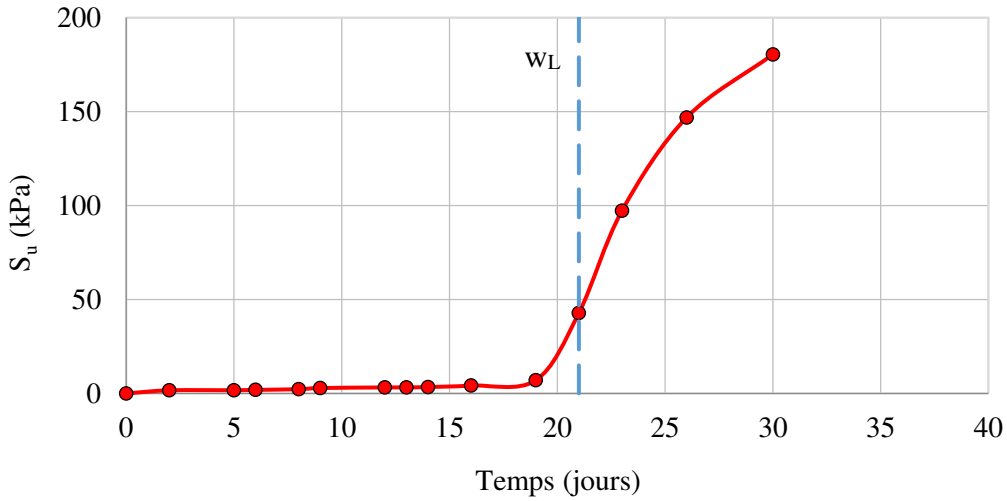


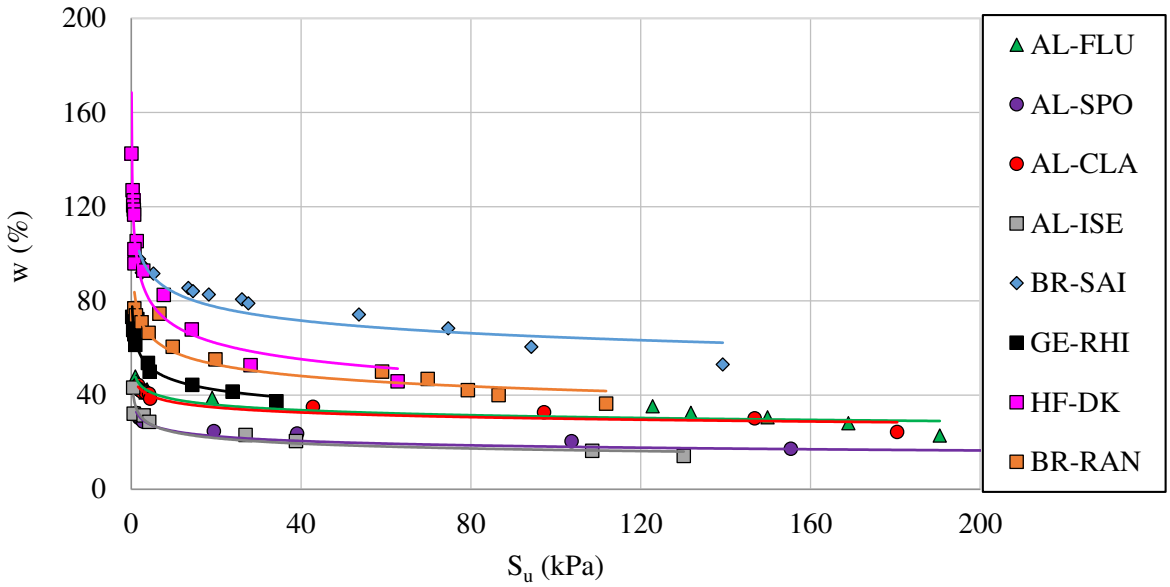

*Figure 4-28. Évolution de $S_u$ en fonction du temps de séchage pour les sédiments « AL-CLA ».*

### *4.4.4.2. Évolution de la cohésion non drainée avec la teneur en eau*

La relation $S_u = f(w)$ propose une combinaison des résultats obtenus de l'essai scissométrique en laboratoire et de l'Essai d'Égouttage et de Séchage. Elle est déterminée en éliminant la variable temps (t), de la relation $S_u = f(t)$ obtenue avec l'essai scissométrique et de la relation $w = f(t)$ issue de l'Essai d'Égouttage et de Séchage.

Au début des essais de séchage, les teneurs en eau sont élevées et les cohésions non drainées nulles. Dès que les sédiments commencent à éliminer l'eau, la résistance au cisaillement tend à augmenter. L'allure de l'évolution de la cohésion non drainée en fonction du temps est illustrée sur la figure 4-29 où deux phases peuvent être distinguées. La première implique d'importantes réductions de teneurs en eau avec de faibles augmentations de la résistance au cisaillement. Cette phase correspond à la première phase de séchage. D'autre part, la deuxième phase de séchage induit de petites variations de la teneur en eau en provoquant de forts changements de la résistance au cisaillement. La frontière entre ces deux phases est définie par la limite de liquidité, voir figure 4-30.

On observe que la cohésion non drainée des sédiments commence à augmenter considérablement dès que les teneurs en eau des sédiments s'approchent à la limite de liquidité ±7% pour les sédiments alpins, ceux de la Rance et de Dunkerque ou ±25% pour les sédiments « BR-SAI » et « GE-RHI ».




$w_{FLU} = 38{,}936Su^{-0{,}094}$ $R^2 = 0{,}6788$

$w_{CLA} = 45{,}563Su^{-0{,}09}$ $R^2 = 0{,}8893$

$w_{SAI} = 108.41Su^{-0.112}$ $R^2 = 0{,}8575$

$w_{DK} = 118{,}51Su^{-0{,}162}$ $R^2 = 0{,}8591$

$w_{SPO} = 34{,}019Su^{-0{,}102}$ $R^2 = 0{,}6562$

$w_{ISE} = 35{,}338Su^{-0.162}$ $R^2 = 0{,}9267$

$w_{RHI} = 63{,}245Su^{-0.135}$ $R^2 = 0{,}9214$

$w_{RAN} = 80{,}265Su^{-0.139}$ $R^2 = 0{,}8863$

*Figure 4-29. Évolution générale de $S_u$ en fonction de w pour l'ensemble de sédiments.*

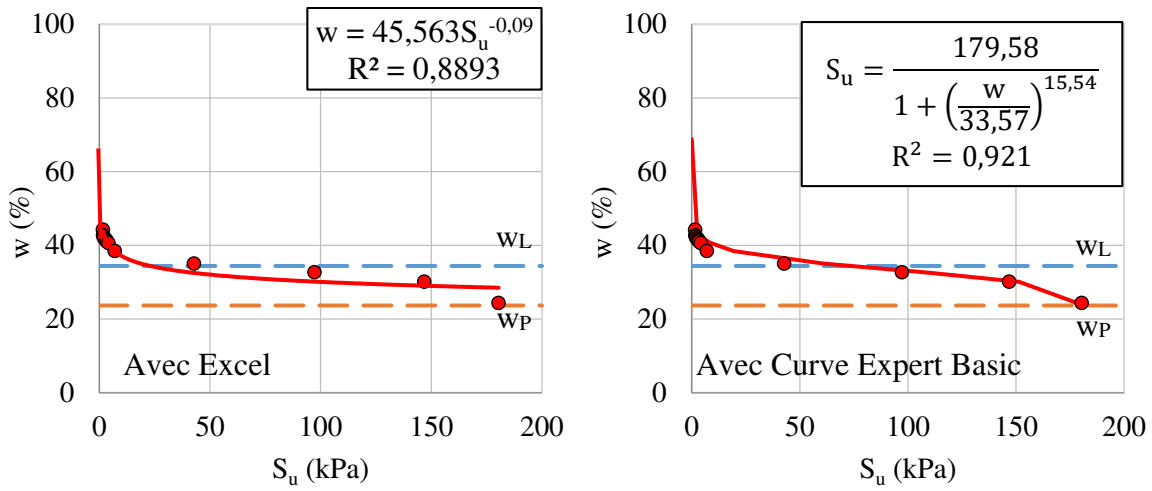



*Figure 4-30. Évolution w-$S_u$ pour les sédiments « AL-CLA ».*

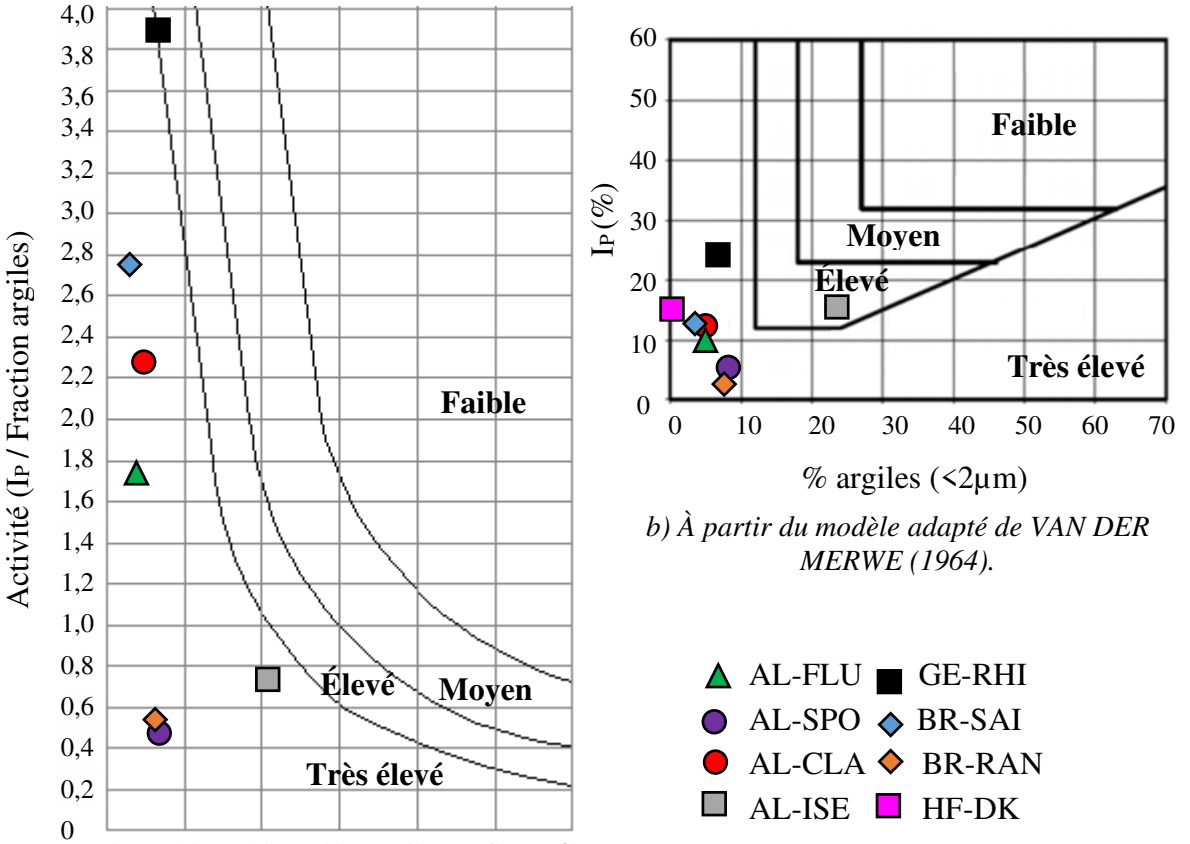
### *4.4.5. Activité des sédiments*

Les sédiments étudiés présentent un potentiel de retrait « très élevé » si l'on adapte aux modèles proposés par SEED et al., (1962) et par VAN DER MERWE (1964). Dans ce dernier modèle, le potentiel de retrait pour les sédiments « AL-ISE » est classé comme « élevé », voir figure 4-31. Il conviendrait d'affiner ces modèles pour les adapter aux sédiments.

Concernant les coefficients d'activité pour les sédiments étudiés, ils sont collectés dans le tableau 4-2. Notons que les sédiments alpins « AL-ISE » et « AL-SPO » et ceux de la Rance ont des coefficients d'activité de 0,73 ; 0,44 et 0,48 respectivement. Du fait que ces coefficients soient inférieurs à 0,75, ces sédiments sont classifiés comme « argiles inactives ». Le reste des sédiments ont des coefficients d'activité supérieurs à 1,25, et considérés comme des « argiles actives ».

*Tableau 4-2. Coefficients d'activité des sédiments étudiés.*

| | **AL-FLU** | **AL-CLA** | **AL-SPO** | **AL-ISE** | **GE-RHI** | **BR-SAI** | **HF-DK** | **BR-RAN** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Activité** | 1,74 | 2,23 | 0,44 | 0,73 | 3,92 | 2,78 | 15,54 | 0,48 |
| | Active | Active | Inactive | Inactive | Active | Active | Active | Inactive |




*a) À partir du modèle adapté de SEED et al., (1962).*

*b) À partir du modèle adapté de VAN DER MERWE (1964).*

*Figure 4-31. Abaques d'évaluation du potentiel de retrait pour les sédiments étudiés.*

## *4.5. ANALYSE ET DISCUSSION*

### *4.5.1. Essai d'Égouttage et de Séchage (EES)*

#### *4.5.1.1. Analyse des phénomènes de drainage et d'évaporation*

Les résultats obtenus pendant l'Essai d'Égouttage et de Séchage permettent de confirmer que les sédiments présentent le même comportement par rapport à la déshydratation naturelle d'une manière générale. Pendant ce processus, tous les sédiments éliminent l'eau par drainage puis par évaporation. Cependant, de petites différences, liées aux caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des sédiments peuvent être appréciées. Il est observé que les sédiments ayant d'importants pourcentages d'argile et/ou de matière organique, comme les sédiments « BR-RAN » ou « HF-DK », présentent des difficultés pour éliminer l'eau ; ces constituants retiennent l'eau (LIFE, 2002 ; DUBOIS, 2006 ; BEN ABDELGHANI et al., 2014).

Au début de l'essai, l'eau est principalement évacuée par drainage et le phénomène d'évaporation est presque inexistant. Le séchage par drainage permet d'éliminer d'importantes quantités d'eau pendant des périodes de temps relativement courts. Ces périodes dépendent du volume des sédiments à déshydrater et leur teneur en eau initiale. La quantité d'eau drainée augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale pour se stabiliser. Ce volume d'eau est lié à l'eau libre. Le phénomène du drainage dépend principalement de la nature des sédiments à déshydrater.

L'évaporation se produit plus régulièrement que le drainage. Elle commence au début du processus de déshydratation et prédomine dès que le drainage s'arrête. L'évaporation est caractérisée par l'agitation des molécules d'eau permettant d'éliminer l'eau interstitielle des sédiments. Elle est régie principalement par le climat (température) et la nature de sédiments. Aussi l'évaporation est directement proportionnelle à la surface en contact avec l'air ; cette surface augmente avec le retrait et/ou l'apparition de fissures dans les sédiments. Ceci se produit quand la teneur en eau des sédiments s'approche de la limite de liquidité. La déshydratation complète des sédiments par évaporation nécessite du temps.

Deux types de comportement de séchage par évaporation peuvent être distinguées. Les sédiments les plus plastiques et ceux qui possèdent des teneurs en matière organique et/ou des pourcentages d'argile élevés présentent des courbes d'évaporation avec une allure concave. Ils voient évaporer des quantités significatives d'eau sans changements brusques dans la cinétique d'évaporation. Comme cela est le cas des sédiments bretons, du Rhin, du port de Dunkerque et des sédiments alpins « AL-ISE ». De même, il est observé que les sédiments avec des pourcentages d'argiles et de limons conséquents, comme ceux de Dunkerque et de l'Isère, peuvent évaporer des quantités d'eau plus élevées. Ce fait peut être lié aux surfaces spécifiques des particules fines des sédiments.

En ce qui concerne les limites d'Atterberg ($w_L$ et $w_P$), il est important de souligner qu'ils se positionnent à proximité des points d'inflexion dans la cinétique de déshydratation de sédiments. Ces limites indiquent un changement d'état associé à l'espacement entre les particules solides des sédiments. Trois comportements ont pu être observés pendant cet essai :

- Diminution de la cinétique de déshydratation après les limites de liquidité et de plasticité, comme c'est le cas des sédiments de Dunkerque et de l'Isère. Ces deux sédiments, composés essentiellement de limons fins, ont les plus importantes quantités de matière organique et d'argiles.

- Augmentation de la cinétique de déshydratation après la limite de plasticité pour des sédiments peu plastiques comme « AL-SPO » et « BR-RAN ». Ces deux sédiments sont les moins plastiques et ils possèdent une granulométrie similaire : faibles pourcentages d'argiles, autour de 8%, vers 30% de sables fins et environ 60% de limons.

- Augmentation de la cinétique de déshydratation après les limites de liquidité et de plasticité, pour les sédiments « AL-FLU », « AL-CLA », « GE-RHI » et « BR-SAI ». Ces sédiments sont constitués principalement de limons avec des pourcentages compris entre 50% et 65% et de sables fins dont les pourcentages varient de 30% jusqu'à 40%. Ils ont des quantités d'argiles faibles (<6,5%).

Ces critères d'aptitude sont expliqués de façon détaillée dans le chapitre 6 portant sur une « proposition de critères d'aptitude au séchage et à la déshydratation des sédiments ».

#### *4.5.1.2. Autres phénomènes constatés pendant le séchage naturel*

Durant le suivi du drainage et de l'évaporation des sédiments pendant le séchage naturel, trois phénomènes à savoir, le tassement, le retrait et la fissuration ont pu être observés ou mesurés. Ils sont fortement liés à l'origine, la nature et les caractéristiques physico - chimiques des sédiments. Comme nous l'avons constaté la présence de la matière organique, l'argilosité et les limites d'Atterberg jouent un rôle fondamental dans le comportement mécanique du séchage.

Les sédiments qui ont des teneurs en matière organique importantes et des valeurs au bleu de méthylène élevées attestant d'une forte quantité d'argiles, comme ceux de Dunkerque ou de la Rance, présentent des valeurs de tassements et de retraits diamétraux élevés. De fait, ils montrent les plus importantes diminutions de volume. Ce comportement peut être expliqué par la capacité de rétention d'eau par les argiles et par la matière organique.

Comme la teneur en eau initiale était égale à deux fois la limite de liquidité, les sédiments avec des limites de liquidité importantes, comme ceux du Rhin, de Dunkerque ou les sédiments bretons, ont des teneurs en eau initiales élevées se traduisant par des par retraits conséquents.

Quant au phénomène de fissuration, il a été constaté pour les sédiments de Dunkerque, d'Isère, du Rhin et de la Rance. Ces fissures apparaissent à proximité des endroits où l'essai scissométrique a été réalisé, la fissuration est initiée par l'empreinte du croisillon laissée après l'application du moment de torsion nécessaire à la rupture du sédiment. Notons que les sédiments de Dunkerque sont des sédiments marins qui contiennent du sel. Ce sel aide à déshydrater les sédiments, néanmoins les fissures sont situées entre deux mesures du

cisaillement. Les sédiments d'Isère, du Rhin et de la Rance ont été confectionnés en utilisant des tamis de taille moyenne. La fissuration des sédiments d'Isère, du Rhin et de la Rance peut être liée à la faible distance entre deux mesures du cisaillement. Cette distance était inférieure à 20 cm.

### *4.5.2. Mesure de la teneur en eau selon la profondeur de la couche*

Les prélèvements de sédiments réalisés pendant le séchage permettent de mettre en évidence que le séchage naturel est hétérogène sur la hauteur de la couche du sédiment. Au début du processus de séchage, tous les sédiments étudiés présentent la même teneur en eau initiale et les profils de teneur en eau en fonction de la hauteur de la couche sont des droites.

Puis les sédiments éliminent l'eau essentiellement par drainage, (l'évaporation est presqu'inexistante), les profils de teneur en eau prennent des formes concaves ou paraboliques dissymétriques. D'importantes pertes d'eau surviennent sur des périodes de temps très courts, en provoquant des variations de teneurs en eau au sein de la couche des sédiments. Au fur et à mesure du processus de séchage, la teneur en eau devient de plus en plus homogène sur toute la couche, les profils tendent à revenir des droites.

Par ailleurs, il est observé que le phénomène d'évaporation provoque une diminution très rapide de la teneur en eau de la couche supérieure et le drainage aide à diminuer la teneur en eau de la couche inférieure. De cette manière, la teneur en eau dans la couche intermédiaire reste la plus élevée. Notons aussi que pour tous les sédiments, les profils ne redeviennent des droites verticales qu'après avoir atteint la limite de liquidité. L'épaisseur de la couche des sédiments tend à diminuer au fur et à mesure (phénomène de retrait) et cela favorise aussi un séchage plus homogène.

### *4.5.3. Essai de Séchage et de Retrait (ESR)*

#### *4.5.3.1. Teneur en eau (w)*

Considérant encore le séchage naturel des sédiments, et la variation de la teneur en eau avec le temps, les sédiments ont un comportement similaire indépendamment de la teneur en eau initiale, voir figure 4-32.a. Au début du séchage, des quantités élevées d'eau sont réduites par drainage principalement. Ceci est dû au fait que le drainage permet d'éliminer l'eau superficielle des sédiments par gravité. Les sédiments avec de hautes teneurs en eau initiales drainent des quantités d'eau aussi plus élevées, voir figure 4-32.b. Dès que le drainage s'arrête, les sédiments voient leur vitesse de séchage diminuer. Cette diminution de la vitesse est liée au phénomène d'évaporation. Rappelons que l'évaporation est plus constante dans le temps mais la cinétique de séchage est faible.

Les caractéristiques physico chimiques et minéralogiques ont une influence sur l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage. Il est clair que les sédiments sableux essentiellement composés de quartz avec des teneurs en matière organique faibles, type « NA-ART » sont capables d'éliminer l'eau plus rapidement que les autres sédiments. Ces autres sédiments sont limoneux et/ou argileux constitués de phyllosilicates, comme « AL-

ISE », ou de la matière organique à des taux importants, comme les sédiments bretons étudiés. Aussi, ces autres sédiments présentent des droites sensiblement parallèles pendant la phase d'évaporation. Ils ont une même vitesse de séchage. Ils ont des propriétés physicochimiques et minéralogiques semblables. Cette remarque parait intéressante pour prédire un modèle de comportement des sédiments. Ce modèle pourrait être basé sur des paramètres liés à la granulométrie, à la caractérisation minéralogique et à la détermination de la matière organique, c'est-à-dire à des essais d'identification.

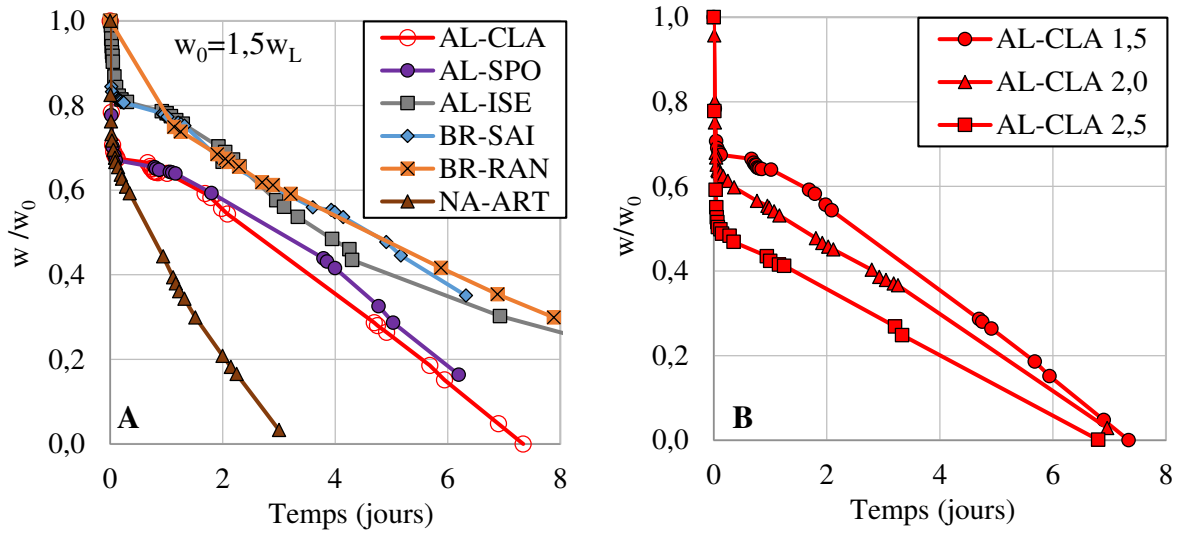



*Figure 4-32. Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage.*

### *4.5.3.2. Indice des vides (e)*

L'indice des vides peut être un facteur clé pour comprendre le séchage naturel des sédiments. Ce paramètre est directement proportionnel à la teneur en eau des sédiments en phase de saturation (début du processus du séchage). En début de processus, si les teneurs en eau sont importantes, les indices des vides initiaux et finaux le sont aussi, voir figure 4-33.b.

L'évolution de l'indices des vides selon le temps de séchage, comme l'évolution de la teneur en eau, les processus et/ou mécanismes sont les mêmes. Ainsi en début du séchage l'indice des vides varie très brusquement pour des courtes périodes de temps. Une fois le drainage finit, l'indice des vides, comme la teneur en eau, tendent à se stabiliser avec le phénomène d'évaporation. Cette évolution est indépendante du type de sédiment. On peut observer que les indices des vides des sédiments sableux et/ou ceux avec de faibles pourcentages de matière organique, tendent à se stabiliser plus rapidement que les sédiments limoneux et/ou argileux ou possédant des teneurs en matière organique importantes, voir figure 4-33.a.

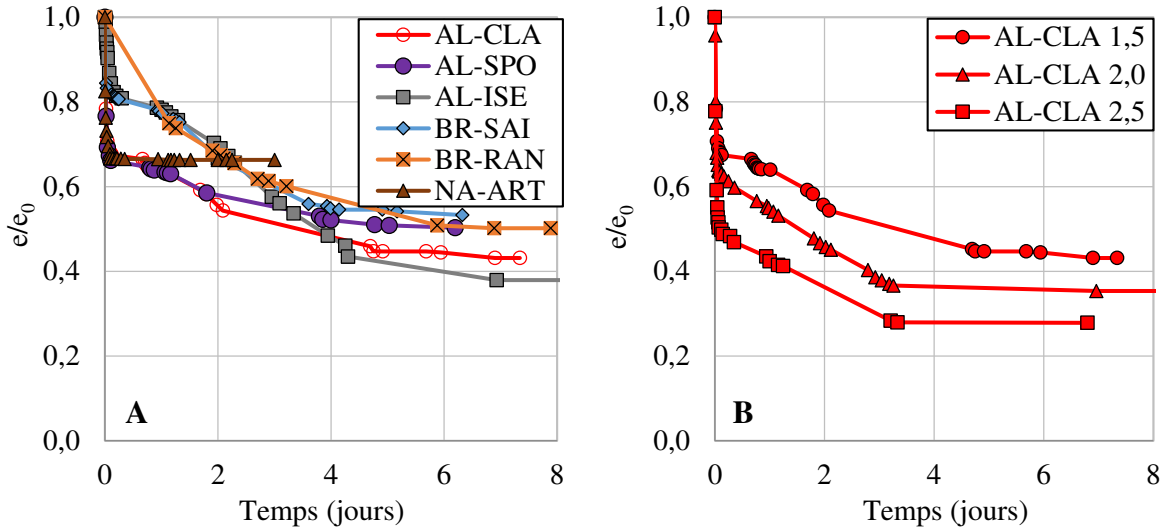



*Figure 4-33. Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage.*

Dès que les valeurs des teneurs en eau des sédiments avoisinent la limite de plasticité, les sédiments voient leurs indices des vides tendent vers une valeur constante.

### *4.5.3.3. Degré de saturation ($S_r$)*

D'après les essais de retrait et de séchage, on constate deux types d'évolution du degré de saturation par rapport au temps : une évolution de type « A » correspondant aux sédiments argileux, limoneux et/ou des teneurs en matière organique significatives, et une évolution de type « B » qui correspond aux sables fins ou grossiers facilement drainés. Dans notre cas d'étude, l'évolution de type A correspond aux sédiments alpins et bretons et le type B, aux sédiments de la Nouvelle Aquitaine, voir figure 4-25.

Les sédiments alpins et bretons étudiés présentent la même évolution du degré de saturation par rapport au temps de séchage. Tous les sédiments commencent le processus de séchage avec des teneurs en eau initiales supérieures à la limite de liquidité, ils sont donc saturés au début du séchage. Ensuite, pendant les premiers jours de séchage, ces sédiments commencent à éliminer l'eau, ils continuent à demeurer saturés. Au fur et à mesure, la teneur en eau et l'indice des vides de ces sédiments diminuent et leurs degrés de saturation baissent. Quand les sédiments cessent d'être saturés et au-delà de la limite de plasticité, leur état dans les diagrammes Sr-temps est représenté par une deuxième droite, voir figure 4-34. La pente de cette deuxième droite est liée aux caractéristiques minéralogiques et physico-chimiques des sédiments tels que la granulométrie, l'argilosité ou la matière organique.

Les sédiments alpins « AL-SPO » et « AL-CLA » présentent sensiblement la même pente. Elle est plus prononcée que celle obtenue avec les sédiments bretons et « AL-ISE ». La similitude de leur pente peut être expliqué par la même origine, la même granulométrie et des teneurs en matière organique voisines. Les sédiments « AL-ISE » ont eux, des quantités d'argile et une teneur en matière organique plus élevée. Ces sédiments ont une pente plus faible et proche de celles des sédiments bretons. Ce comportement est en mettre en relation avec la

diminution de la vitesse de séchage provoquée par la rétention d'eau au sein des argiles et de la matière organique.

L'évolution du degré de saturation avec le temps de séchage de type B, correspond aux sédiments sableux avec de fortes capacités drainantes, comme ceux de la Nouvelle Aquitaine. Le degré de saturation égal à 1 en début d'essai diminue brusquement dès que le drainage est amorcé. Dès que les sédiments ne perdent plus d'eau par drainage, le degré de saturation tend à diminuer plus lentement.

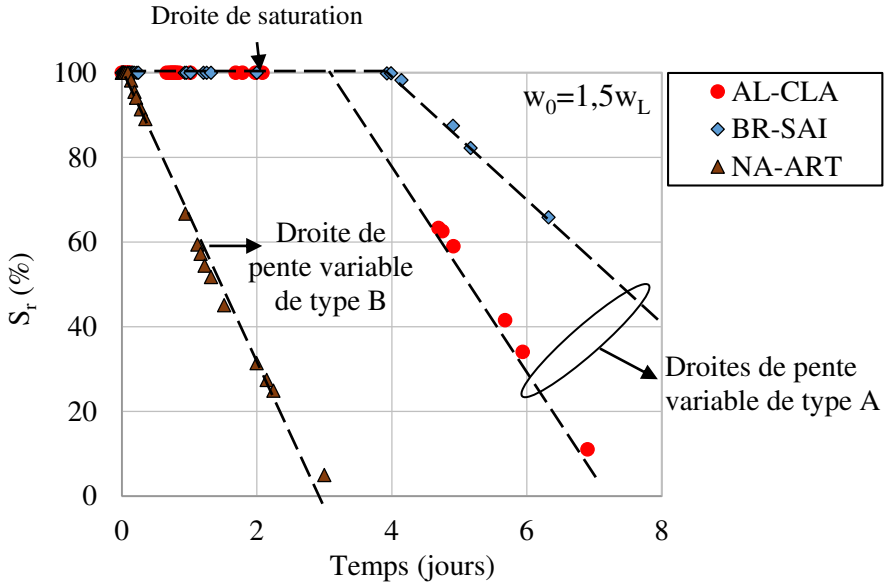



*Figure 4-34. Évolution du degré de saturation par rapport au temps de séchage.*

### *4.5.3.4. Déformation axiale ($\varepsilon_a$)*

La déformation axiale des sédiments est directement corrélée à la teneur en eau. Au début du séchage, les sédiments sont saturés dans un état liquide. Dans cet état, les sédiments se comportent comme un liquide et des déformations axiales importantes sont générées par diminution d'eau. Ces déformations tendent à se stabiliser quand les teneurs en eau des sédiments s'approchent de la limite de liquidité. Puis elles diminuent et tendent à devenir presque constantes au-delà de la limite de plasticité. Ce comportement est lié à l'évolution de l'indice des vides et de la teneur en eau, et au temps de séchage. Au fur et à mesure que la teneur en eau et l'indice des vides diminuent progressivement, les particules tendant à se rapprocher, les sédiments sont tous dans un état plastique, le volume des sédiments se stabilise. À la fin du séchage, les sédiments arrivent à la limite de retrait, les particules des sédiments sont en contact les unes avec les autres et il n'y a plus de changement de volume.

D'après les résultats de nos essais et ceux obtenus et commentés par SERRATRICE (1995 et 2015), la déformation axiale est étroitement liée à la granulométrie et à la teneur en eau initiale des sédiments étudiés. Les sédiments dits « sableux » présentent des déformations axiales les moins importantes. Cependant, les sédiments dont la teneur en eau est plus élevée présentent les plus importantes déformations axiales.

Il y a certains indices qui font penser que la déformation axiale peut être reliée à l'origine et la nature des sédiments. Les sédiments de l'Artaude sont composés essentiellement de quartz favorisant la capacité drainante. Les phyllosilicates sont bien connus pour leur rétention d'eau dans les sols, et provoquant des déformations importantes, comme les sédiments alpins.

### *4.5.4. Essai mécanique*

#### *4.5.4.1. Évolution de la cohésion non drainée selon le temps de séchage*

L'évolution de la cohésion non drainée par rapport au temps de séchage permet de mettre en évidence que la cohésion non drainée est proportionnelle au temps de séchage. Le processus de séchage des sédiments est initié avec des cohésions non drainées nulles. Les sédiments voient augmenter considérablement leur résistance au cisaillement dans les derniers jours de séchage.

L'évolution de cette cohésion non drainée montre deux zones distinctes de séchage Une première zone, correspondant aux premiers jours de séchage où la cohésion non drainée augmente très faiblement et, au-delà de cette période, la résistance au cisaillement augmente de manière exponentielle sur des périodes de temps réduites. Ce changement brusque de comportement est étroitement corrélé à la nature et à l'origine des sédiments.

On observe que l'évolution de la cohésion non drainée avec le temps de séchage est plus étendue avec les sédiments qui ont des teneurs élevées de matière organique et/ou des valeurs au bleu de méthylène (VBS) importantes correspondant aux argiles. Cette évolution correspond aux sédiments bretons, du port de Dunkerque et du Rhin. Pour les sédiments alpins, l'évolution suivie est un peu différente de celle des sédiments préalablement nommés. Pour ces sédiments, la frontière entre les deux zones est plus marquée. La résistance au cisaillement dans la première zone est presque nulle et à partir de la deuxième zone, elles augmentent largement avec des petites variations du temps de séchage. Ceci peut être dû au fait que les sédiments alpins présentent de faibles teneurs en matière organique, et que leurs valeurs des indices de plasticité (IP) sont les plus faibles.

Notons que les sédiments « AL-ISE » ont un pourcentage d'argiles important, se traduisant par un changement entre les deux zones plus étendu. Soulignons aussi, le fait que les sédiments alpins acquièrent les plus fortes résistances au cisaillement à la fin du séchage.

#### *4.5.4.2. Évolution de la cohésion non drainée avec la teneur en eau*

L'évolution de la cohésion non drainée avec la teneur en eau permet de suivre le comportement au séchage des sédiments. Si une telle relation pouvait être modélisée, alors il serait permis de penser qu'une seule mesure de la teneur en eau des sédiments permettrait de déduire la cohésion non drainée (LEVACHER et al., 2018 ; BOULLOSA ALLARIZ et al., 2018).

Après les essais, on observe d'une part, que la teneur en eau est inversement proportionnelle à la cohésion non drainée. Et d'autre part, la limite de liquidité joue un rôle essentiel dans l'évolution de la cohésion non drainée en fonction de la teneur en eau. Du fait

que les sédiments, au début du séchage naturel sont saturés, de faibles augmentations de la résistance au cisaillement sont perceptibles seulement quand le drainage est amorcé causant des diminutions brusques de pertes d'eau. Ce comportement est dû au contact quasi-inexistant entre les particules des sédiments. Au fur et à mesure que les sédiments évacuent l'eau, les particules des sédiments tendent à se réorganiser. Dès que la teneur en eau s'approche à la limite de liquidité, les sédiments ont comportement qui devient plastique, les contacts entre les particules augmentent, en provocant un accroissement rapide de la résistance au cisaillement. Il est noté que cette frontière de transition est définie à $w_L$ ±7% pour les sédiments alpins, de la Rance et de Dunkerque et $w_L$ ±25% pour les sédiments « BR-SAI » et « GE-RHI ». Ce fait peut être lié à la limite de plasticité. Ces derniers sédiments sont plus plastiques et présentent des valeurs de la limite de liquidité les plus élevées.

### *4.6. CONCLUSION DU CHAPITRE*

Le séchage naturel des sédiments est une méthode de déshydratation qui permet de réduire la quantité d'eau des sédiments grâce à l'évaporation atmosphérique et au drainage provoqué par des matériaux drainants. Du fait que cette technique utilise l'énergie solaire pour évaporer l'eau et la force de gravité pour évacuer l'eau par drainage, elle est considérée comme la méthode de déshydratation la plus économique et acceptable du point de vue environnemental. Cependant, cette technique dépend fortement des propriétés de la matrice sédimentaire et du climat local. Cela se traduit en général par l'obtention d'un produit déshydraté pâteux, hétérogène et faiblement déshydraté. En vue d'améliorer ce procédé, des paramètres d'état des sédiments et des critères d'aptitude au séchage naturel doivent être déterminés.

La détermination des paramètres d'état des sédiments pendant le séchage naturel et la recherche de critères d'aptitude au séchage passe par la réalisation d'Essais de Séchage et de Retrait (ESR), d'Égouttage et de Séchage (EES) et des essais scissométriques. Ainsi, une série d'essais ont été mis en place avec un groupe de sédiments présentés dans le chapitre 3. Les résultats obtenus à partir de ces essais ont été récapitulés dans le présent chapitre. Ils permettent de tirer une série de conclusions qui sont exposées ci-après.

D'une manière générale, il est remarqué que **les sédiments présentent le même comportement par rapport à la déshydratation naturelle** : au début du séchage naturel, l'eau est principalement évacuée par drainage et le phénomène d'évaporation est presque inexistant. Au fur et à mesure, la quantité d'eau drainée augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale, correspondant à l'eau libre contenue dans les sédiments. Puis le drainage tient à se stabiliser et le phénomène d'évaporation devient de plus en plus important.

De ces essais et observations, il est remarqué que **le drainage et l'évaporation sont les phénomènes prédominants pendant le séchage naturel**. Le séchage par drainage permet de réduire d'importantes quantités d'eau pendant des périodes de temps courts. **L'eau évacuée par drainage correspond à l'eau libre des sédiments.** Par ailleurs, il est noté que le drainage est fortement lié à la nature des sédiments à déshydrater : les sédiments avec des pourcentages d'argile et/ou de matière organique relativement élevés présentent des difficultés pour éliminer l'eau. Ceci est dû à la capacité de rétention d'eau par les argiles et la matière organique. Par contre les sédiments plus sableux drainent d'eau plus rapidement. **La connaissance des**

**caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques joue un rôle important dans l'étude du séchage naturel.**

En ce qui concerne le phénomène d'évaporation, il est remarqué que **l'évaporation** est caractérisée par l'agitation des molécules d'eau, ce qui **permet d'éliminer l'eau interstitielle des sédiments. Elle est régie principalement par le climat et par la nature de sédiments.** Les sédiments avec d'importants pourcentages d'argiles et de limons, sont capables d'évaporer les plus importantes quantités d'eau. Par ailleurs, **elle est directement proportionnelle à la surface en contact avec l'air**, qui augmente avec le retrait et/ou l'apparition de fissures dans les sédiments.

Par ailleurs, le phénomène d'évaporation provoque une diminution très rapide de la teneur en eau de la couche supérieure des sédiments, et le drainage aide à diminuer la teneur en eau de la couche inférieure. De cette manière, la plus haute teneur en eau est située dans la couche intermédiaire. Ceci provoque un produit déshydraté hétérogène. Du fait aussi que l'épaisseur de la couche des sédiments diminue au fur et à mesure, des pertes en eau, **la teneur en eau des sédiments devient plus homogène dans les couches.**

On observe que **le drainage et l'évaporation sont accompagnés par des phénomènes de tassement et de retrait et aussi de fissuration occasionnelle**. Ces phénomènes ont été étudiés à l'aide des Essais de Séchage et de Retrait.

Les sédiments ont tous été testés avec des teneurs en eau initiale supérieure à la limite de liquidité. Dans cet état, **les sédiments sont saturés. Soumis au séchage, de fortes diminutions de teneur en eau s'ensuivent et, par répercussion celui de l'indice de vides. Durant cette période, des déformations axiales importantes se développent. Ces paramètres se stabilisent quand la teneur en eau des sédiments s'approche de la limite de liquidité.**

Au-delà de la limite de liquidité des sédiments, l'indice des vides et la déformation axiale des sédiments tendent à devenir constants et le degré de saturation diminue au fur et à mesure.

Quant aux essais mécaniques, c'est l'essai au scissomètre de laboratoire qui a été utilisé pour déterminer la cohésion non drainée. **La cohésion non drainée est directement proportionnelle au temps de séchage et inversement proportionnelle à la teneur en eau des sédiments testés**. L'empreinte du croisillon lors des essais peut provoquer l'apparition de fissures pendant le séchage si la distance entre deux mesures est relativement courte : inférieure à 20 cm ou inférieure à 35 cm dans le cas du sédiment marin (présence du sel).

À l'analyse des résultats des essais, il est important de noter que **les limites d'Atterberg sont un paramètre clé pour comprendre le séchage naturel**. Notamment, elles sont associées aux points d'inflexion dans la cinétique de déshydratation de sédiments. Au-delà la limite de liquidité, les sédiments passent vers un état plastique et dans cet état, le contact entre particules augmente, en provocant un accroissement rapide de la résistance au cisaillement et de faibles diminutions de l'indice des vides et de faibles déformations axiales.

**L'activité des sédiments dépend donc du pourcentage d'argiles** contenues dans les sédiments, **est fortement liée au phénomène de retrait**, de même elle peut avoir une influence dans la cinétique de séchage. L'étude du séchage naturel a été réalisée avec des sédiments qui présentent un potentiel de retrait « très élevé » si les modèles proposés par SEED et al., (1962) et du VAN DER MERWE (1964) pouvaient être adaptés aux sédiments. Si on considère ce dernier modèle, le sédiment d'Isère serait classé comme ayant un potentiel « élevé ». Cela peut être traduit par des pourcentages de déformations importantes. Soulignons que pour les sédiments étudiés, seulement les sédiments « AL-SPO », « AL-ISE » et « BR-RAN » sont classés comme « inactifs ». En comparant les cinétiques de déshydratation entre les sédiments de la même origine, **ceux qui sont inactifs ont les vitesses de déshydratation les plus élevées.**

# *5. ÉTUDE DE LA DÉSHYDRATATION MÉCANISÉE*

## *5.1. INTRODUCTION*

La déshydratation mécanique résulte d'une combinaison de forces mécaniques, telles que la filtration, le cisaillement, la compression etc., afin de réduire la teneur en eau des sédiments indépendamment des caractéristiques du sédiment et du climat local. Du fait que cette méthode de déshydratation donne un produit déshydraté homogène avec de faibles quantités d'eau pour des périodes de temps assez réduites, elle est présentée comme une alternative pour résoudre les inconvénients occasionnés par le séchage naturel comme *(i)* la forte dépendance des caractéristiques du sédiment et du climat *(ii)* le besoin d'une grande surface ou *(iii)* l'obtention des produits obtenus pâteux et hétérogènes avec de faibles quantités d'eau déshydratée.

De plus les machines de déshydratation sont facilement transportables, elles peuvent être installées près de la zone de dragage, tout en permettant à la fois de diminuer les coûts du transport des boues déshydratées. La déshydratation se fait d'une manière rapide, efficace et relativement simple. De surcroît elles peuvent être réutilisées dans d'autres sites de dragage, en réduisant de cette façon, le coût d'investissement de la machine. À cet égard, elle peut apporter des solutions et jouer un rôle intéressant dans la déshydratation de sédiments.

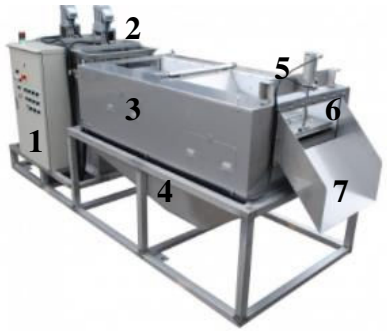
L'avantage le plus important de cette méthode de déshydratation réside dans le procédé ou le système de travail envisagé. Deux procédés de travail peuvent être différenciés : un premier système de travail conventionnel ou « discontinu » où la machine doit être arrêtée à la fin de chaque cycle de déshydratation et un nouveau système « en continu » où les sédiments peuvent être déshydratés 24 h/24 h. Notons que si le système de travail « discontinu » reste la méthode la plus utilisée actuellement, c'est le système « en continu » qui offre apparemment une meilleure efficacité.

Le présent chapitre est dédié à l'apprentissage et à l'amélioration d'un système de travail « en continu » en proposant une nouvelle technologie de déshydratation des sédiments en utilisant la presse à boues KDS®. Les paramètres influant sur le comportement de cette version améliorée du procédé Volute® et le plan expérimental de déshydratation en continu sont présentés. Puis, une série d'essais de déshydratation avec la presse KDS® sont effectués avec des argiles et des sédiments. Les résultats de déshydratation obtenus sont exprimés graphiquement et les observations effectuées pendant sa mise en œuvre sont rassemblés. Puis, des questions sur la capacité de déshydratation de sédiments par la machine actuelle ou modifiée et sur la maintenance avec la présence de sables sont abordées.

## *5.2. LA MACHINE D'ESSAI*

### *5.2.1. Description de la presse à boues KDS®*

La presse à boues KDS® est une machine de déshydratation composée d'une table à barres oscillantes équipée d'une succession de rangées de disques elliptiques et d'une plaque de pression placée à la fin de la table. Cette presse propose une combinaison d'actions : *(i)* du cisaillement existant entre les disques, les barres oscillantes et la boue, *(ii)* de la compression appliquée par la plaque d'appui ou de pression, *(iii)* de la gravitation et *(iv)* de la filtration entre les disques elliptiques et les barres horizontales oscillantes, pour une déshydratation en continu de boues, voir figure 5-1.a. Elle est présentée comme la « version améliorée de Volute® », voir figure 5-1.b. La presse à boues KDS® a été récemment dénommée « EC'eau wave ».




*a) Vue extérieure de la presse à boues KDS®, (FOOD & BEVAGE, 2018).*

*b) Vue extérieure de la presse à boues Volute®, (BOEEP, 2018).*

**Légende**

| | |
|---|---|
| **1** : Coffret électrique | **5 :** Vérin |
| **2** : Réservoir de floculation | **6 :** Plaque de pression |
| **3** : Disques elliptiques rotatifs | **7** : Sortie des boues épaissies |
| **4** : Collecteur d'eau | **8** : Anneaux fixes et mobiles |

*Figure 5-1. Vue extérieure des presses à boues KDS® et Volute®.*

#### *5.2.1.2. Design de la presse à boues KDS® et améliorations apportées par rapport à la presse Volute®*

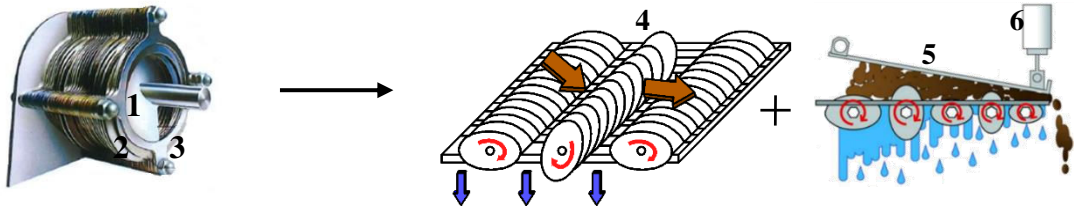
Le design de la presse à boues KDS® comporte trois modifications importantes par rapport à la presse à boues Volute®, voir figure 5-2 :

- Le système de transport des boues : la vis de la presse à boues Volute® est supprimée dans la version améliorée KDS®. Le transport se fait dans un plan légèrement incliné. Le mouvement en rotation des disques elliptiques permet à la fois de transporter, de cisailler et de réduire la quantité d'eau de la boue.

- Le système de compression : la forme tronconique du tambour de la machine de déshydratation Volute® est remplacée par une plaque de pression. Cette plaque permet d'appliquer une pression variable mais réglable sur la boue. La forme

horizontale et à plat de la machine KDS® permet de suivre le processus de déshydratation d'une manière plus visuelle et de détecter tout problème en temps réel.

- La disposition des disques rotatifs : les disques de la machine KDS® sont séparés de manière régulière par des barres oscillantes horizontales. Chaque rangée de disques elliptiques est positionnée perpendiculairement par rapport à la précédente et la suivante. Chaque grand axe de l'ellipse fait un angle de π/2. Cette disposition pourrait permettre d'envisager des applications de la presse à boues KDS® pour la déshydratation de boues sableuses.




*a) Anneaux de la presse à boues Volute®, (ATLANTIQUE INDUSTRIE, 2018a).*

*b) Disques elliptiques et plaque de pression de la presse à boues KDS®, (BENENV & CO., 2018).*

**Légende**

**1** : Vis
**2** : Anneau mobile
**3** : Anneau fixe
**4** : Disques elliptiques
**5** : Plaque de pression
**6** : Vérin

*Figure 5-2. Modifications apportées dans le design de la presse à boues KDS® par rapport à la presse Volute®.*

### *5.2.1.3. Caractéristiques principales de la presse à boues KDS®*

Les caractéristiques principales de la presse à boues KDS® sont synthétisées dans le tableau 5-1. Ces données ont été fournies par Atlantique Industrie et BENENV & CO. Afin de comparer les caractéristiques de différents types de presse de boues KDS®, deux modèles de KDS® « KDS-311D » et « KDS-1224D » sont également présentés dans le tableau suivant.

*Tableau 5-1. Récapitulatif des caractéristiques principales de la presse à boues KDS®.*

| **Caractéristiques** | **Valeur** | |
|---|---|---|
| Siccité moyenne attendue (S)* (%) | 70 - 80 | |
| Teneur en eau (w) (%) | 25 - 42,86 | |
| Opérateurs par machine | 2 | |
| Système de travail | Continu | |
| Séchage à faible concentration | Possible | |
| Mobilité | Possible | |
| Type de sols fins à traiter | Boues non sableuses | |
| **Modèle** | **KDS-311D** | **KDS-1224D** |
| Largeur (m) | 0,3 | 1,2 |
| Masse (kg) | 120 | 1370 |
| Capacité pour une boue de 0,5% de siccité ($m^3$/h) | 10,0 | 75,0 |
| Capacité pour une boue de 1% de siccité ($m^3$/h) | 5,0 | 38,0 |
| Capacité pour une boue de 2% de siccité ($m^3$/h) | 2,0 | 18,8 |
| Capacité pour une boue de 9% de siccité ($m^3$/h) | 1,3 | 12,0 |
| Débit massique (kg/l) | 25 - 40 | 260 - 350 |
| Puissance électrique (kW) | 0,40 | 1,50 |

***Note** : En fonction du type de matériau à déshydrater, la siccité moyenne varie. Dans le cas d'applications agricoles, elle va de 70% (w=42,86%) pour de la bouse de vache et de 80% (w=25%) pour des lisiers d'origine porcine.*

#### *5.2.1.4. Applications*

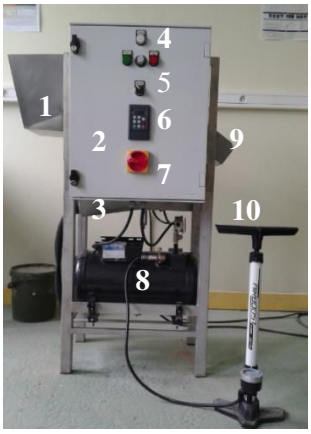
La presse à boues KDS® donne la possibilité de déshydrater une large gamme de boues notamment elle peut être utilisée pour le traitement de déchets alimentaires, de la pêche, de rejets agro-industriels, des lisiers d'animaux, de la filtration primaire de déchets et d'eau résiduelle, des hydrocurages ou pour la séparation de déchets d'huile ou de graisses (AMCON, 2017 ; Atlantique Industrie, 2018a). Elle n'est pas destinée *a priori* à des boues minérales ou finement sableuses.

### *5.2.2. Prototype en laboratoire*

#### *5.2.2.1. Description du prototype en laboratoire*

Le prototype de la presse à boues KDS® utilisé en laboratoire est composé d'une table à barres oscillantes de 47 cm de longueur et 23 cm de largeur. Elle est équipée de six rangées de disques elliptiques et d'une plaque de pression de 29 cm de longueur et 23 cm de largeur. Chaque disque elliptique a une longueur de grand axe égale à 11 cm et une longueur de petit axe égale à 4,6 cm. La séparation entre les disques est de 0,1 cm ± 0,01 cm. Le prototype en laboratoire présente une hauteur totale de 1,5 mètre. Le réservoir de floculation a un volume de 12,9 litres.

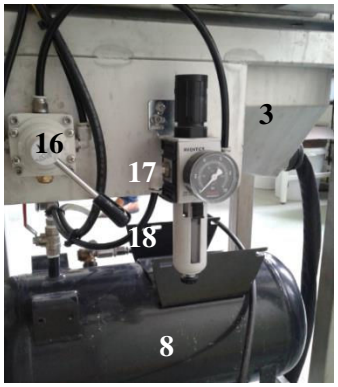
La force de compression est appliquée par un système hydraulique qui est régi de manière manuelle grâce à une pompe de mise en pression. Elle est réglée par un levier d'ouverture et de fermeture de la plaque de compression, voir figure 5-3.



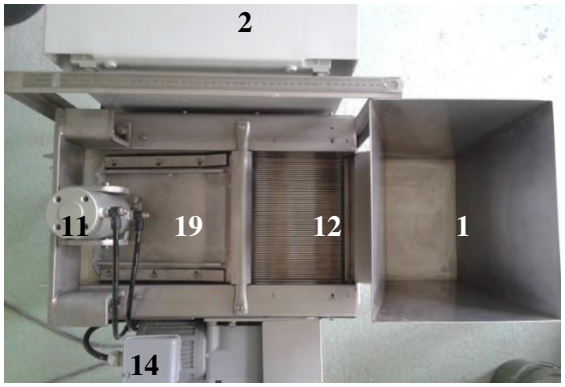

**Vue de face**

**Vue de droite**

**Vue de gauche**




**Vue arrière**




**Vue de dessus**

**Légende**

**1** : Réservoir de floculation
**2** : Coffret électrique
**3** : Collecteur d'eau
**4** : Potentiomètre de réglage de vitesse
**5** : Bouton « Marche/Arrêt »
**6** : Affichage de la fréquence appliquée au moteur
**7** : Interrupteur d'alimentation
**8** : Cuve
**9** : Sortie des boues épaissies
**10** : Pompe de mise en pression de la cuve
**11** : Vérin
**12** : Disques elliptiques rotatifs
**13** : Mesure de la pression dans la cuve
**14** : Moteur électrique
**15** : Sortie d'eau
**16** : Levier d'ouverture et de fermeture de la plaque de compression
**17** : Réglage de la pression appliquée à la plaque de compression
**18** : Affichage de la pression appliquée à la plaque de compression
**19** : Plaque de pression

*Figure 5-3. Présentation de la machine prototype d'essai.*

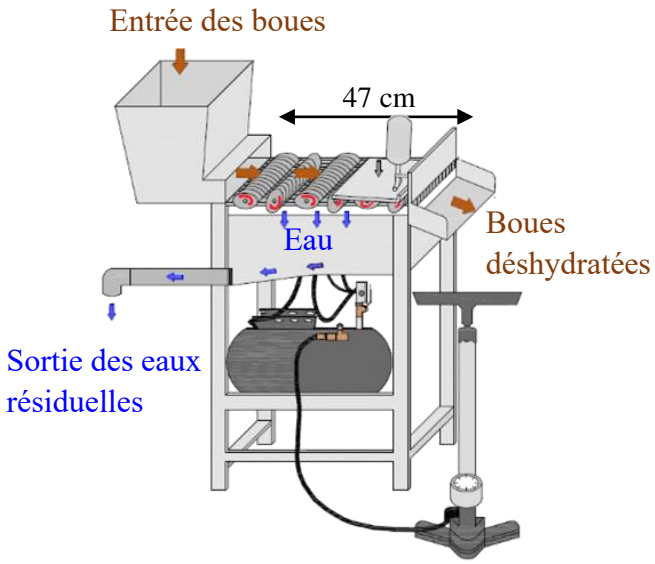
### *5.2.2.2. Principe de fonctionnement*

La presse à boues KDS® suit le même principe de fonctionnement que la presse à boues Volute®.

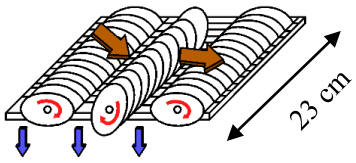
Le matériau à déshydrater est introduit dans le réservoir de floculation de la machine où des polymères floculants sont injectés. Ensuite, ce mélange est transporté par un ensemble de

disques elliptiques. Ces disques ont une double fonction : transporter le matériau à déshydrater et appliquer une force de cisaillement qui permet de réduire la teneur en eau, voir figures 5-4.a et 5-4.b.

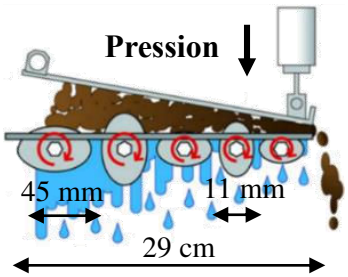
Une force de compression peut être appliquée à la fin du cycle de transport et d'égouttage, voir figure 5-4.c. Cette force de compression est appliquée à l'aide d'un vérin dont la pression est réglée à l'aide de l'air comprimé mis sous pression manuellement pour la machine prototype de laboratoire. Le matériau déshydraté sort après cette plaque de compression. Il peut être récupéré à l'aide d'un réservoir pour une future valorisation. En même temps, l'eau s'écoule par les espaces existants entre les disques et grâce aux phénomènes de filtration et de gravité. Elle est stockée dans le collecteur d'eau se trouvant sous la machine. Elle peut être réutilisée ultérieurement.




*a) Schéma de fonctionnement (BOULLOSA ALLARIZ et al., 2017 et 2018).*




*b) Force de cisaillement.*




*c) Force de compression, filtration par gravité, (BENENV & CO., 2018).*

*Figure 5-4. Principe de fonctionnement du prototype de la presse à boues KDS® testé en laboratoire.*

## *5.3. PARAMÈTRES ÉTUDIÉS*

Les paramètres intervenant dans le processus de déshydratation avec la presse à boues KDS® sont les paramètres de la machine et le floculant utilisé selon le type de matériau à déshydrater. Ces paramètres sont décrits dans les paragraphes suivants.

### *5.3.1. Paramètres de la machine*

Les paramètres-machine qui interviennent dans la presse à boues KDS® lors de la déshydratation sont : le débit d'entrée du matériau à déshydrater ($D_e$), la vitesse de rotation des disques elliptiques (V) et la pression exercée par le vérin sur la plaque d'appui (P).

#### *5.3.1.1. Débit d'entrée ($D_e$)*

Le débit peut être défini comme le volume d'un liquide qui traverse une section par unité de temps, voir équation 5.1.

$$D_e = \frac{V_e}{t} \left(\frac{m^3}{s}\right) \quad [5.1]$$

avec les notations suivantes :
$D_e$ : Débit d'entrée de la boue, en $m^3/s$ ;
$V_e$ : Volume de la boue, en $m^3$ ;
t : Temps nécessaire pour verser un volume de boues, en s.

Il peut être mesuré soit à l'aide d'une pompe péristaltique (appareil composé d'un tube flexible et d'un moteur qui transporte la boue en utilisant le processus du péristaltisme) ou soit en mesurant la section de sortie du réservoir de floculation et la vitesse de sortie de la boue, voir équation 5.2.

$$D_e = S_e \cdot V \left(\frac{m^3}{s}\right) \quad [5.2]$$

avec les notations suivantes :
$D_e$ : Débit d'entrée de la boue en $m^3/s$ ;
$S_e$ : Section de sortie du réservoir en $m^2$ ;
V : Vitesse de sortie en m/s.

Le débit d'entrée optimal correspond à l'obtention du plus faible pourcentage de matière en suspension (MES) en ce qui concerne la sortie de l'eau et la plus grande quantité de matériau déshydraté. Si le débit d'entrée est très élevé, le contact entre les disques et la boue sera très faible. Ceci induira des teneurs en eau finales supérieures à la valeur minimale possible.

#### *5.3.1.2. Vitesse de rotation des disques elliptiques (V)*

Le prototype de la presse à boues KDS® testé en laboratoire dispose d'une gamme de onze vitesses de rotation des disques elliptiques comprises entre 2,90 tr/min jusqu'à 7,04 tr/min.

Elles sont réglables à l'aide d'un potentiomètre qui affiche des fréquences de 20 Hz jusqu'à 50 Hz. La courbe d'étalonnage est donnée à la figure 5-5.

La vitesse optimale peut être définie comme étant la vitesse qui donne les meilleurs résultats, à savoir, des teneurs en eau finales ($w_f$) et matières en suspension faibles. Notons que si la vitesse de rotation des disques elliptiques est supérieure à la valeur optimale, le temps de déshydratation tend à diminuer, et de fait cela peut fournir des teneurs en eau finales supérieures à la valeur minimale possible.

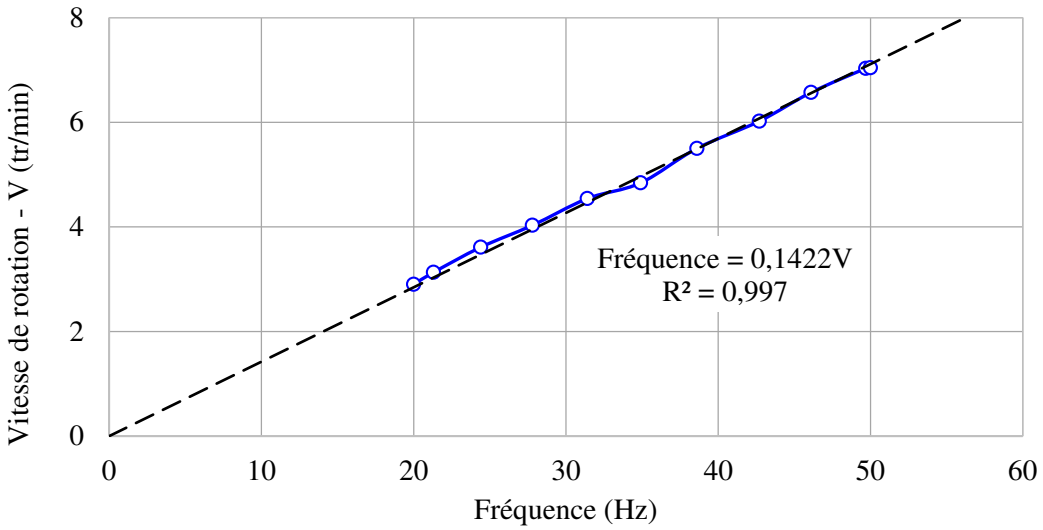



*Figure 5-5. Rapport entre la vitesse de rotation des disques et leur fréquence.*

### *5.3.1.3. Pression du vérin (P)*

Afin de réduire la teneur en eau finale du produit à déshydrater, la presse à boues KDS® permet d'appliquer une force à l'aide d'un vérin hydraulique sur une plaque d'appui à la fin de chaque cycle de déshydratation. Cette force de compression peut être réglée à l'aide d'un manomètre. Le prototype de presse à boues KDS® testé en laboratoire permet d'appliquer des pressions à l'aide du vérin jusqu'à 130 kPa (ou 1,3 bar).

La pression optimale est celle qui permettra d'obtenir les plus faibles teneurs en eau finales et les plus petites quantités de matière en suspension. *A priori*, deux situations peuvent être observées :

- Si la pression appliquée est supérieure à la valeur optimale : les particules les plus fines traverseront l'espace entre les disques et barres et la quantité de matière en suspension augmentera.

- Si la pression est inférieure à la valeur optimale, les teneurs en eau finales seront supérieures à la valeur minimale possible.

### *5.3.2. Floculants*

#### *5.3.2.1. Processus de floculation*

La floculation peut être définie comme le processus physico-chimique dans lequel les particules plus fines sont rassemblées pour former des amas floconneux. L'objectif de la floculation est d'épaissir le matériau rapidement. Ce processus permet d'optimiser les performances des traitements de déshydratation mécanique (COLIN, 2003).

#### *5.3.2.2. Floculants polymères*

Les floculants polymères peuvent être définis comme des polymères organiques qui permettent d'agglomérer de fines particules en agrégats. Les polymères sont des macromolécules artificielles composées par la répétition de molécules de petite taille dénommées « monomères ». Le matériau floculé présente une masse moléculaire plus importante appelée « flocs » (SNF FLOERGER, 2011).

#### *5.3.2.3. Classification des polymères*

Les floculants sont classifiés en fonction de la nature de leurs charges. Trois groupes de floculants peuvent être différenciés : les floculants « non-ioniques » qui ne sont pas chargés, les floculants « cationiques » chargés positivement et les floculants « anioniques » qui sont dotés de charges négatives. Différents pourcentages de charges ioniques peuvent être apportés, ils varient de 0 à 100%. La charge peut être distribuée sur la chaîne principale ou la chaîne secondaire, voir tableau 5-2 (COLIN, 2003).

*Tableau 5-2. Caractéristiques des floculants (COLIN, 2003).*

| **Nature des charges** | **Poids moléculaire** | **Distribution moléculaire** | **Densité de charge (nombre de sites chargés)** | **Distribution de charge** |
|---|---|---|---|---|
| Non-ionique<br>Cationique<br>Anionique | Faible : 1 à 3 millions<br>Moyen : 3 à 6 millions<br>Standard : 6 à 10 millions<br>Haut : 10 à 15 millions<br>Très haut : > 15 millions | Faible<br>Forte | Faible : 1 à 10%<br>Moyenne : 10 à 40%<br>Haute : 40 à 80%<br>Très haute : 80 à 100% | Sur la chaîne principale<br>Sur la chaîne secondaire |

En outre, l'étude réalisée par MAROT (1997) sur la séparation des phases solide-liquide d'un sédiment du canal de la Haute Deûle (Hauts-de-France) permet de différencier des floculants polymères en fonction de leur charge. Les résultats ont montré que :

- Les floculants anioniques forment des flocs de grande taille pour des concentrations en réactifs relativement faibles (0,2 kg/tonne de matières sèches). La décantation des flocs est très rapide. Le surnageant reste trouble.

- Les floculants cationiques forment des flocs de petite taille. Le surnageant est parfaitement clair.

- Les floculants non-ioniques donnent des résultats intermédiaires entre les deux floculants précédents. Les flocs sont de taille moyenne et le surnageant reste trouble.

#### *5.3.2.4. Formes commerciales des floculants*

Les floculants peuvent être fournis soit sous une forme liquide (émulsion ou solution aqueuse) ou soit sous une forme solide (poudre ou granulé). Ils sont ajoutés aux matériaux à déshydrater sous une forme de dissolution dans la phase préliminaire de déshydratation.

#### *5.3.2.5. Processus de sélection des floculants*

Un large éventail de types de floculants polymères est disponible. Cela permet de choisir le floculant le plus adéquat en fonction des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du matériau à déshydrater. La procédure de sélection des floculants est composée de trois étapes. Elle est décrite dans les paragraphes suivants et schématisée à la figure 5-6.

Après une caractérisation initiale du matériau à déshydrater, il peut être classé selon trois groupes : minéral, organique et organique-minéral. Cette première étape conduit à déterminer la nature de la charge du floculant la plus appropriée : anionique, cationique et non-ionique respectivement.

Ensuite, la deuxième étape de ce processus concerne la détermination de la densité de charge. Cette étape est réalisée à l'aide de l'essai du jar test. La densité de charge varie de 1% jusqu'à 100% et elle sera de 0% dans le cas de floculants non-ioniques.

Finalement, par rapport à la méthode de déshydratation utilisée, le poids moléculaire sera sélectionné. En règle générale, le floculant avec un très haut poids moléculaire forme les plus grands flocs, mais cela dépend des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du matériau à déshydrater.

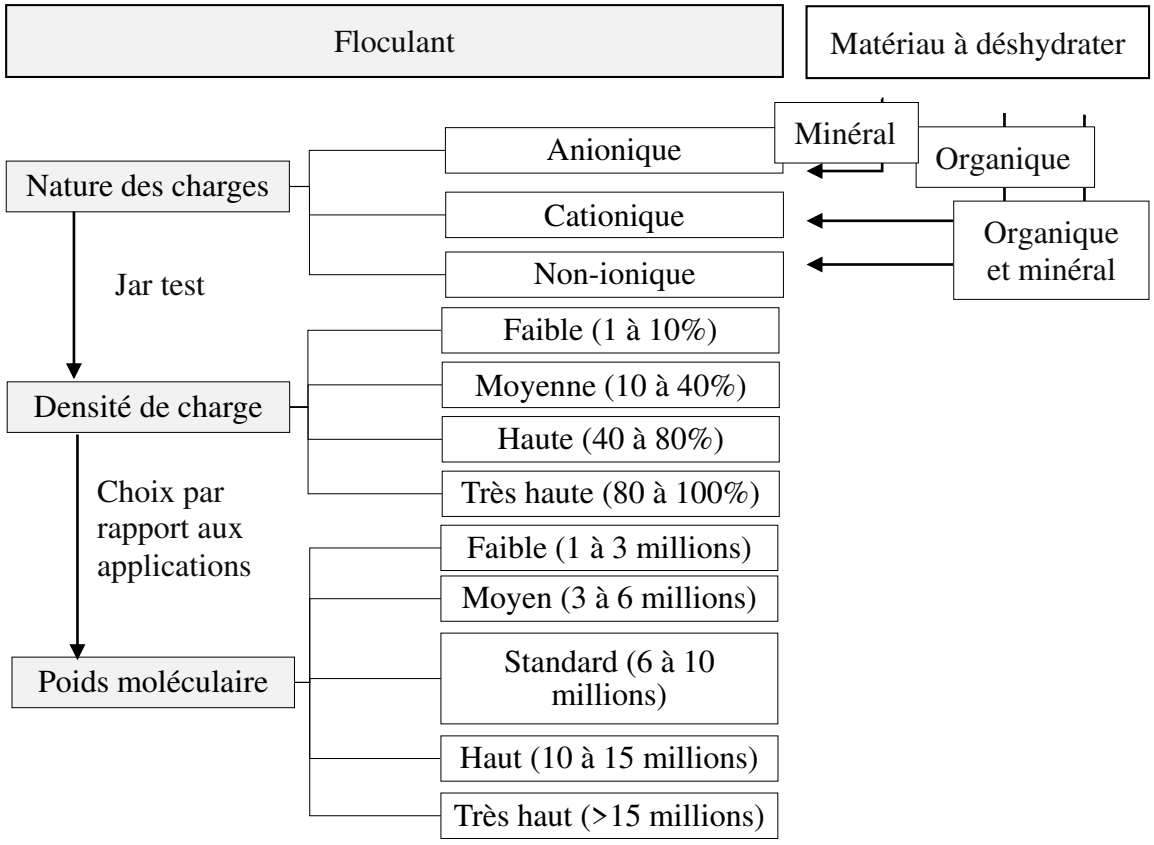



*Figure 5-6. Méthode de sélection des floculants par rapport au matériau à déshydrater.*

### *5.3.2.6. Jar test*

L'essai du jar test est un essai mené en laboratoire, composé d'un appareillage avec une série de béchers alignés ; l'agitation à l'intérieur des béchers se fait à la même vitesse. Cet essai permet de déterminer *(i)* le type de floculant, *(ii)* le dosage, *(iii)* la vitesse et *(iv)* le temps d'agitation qui forme les flocs les plus adéquats en fonction de la méthode de déshydratation utilisée. La procédure du jar test consiste à remplir les béchers avec divers types de floculants afin d'envisager une gamme variée de floculants.

### *5.3.2.7. Dosage optimal du floculant*

Lors de la préparation du floculant, une concentration est choisie. La dose optimale du floculant est déterminée grâce à l'injection à la seringue. L'injection est réalisée à petites doses successives dans des petits seaux de 500 ml. Lorsque le floculant est injecté, le mélange est agité avec une vitesse d'agitation d'environ 40 tr/min ± 10 tr/min jusqu'à la formation de flocs.

## *5.4. PLAN EXPÉRIMENTAL*

Un plan expérimental est proposé avec l'objectif d'analyser les paramètres influant sur le comportement de cette machine et de développer une méthode de travail pour la déshydratation de sédiments avec la machine KDS®.

### *5.4.1. Description générale*

Ce plan expérimental est composé de trois étapes, voir figure 5-7. Il débute avec une première étape appelée « préparation du matériau » où le matériau à déshydrater est mélangé avec une teneur en eau connue. Ce mélange est introduit dans le réservoir de la presse à boues KDS® où un type de floculant est injecté avec un dosage et une concentration donnés.

Ensuite, ce mélange est transporté par l'ensemble des disques elliptiques avec une vitesse choisie. Du point de vue mécanique, trois phénomènes éventuels peuvent survenir durant cette étape appelée « déshydratation mécanisée avec la machine KDS® » :

- Accumulation des sédiments au-dessus des disques : les sédiments ayant un diamètre supérieur aux écarts entre les disques et barres oscillantes restent sur la table (disques et barres), sont transportés et vont vers la plaque d'appui (sortie des sédiments). Ces sédiments sont récupérés à la fin de chaque cycle de déshydratation.

- Blocage des disques éventuellement par des sédiments « sableux ». Cette situation risque d'empêcher le mouvement des disques en provoquant leur blocage. Elle peut endommager la machine.

- Passage des sédiments à travers les disques : le diamètre des sédiments se trouve être inférieur au jeu disponible entre les disques et barres. Dans ce cas, les sédiments passent à travers ces espaces existants entre les disques et barres. Ils sont directement évacués vers le réservoir d'eau issue de la déshydratation et récupérés dans les matières en suspension. Pour cette éventualité, la presse à boues KDS® est aménagée pour traiter des boues, donc cette situation est moins probable que les deux précédentes.

Finalement, une « analyse et interprétation des résultats » sont réalisés : d'une part, le matériau déshydraté est récupéré dans un bidon où un échantillon est extrait afin de mesurer sa teneur en eau de sortie et de l'autre côté, la quantité d'eau est récupérée dans un bidon à l'aide d'un tuyau et la matière en suspension est mesurée. Du fait que le matériau déshydraté contient du floculant, des essais de résistance à la compression simple sont réalisés afin d'analyser l'influence de ce produit chimique.

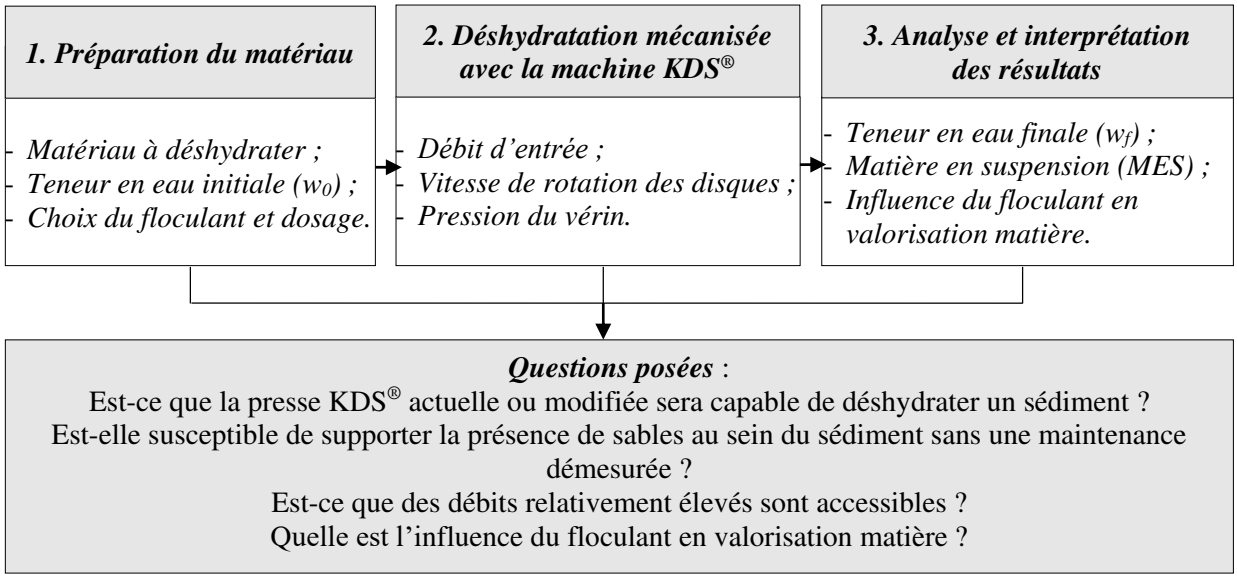



*Figure 5-7. Présentation schématique du plan expérimental.*

### *5.4.2. Paramètres intervenants et réalisation des essais*

Les paramètres étudiés dans les trois étapes du plan expérimental sont décrits dans les paragraphes suivants.

#### *5.4.2.1. Étape 1. Préparation du matériau*

Les matériaux à déshydrater et leurs floculants constituent les éléments prépondérants dans l'étape 1. Les paramètres que l'on pourrait qualifier d'initiaux (avant déshydratation) sont pour le matériau, les propriétés physico-chimiques essentielles dans la déshydratation (minéralogie, granulométrie, nature, matières organiques ou autres) et pour le floculant, sa capacité à floculer ledit matériau et le dosage. Pour ce dernier le coût sera à considérer dans l'analyse finale.

***Matériau à déshydrater***

Les essais de déshydratation avec la presse à boues KDS® ont été réalisés avec *(i)* de la kaolinite, *(i)* un mélange composé de sable de Fontainebleau et de kaolinite et *(iii)* des sédiments de barrage. Pour une question de disponibilité du matériau en quantité suffisante, les sédiments sélectionnés pour la réalisation des essais sont : AL-CLA, AL-FLU, AL-SPO et BR-SAI. Leurs caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques sont décrites dans le chapitre 3 « Caractérisation des sédiments et matériaux ».

La première série d'essais de déshydratation est effectuée en utilisant de la kaolinite. Cette argile pure est le matériau choisi pour étudier l'influence des paramètres de la presse à boues KDS®. Lorsque ces paramètres sont cernés, une succession d'essais de déshydratation est proposée avec ce kaolin avec un pourcentage de sable ajouté. Ces pourcentages sont : 5%, 25% et 50%. Cette deuxième série d'essais a pour objectif la détermination de l'influence du sable

dans cette presse à boues. Une fois établi le comportement de la presse avec la présence de sables, une série d'essais a été envisagée avec les sédiments de barrage.

***Teneur en eau initiale des sédiments ($w_0$)***

La teneur en eau initiale du kaolin a été prise égale à cinq fois sa limite de liquidité, ($w_0$=5$w_L$=275%). Cette quantité a été choisie car elle se rapproche de la teneur en eau des sédiments à l'entrée du décanteur dynamique Nemeau® du programme COVASED.

Les sédiments sont déshydratés avec des teneurs en eau initiales élevées, $w_0$=400% considérés comme des « boues lourdes ou chargées » et 800%, comme des « boues légères ou diluées ». Remarquons que ces teneurs en eau représentent des sédiments à haute et très haute teneur en eau.

***Choix du floculant***

Le choix du floculant est le résultat d'un essai de floculation ou « Jar test ». Cet essai permet de cibler le floculant le plus adéquat pour la déshydratation de chaque matériau. Il est décrit dans le paragraphe 5.3.2.6. « Jar test » de ce chapitre.

Le choix du floculant a été effectué avec la collaboration de la société SNF FLOERGER, entreprise française, leader mondial des polyacrylamides. Cette entreprise comprend des filiales dans plus de 30 pays et exploite 23 sites de production en Europe, en Asie, en Australie et en Amérique (SNF FLOERGER, 2018).

### *5.4.2.2. Étape 2. Déshydratation mécanisée avec KDS®*

***Débit d'entrée ($D_e$)***

Les essais de déshydratation mécanisée effectués avec la presse à boues KDS® sont réalisés en faisant varier la section de sortie du réservoir de floculation. Plusieurs hauteurs de sortie sont testées avec une vitesse de sortie de la boue constante égale à 0,6 l/s ±0,1 l/s.

L'objectif lié à la variation de ce paramètre est, d'une part, d'étudier le rôle du débit d'entrée en ce qui concerne la déshydratation mécanisée par la presse à boues KDS® et d'autre part, de trouver le débit optimal pour chaque type de sédiment à déshydrater.

***Vitesse de rotation des disques elliptiques (V)***

Un essai de déshydratation mécanisée a été réalisé en faisant varier la vitesse de rotation des disques elliptiques afin de déterminer la vitesse de rotation optimale. Les vitesses sélectionnées pour la réalisation des essais de déshydratation mécanique sont : 2,90 tr/min, 4,84 tr/min et 7,04 tr/min.

***Pression du vérin (P)***

La pression appliquée pendant les essais de déshydratation mécanique est comprise entre 0 et 130 kPa (0 – 1,3 bar). Sachant que la valeur de 130 kPa est la pression maximale qui peut être appliquée avec ce prototype de presse, les pressions choisies sont : 0 kPa, 70 kPa et 130 kPa.

Les résultats attendus de ces essais de déshydratation montreront l'influence de la pression du vérin pendant la déshydratation mécanique des produits à déshydrater avec la presse à boues KDS®, tout en permettant de trouver une pression optimale.

#### *5.4.2.3. Étape 3. Analyse et interprétation des résultats*

***Teneur en eau finale ($w_f$)***

Une mesure de la teneur en eau finale des matériaux à déshydrater ($w_f$) est faite à la fin de chaque cycle de déshydratation. Ce résultat permet d'optimiser les paramètres de cette machine pour obtenir les teneurs en eau finales les plus faibles. La mesure de teneur en eau est réalisée en suivant la norme française NF P 94-050.

***Matière en suspension (MES)***

La Matière En Suspension (MES) est aussi mesurée à la fin de chaque cycle de déshydratation en suivant la norme française NF EN 872. Les résultats escomptés sont ceux qui donnent la matière en suspension la plus faible dans les eaux résiduaires.

***Influence du floculant en valorisation matière***

L'objectif de toute déshydratation de sédiments est de pouvoir valoriser les sédiments dans plusieurs domaines du génie civil. Une fois le sédiment mélangé avec un floculant, les caractéristiques physico-chimiques de celui-ci sont modifiées. Il est apparu nécessaire d'étudier le comportement mécanique du matériau avec une partie du floculant inclus ou restant dans la matrice sédimentaire pour une valorisation donnée. La valorisation retenue est une variation en matériau routier de formulation prédéfinie (ANGER, 2014). Des essais de résistance à la compression simple ($R_c$) sont réalisés en suivant la norme NF EN 13286-41. Ils ont été réalisés pour des temps de cure de 7, 14 et 28 jours.

## *5.5. RÉSULTATS DES ESSAIS*

Cette section concerne la compilation des résultats obtenus pendant les essais de floculation et de déshydratation. Elle est divisée en trois parties. La première partie traite des essais réalisés avec les matériaux argileux. La deuxième partie est dédiée aux essais effectués avec des mélanges composés de kaolin et de sable. Puis la troisième partie est consacrée aux sédiments de barrage.

### *5.5.1. Essais sur le matériau argileux*

Le matériau argileux étudié est une kaolinite, avec une teneur en eau initiale de 275%. Ce mélange est noté « KAO 0% S ».

#### *5.5.1.1. Essai de floculation*

L'essai de floculation au « Jar test » sur la kaolinite a été réalisé au sein du laboratoire M2C à Caen et avec la collaboration de la société SNF FLOERGER.

***Choix du floculant***

Trois types de floculants polymères ANioniques (AN) en poudre ont été testés : FLOPAM AN 934, FLOPAM AN 923 SH et FLOPAM AN 923. D'une manière générale, leurs caractéristiques principales sont mentionnées ci-après :

- Le floculant « FLOPAM AN 934 » correspond à un polymère floculant anionique en poudre, avec une densité de charge moyenne égale à 30% et un poids moléculaire standard.

- Le floculant « FLOPAM AN 923 SH » est un polymère anionique en poudre de densité de charge moyenne équivalent à 20% et un très haut poids moléculaire, (SH = Super High).

- Le floculant « FLOPAM AN 923 » est un polymère anionique en poudre, avec une densité de charge moyenne égale à 20% et un poids moléculaire standard.

La densité apparente pour tous ces floculants est approximativement de 0,80. Leur concentration d'utilisation recommandée est de 3 g/l et celle maximale est de 5 g/l (SNF FLOERGER, 2012). Leurs caractéristiques sont rassemblées dans le tableau 5-3.

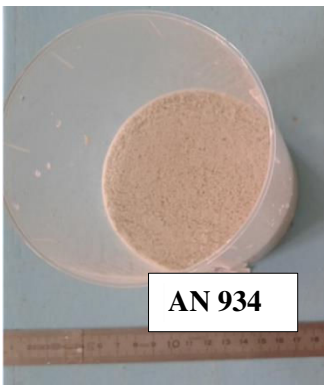
*Tableau 5-3. Caractéristiques des floculants testés avec la kaolinite (SNF FLOERGER, 2012).*

| | | AN 923 | AN 923 SH | AN 923 VHM | AN 934 |
|---|---|---|---|---|---|
| Forme | | Poudre | Poudre | Poudre | Poudre |
| Couleur | | Blanc | Blanc | Blanc | Blanc |
| Caractère ionique | | Anionique | Anionique | Anionique | Anionique |
| Poids moléculaire | | Standard | Très haut | Ultra haut | Standard |
| Granulométrie | % > 10 grille | 2 maxi | 2 maxi | 2 maxi | 2 maxi |
| | % < 100 grille | 6 maxi | 6 maxi | 6 maxi | 6 maxi |
| Densité apparente approximative | | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |
| Viscosité Brookfield approximative (cps)[1] | À 5,0 g/l | 1300 | 1600 | 1700 | 1650 |
| | À 2,5 g/l | 500 | 600 | 650 | 630 |
| | À 1,0 g/l | 180 | 200 | 200 | 250 |
| Concentration d'utilisation conseillée (g/l) | | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Concentration d'utilisation maxi (g/l) | | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Temps de dissolution dans l'eau distillée à 5 g/l à 25°C (minutes) | | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Température de stockage (°C) | | 0 - 35 | 0 - 35 | 0 - 35 | 0-35 |
| Stabilité[2] (en mois) | | 24 | 24 | 24 | 24 |

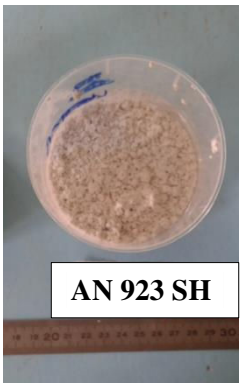
***Note*** *[1] : 1 centipoise (ou cps) est une unité de viscosité dynamique égale à 1 mPa/s ;*

*[2] : Si le produit est stocké à l'intérieur d'un bâtiment à une température stable située entre 5°C et 30°C.*

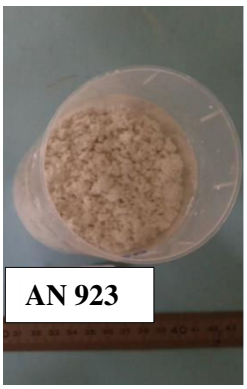
Les résultats de la floculation montrent que le floculant « FLOPAM AN 934 » forme des petits flocs et le surnageant est classé comme « très trouble », voir figure 5-8.a. Le floculant référencé « FLOPAM AN 923 SH » forme des flocs moyens et le surnageant avec ce polymère est « trouble », voir figure 5-8.b. En revanche, le « FLOPAM AN 923 » permet d'obtenir les plus gros flocs avec un surnageant clair, voir figure 5-8.c. Pour cette raison, le polymère choisi est « FLOPAM AN 923 ».




a) Surnageant : très trouble
Flocs : petits




b) Surnageant : trouble
Flocs : moyens




c) Surnageant : clair
Flocs : grossiers

*Figure 5-8. Résultats de l'essai de floculation avec la kaolinite.*

***Choix de la concentration du polymère***

Les floculants AN 934, AN 923 SH et AN 923 ont été préparés à une dissolution de 10 g/l. Cette concentration a été choisie en raison d'un dosage de floculant très élevé avec les concentrations d'utilisation conseillées (plus de 200 ml pour chaque litre de mélange). La préparation du floculant a été effectuée à l'aide d'un agitateur mécanique. La durée d'agitation a été d'une heure.

***Calcul du dosage optimal***

Les résultats indiquent que le dosage optimal du floculant FLOPAM AN 923, préparé à une concentration de 10 g/l est de 42,5 ml pour chaque litre de mélange de kaolin préparé avec une teneur en eau de $5w_L$ ou 275%.

***5.5.1.2. Essai de déshydratation***

Une série d'essais de déshydratation a été réalisée avec le mélange composé de kaolinite afin d'évaluer l'influence de la vitesse de rotation des disques elliptiques de la presse à boues KDS® (V) et la pression exercée par le vérin sur la plaque d'appui (P) sur les matériaux argileux.

En raison de problèmes techniques, comme la rupture de flocs pendant le pompage de la pompe péristaltique, le débit d'entrée du matériau à déshydrater ($D_e$) n'a pas pu être mesuré. Cependant, la section de la sortie du réservoir de floculation a été constante et égale à 110,5 $cm^2$ pour tous les essais et le volume de mélange à déshydrater a été de deux litres.

Les essais de déshydratation sur la kaolinite ont été réalisés avec la collaboration de MÜLLER (MÜLLER et al., 2018.a).

***Teneur en eau finale ($w_f$)***

Les essais de déshydratation effectués avec le mélange de kaolinite ont été réalisés avec une teneur en eau initiale de 275%. L'ensemble des résultats relatifs aux teneurs en eau finales et aux formes des flocs sont récapitulés sur les figures allant de 5-9 à 5-12.

L'évolution de la teneur en eau finale de la kaolinite obtenue en modifiant les vitesses de la presse à boues KDS® est montrée sur la figure 5-9. Les teneurs en eau reportées sur cette figure correspondent aux valeurs moyennes des mesures de la teneur en eau finale obtenues sans application de la force de compression. Ces valeurs oscillent entre 191% et 192 % en utilisant des vitesses de rotation des disques de 7,04 tr/min et 2,90 tr/min respectivement (vitesses maximale et minimale) et 215% et 218% en appliquant des vitesses de rotation de 6,02 tr/min et 4,03 tr/min, voir figure 5-9.

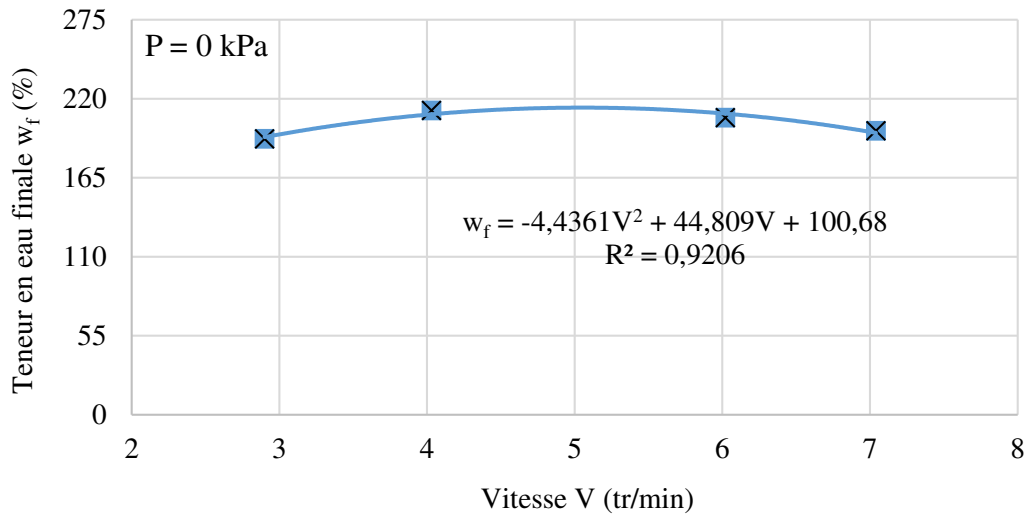
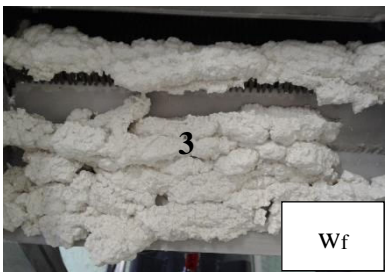



*Figure 5-9. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la vitesse de rotation des disques V pour la kaolinite.*

L'aspect visuel de la kaolinite déshydratée sans l'application d'une force de compression peut être observé sur la figure 5-10. La kaolinite déshydratée se présente sous forme de « rouleaux » plastiques. Ces rouleaux retiennent encore de l'eau, sa teneur en eau diminuera s'ils sont pressés.

*a) Mélange KAO 0% S + AN 923*

*b) Déshydratation mécanisée avec KDS® sans pression*




*c) Produit partiellement déshydraté*

**Légende**

**1** : Flocs visqueux
**2** : Flocs très fins
**3** : Rouleau plastique

*Figure 5-10. Déshydratation mécanisée de la kaolinite sans pression : aspect visuel du produit déshydraté.*

Les teneurs en eau finales obtenues après le passage du mélange du kaolin par la presse à boues KDS® en utilisant une vitesse constante de 2,9 tr/min et en faisant varier la pression exercée par le vérin sont données sur la figure 5-11. Ce prototype de presse permet d'obtenir des teneurs en eau finales de 142% si on applique une pression intermédiaire de 70 kPa et de 143% en appliquant une pression maximale de 130 kPa.

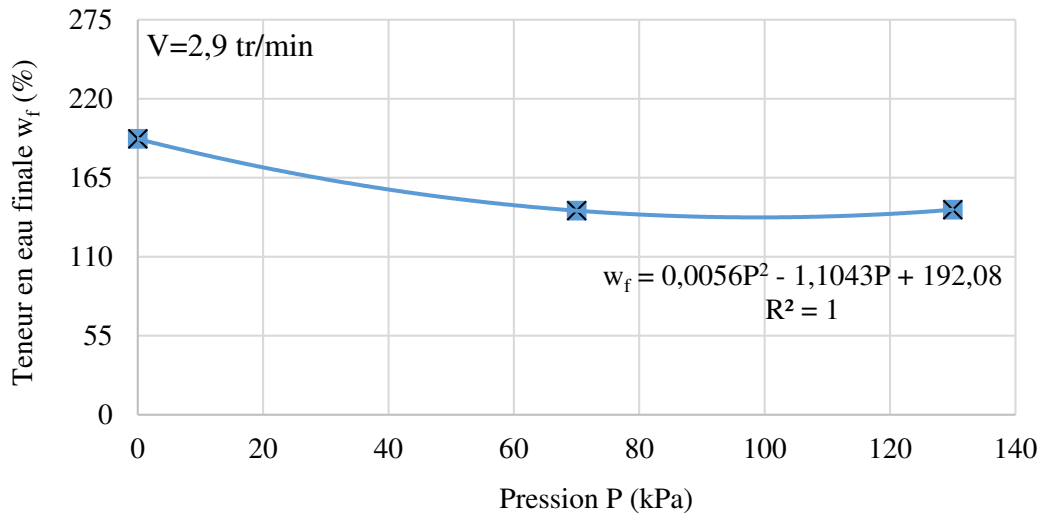



*Figure 5-11. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la pression appliquée P pour la kaolinite.*

La kaolinite déshydratée sous l'application d'une force de compression se présente sous la forme de « morceaux » rectangulaires de texture épaisse, comme montré à la figure 5-12. À la différence des rouleaux plastiques, l'eau contenue entre les flocs a été diminuée en appliquant une force de compression.

*a) Mélange KAO 0% S + AN 923*

*b) Déshydratation mécanisée avec KDS® avec P>0 kPa*

*c) Produit déshydraté*

**Légende**

**1** : Flocs visqueux
**2** : Flocs très fins
**3** : Rouleau plastique
**4** : Morceaux de produit déshydraté

*Figure 5-12. Déshydratation mécanisée de la kaolinite sous pression : aspect visuel du produit déshydraté.*

***Matière en suspension (MES)***

La concentration de la matière en suspension du mélange de kaolinite selon les différentes vitesses de la presse à boues KDS® et pressions appliquées, est présentée sur les figures allant de 5-13 à 5-16.

La figure 5-13 montre l'évolution de la concentration de la matière en suspension par rapport à la vitesse de rotation des disques, sans application de la pression. Cette évolution débute avec une importante valeur en MES, autour de 4,4 g/l, pour la vitesse la plus réduite de 2,9 tr/min. Elle diminue progressivement jusqu'à obtenir une valeur de MES égale à 1,5 g/l

pour une vitesse de 4,84 tr/min. À partir de cette vitesse, la matière en suspension augmente de nouveau jusqu'à 4,5 g/l pour la plus élevée des vitesses possibles (7,04 tr/min).

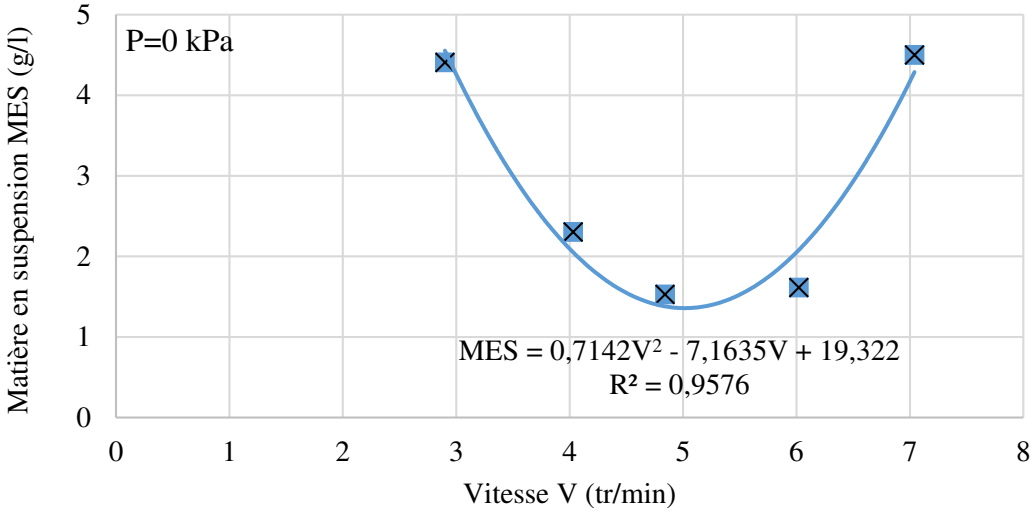
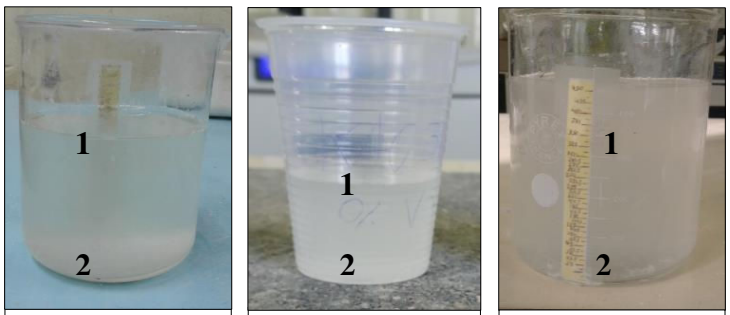



*Figure 5-13. Évolution de la concentration en MES selon la vitesse de rotation des disques V pour la kaolinite.*

Après déshydratation de la kaolinite avec la presse à boues KDS® les eaux résiduaires obtenues présentent une couleur translucide et blanche. Les flocs agglomérés fins et les particules de kaolinite non floculés sont récupérés dans la MES, voir figure 5-14.




| KAO 0% S<br>V= 2,90 tr/min<br>P=0 kPa | KAO 0% S<br>V= 4,03 tr/min<br>P=0 kPa | KAO 0% S<br>V= 7,04 tr/min<br>P=0 kPa |
|---|---|---|

**Légende**
**1** : Surnageant trouble
**2** : Flocs agglomérés fins

*Figure 5-14. Aspect visuel de la concentration de la MES pour la kaolinite.*

L'évolution de la concentration de la matière en suspension suivant la pression appliquée et avec une vitesse de rotation des disques égale à 2,9 tr/min, est présentée sur la figure 5-15. Cette évolution commence avec une valeur en MES de 4,4 g/l, sans l'application de pression. Puis elle augmente progressivement jusqu'à avoir une valeur maximale en MES de 5,6 g/l pour une pression de 70 kPa. Elle tend à diminuer par la suite jusqu'à une valeur de 2,56 g/l pour une pression maximale de 130 kPa. Cette baisse considérée comme anormale de la MES sous une pression de 130 kPa peut être due à une meilleure floculation : formation des flocs plus gros pendant l'agitation du mélange.

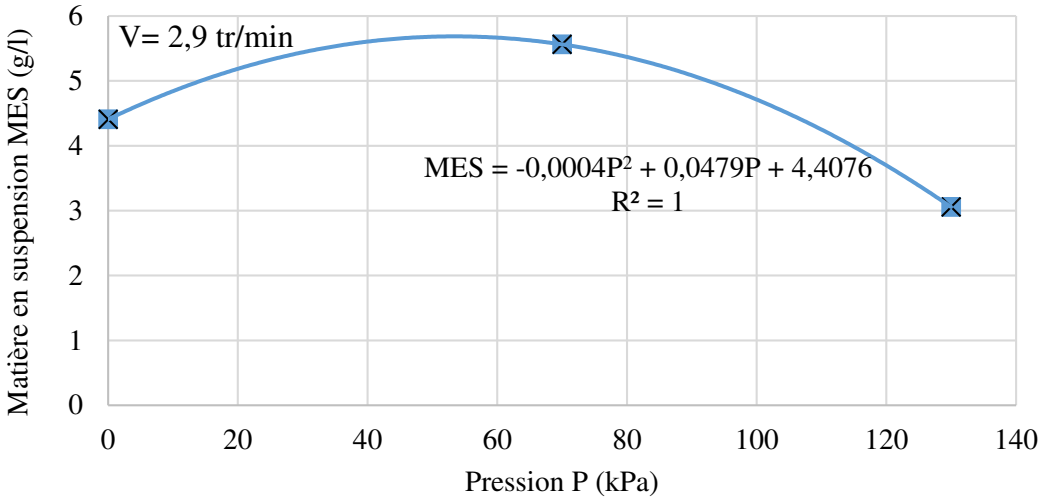
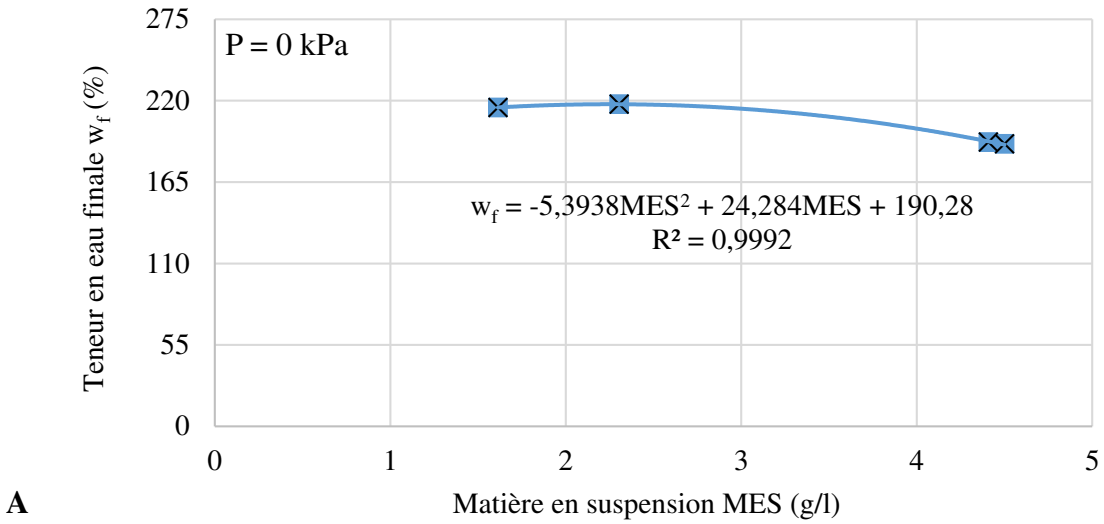


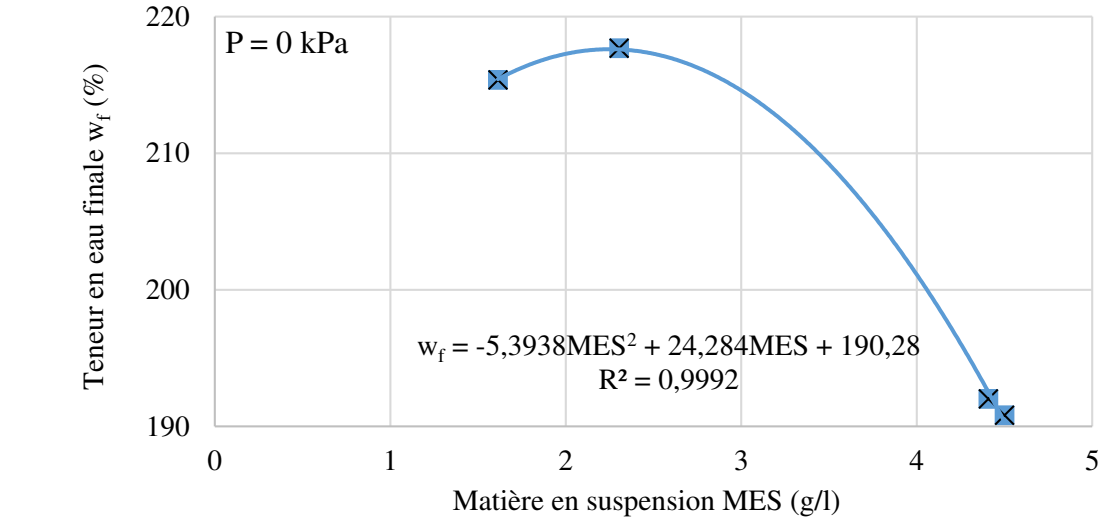

*Figure 5-15. Évolution de la concentration en MES selon la pression appliquée P pour la kaolinite.*

***Teneur en eau finale ($w_f$) selon la matière en suspension (MES)***

L'évolution de la teneur en eau finale de la kaolinite en fonction de la matière en suspension est montrée sur la figure 5-16. Cette évolution commence avec de faibles valeurs en MES, autour de 1,5 g/l jusqu'à 1,6 g/l, pour des teneurs en eau élevées comprises entre 215 % et 218 % respectivement. Les concentrations les plus élevées de la matière en suspension allant de 4,4 g/l à 4,5g/l, sont obtenues avec des teneurs en eau plus faibles, de valeurs égales à 191% et 192%.




**A**




**B**

*Figure 5-16. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la matière en suspension pour la kaolinite, (figure A) et zoom sur le graphique (figure B).*

### *5.5.2. Essais sur les matériaux argileux et sableux*

La deuxième série d'essais a été effectuée en utilisant des mélanges confectionnés à base de kaolinite et de sable de Fontainebleau. Ces mélanges ont été composés de 5%, 25% et 50% de sable. Ils sont notés : « KAO 5% S », « KAO 25% S », « KAO 50% S » respectivement. La teneur en eau choisie pour les trois mélanges est toujours de 275%.

#### *5.5.2.1. Essai de floculation*

##### *Choix du floculant*

L'essai de floculation au « Jar test » sur les mélanges confectionnés à base de kaolinite et de sable de Fontainebleau a été réalisé au sein du laboratoire SNF FLOERGER. Il a pour objet

la détermination du floculant le plus adéquat en évaluant la qualité du surnageant et de la floculation.

Une série de floculants anioniques avec différents poids moléculaires et différentes densités de charge ont été testés. Pour pouvoir estimer l'effet du floculant pendant le passage dans la presse à boues KDS®, une simulation de passage du matériau floculé dans un tamis de 140 µm a été évalué.

Les résultats de cet essai montrent que les floculants les plus aptes sont les floculants anioniques en poudre, avec un poids moléculaire « ultra haut » (classification de poids moléculaires selon l'entreprise SNF FLOERGER) et des densités de charge comprises entre 5% et 20%. Leurs caractéristiques sont rassemblées dans le tableau 5-4.

*Tableau 5-4. Caractéristiques des floculants testés avec les matériaux argileux et sableux (SNF FLOERGER, 2012).*

| | | **AN 905 VHM** | **AN 910 VHM** | **AN 923 VHM** |
|---|---|---|---|---|
| Forme | | Poudre | Poudre | Poudre |
| Couleur | | Blanc | Blanc | Blanc |
| Caractère ionique | | Anionique | Anionique | Anionique |
| Poids moléculaire | | Ultra haut | Ultra haut | Ultra haut |
| Densité de charge | | Très faible | Très faible | Moyenne |
| Granulométrie | % > 10 grille | 2 maxi | 2 maxi | 2 maxi |
| | % < 100 grille | 6 maxi | 6 maxi | 6 maxi |
| Densité apparente approximative | | 0,80 | 0,80 | 0,80 |
| Viscosité Brookfield approximative (cps)[1] | À 5,0 g/l | 1000 | 1200 | 1700 |
| | À 2,5 g/l | 400 | 550 | 650 |
| | À 1,0 g/l | 100 | 170 | 200 |
| Concentration d'utilisation conseillée (g/l) | | 5 | 5 | 3 |
| Concentration d'utilisation maxi (g/l) | | 10 | 10 | 5 |
| Temps de dissolution dans l'eau distillée à 5 g/l à 25°C (minutes) | | 150 | 60 | 60 |
| Température de stockage (°C) | | 0 - 35 | 0 - 35 | 0 - 35 |
| Stabilité[2] (en mois) | | 24 | 24 | 24 |

***Note*** *[1] : 1 centipoise (ou cps) est une unité de viscosité dynamique égale à 1 mPa/s ;*

*[2] : Si le produit est stocké à l'intérieur d'un bâtiment à une température stable située entre 5°C et 30°C.*

Les résultats de l'essai de floculation montrent que le floculant référencé « FLOPAM AN 910 VHM » permet d'obtenir les plus gros flocs avec un surnageant clair pour les mélanges confectionnés avec 25% et 50% de sable. Le floculant « FLOPAM AN 923 VHM » forme de grands flocs et avec un surnageant plus clair pour le mélange argileux composé de 5% de sable.

En raison de la disponibilité du floculant « FLOPAM AN 923 VHM », et de petites différences observées dans les résultats de floculation, le floculant « FLOPAM AN 923 VHM » a été choisi pour les trois mélanges.

***Choix de la concentration du polymère***

Le floculant AN 923 VHM a été préparé à une dissolution de 4 g/l. La concentration du polymère a été choisie en suivant trois critères : *(i)* consistance du floculant pas très visqueuse, *(ii)* concentration en dessous des limites d'utilisation maximale, *(iii)* dosage de floculant pas très élevé. La préparation du floculant a été effectuée à l'aide d'un agitateur mécanique. La durée d'agitation a été d'une heure.

***Calcul du dosage optimal***

Les dosages optimaux pour les mélanges élaborés à base de kaolinite et de sable de Fontainebleau sont donnés au tableau 5-5. Ils varient de 32 ml jusqu'à 100 ml pour chaque litre de mélange.

*Tableau 5-5. Récapitulatif des dosages optimaux pour les matériaux argileux et sableux.*

| **Mélange** | **Floculant choisi** | **Dosage de floculant** (pour chaque litre de mélange) **(ml)** |
|---|---|---|
| KAO 5% S | AN 923 VHM | 100 |
| KAO 25% S | AN 923 VHM | 50 |
| KAO 50% S | AN 923 VHM | 32 |

***5.5.2.2. Essai de déshydratation***

Les essais de déshydratation mécanique sur les matériaux argileux ont été effectués en faisant varier la vitesse de rotation des disques elliptiques (V) et la pression (P) de la presse à boues KDS®. Ces essais ont été réalisés sans mesurer le débit d'entrée du matériau à déshydrater ($D_e$). Le volume du mélange à déshydrater, dans chaque essai, a été de deux litres. La section de la sortie du réservoir de floculation était de 110,5 $cm^2$. Ces essais de déshydratation ont été réalisés avec la collaboration de MÜLLER (MÜLLER et al., 2018.a).

***Teneur en eau finale ($w_f$)***

Les essais de déshydratation ont été réalisés sur des matériaux argileux et sableux de teneur en eau égale à 275%. Les résultats relatifs à ces essais sont consignés dans les figures 5-17 et 5-18.

L'évolution de la teneur en eau finale moyenne des matériaux argilo-sableux selon les vitesses de la presse à boues KDS® et sans l'application d'une force de compression est illustrée sur la figure 5-17. Les valeurs de la teneur en eau finale varient entre 189% et 192% pour le mélange composé de 5% de sable ; entre 134% et 137% pour le mélange avec 25% de sable et

entre 82% et 86% pour le mélange confectionné avec 50% de sable. Les valeurs des teneurs en eau finales sont légèrement plus faibles en appliquant des vitesses de rotation réduites comprises entre 2,90 tr/min et 4,84 tr/min, sauf pour le mélange « KAO 5% S ». La teneur en eau finale la plus faible pour le mélange « KAO 5% S » est obtenue avec une vitesse de 7,04 tr/min, voir figure 5-17.

Les résultats des essais de déshydratation obtenus en modifiant la pression exercée par le vérin avec une vitesse constante de 2,9 tr/min montrent que le prototype de laboratoire KDS® permet d'obtenir des teneurs en eau finales de 137,6% et de 138,4% en appliquant des pressions de 70 kPa et 130 kPa respectivement pour le mélange « KAO 5% S ». Des valeurs de teneur en eau finales de 104,1% et 107,9% en appliquant ces mêmes pressions, sont obtenues pour le mélange « KAO 25% S » comme des valeurs de 74,6% et 74,7% le sont pour le mélange « KAO 50% S », voir figure 5-18.

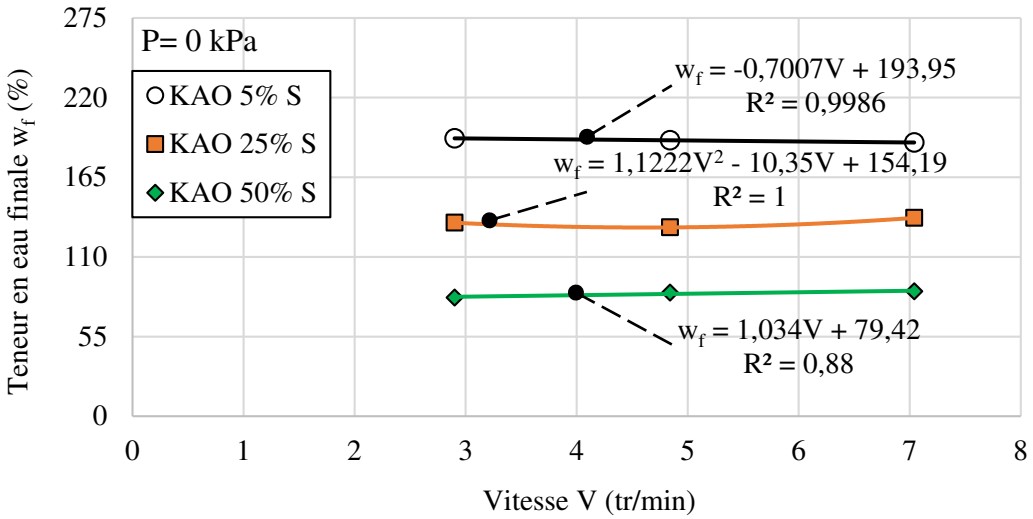



*Figure 5-17. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la vitesse de rotation des disques V pour les matériaux argileux et sableux.*

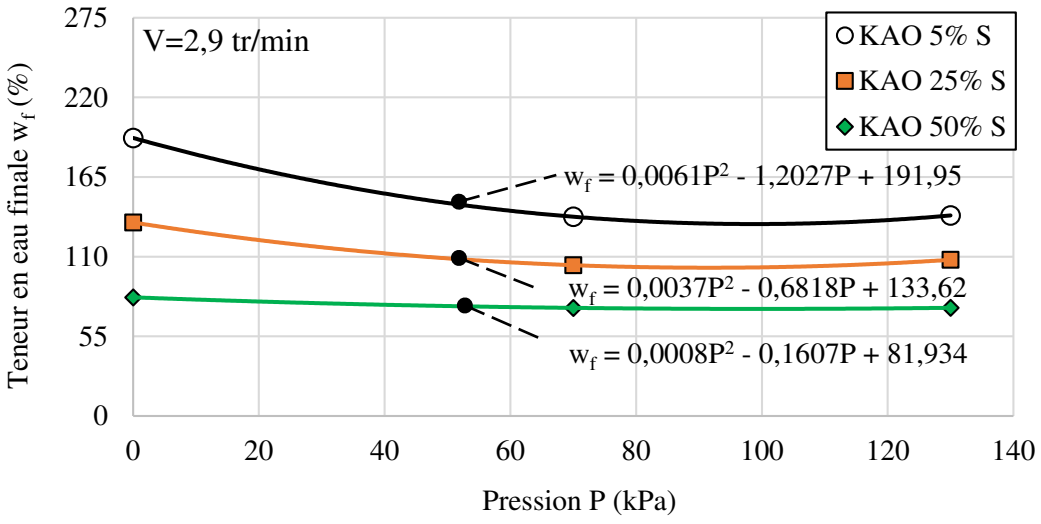



*Figure 5-18. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la pression appliquée P pour les matériaux argileux et sableux.*

Les résultats de déshydratation mécanique sur les matériaux argilo-sableux montrent que les teneurs en eau les plus réduites sont obtenues avec les mélanges les plus sableux. Le sable permet ainsi d'assurer un drainage du matériau.

***Matière en suspension (MES)***

L'évolution de la concentration de la matière en suspension des matériaux argileux et sableux en fonction d'une part de la vitesse de rotation des disques et d'autre part de la pression de la presse à boues KDS®, est illustrée sur les figures 5-19 et 5-20.

Les valeurs de la concentration de la matière en suspension, obtenues avec la variation de la vitesse de rotation des disques et sans application de pression sont données sur la figure 5-19. Le mélange composé de 95% de kaolinite et de 5% de sable fournit des valeurs de MES égales à 1,10 g/l, 0,89 g/l et 0,95 g/l pour des vitesses de rotation des disques de 2,9 tr/min, 4,84 tr/min et 7,04 tr/min respectivement.

L'évolution de la MES du mélange composé de 25% de sable et de 75% de kaolin débute avec une valeur de 1,44 g/l pour une vitesse de 2,9 tr/min, croît progressivement jusqu'à avoir une valeur maximale de 1,70 g/l à la vitesse de 4,84 tr/min, puis diminue graduellement jusqu'à 1,41 g/l avec une vitesse de 7,04 tr/min, voir figure 5-19.

La variation de la MES du mélange confectionné avec 50% de sable et 50% de kaolin selon la vitesse des disques, commence avec une valeur de MES égale à 2,5 g/l pour une vitesse de rotation de 2,9 tr/min, augmente doucement jusqu'à obtenir des valeurs de 2,45 g/l et 2,69 g/l pour des vitesses de 4,84 tr/min et 7,04 tr/min respectivement, voir figure 5-19.

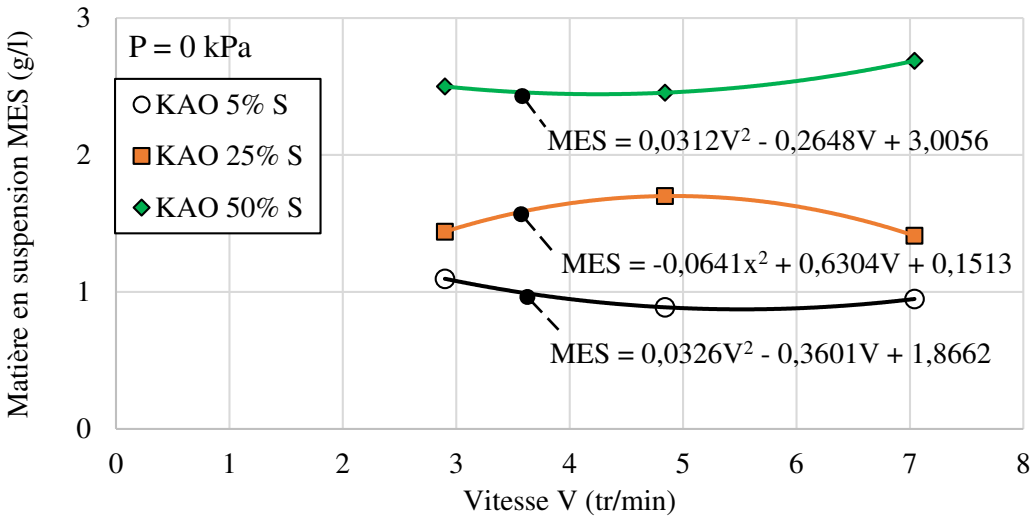



*Figure 5-19. Évolution de la concentration en MES selon la vitesse de rotation des disques pour les matériaux argileux et sableux.*

L'évolution de la concentration de la matière en suspension en faisant varier la pression appliquée tout en maintenant une vitesse de rotation des disques constante et égale à 2,9 tr/min sur les matériaux argileux est donnée sur la figure 5-20.

La concentration de MES pour le mélange « KAO 5% S » présente des valeurs de MES de 1,10 g/l, 3,72 g/l et 3,03 g/l pour des pressions respectives de 0 kPa, 70 kPa et 130 kPa. L'évolution de la MES en fonction de la pression appliquée pour le mélange « KAO 25% S » montre une augmentation progressive jusqu'à obtenir une valeur maximale de 7,70 g/l. Quant à l'évolution du mélange « KAO 50% S », elle tend à diminuer jusqu'à obtenir une valeur de 1,69 g/l pour une pression de 70 kPa, puis elle augmente jusqu'à 3,35 g/l avec une pression de 130 kPa, voir figure 5-20.

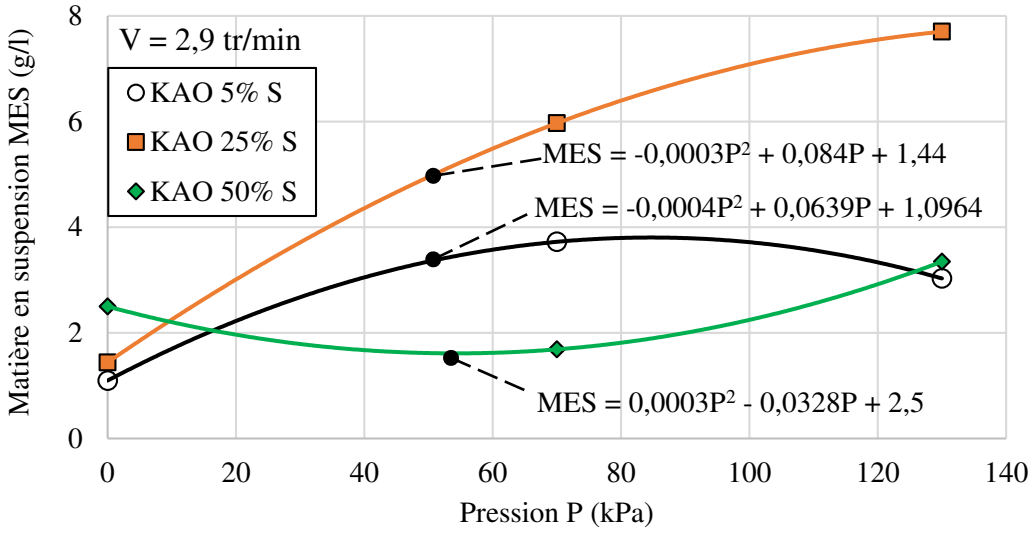



*Figure 5-20. Évolution de la concentration en MES selon la pression appliquée P pour les matériaux argileux et sableux.*

L'aspect visuel des eaux résiduaires obtenues après la déshydratation mécanique des matériaux argileux et sableux est montré sur la figure 5-21. Elles présentent une couleur translucide et blanche, avec des flocs agglomérés fins.

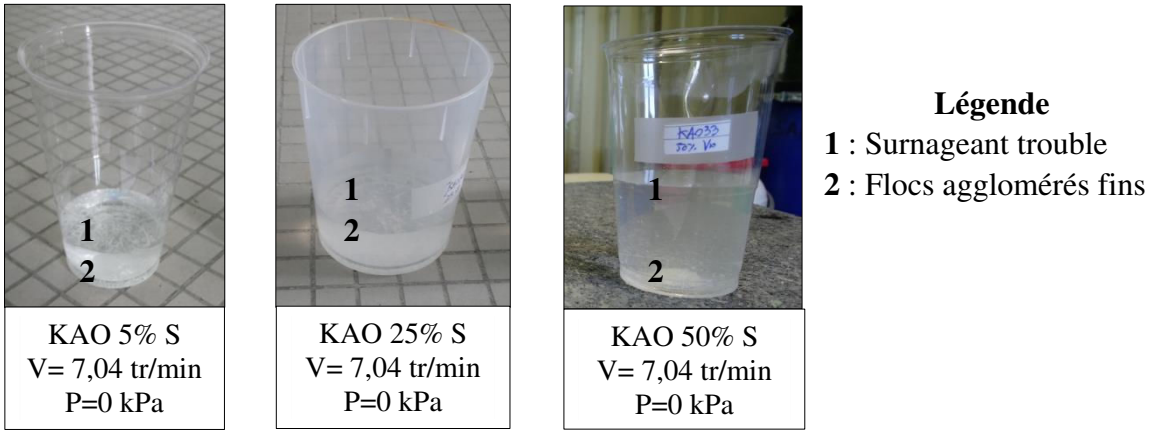



*Figure 5-21. Aspect visuel de la concentration de la MES des matériaux argileux et sableux.*

***Teneur en eau finale ($w_f$) selon la matière en suspension (MES)***

Les évolutions de la teneur en eau finale des matériaux argileux et sableux selon la matière en suspension sont exposées sur la figure 5-22. Ces évolutions débutent avec de faibles valeurs en MES comprises entre 1,1 g/l et 2,5 g/l pour des teneurs en eau élevées autour de 191% pour le mélange « KAO 5% S » ; de 134% pour le mélange « KAO 25% S » et de 82% pour le mélange « KAO 50% S ». Puis elles diminuent progressivement, jusqu'à obtenir des valeurs de teneur en eau finales de 138% pour le mélange « KAO 5% S », de 108% pour le mélange « KAO 25% S » et de 75% pour le mélange « KAO 50% S », correspondant à des valeurs de la matière en suspension les plus élevées entre 3,3 g/l et 7,7 g/l.

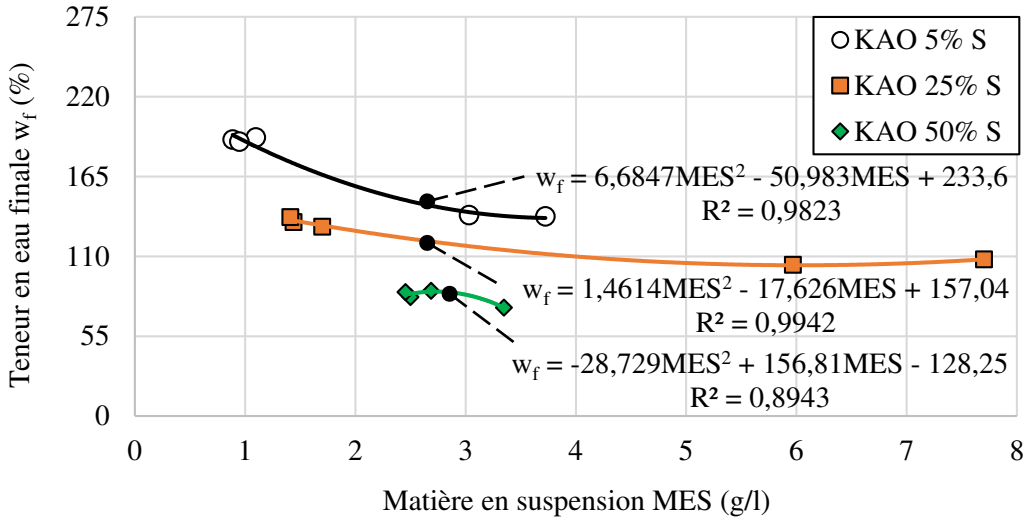



*Figure 5-22. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la matière en suspension pour les matériaux argilo-sableux.*

### *5.5.3. Essais sur les sédiments de barrage*

Les mélanges réalisés avec les sédiments de barrage, sont codifiés par le nom du sédiment et la teneur en eau initiale. À titre d'exemple, pour une teneur en eau initiale de 400%, les mélanges sont notés : « BR-SAI (400%) », « AL-FLU (400%) », « AL-CLA (400%) » et « AL-SPO (400%) ».

#### *5.5.3.1. Essai de floculation*

***Choix du floculant***

L'essai de floculation sur les sédiments de barrage a été divisé en deux phases, réalisées entre les laboratoires SNF FLOERGER à Andrezieux et M2C à Caen. La première phase avait pour but la détermination des floculants les plus adéquats quant à la qualité du surnageant et à la floculation. Puis la deuxième phase, a été menée dans le but de définir le floculant le plus adapté pour la presse à boues KDS®.

Dans la première phase de l'essai de floculation, une dizaine de floculants anioniques et cationiques avec des poids moléculaires « haut » et « ultra haut » (classification de poids moléculaires selon l'entreprise SNF FLOERGER) et des densités de charge comprises entre 5% et 60%, ont été testés. Pour pouvoir estimer l'effet du floculant pendant le passage dans la presse à boues KDS®, une simulation de passage du matériau floculé dans un tamis de 140 µm a été évalué. Les résultats de cette première approximation montrent que les floculants les plus aptes sont :

- Le floculant « FLOPAM AN 923 VHM » : floculant anionique en poudre de densité de charge égale à 20% et un ultra haut poids moléculaire.

- Le floculant « FLOPAM FO 4350 SH » : floculant cationique en poudre, avec 25% de densité de charge et un poids moléculaire « très haut ».

- Le floculant « FLOPAM EM 340 HIB » : floculant en émulsion, cationique, qui a une densité de charge haute, de valeur égale à 30% (SNF FLOERGER, 2017).

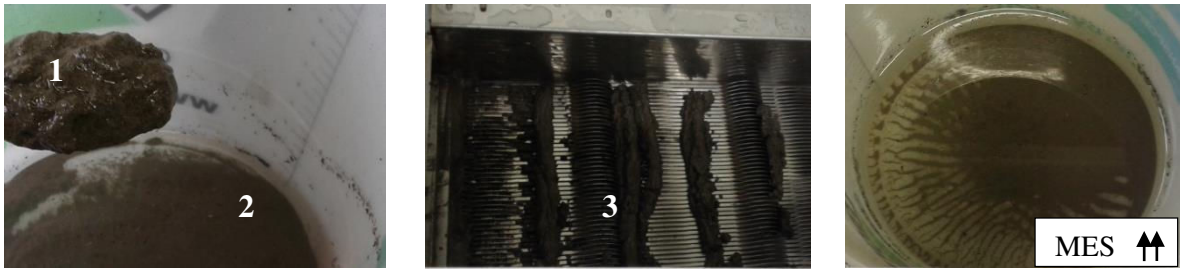
Les caractéristiques des floculants sont récapitulées dans le tableau 5-6 ci-après.

*Tableau 5-6. Caractéristiques des floculants testés avec les sédiments de barrage (SNF FLOERGER, 2012 et 2017).*

| | | **AN 923 VHM** | **FO 4350 SH** | **EM 340 HIB** |
|---|---|---|---|---|
| Forme | | Poudre | Poudre | Liquide visqueux |
| Couleur | | Blanc | Blanc | Opaque |
| Caractère ionique | | Anionique | Anionique | Cationique |
| Poids moléculaire | | Ultra haut | Très haut | 30 |
| Densité de charge | | Moyenne | Haut | Haute |
| Granulométrie | % > 10 grille | 2 maxi | 2 maxi | - |
| | % < 100 grille | 6 maxi | 6 maxi | - |
| Solides non volatiles moyens (%) | | - | - | 44 - 51 |
| Densité apparente approximative | | 0,80 | 0,85 | 1,0 - 1,1 |
| Viscosité Brookfield approximative (cps)[1] | À 5,0 g/l | 1700 | 625 | 2000 |
| | À 2,5 g/l | 650 | 340 | - |
| | À 1,0 g/l | 200 | 140 | - |
| Viscosité telle quelle (cps[1]) | | - | - | 500 – 2000 |
| Concentration d'utilisation conseillée (g/l) | | 3 | 4 | - |
| Concentration d'utilisation maxi (g/l) | | 5 | 10 | 10 |
| Temps de dissolution dans l'eau distillée à 5 g/l à 25°C (minutes) | | 60 | 60 | 15 |
| Stabilité de la solution dans l'eau déionisée (jours) | | 1 | 1 | 1 |
| Température de stockage (°C) | | 0 - 35 | 0 - 35 | 5 – 35 |
| Stabilité[2] (en mois) | | 24 | 24 | 6 |

***Note** [1] : 1 centipoise (ou cps) est une unité de viscosité dynamique égale à 1 mPa/s ;*
*[2] : Si le produit est stocké à l'intérieur d'un bâtiment à une température stable située entre 5°C et 30°C.*

La deuxième phase de l'essai de floculation a démontré que le floculant anionique en poudre AN 923 VHM, voir tableau 5-7, préparé avec une concentration de 2,5g/l, permet de floculer les mélanges avec des dosages modérés : 5 ml de floculant pour chaque litre de mélange « AL-SPO » préparé à une teneur en eau égale à 800%. Cependant, les flocs formés sont fins, fragiles et denses et l'eau libre est limpide, voir figure 5-23.a ; ces flocs passent à travers les espaces existants entre les disques et barres oscillantes de la presse KDS®, voir figure 5-23.b et le surnageant est chargé en MES très fines, non floculées, voir figure 5-23.c.




*a) Préparation du mélange AL-SPO + AN 923 VHM*

*b) Déshydratation mécanisée avec KDS®*

*c) Surnageant : très trouble. MES très élevée*

**Légende**

**1** : Flocs très fins

**2** : Particules fines en suspension

**3** : Passage des flocs entre les disques

*Figure 5-23. Essai de floculation avec la presse à boues KDS®. Mélange AL-SPO + floculant AN 923 VHM, $w_0$=800%.*

Le floculant en émulsion EM 340 HIB, voir tableau 5-7 et figure 5-24, forme les flocs les plus grossiers, les plus résistants et les plus spongieux. L'eau libre est limpide selon la figure 5-24. Le surnageant est peu chargé et la MES contient des flocs bien agglomérés qui ont aussi traversé les espaces entre les disques et les barres. Ce polymère a été préparé avec une concentration de 5 g/l. De ce fait, le floculant « EM 340 HIB » est le floculant choisi pour la réalisation des essais de déshydratation avec la presse à boues KDS®.

*Tableau 5-7. Résultats des essais de floculation après déshydratation avec la presse KDS® (CARLE, 2017b).*

| **FLOCULANT** | **AN 923 VHM** (Préparé à 2,5 g/l) Uniquement testé sur le mélange AL-SPO et $w_0$=800% | **FO 4350 SH** | **EM 340 HIB** (Préparé à 5 g/l pour avoir une concentration en matière active de ≈ 2,5 g/l) |
|---|---|---|---|
| Floculation | - Dosage modéré ;<br>- Flocs fins, fragiles, denses, eau libre limpide. | Pas testé.<br>Les deux autres polymères qui ont les comportements les plus différents ont été testés. | - Dosage élevé [1] ;<br>- Flocs grossiers, résistants, spongieux, eau libre limpide s'il n'y a pas d'excès de polymère (aspect légèrement laiteux). |
| Passage[2] sur la presse à boues KDS® | Après les premières secondes de l'effet « douche », les flocs très fins et denses forment une fine couche de boue qui roule sur les disques et progresse bien. | | Après les premières secondes de l'effet « douche », les flocs spongieux forment des boulettes de boue qui roulent sur les disques et progresse bien. |
| Aspect du surnageant | Le surnageant semble chargé en MES très fines avec des flocs non floculés.<br>« Le pire résultat ». | | Le surnageant semble peu chargé, pour la MES les flocs sont bien floculés.<br>« Le meilleur résultat ». |
| Teneur en eau finale | 59% à partir d'une boue à 800%, soit 62% de siccité à partir d'une boue à 11% de siccité.<br>« Le meilleur résultat ». | | 97 à 142 % sur les boues à 800% soit 41 à 50 % de siccité à partir d'une boue à 11% de siccité. |
| Influence de la teneur en eau initiale | Quel que soit le sédiment ou le polymère utilisé, la teneur en eau initiale a un impact direct et négatif sur la teneur en eau finale et la MES dans le surnageant. | | |

***Note** : [1] : Dosages récapitulés dans le tableau 5-8.*

*[2] : Le passage sur la presse à boues KDS® a été réalisé avec une vitesse de rotation des disques de 2,9 tr/min et sans pression sur la plaque de compression.*

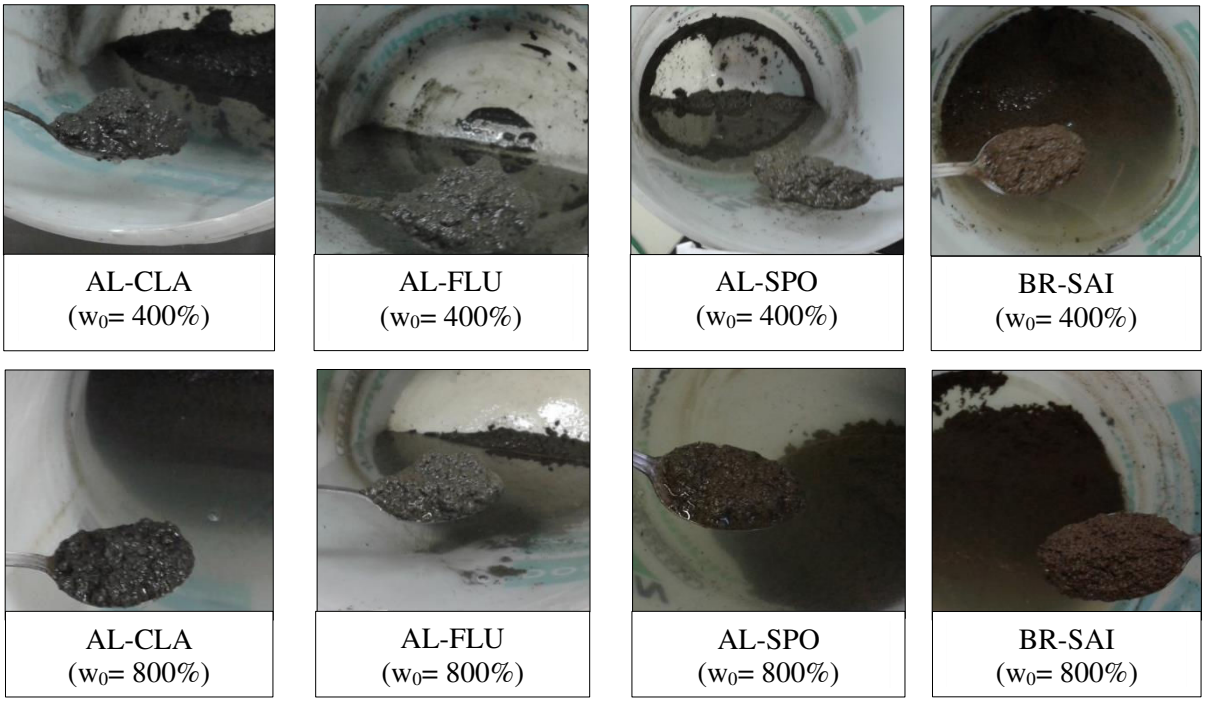



*Figure 5-24. Aspect visuel des flocs et du surnageant. Sédiments de barrage, floculant EM 340 HIB.*

***Choix de la concentration du polymère***

Le floculant EM 340 HIB a été préparé à une dissolution de 5 g/l, afin d'avoir une concentration en matière active de 2,5 g/l. De fait, cette concentration est en dessous des limites d'utilisation maximale et le dosage du floculant n'était pas très élevé, voir tableau 5-8. La préparation du floculant a été effectuée à l'aide d'un agitateur magnétique. La durée d'agitation a été de 15 minutes.

*Tableau 5-8. Récapitulatif des dosages optimaux par rapport à la teneur en eau initiale.*

| **Sédiment** | **Teneur en eau initiale (%)** | **Floculant choisi** | **Dosage de floculant** (préparé à 5 g/l pour chaque litre de mélange) **(ml)** |
|---|---|---|---|
| AL-SPO | 400 | EM 340 HIB | 40 |
| | 800 | EM 340 HIB | 40 |
| AL-FLU | 400 | EM 340 HIB | 40 |
| | 800 | EM 340 HIB | 30 |
| AL-CLA | 400 | EM 340 HIB | 30 |
| | 800 | EM 340 HIB | 30 |
| BR-SAI | 400 | EM 340 HIB | 20 |
| | 800 | EM 340 HIB | 20 |

***Calcul du dosage optimal***

Les dosages optimaux pour chaque sédiment sont donnés au tableau 5-8. Ils varient de 20 ml jusqu'à 40 ml pour chaque litre de mélange.

### *5.5.3.2. Essai de déshydratation*

Les essais de déshydratation sur les sédiments de barrage visent à déterminer le comportement de la presse à boues KDS® lors la déshydratation de boues sableuses. Les essais ont été réalisés en faisant varier la vitesse de rotation des disques (V), sans l'application d'une force de compression et d'autre part en faisant varier la force de compression (P) en maintenant une vitesse de rotation des disques constante. Le volume de mélange à déshydrater était de trois litres pour tous les essais de déshydratation.

Dans un premier essai de déshydratation, le mélange de sédiments floculés a été introduit dans le réservoir de floculation de la presse à l'aide d'une pompe péristaltique. La structure de flocs se brisait pendant le pompage. Le matériau à déshydrater a été introduit directement dans le réservoir. Des essais de déshydratation préliminaires ont été effectués afin de déterminer la section de sortie du réservoir de floculation la plus adéquate pour la déshydratation des boues. Ceci a permis d'obtenir les teneurs en eau finales et la matière en suspension les plus réduites.

Les essais de déshydratation sur les sédiments de barrage ont été réalisés en collaboration avec MÜLLER (MÜLLER et al., 2018.a).

***Choix de la section de sortie du réservoir de floculation***

Une série d'essais de déshydratation a été menée avec une hauteur de sortie du réservoir variable. En raison de la disponibilité du matériau, le sédiment testé a été « AL-CLA » avec une teneur en eau égale de 400%. Le volume de sédiment à déshydrater a était constant et égal à trois litres. La vitesse de rotation des disques choisie a était de 2,9 tr/min et la pression appliquée, de 50 kPa pour tous les essais. Les valeurs des paramètres de la machine ont été choisies afin d'établir des paramètres communs pour tous les essais. Une pression de 50 kPa permet d'appliquer une pression intermédiaire et une vitesse de rotation des disques faible de 2,9 tr/min permet de visualiser l'essai sur une plus grande période de temps.

Les hauteurs testées ont été de 6 cm, correspondant à la hauteur de sortie du réservoir de floculation, de 5 cm et de 4 cm. Ces hauteurs ont été graduées à l'aide d'un système de porte à guillotine.

Les résultats des essais de déshydratation obtenus ont montré que la hauteur du réservoir de 6 cm était trop élevée. Le matériau à déshydrater subissait une vitesse d'écoulement élevée au moment de l'ouverture et passait au-dessus des disques et de la plaque de compression.

L'essai de déshydratation réalisé avec une hauteur de sortie du réservoir égale à 5 cm, soit une section de sortie du réservoir égale à 110,5 $cm^2$, a permis d'obtenir une teneur en eau finale égale à 73,8% et une concentration de matière en suspension de 8,9 g/l.

La teneur en eau finale obtenue avec une hauteur de sortie du réservoir égale à 4 cm, et une section de sortie du réservoir égale à 88,4 $cm^2$, a été de 75,1% correspondant à une concentration de matière en suspension de 17,3 g/l.

Les teneurs en eau finales et les concentrations de la matière en suspension les plus faibles sont obtenues avec une hauteur de sortie du réservoir de 5 cm. La section de sortie du réservoir de floculation choisie pour la réalisation des essais de déshydratation est de 110,5 $cm^2$.

***Teneur en eau finale ($w_f$)***

Une série d'essais avec les sédiments « AL-FLU », « AL-SPO », « AL-CLA », et « BR-SAI » a été conduite en utilisant des teneurs en eau initiales de 400% (boue lourde ou chargée) et 800% (boue légère ou diluée). Les résultats des teneurs en eau finales sont récapitulés sur les figures 5-25 et 5-26.

Les teneurs en eau finales des sédiments, sans appliquer de force de compression sont données à la figure 5-25. Ces valeurs sont assez similaires pour le même type de sédiment, indépendamment de la teneur en eau initiale. Elles oscillent entre 143% et 121% pour les mélanges « BR-SAI », entre 105% et 115% pour « AL-FLU », entre 98% et 105% pour les mélanges « AL-CLA » et entre 77% et 90% pour les mélanges « AL-SPO » ; tous les mélanges ont été préparés avec le floculant EM 340 HIB.

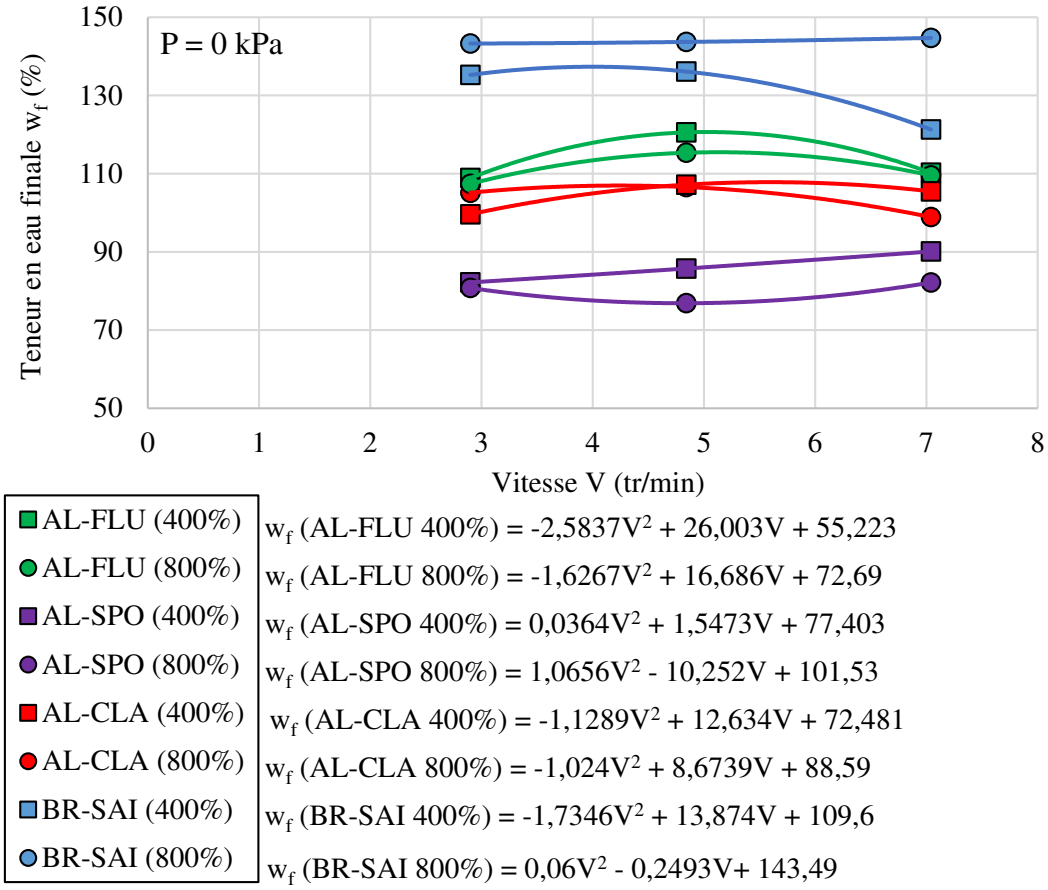



*Figure 5-25. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la vitesse de rotation des disques V pour les sédiments.*

Les teneurs en eau finales obtenues après le passage des sédiments par la presse à boues KDS® en utilisant une vitesse constante de 2,9 tr/min sont données sur la figure 5-26. Sur cette figure quelle que soit la teneur en eau initiale, le prototype de presse permet d'obtenir des teneurs en eau finales de 65% pour les mélanges « AL-SPO » si on applique une pression de 70 kPa et d'environ 70 % en appliquant une pression de 130 kPa.

Pour les mélanges « AL-CLA », indépendamment de la pression appliquée, les teneurs en eau finales sont autour de 70% si la teneur en eau initiale est de 400% et d'environ 75% si la teneur en eau initiale est de 800%.

Le mélange « AL-FLU (400%) » présente des teneurs en eau finales d'environ 80% en appliquant des pressions de 70 kPa et de 130 kPa. Le mélange « AL-FLU (800%) » a des teneurs en eau finales aux alentours de 90% quelle que soit la pression appliquée.

Les teneurs en eau finales pour le mélange « BR-SAI (400%) » sont de 105% et de 90% en appliquant des pressions de 70 kPa et de 130 kPa respectivement. Pour le mélange « BR-SAI (800%) », les teneurs en eau finales sont de 120% et de 114% en appliquant les mêmes pressions respectives de 70 kPa et 130 kPa.

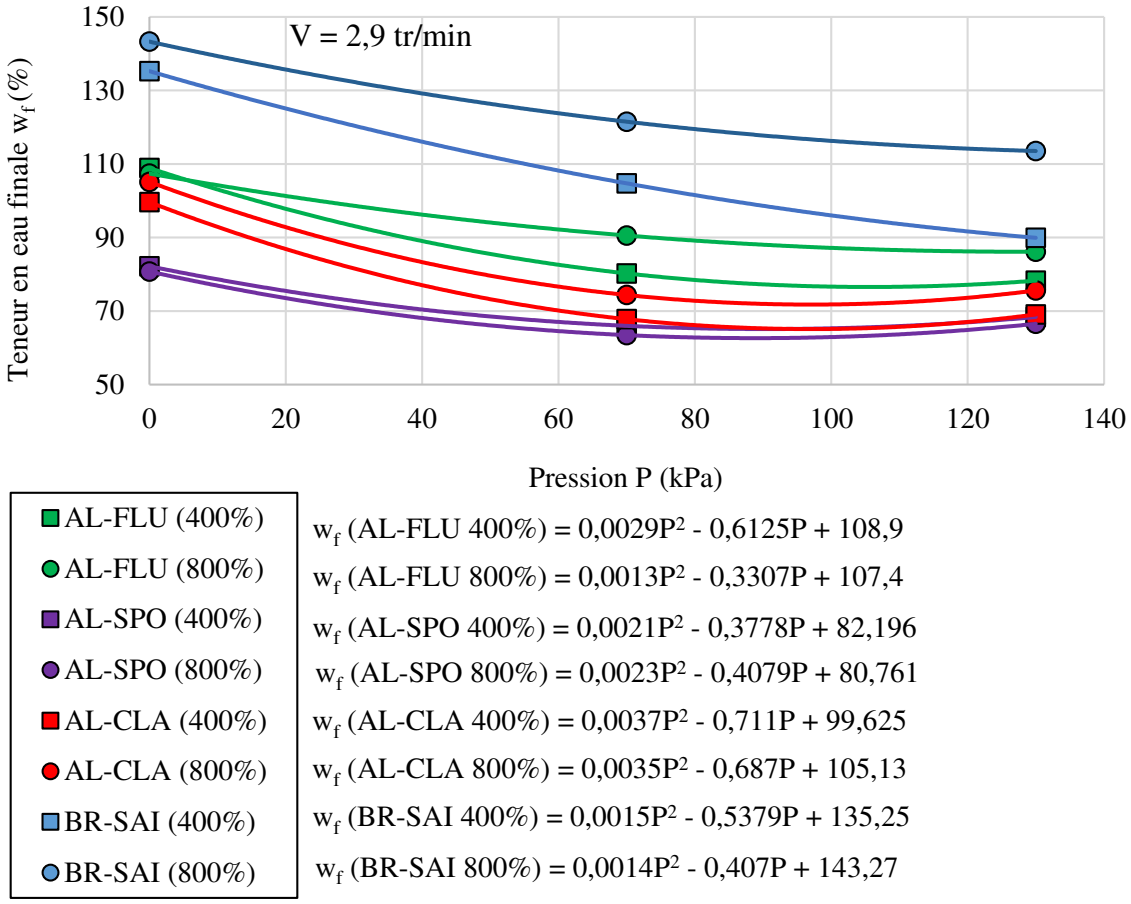



*Figure 5-26. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la pression appliquée P pour les sédiments de barrage.*

***Matière en suspension (MES)***

L'évolution de la concentration de la matière en suspension selon la vitesse de rotation des disques, sans l'application d'une force de compression pour tous les sédiments de barrage est représentée sur la figure 5-27.A. Cette évolution a été divisée en deux graphiques selon la teneur en eau initiale ; ces graphiques correspondent aux figures 5-27.B et 5-27.C.

Sur ces graphiques, on observe que le mélange «AL-SPO » possède les plus importantes concentrations de matière en suspension indépendamment de sa teneur en eau initiale. Elles varient de 13,5 g/l jusqu'à 15,4 g/l avec des vitesses comprises entre 2,9 tr/min et 7,04 tr/min pour des teneurs en eau initiales de 400%, voir figure 5-27.B. Les valeurs de MES du mélange « AL-SPO » préparé avec une teneur en eau de 800% sont comprises entre 13,4 g/l à 22,9 g/l pour toutes les vitesses de rotation des disques, voir figure 5-27.C.

Les concentrations de la MES pour le sédiment « AL-CLA 400% » sont de 3,6 g/l, 13,5 g/l et 12,6 g/l pour les vitesses de rotation de 2,9 tr/min, 4,84 tr/min et 7,04 tr/min respectivement, voir figure 5-27.B. Les valeurs pour le sédiment fortement dilué « AL-CLA 800% » sont comprises entre 5,7 g/l et 8,2 g/l, voir figure 5-27.C.

Le sédiment « AL-FLU 400% » a des valeurs de MES de 3,1 g/l, 8,8 g/l et 19,3 g/l pour les vitesses de rotation de 2,9 tr/min, 4,84 tr/min et 7,04 tr/min respectivement, voir figure 5-27.B. La MES pour une dilution plus élevée de sédiment « AL-FLU 800% » est de 9,0 g/l avec une vitesse de 2,9 tr/min. Cette concentration descend à 6 g/l pour une vitesse de rotation de 4,84 tr/min, et elle augmente jusqu'à 10,0 g/l avec une vitesse de 7,04 tr/min, voir figure 5-27.C.

Les concentrations de MES pour le mélange « BR-SAI 400% » ont des valeurs de 6,0 g/l, de 7,6 g/l et de 7,9 g/l pour les vitesses de rotation de 2,9 tr/min, 4,84 tr/min et 7,04 tr/min respectivement, voir figure 5-27.B. Les valeurs du sédiment dilué « BR-SAI 800% » sont comprises entre 4,5 g/l et 8,7 g/l, voir figure 5-27.C.

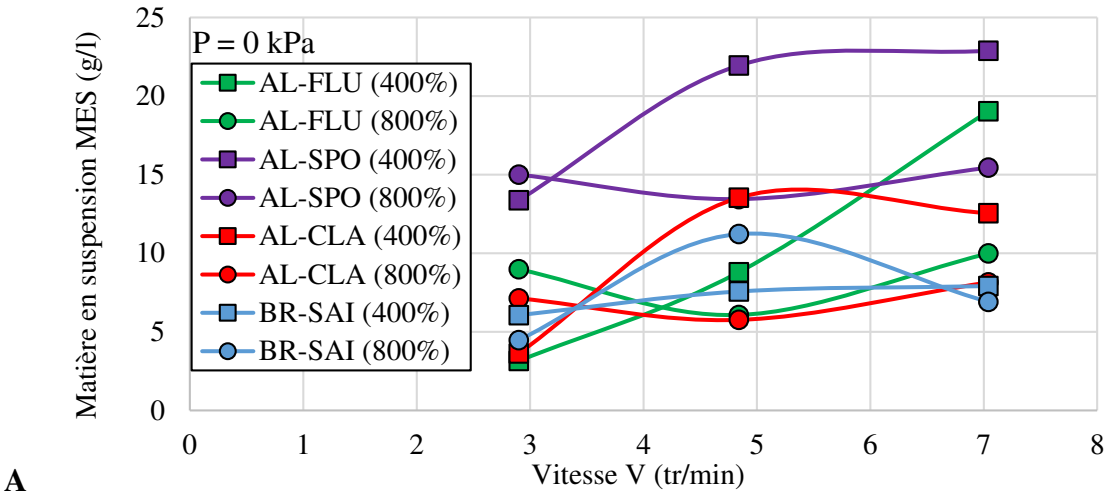
L'évolution de la concentration de la matière en suspension selon la pression appliquée et avec une vitesse de rotation des disques constante de 2,9 tr/min est montrée sur la figure 5-28.A. pour tous les sédiments de barrage. Elle est représentée selon les deux teneurs en eau initiale sur les figures 5-28.B et 5-28.C.

Les concentrations de la MES les plus importantes sont obtenues avec le mélange «AL-SPO 400% », voir figure 5-28.A. Ce mélange présente des valeurs de 17,3 g/l et 14,4 g/l pour des pressions de 70 kPa et 130 kPa respectivement. Pour le sédiment dilué « AL-SPO 800% », on obtient des valeurs en MES de 12,8 g/l et de 7,13 g/l en appliquant des pressions de 70 kPa et 130 kPa respectivement.

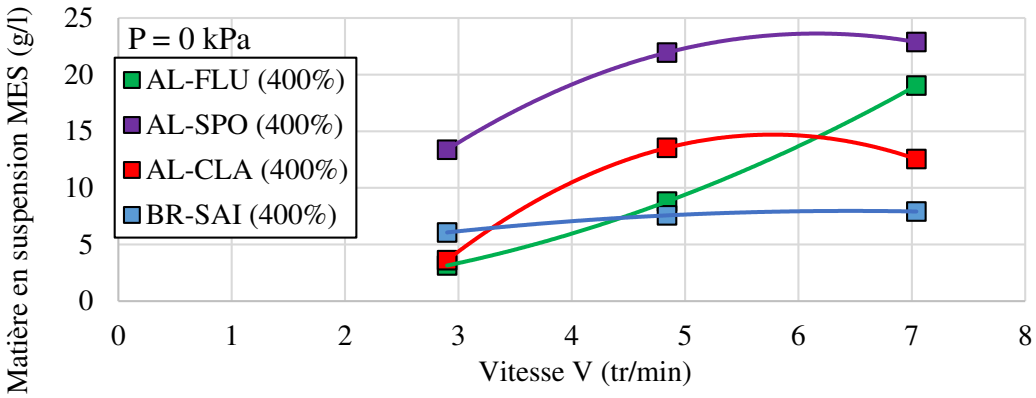
En appliquant des pressions de 70 kPa et de 130 kPa, les valeurs de la MES sont de 12,3 g/l et de 11,2 g/l respectivement pour le mélange « AL-CLA 400% » et de 8,7 g/l et de 11,3 g/l pour le mélange « AL-CLA 800% ».

Les concentrations de la MES pour le mélange « AL-FLU », préparé avec une teneur en eau initiale de 400%, sont de 11,1 g/l et 8,2 g/l en appliquant des pressions de 70 kPa et de 130 kPa respectivement. Ces valeurs diminuent jusqu'à 3,3 g/l et 5,3 g/l si le mélange « AL-FLU » a une teneur en eau initiale de 800%.

Le sédiment dilué « BR-SAI 800% » possède des valeurs en MES de 11,2 g/l et 11,6 g/l en appliquant des pressions de 70 kPa et 130 kPa respectivement. Le même sédiment à teneur en eau moindre « BR-SAI 400% » a des valeurs en MES de 12,2 g/l et 8,9 g/l pour les pressions de 70 kPa et 130 kPa, voir figure 5-28.C.




**A**



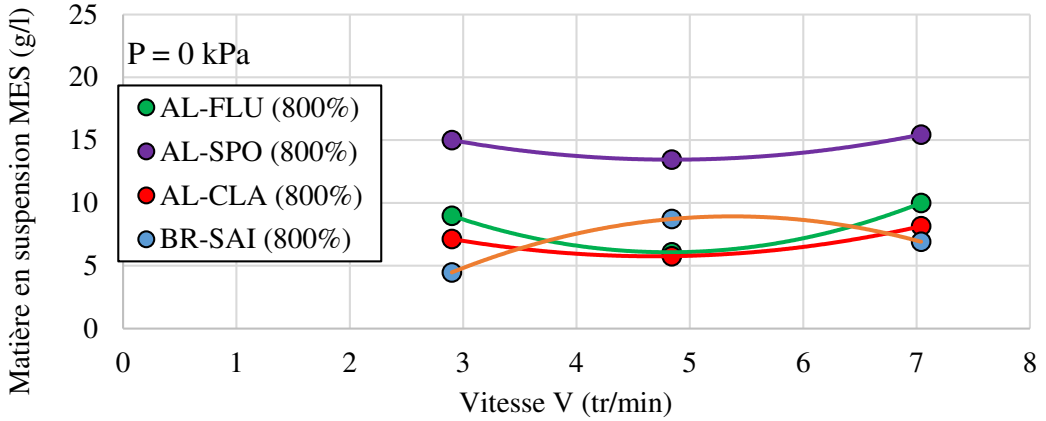

MES (AL-SPO 400%) = -0,9647V² + 11,885V - 12,978

MES (AL-CLA 400%) = -1,3421V² + 15,497V - 30,031

MES (AL-FLU 400%) = 0,4211V² - 0,3479V + 0,611

MES (BR-SAI 400%) = -0,15V² + 1,9375V + 1,7055

**B**




MES (AL-FLU 800%) = 0,792V² - 7,6271V + 24,436

MES (AL-SPO 800%) = 0,413V² - 3,9978V + 23,12

MES (AL-CLA 800%) = 0,4328V² - 4,0576V + 15,26

MES (BR-SAI 800%) = -0,7282V² + 7,8281V - 12,109

**C**

*Figure 5-27. Évolution de la concentration en MES selon la vitesse de rotation des disques pour les sédiments de barrage (figure A) avec $w_0$= 400% (figure B) et $w_0$= 800% (figure C).*

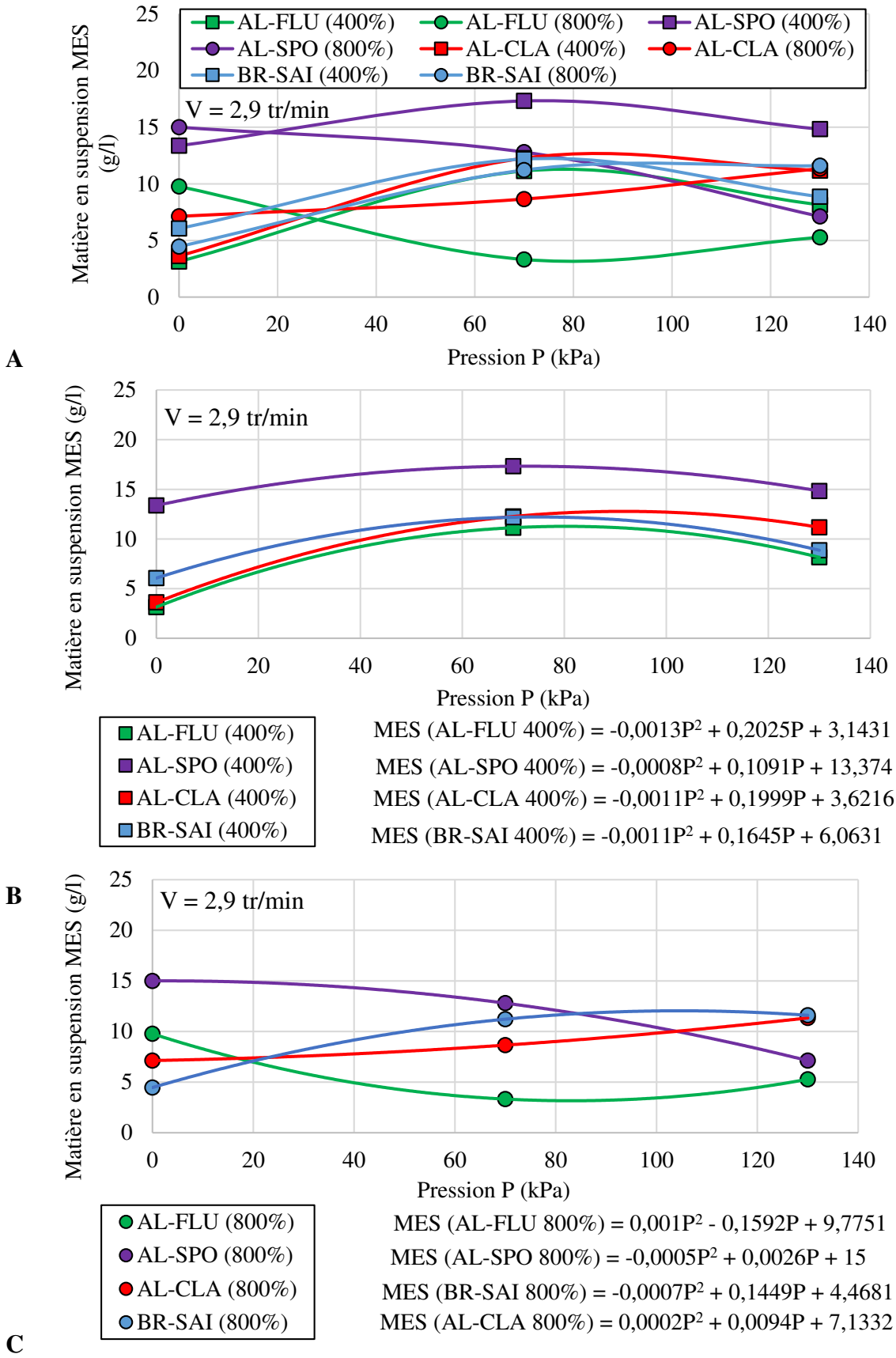
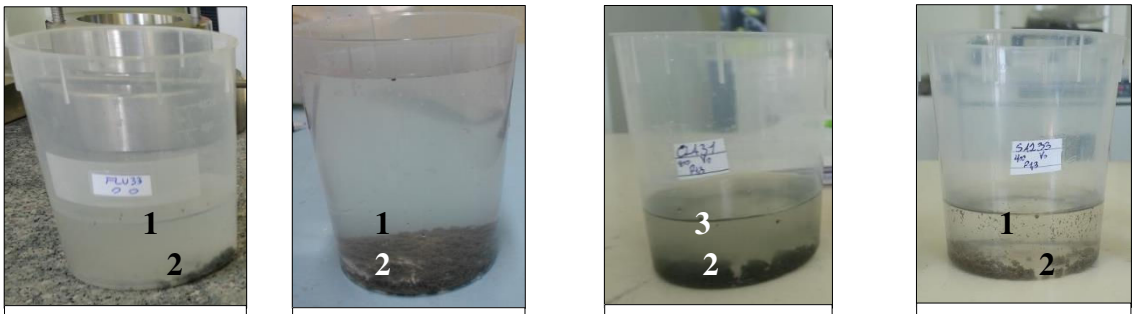



*Figure 5-28. Évolution de la concentration en MES selon la pression appliquée P pour les sédiments de barrage (figure A) avec $w_0$= 400% (figure B) et $w_0$= 800% (figure C).*

L'eau collectée après la déshydratation mécanique en utilisant la presse à boues KDS® est claire et présente des flocs agglomérés fins, indépendamment des paramètres de la machine, voir figure 5-29.




| AL-FLU 400%<br>V= 2,9 tr/min<br>P=0 kPa | AL-SPO 400%<br>V= 2,9 tr/min<br>P=0 kPa | AL-CLA 800%<br>V= 2,9 tr/min<br>P=130 kPa | BR-SAI 400%<br>V= 2,9 tr/min<br>P=130 kPa |
|---|---|---|---|

**Légende**

**1** : Surnageant clair **2** : Flocs agglomérés fins **3** : Surnageant trouble

*Figure 5-29. Aspect visuel de la concentration de la MES pour les sédiments de barrage.*

***Teneur en eau finale ($w_f$) selon la matière en suspension (MES)***

Les évolutions de la teneur en eau finale des sédiments de barrage selon la matière en suspension sont montrées sur la figure 5-30. Des tendances sont montrées selon le type de sédiments, voir figure 5-30.A et selon la teneur en eau initiale, voir figure 5-30.B.

Sur ces mêmes graphiques, on observe des teneurs en eau finales élevées pour des concentrations de la MES faibles. Les sédiments « BR-SAI » présentent les teneurs en eau finales les plus élevées, avec des valeurs comprises entre 135% et 145% pour des MES parmi 4,5 g/l et 6,1 g/l. Les sédiments « AL-SPO » possèdent les teneurs en eau les plus faibles ($w_f$ = 80% ± 10%) pour les concentrations de la MES les plus élevées. 13,37 g/l et 22,8 g/l, voir figure 5-30.A.

Le coefficient de détermination ($R^2$) des courbes de tendances pour les sédiments «AL-FLU » et « BR-SAI » est très faible pour être représentatif de l'évolution de la teneur en eau finale selon la concentration en MES, voir figure 5-30.A. Ceci peut être dû au fait que les valeurs de la MES et de la teneur en eau finale des sédiments sont insuffisantes pour permettre de voir une réelle tendance. Ces résultats mettent aussi en évidence que la presse à boues KDS® de laboratoire n'est pas le modèle représentatif de la machine à échelle réelle et que cette machine n'a pas été conçue dans un premier temps, pour la déshydratation de sédiments.

Les variations les plus importantes de la teneur en eau finale selon la concentration de la matière en suspension sont observées avec des teneurs en eau initiale élevées ($w_0$ = 800%). Ces teneurs en eau varient de 143% jusqu'à 76,9% pour des valeurs de MES comprises entre 4,5 g/l et 15,4 g/l, voir figure 5-30.B.

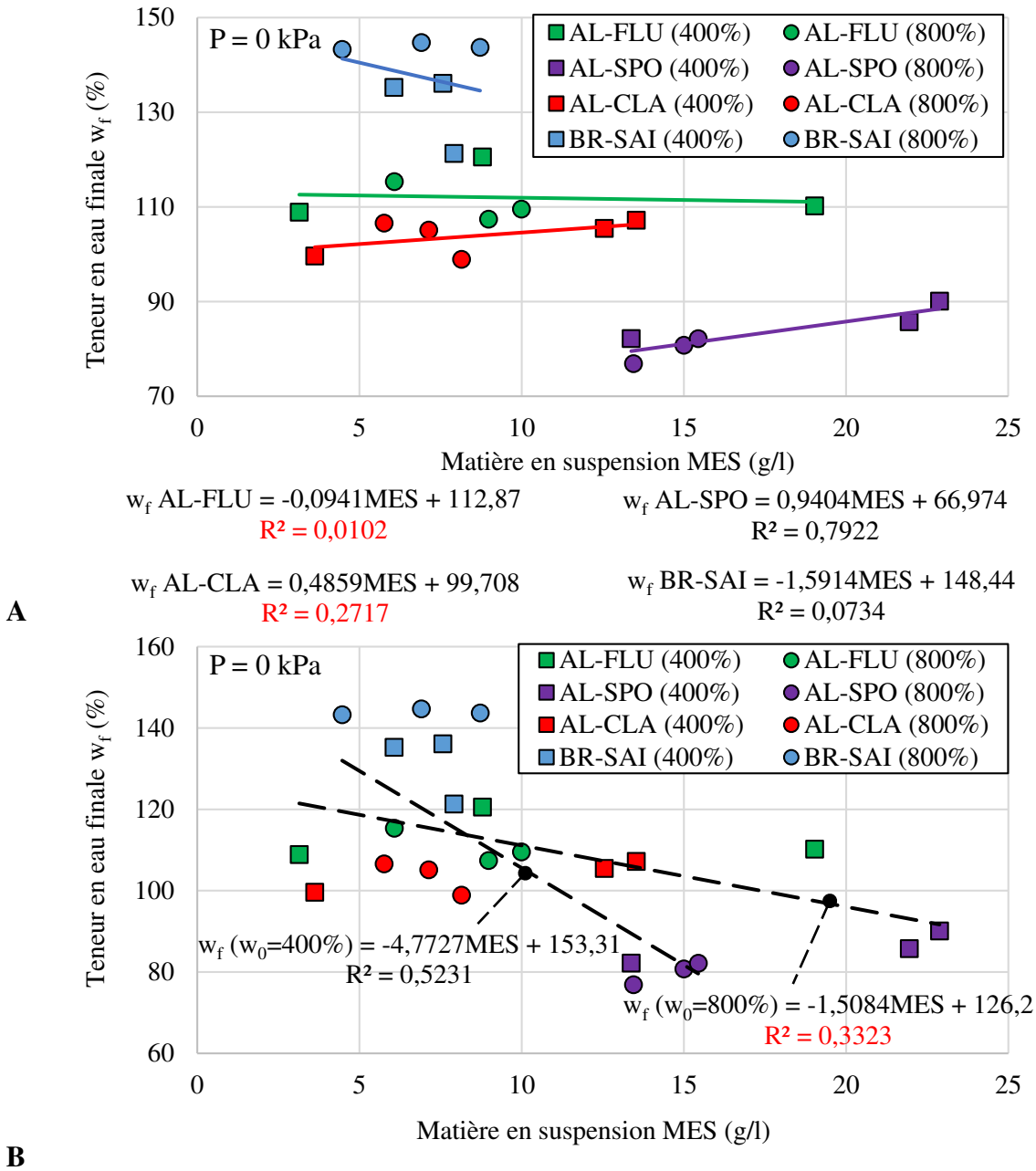



*Figure 5-30. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la concentration en MES pour les sédiments de barrage (figure A) et selon la teneur en eau initiale (figure B).*

## *5.6. ANALYSE ET DISCUSSION*

Cette partie aborde dans un premier temps la justification du choix du floculant sélectionné et puis, elle traite de l'interprétation des résultats graphiques provenant des essais de déshydratation.

### *5.6.1. Matériaux argileux*

#### *5.6.1.1. Essai de floculation*

L'essai de floculation vise à déterminer le floculant le plus adéquat. Dans ce cas d'étude, le floculant le plus adéquat est celui qui forme les plus gros flocs résistants avec un surnageant clair. La réalisation d'un essai de floculation est une étape essentielle dans le processus de déshydratation mécanisée de matériaux argileux avec la presse à boue KDS®.

***Choix du floculant***

En ce qui concerne le choix du floculant, il a été montré que le floculant le plus adéquat pour la déshydratation de la kaolinite est le floculant anionique qui présente 20% de densité de charge et un poids moléculaire standard référencé par la société SNF FLOERGER sous le nom de « FLOPAM AN 923 ». Ce floculant permet de former les plus gros flocs et d'obtenir le surnageant le plus clair, voir figure 5-8.

***Concentration du floculant***

La concentration de préparation du floculant a été de 10 g/l. Cette concentration a été choisie en suivant des critères visuels lors la réalisation de l'essai de floculation, même si elle dépasse les valeurs de concentrations d'utilisation maximales conseillées.

***Dosage optimal***

Le dosage optimal du floculant « AN 923 » préparé avec une concentration de floculant de 10 g/l, est de 42,5 ml pour chaque litre de mélange de kaolin préparé avec une teneur en eau de 275%. Avec ce dosage, les flocs formés étaient de grande taille assez résistants pour être transportés sur la table de la presse à boues KDS®.

***Précautions pendant l'injection du floculant***

Lors de la préparation de ce mélange, une forte influence de la vitesse de préparation du mélange a été remarquée : cette vitesse doit être suffisamment lente afin d'assurer la structure des flocs et de garantir le contact entre le floculant et la boue de kaolin. Par ailleurs, dès que les flocs sont formés l'arrêt en rotation pour la préparation est recommandé.

### *5.6.1.2. Essai de déshydratation*

***Teneur en eau finale ($w_f$) selon la vitesse de rotation des disques elliptiques (V)***

Les résultats des essais de déshydratation mettent en évidence des petites variations de la teneur en eau finale selon la vitesse de rotation des disques choisie. Ces valeurs oscillent entre 192% et 212% sans application de pression. Ces pourcentages correspondent à des réductions de teneur en eau respectives de 30% et 23%. Rappelons que la teneur initiale du mélange de kaolin était de 275%.

Les plus faibles teneurs en eau, sans application de pression, évoluent entre 192% et 198%, elles ont été acquises en utilisant des vitesses de rotation des disques extrêmes (2,90 tr/min et 7,04 tr/min). Les plus importantes teneurs en eau sans pression appliquée, ont été obtenues pour des vitesses de rotation de disques intermédiaires, voir figure 5-31.A.

La teneur en eau la plus faible est obtenue avec une vitesse de rotation de disques elliptiques réduite, ceci peut s'expliquer par le fait que la vitesse de rotation de disques est liée au temps de déshydratation et au contact entre les flocs du matériau et les disques elliptiques. Plus la vitesse est réduite, plus le temps de déshydratation *i.e.* d'égouttage sur la table, augmente, plus le contact entre les flocs et les disques est importante et la teneur en eau s'en trouve diminuée.

Les petites variations de la teneur en eau finale selon la vitesse de rotation des disques et la forme plus ou moins marquée concave de l'évolution de $w_f$ en fonction de la vitesse indiquent que la teneur en eau finale est relativement indépendante de la vitesse pour notre machine de laboratoire.

Du point de vue visuel, la boue de kaolinite déshydratée sans application de pression se présente sous la forme de « rouleaux » de texture plastique. Cette forme et texture sont plus ou moins liées à l'eau restante entre les flocs. Par la suite, la teneur en eau finale peut être réduite en appliquant une pression, voir figure 5-10.

***Teneur en eau finale ($w_f$) selon la pression appliquée (P)***

Les résultats des essais de déshydratation obtenus sur le matériau argileux, avec une vitesse constante de 2,9 tr/min et une pression variable, révèlent une diminution de la teneur en eau finale d'environ 48% par rapport à la teneur en eau initiale, quelle que soit la pression appliquée, voir figure 5-31.B.

En comparant les valeurs de la teneur en eau finale, en utilisant une vitesse de rotation des disques de 2,9 tr/min, ce prototype de presse permet de baisser jusqu'à 50% de la teneur en eau du matériau argileux sous l'application d'une pression de 70 kPa et 130 kPa.

L'aspect visuel du matériau argileux déshydraté, en « morceaux » rectangulaires de texture épaisse, indique que l'application d'une pression permet d'éliminer une partie de l'eau qui reste dans l'intérieur des flocs.

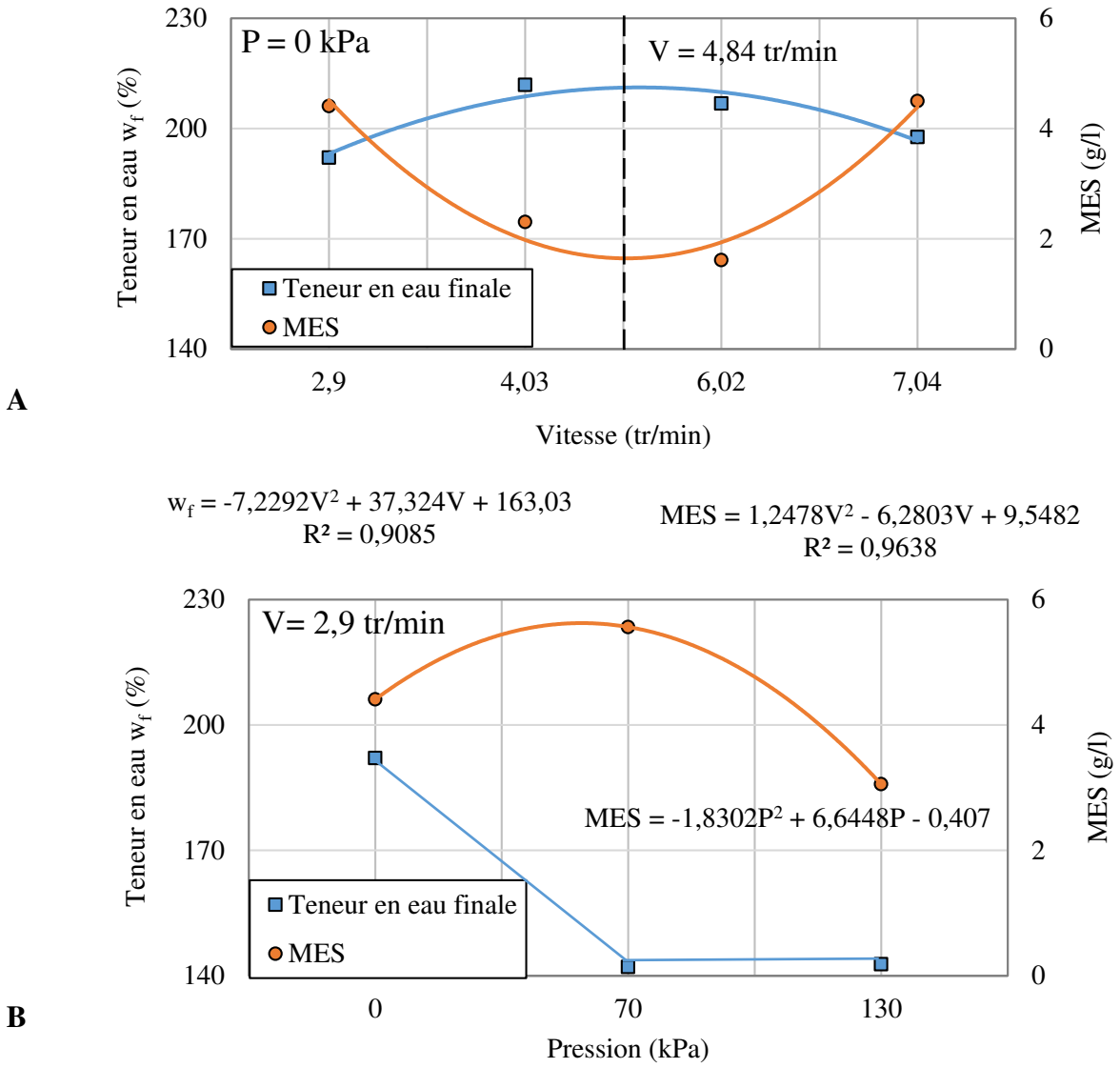



*Figure 5-31. Relations entre la teneur en eau finale et la MES selon la vitesse de rotation des disques (figure A) et la pression (figure B) pour la kaolinite.*

***Aspect visuel des surnageants après les essais de déshydratation***

Les résultats relatifs à la matière en suspension obtenus après le passage de la boue de kaolinite dans la presse à boues KDS® montrent des surnageants de couleur translucide et blanche. Ce fait est lié à la présence de petits flocs qui traversent les espaces existants entre les disques et la présence de colloïdes dans le mélange. Le degré d'opacité est indépendant de la vitesse de rotation des disques et de la pression appliquée, voir figure 5-10.

***Matière en suspension (MES) selon la vitesse de rotation des disques elliptiques (V)***

La courbe de l'évolution de la matière en suspension avec la vitesse de rotation des disques, sans pression, débute avec une importante valeur de la MES égale à 4,4 g/l pour une vitesse réduite de 2,90 tr/min. Ensuite, ces valeurs diminuent progressivement pour des vitesses

de 4,03 tr/min et de 6,02 tr/min avec des valeurs respectives de 2,3 g/l et 1,61 g/l. Puis, la matière en suspension augmente de nouveau pour atteindre une valeur maximale de 4,5 g/l pour la vitesse la plus élevée, voir figure 5-31.A.

La forte valeur de la MES, en choisissant une vitesse de rotation de disques elliptiques de 2,9 tr/min, peut s'expliquer par le fait que plus la vitesse de rotation de disques serait trop réduite, plus le temps de déshydratation augmente et plus la concentration de la MES est importante. L'augmentation de la matière en suspension avec la vitesse de 7,04 tr/min paraît plus être liée à une mauvaise floculation de la boue.

***Matière en suspension (MES) selon la pression appliquée (P)***

En ce qui concerne l'évolution de la MES et de la pression appliquée, la valeur de MES la plus importante est obtenue en appliquant une pression de 70 kPa, avec une valeur de 5,6 g/l. Une part de l'augmentation de la MES résulte de l'application de la pression elle-même. Lorsque le matériau argileux floculé est soumis à une pression, les flocs sont comprimés et écrasés et les plus petites particules peuvent traverser les espaces existants entre les disques elliptiques, voir figure 5-31.B.

La faible valeur de la MES est obtenue avec une pression de 130 kPa, pression supérieure à 70 kPa. Elle est de 3 g/l. Cette baisse de MES serait plutôt à attribuer à une altération dans le processus de floculation à cause d'une mauvaise agitation pendant l'essai de déshydratation comme dans l'essai sans pression, ou soit à une très bonne formation de flocs durant l'essai de déshydratation en appliquant 130 kPa.

***Teneur en eau finale ($w_f$) selon la matière en suspension (MES)***

Les concentrations les plus élevées de la matière en suspension correspondent aux teneurs en eau les plus faibles, voir figures 5-16 et 5-31. La teneur en eau finale tendrait à évoluer de manière inversement proportionnelle à la MES.

### *5.6.2. Matériaux argileux et sableux*

#### *5.6.2.1. Essai de floculation*

***Choix du floculant***

Les résultats de l'essai de floculation sur les matériaux argileux et sableux montrent que la teneur en argile joue un rôle essentiel dans le choix du floculant. Plus le pourcentage d'argile est élevé, plus le mélange est visqueux et plus la densité de charge et le poids moléculaire du floculant sont importants. Le sable a une granulométrie serrée et il décante très vite naturellement sans besoin d'être floculé. Une fois mis en suspension avec le kaolin, le sable décante plus lentement naturellement, la viscosité du mélange devient plus élevée et le mélange a besoin d'un polymère pour floculer les particules d'argile.

Dans ce cas d'étude, les floculants en poudre avec une densité de charge anionique de 5%, 10% et 20% et un ultra haut poids moléculaire permet d'obtenir les plus gros flocs avec un surnageant clair pour les mélanges composés de kaolin avec des pourcentages de sable de 5%, 25% et 50%. Même si les différences de floculation avec trois floculants sont minimales, le floculant « AN 923 VHM » est le plus adéquat pour le mélange « KAO 5 S% » et le floculant « AN 910 VHM » est légèrement meilleur pour les mélanges « KAO 25 S% » et « KAO 50 S% ».

Sachant que le floculant « AN 923 VHM » est le plus adéquat pour le mélange de kaolin avec 5% de sable, plus visqueux et en raison de disponibilité du matériau, il a été choisi pour les trois mélanges.

***Choix de la concentration du polymère***

La concentration de préparation du polymère floculant AN 923 VHM est de 4 g/l. Cette valeur a été sélectionnée en suivant les recommandations de la société SNF FLOERGER. Ceci permet l'obtention d'une consistance du floculant fluide en dessous des limites d'utilisation maximales et un dosage de floculant faible.

***Dosage optimal***

Le mélange de kaolin avec une teneur en sable faible (5%) est plus visqueux que les mélanges de kaolin avec des pourcentages importants de sable, ce qui influe sur la floculation. Moins il y a de sable dans le mélange, plus le mélange est visqueux, plus le dosage efficace de floculant est élevé et plus, l'incorporation du polymère est lente, voir tableau 5-5.

***Précautions pendant l'injection du floculant***

Le polymère doit être injecté à la seringue à petites doses successives. L'agitation doit être suffisamment lente pour tenir intacte la structure des flocs et assurer un bon contact entre le polymère et la boue et convenablement rapide pour empêcher la décantation du matériau à floculer. La vitesse d'agitation dépend de la viscosité de la boue et du floculant et de la résistance des flocs, elle doit être située entre 30 et 200 tr/min.

### *5.6.2.2. Essai de déshydratation*

***Teneur en eau finale ($w_f$) selon la vitesse de rotation des disques elliptiques (V)***

Les résultats de déshydratation mécanique sur les matériaux argileux et sableux montrent que le prototype de laboratoire KDS® permet de réduire environ 30%, 50% et 70% la teneur en eau pour les mélanges de kaolin confectionnés avec 5%, 25% et 50% de sable respectivement, indépendamment de la vitesse de rotation de disques et sans l'application de la pression, voir figure 5-17.

Les pourcentages de réduction de la teneur en eau indiquent que les teneurs en eau finales les plus réduites sont obtenues avec les mélanges les plus sableux. Ceci peut être expliqué par

le fait que le sable est infloculable et il ne retient pas l'eau. Pendant le processus de déshydratation mécanisée, une partie de l'eau du mélange est évacuée par égouttage et l'autre partie est retenue dans les flocs de kaolin. La teneur en eau finale est directement proportionnelle à la quantité d'argile.

Les valeurs de teneur en eau finales pour les mélanges avec un pourcentage de sable de 25% et 50% sont légèrement plus faibles en appliquant des vitesses de rotation réduites comprises entre 2,90 tr/min et 4,84 tr/min. Le mélange composé de 95% de kaolin et 5% de sable a la teneur en eau finale la plus faible avec une vitesse de 7,04 tr/min. Les petites variations de la teneur en eau finale selon la vitesse de rotation des disques choisie, inférieures à 7% indiquent que la teneur en eau finale est indépendante de la vitesse de rotation des disques.

Le prototype de presse utilisé permet de déshydrater des matériaux sableux et argileux. Les grains de sable fin des mélanges risquent de rester coincés entre les espaces existants entre les disques elliptiques. Ceci peut abîmer les disques de la presse et entraîné un problème de bruit. Ce bruit a été identifié pour les mélanges confectionnés avec une teneur en sable minimale de 25% lors du passage de la boue par la presse KDS®. Ceci dépend de la granulométrie du sable fin.

***Teneur en eau finale ($w_f$) selon la pression appliquée (P)***

L'évolution de la teneur en eau finale selon la pression appliquée pour les matériaux argileux et sableux, avec une vitesse constante de 2,9 tr/min, indique que le prototype de laboratoire KDS® permet de diminuer autour de 50%, 61% et 73% la teneur en eau des mélanges « KAO 5% S », « KAO 25% S » et « KAO 50% S » respectivement, en appliquant des pressions comprises entre 70 kPa et 130 kPa, voir figure 5-18.

La faible variation de la teneur en eau après application d'une pression, qui est inférieure à 4%, démontre que la teneur en eau finale est indépendante de la pression appliquée à l'échelle du prototype utilisé. L'application de la pression pendant la déshydratation des matériaux argileux et sableux permet de baisser d'environ 51%, 29% et 7% de la teneur en eau pour les mélanges confectionnés à base de kaolin et des teneurs en sable respectives de 5%, 25% et 50%. La diminution en eau sous l'application d'une pression est inversement proportionnelle à la quantité de sable du mélange, voir figure 5-18.

***Teneur en eau finale ($w_f$) selon la matière en suspension (MES)***

En analysant les matériaux argileux et sableux individuellement, les faibles concentrations de la matière en suspension correspondent à des teneurs en eau finales élevées, voir figure 5-22.

***Aspect visuel des surnageants après les essais de déshydratation***

En ce qui concerne l'aspect visuel des eaux résiduaires récupérées après le passage des matériaux argileux et sableux par la presse à boues KDS®, il est noté qu'elles présentent une couleur translucide et blanche composée de flocs agglomérés fins et de sable, voir figure 5-21.

La couleur translucide du surnageant est reliée à la présence de colloïdes dans le mélange et des petits flocs qui traversent les espaces existants entre les disques elliptiques. Une partie du sable est récupérée dans l'eau résiduelle, ceci est dû à la granulométrie du sable utilisé. Le sable de Fontainebleau a une taille des grains uniforme et petite avec un $D_{50}$ de 0,24 mm. Le degré de turbidité est indépendant de la vitesse de rotation des disques et de la pression appliquée.

***Matière en suspension (MES) selon la vitesse de rotation des disques elliptiques (V)***

L'évolution de la concentration de la matière en suspension des matériaux argilo-sableux avec la vitesse de rotation des disques montre que les teneurs en eau finales les plus faibles des mélanges « KAO 5% S » et « KAO 50% S » sont obtenues avec une vitesse de 4,84 tr/min. La vitesse de rotation de disques de 7,04 tr/min donne la teneur en eau finale la plus faible pour le mélange composé de 25% de sable et de 75% de kaolin, voir figure 5-19.

Les concentrations de la MES les plus importantes sont acquises avec les vitesses de rotation des disques de 2,9 tr/min, 4,84 tr/min et 7,04 tr/min pour les mélanges de 5%, 25% et 50% de sable respectivement. Ces résultats peu nombreux sont difficiles à interpréter. Cependant le modèle de laboratoire comme la machine à échelle industrielle, ne sont pas dédiés à la déshydratation de matériaux fins sableux.

La variation de la concentration de la MES pour tous les mélanges est inférieure à 0,3 g/l. Ceci dénote que la matière en suspension est indépendante de la vitesse de rotation de disques.

La concentration de la matière en suspension est ici directement proportionnelle à la teneur en sable du mélange. Plus la quantité de sable est importante, plus la MES est élevée.

***Matière en suspension (MES) selon la pression appliquée (P)***

L'évolution de la concentration de la matière en suspension avec la pression appliquée pour les matériaux argileux et sableux révèle que l'augmentation de la MES est liée à l'augmentation de la pression. L'augmentation de la MES est directement proportionnelle à la pression pour les mélanges « KAO 25% S » et « KAO 50% S ». Elle tend à rester stable pour le mélange « KAO 5% S », voir figure 5-20.

L'évolution de la MES par rapport à la pression appliquée de 70 kPa au mélange « KAO 50% S » montre une valeur minimale de 1,69 g/l. Cette faible valeur est difficile à expliquer, étant donné aussi que les données sont peu nombreuses.

### *5.6.3. Sédiments de barrage*

#### *5.6.3.1. Essai de floculation*

Les résultats des essais de floculation révèlent l'importance du choix du floculant le plus adéquat pour le matériau à déshydrater et adapté à la machine de déshydratation utilisée. Le floculant intervient dans la préparation avant la déshydratation et indirectement dans le coût de la déshydratation. Le choix du polymère est primordial comme la quantité de floculant qui doit

être la plus réduite afin de diminuer le cout de la déshydratation. Un compromis entre la matière en suspension et la teneur en eau finale est à trouver pour assurer au mieux la déshydratation des sédiments et le recyclage de l'eau.

***Choix du floculant***

Lors d'une première phase d'essais de floculation, le polymère cationique en émulsion « EM 340 HIB » a permis de former les plus grands flocs et d'avoir un surnageant clair pour tous les sédiments de barrage testés. Néanmoins, le dosage optimal du floculant risque d'être le plus élevé, voir tableau 5-9. Dans une première approche, une série de remarques ont été formulées. Elles sont rappelées dans le tableau ci-après :

*Tableau 5-9. Observations réalisées après l'exécution des essais effectués au sein de SNF FLOERGER (CARLE, 2017a.).*

| | **AN 923 VHM** (poudre à préparer entre 0,5 et 1 g/l) | **FO 4350 SH** (poudre à préparer entre 2 et 4 g/l) | **EM 340 HIB** (émulsion à préparer entre 3 et 5 g/l) |
|---|---|---|---|
| Avantages | - Dosage modéré ;<br>- Très connu dans les industries extractives. | - Surnageant clair si les flocs ne passent pas à travers les disques et barres. | - Floc massif, résistant, compressible ;<br>- Surnageant clair si les flocs ne passent pas à travers les disques et barres. |
| Inconvénients | - Flocs très fins, risque de passage entre les disques elliptiques ou à la compression. | - Dosage plus élevé qu'un anionique ;<br>- Peu connu dans les industries extractives (à l'origine utilisé pour traiter les boues organiques). | - Dosage plus élevé que les autres options ;<br>- Peu connu dans les industries extractives (à l'origine utilisé pour traiter les boues organiques). |

La deuxième phase d'essais de floculation, réalisée au laboratoire M2C, souligne le fait que le polymère « AN 923 VHM », avec des dosages modérés, autour de 5 ml de floculant préparé avec une concentration de 2,5g/l pour chaque litre de mélange « AL-SPO 800% », permet d'obtenir les plus faibles teneurs en eau finales, avec des valeurs aux alentours de 60% pour des teneurs en eau initiale de 800%, sans application de pression et avec une vitesse de rotation des disques de 2,9 tr/min. Cependant, le surnageant est très trouble, voir figure 5-23.

Dans ces travaux de recherche, un compromis entre les teneurs en eau finales faibles et les concentrations de matières en suspension réduites est requis. Pourtant, le floculant « AN 923 VHM » n'est pas le polymère le plus adéquat.

Les résultats de la deuxième phase d'essais de floculation confirment ceux obtenus lors de la première phase. Les plus gros flocs résistants ont été formés avec le floculant « EM 340 HIB ». D'autre part, ce polymère contribue à améliorer la qualité de l'eau collectée. Le

surnageant présente de faibles MES après le passage par la presse à boues KDS®. Ainsi, il semble être le polymère le plus adéquat pour ces sédiments.

***Concentration du floculant***

La concentration choisie pour le floculant « EM 340 HIB » est de 5 g/l. Ce dosage permet d'avoir une concentration en matière active d'environ 2,5 g/l. Cette concentration permettait de réduire le dosage de ce polymère. Elle a été sélectionnée en suivant les recommandations de la société SNF FLOERGER, voir tableau 5-6.

***Dosage optimal***

Le dosage optimal varie entre 20 ml et 40 ml pour chaque litre de boue avec des teneurs en eau comprises entre 400% et 800%, voir tableau 5-8. Cette variation de dosage est plutôt liée aux propriétés physico-chimiques et minéralogiques des sédiments.

Le sédiment breton « BR-SAI » a le plus faible dosage de floculant par rapport aux sédiments alpins : 20 ml pour chaque litre de boue. Ce « faible » dosage peut être lié soit à la faible masse volumique de ce sédiment, avec une valeur de 2,50 g/cm$^3$, soit lié à sa minéralogie. Il possède la teneur la plus élevée en matière organique. Rappelons que le floculant utilisé a une charge cationique. Le surnageant de ce sédiment est parfois translucide et de couleur marron clair. Il est très lié à l'agitation du mélange et au floculant, sa qualité peut être améliorée en injectant des coagulants.

Rappelons que les coagulants sont des particules ayant un diamètre variant entre $10^{-8}$ et $10^{-5}$ m. Ils permettent la déstabilisation des particules afin de les agglomérer et de former des amas floconneux qui améliorent la décantation (COLIN, 2003 ; CABANA, 2011).

Les sédiments alpins ont des dosages similaires. Ce fait est à rapprocher de la similarité entre leurs caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques. À la différence des sédiments bretons, les sédiments alpins ont des surnageants clairs et transparents, voir figure 5-24.

***Précautions pendant l'injection du floculant***

Afin de conserver intacte la structure des flocs, et en même temps, assurer un bon contact entre le polymère et la boue, le polymère doit être injecté à la seringue à petites doses successives. La floculation doit être opérée par agitation douce à la cuillère jusqu'à floculation optimale.

***5.6.3.2. Essai de déshydratation***

***Teneur en eau finale ($w_f$) selon la vitesse de rotation des disques elliptiques (V)***

Sur la figure 5-25, on observe quelle que soit la teneur en eau initiale du mélange, avec le dosage adéquat de floculant, les teneurs en eau finales obtenues sont indépendantes de la

vitesse sélectionnée. Néanmoins, des petites variations de la teneur en eau finale selon la vitesse de rotation des disques et du type de sédiment à déshydrater peuvent être observées.

La presse à boues KDS® permet de réduire la teneur en eau initiale des sédiments autour de 66%, 70%, 74% et 80% pour les sédiments « BR-SAI », « AL-FLU », « AL-CLA » et « AL-SPO » respectivement avec une teneur en eau initiale de 400% et d'environ 82%, 86%, 87% et 90% pour les sédiments « BR-SAI », « AL-FLU », « AL-CLA » et « AL-SPO » respectivement avec une teneur en eau initiale de 800%.

La teneur en eau finale des sédiments avec une teneur en eau initiale de 400% est plus importante que celle obtenue avec une teneur en eau initiale de 800%, hormis le sédiment breton « BR-SAI ». Les mélanges réalisés avec une teneur en eau initiale de 400% sont plus concentrés que ceux confectionnés avec 800%. La concentration du mélange est inversement proportionnelle à l'eau libre restant autour des flocs. Plus l'eau libre est élevée, plus elle sera évacuée par égouttage avec la presse à boues KDS®.

Le sédiment breton « BR-SAI » a les valeurs des teneurs en eau finales les plus importantes. Les teneurs en eau finales élevées du sédiment « BR-SAI » peuvent être liées au fait que ce sédiment a les plus importantes teneurs en matière organique (6,61%) et en argile (VBS= 0,62 g/100g). Le sédiment « AL-FLU » présente les pourcentages plus élevés de matière organique (1,54%) et des argiles (VBS= 0,51 g/100g) parmi les sédiments alpins. Le sédiment « AL-FLU » a une teneur en eau finale relativement élevée. Par ailleurs, ce sont les sédiments les plus plastiques. Rappelons que les sédiments avec des pourcentages d'argile et/ou de matière organique relativement élevés présentent des difficultés pour éliminer l'eau. Ceci est dû à la capacité de rétention d'eau par les argiles et la matière organique. Cette eau est retenue dans les flocs.

Les plus faibles valeurs de la teneur en eau finale sont obtenues avec une vitesse de rotation de disques de 2,9 tr/min, elles concernent le sédiment « AL-FLU », quelle que soit sa teneur en eau initiale, et les sédiments « AL-CLA » et « AL-SPO » déshydratés à 400% d'eau et du sédiment « BR-SAI » avec une teneur en eau initiale de 800%. Les teneurs en eau finales les plus petites sont acquises avec une vitesse de rotation de disques de 7,04 tr/min pour les sédiments « BR-SAI » à 400% et « AL-CLA » à 800%.

La forme de « rouleaux plastiques » des sédiments déshydratés indique que la teneur en eau finale peut être réduite en appliquant de la pression.

***Teneur en eau finale ($w_f$) selon la pression appliquée (P)***

Les résultats des essais de déshydratation sur les sédiments de barrage avec application d'une pression et à vitesse constante de 2,9 tr/min montrent que l'application d'une force de compression baisse considérablement la teneur en eau des sédiments, voir figure 5-26.

Les valeurs de teneur en eau finales les plus faibles sont obtenues en appliquant des pressions de 130 kPa pour les sédiments « BR-SAI » et « AL-FLU » et de 70 kPa pour les sédiments « AL-CLA » et « AL-SPO ». Cependant, ces résultats indiquent qu'il n'y a pas une

grande variation selon les pressions appliquées à l'échelle du prototype de presse utilisée en laboratoire. Ces variations sont inférieures à 1,5%, 3%, 4,5% et 15% pour les sédiments « AL-CLA », « AL-SPO », « AL-FLU » et « BR-SAI » respectivement.

L'application d'une force de compression sur les sédiments de barrage floculés est capable de réduire entre 13,8% et 45,3% les pourcentages de teneur en eau finales selon le type de sédiment à déshydrater, voir tableau 5-10. Ces réductions interviennent après floculation et passage des sédiments sur la machine à déshydrater pour une pression nulle.

En appliquant des pressions comprises entre 70 kPa et 130kPa, la presse à boues KDS® permet de réduire la teneur en eau initiale des sédiments autour de 76% ± 2%, de 80% ± 1%, de 83% et de 84% ± 1% pour les sédiments « BR-SAI », « AL-FLU », « AL-CLA » et « AL-SPO » respectivement avec une teneur en eau initiale de 400% et vers 85%± 1%, 89%, 91% et 92% pour les sédiments « BR-SAI », « AL-FLU », « AL-CLA » et « AL-SPO » respectivement avec une teneur en eau initiale de 800%.

Les variations les plus grandes observées de la teneur en eau finale concernent les sédiments dont les teneurs en matière organique et en argiles sont les plus importantes. Ce sont les sédiments « BR-SAI » et « AL-FLU ». L'application d'une pression permet d'extraire l'eau des flocs. Plus les teneurs en argiles et en matière organique sont élevées, plus il y a d'eau rétentionnées dans les flocs et, plus de pression sera nécessaire pour l'évacuer.

*Tableau 5-10. Récapitulatif des variations de la teneur en eau finale ($\Delta w_f$) selon la pression appliquée pour une vitesse de 2,9 tr/min.*

| **Sédiment** | **Pression (kPa)** | **$w_f$** | | **$\Delta w_f$[1]** | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **$w_0$ = 400%** | **$w_0$ = 800%** | **$w_0$ = 400%** | **$w_0$ = 800%** |
| BR-SAI | 0 | 135,25 | 143,27 | - | - |
| | 70 | 104,73 | 121,51 | 30,52 | 21,76 |
| | 130 | 89,92 | 113,54 | 45,33 | 29,73 |
| AL-FLU | 0 | 108,90 | 107,40 | - | - |
| | 70 | 80,23 | 90,55 | 28,67 | 16,85 |
| | 130 | 75,76 | 86,13 | 33,14 | 21,27 |
| AL-CLA | 0 | 99,62 | 105,13 | - | - |
| | 70 | 67,80 | 74,37 | 31,82 | 30,76 |
| | 130 | 69,07 | 75,60 | 30,55 | 29,53 |
| AL-SPO | 0 | 82,20 | 80,76 | - | - |
| | 70 | 65,99 | 63,46 | 16,21 | 41,67 |
| | 130 | 68,38 | 66,54 | 13,82 | 38,59 |

***Note** : [1] La variation de la teneur en eau finale ($\Delta w_f$) correspond à la différence de $w_f$ selon la pression appliquée en utilisant la même vitesse de rotation de disques (V=2,9 tr/min).*

***Teneur en eau finale ($w_f$) selon la matière en suspension (MES)***

L'évolution de la teneur en eau finale pour les sédiments de barrage avec la matière en suspension indique que la teneur en eau finale est inversement proportionnelle à la concentration de la matière en suspension, voir figure 5-30.

***Aspect visuel des surnageants après les essais de déshydratation***

La presse à boues KDS® permet de collecter des eaux résiduelles claires avec la présence des flocs agglomérés fins. La quantité de flocs récupérée dans le surnageant est indépendante de la vitesse de rotation des disques et de la pression appliquée. Le nombre de flocs accumulés dans l'eau résiduelle dépend essentiellement du floculant choisi et de la qualité du processus de floculation. Plus les flocs sont résistants, moins ils traversent les espaces entre les disques elliptiques, voir figure 5-29.

L'aspect visuel des surnageants est aussi liée aux caractéristiques physico-chimiques du matériau à déshydrater. Ceci peut expliquer les différences visuelles avec les surnageants des mélanges confectionnés à base de kaolin.

***Matière en suspension (MES) selon la vitesse de rotation des disques elliptiques (V)***

De manière générale, deux types de comportement sont à distinguer selon la teneur en eau initiale du sédiment à déshydrater.

L'évolution de la matière en suspension selon la vitesse de rotation des disques elliptiques, sans application de pression indique que la matière en suspension des sédiments qui ont de faibles teneurs en eau initiale, est sensiblement inversement proportionnelle à la vitesse de rotation des disques. Les plus faibles MES sont obtenues avec les plus grandes vitesses de rotation, hormis le sédiment « AL-CLA ». À faibles vitesses, la durée de déshydratation est plus importante, cette durée pourrait expliquer ce comportement, voir figure 5-27.B.

Les valeurs des concentrations de la MES du sédiment « AL-CLA » sont assez proches pour les vitesses de rotation des disques de 4,84 tr/min et 7,04 tr/min. La concentration de la MES pour le sédiment « BR-SAI » est plus ou moins constante indépendamment de la vitesse sélectionnée.

En comparant les résultats de la concentration de MES avec ceux obtenus dans les essais de déshydratation de la kaolinite, le comportement des sédiments est différent de celui de la kaolinite. Pour les sédiments, les plus importantes concentrations sont obtenues avec de faibles vitesses, ce qui n'est pas le cas du kaolin. La différence de ce comportement pourrait être liée aux différences des propriétés physico-chimiques.

Il est à noter que l'évolution de la MES selon la vitesse de rotation des disques elliptiques, sans application de pression, pour les sédiments à teneur en eau élevée est presque constante indépendamment de la vitesse sélectionnée. Même si la teneur en eau finale la plus faible est obtenue avec une vitesse de 4,84 tr/min, les variations de la concentration de la MES sont

inférieures à 5g/l. La valeur élevée de la concentration de MES pour le sédiment « BR-SAI » avec une vitesse de 4,84 tr/min (MES = 8,72 g/l) pourrait être due à une mauvaise floculation, causée par une agitation mal réalisée, voir figure 5-27.C.

Le sédiment «AL-SPO » possède les plus importantes concentrations de matière en suspension indépendamment de sa teneur en eau initiale. Ceci peut être dû au fait que ce sédiment est très peu argileux (VBS = 0,39 g/100g) et le moins plastique.

***Matière en suspension (MES) selon la pression appliquée (P)***

L'évolution de la concentration en matière en suspension avec les pressions appliquées, signale une augmentation de la MES pour tous les sédiments de barrage, hormis les sédiments « AL-FLU » et « AL-SPO » déshydratés avec une teneur en eau initiale de 400%. Les sédiments « AL-FLU » et « AL-SPO » déshydratés avec une teneur en eau initiale de 400% voient diminuer leur concentration de la MES avec la pression. Ces résultats sont pour une part à relier au fait que les flocs de ces sédiments ont causé un colmatage des espaces entre les disques sous l'application de la pression (taille et résistance des flocs).

L'augmentation de la MES avec la pression est à relier à la teneur en eau initiale des sédiments. Les sédiments déshydratés à 400% de teneur en eau, voient leurs valeurs maximales de MES sous une pression de 70 kPa, voir figure 5-28.B. En revanche, l'augmentation de la concentration de la MES est directement proportionnelle à la pression appliquée pour les sédiments « BR-SAI » et « AL-CLA » avec une teneur en eau initiale de 800%. Ces derniers sédiments ont leurs concentrations maximales avec une pression de 130 kPa, voir figure 5-28.C.

L'effet d'appliquer une pression aux sédiments floculés fait augmenter les concentrations de MES. Par contre les faibles différences des valeurs de MES obtenues, inférieures à 6 g/l, en faisant varier les pressions, indiquent que la concentration de la MES est indépendante de la pression appliquée.

## *5.7. INFLUENCE DU FLOCULANT EN VALORISATION MATIÈRE*

L'influence du floculant en valorisation matière après leur passage par la presse à boues KDS® a été analysée en comparant la résistance en compression simple ($R_c$) d'une première série de mélanges confectionnés à base de sédiments « bruts » et une deuxième série de mélanges élaborés à base de « sédiments déshydratés et floculés ». Les essais de détermination de la résistance en compression simple ont été réalisés au sein de l'ESITC à Caen et au laboratoire de la DDE à Carpiquet.

### *5.7.1. Matériaux utilisés pour les mélanges*

Les matériaux nécessaires à l'élaboration des mélanges sont du ciment et de la chaux. Leurs caractéristiques principales, décrites dans les paragraphes suivants, ont été obtenues auprès des fournisseurs.

#### *5.7.1.1. Le ciment*

Le ciment est un liant hydraulique, une matière pulvérulente, formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte homogène et plastique, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées appelées agrégats ou granulats.

Le ciment sélectionné pour la réalisation des mélanges est le ciment CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R CE CP1. Le CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R CE CP1 est un ciment Portland au calcaire, il est formulé pour des travaux courants de béton armé, non soumis à un environnement agressif. Il est composé de 87% clinker plus précisément de 68% alite ($C_3S$), de 11% belite ($C_2S$) et de 8% aluminate ($C_3A$). Il contient entre 8 % et 13 % laitier de haut-fourneau (S) et de calcaire (LL) et un maximum de 5% de constituants secondaires. Il a une résistance à la compression courante à 28 jours de 48 MPa.

#### *5.7.1.2. La chaux*

La « chaux vive » est la chaux (CaO) sortie du four à chaux. Elle se présente sous la forme d'une poudre blanche légère. Ce matériau est très utilisé dans le traitement des sols afin d'améliorer les sols et/ou les sédiments de manière immédiate et à long terme.

De façon immédiate, le traitement à la chaux provoque un abaissement de la teneur en eau et une amélioration de la capacité portante provoqués par l'apport d'ions $Ca^{2+}$ et $OH^-$ aux sols et/ou sédiments en provoquant un échange des cations $K^+$ et $Na^+$ par $Ca^{2+}$ et une floculation des particules argileuses (SETRA-LCPC, 1972 et ANGER, 2014). Par ailleurs, le traitement à la chaux provoque une diminution importante de l'indice de plasticité liée à une augmentation considérable de la valeur de la limite de plasticité et une faible variation de la limite de liquidité. Cela peut être traduit par une diminution de la plasticité et une solidification du sol et/ou sédiments, en facilitant leur compactage et en améliorant leur capacité portance (SETRA-LCPC, 2000 et CIMBETON, 2009).

À long terme, elle permet *(i)* de garder le sol à des pH de 9 à 11 en minimisant la solubilité des métaux (GARCÍA et al., 2004), *(ii)* de diminuer le gonflement des argiles en modifiant leur charge superficielle et *(iii)* la liaison des particules argileuses (SILITONGA, 2010). Par ailleurs, la réaction de la chaux sur les argiles provoque la consommation des argiles et la formation de nouveaux minéraux aux propriétés liantes (SILITONGA, 2010).

#### *5.7.1.3. Les sédiments*

Les sédiments utilisés pour l'élaboration des mélanges peuvent être divisés en deux groupes : un premier groupe de sédiments désignés comme des sédiments de référence ou « témoins », ils sont appelés sédiments « bruts » et un deuxième groupe de sédiments dénommés sédiments « floculés », ils sont issus de la déshydratation mécanisée.

Les sédiments « bruts » correspondent aux sédiments de Flumet « AL-FLU », de Clapiers « AL-CLA », de Serre-Ponçon « AL-SPO » et de Saint-Aignan « BR-SAI », avant l'injection de floculant.

Les sédiments « floculés » sont les sédiments mentionnés ci-dessus après leur passage par la presse à boues KDS®. Ces sédiments ont été séchés à l'étuve, broyés à l'aide d'un rouleau et tamisés avec un tamis de 2 mm de maillage. Ces opérations permettent de casser la structure des sédiments séchés et d'obtenir un matériau homogène.

### *5.7.2. Formulation des mélanges et codification*

Les mélanges élaborés avec les sédiments « bruts » ont été nommés par le nom du sédiment utilisé : « AL-FLU », « AL-CLA », « AL-SPO » et « BR-SAI ». Les mélanges confectionnés avec des sédiments floculés ont été référenciés par la lettre « F » suivie du nom du sédiment utilisé, soit respectivement : « F-AL-FLU », « F-AL-SPO », « F-AL-CLA » et « F-BR-SAI ».

La formulation choisie pour tous ces mélanges concerne la réutilisation de sédiments en matériau routier. Cette formulation a été prédéfinie et utilisée par ANGER (2014). Elle est de 3% de chaux, 3% de ciment et 94% de sédiment. Ces proportions s'entendent en pourcentages massiques.

La teneur en eau des mélanges « BR-SAI » et « F-BR-SAI » est de 55%. La teneur en eau pour les autres mélanges est de 40 %. Ces pourcentages d'eau permettent d'obtenir un mélange facilement compactable, proche de l'optimum Proctor.

### *5.7.3. Préparation des échantillons*

Les éprouvettes ont été réalisées dans des moules cylindriques d'élancement 2 en PVC de 68 mm de hauteur pour 34 mm de diamètre. Afin de faciliter le démoulage, les moules cylindriques ont été fendus sur une génératrice et maintenus fermés à l'aide de colliers métalliques.

Les mélanges sont malaxés mécaniquement à l'aide d'un malaxeur à vitesse lente, jusqu'au moment où le mélange est homogène. Ensuite, le mélange est introduit directement dans les éprouvettes, il est rempli en trois couches ; chaque couche est compactée pour 10 chocs réalisés avec une tige d'une masse de 73 grammes. Par la suite, la surface de l'éprouvette est arasée. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées à l'air libre et à la température ambiante environ 20°C ±2°C.

Pour assurer un bon démoulage, les moules des éprouvettes doivent être badigeonnés avec de l'huile de décoffrage pour éviter que les échantillons ne se cassent ou s'effritent à cause de l'adhérence du matériau sur la paroi du moule.

### *5.7.4. Essai de résistance en compression simple*

#### *Définition*

L'essai de compression simple ou compression uniaxiale est un essai conventionnel en laboratoire qui permet de déterminer la résistance maximale en compression simple ($R_c$) d'un échantillon soumis à une force de compression ($F_c$), voir figure 5-32.

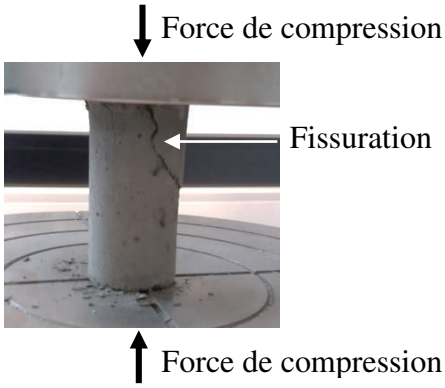



*Figure 5-32. Exemple d'essai de résistance en compression simple.*

#### *Principe de l'essai*

Le protocole de cet essai est décrit dans la norme NF EN 13286-41. Dans cet essai, l'éprouvette est placée entre le plateau de la presse et un support muni d'un capteur d'effort. Une force axiale de compression est appliquée jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Ces valeurs sont enregistrées par le dispositif d'acquisition des données, donnant les résultats sous la forme d'une courbe « Contrainte / Déformation axiale » et « Contrainte / Temps ». La résistance en compression simple maximale ($R_c$) est déduite à partir de la force maximale ($F_c$) en suivant l'équation 5.3.

$$R_c = \frac{F_c}{S_{éprouvette}} \qquad [5.3]$$

avec les notations suivantes :

$R_c$ : Résistance en compression simple ;

$F_c$ : Force axiale de compression ;
$S_{éprouvette}$ : Section de l'éprouvette.

La déformation axiale ($\varepsilon_a$) indique la variation relative des dimensions d'un matériau, lorsque la sollicitation est purement axiale. Elle peut être calculée en suivant l'équation 5.4.

$$\varepsilon_a = \frac{L - L_0}{L_0} \quad [5.4]$$

avec les notations suivantes :
$\varepsilon_a$ : Déformation axiale;
$L_0$ : Longueur initiale ;
L : Longueur.

Le module de Young ou module d'élasticité longitudinale (E) est la constante qui permet de relier la contrainte de compression et la déformation d'un matériau élastique isotrope. Il peut être calculé d'après la loi de Hooke, voir l'équation 5.5.

$$E = \frac{R_c}{\varepsilon_a} \quad [5.5]$$

### *5.7.5. Résultats de l'essai de résistance en compression simple*

L'évolution de la résistance en compression simple des mélanges étudiés est synthétisée sur la figure 5-33. Sur cette figure, on constate que les mélanges élaborés à base de sédiments « bruts » présentent des résistances en compression simple les plus élevées à 7 et 14 jours de cure, sauf pour le mélange « AL-SPO » à 14 jours.

Mais les résistances en compression simple des mélanges confectionnés à base de sédiments « floculés » sont plus élevées à 28 jours de cure, à l'exception du mélange « F-AL-SPO » dont la résistance est d'environ 2% inférieure à celle du mélange « AL-SPO », voir tableau 5-9. Cette différence de comportement peut être liée au fait que le sédiment « AL-SPO » a été déshydraté avec un dosage de floculant très important (40 ml pour chaque litre de boue préparée avec des teneurs en eau initiales de 400% et 800%).

La variation de résistance en compression simple ($\Delta R_c$) pour les mélanges de sédiments bruts et floculés sont récapitulés dans le tableau 5-11. Les variations de $R_c$ les plus importantes à 7, 14 et 28 jours sont observées avec les mélanges élaborés avec les sédiments : « AL-FLU », « AL-SPO » et « BR-SAI ».

L'importante valeur de $\Delta R_c$ à 28 jours obtenue avec les mélanges élaborés avec le sédiment « BR-SAI » peut être due à un compactage mal réalisé. Le sédiment « BR-SAI » a le dosage de floculant le plus faible. Le mélange « AL-FLU 400% » et les mélanges confectionnés à base du sédiment « AL-SPO » ont les dosages de floculant les plus importants, correspondant à 40 ml pour chaque litre de boue préparée avec des teneurs en eau initiale de 400%.

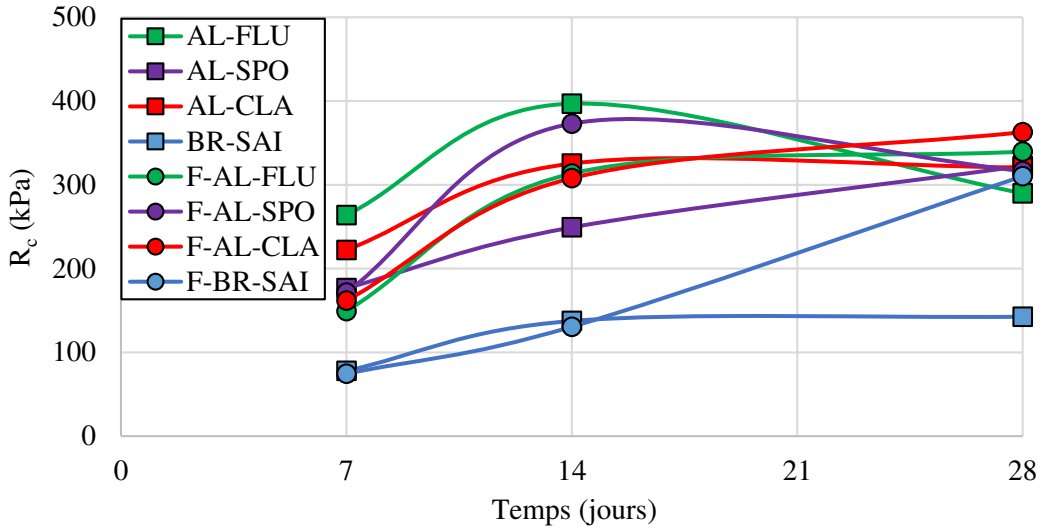



*Figure 5-33. Évolution de la résistance en compression simple des mélanges étudiés d'après HERRERA TARRILLO (2018).*

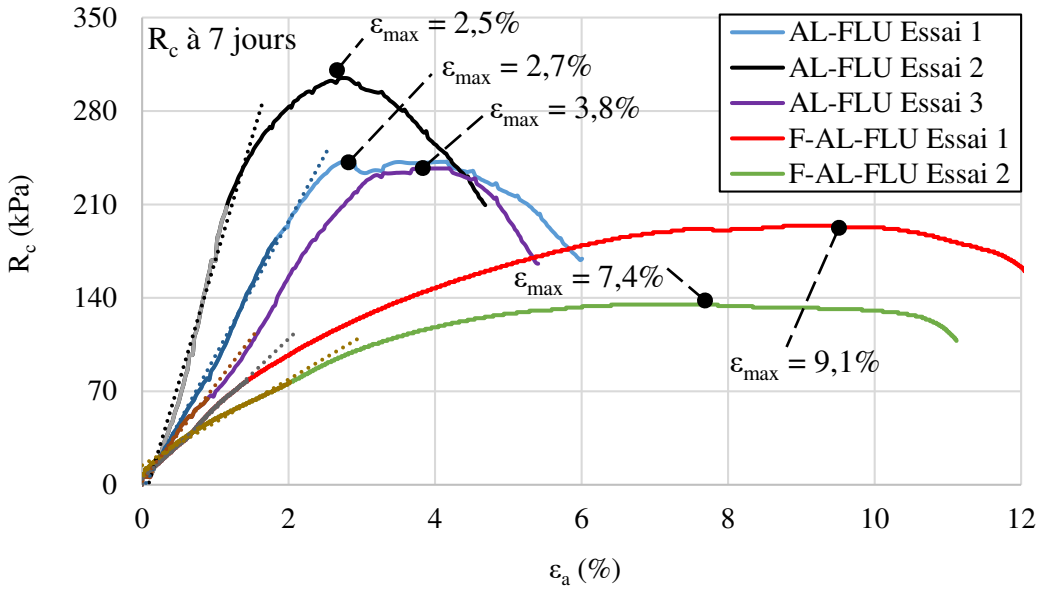
*Tableau 5-11. Variations relatives de la résistance en compression simple des mélanges étudiés.*

| $\Delta R_c$ [1](%) | **AL-FLU et F-AL-FLU** | **AL-SPO et F-AL-SPO** | **AL-CLA et F-AL-CLA** | **BR-SAI et F-BR-SAI** |
|---|---|---|---|---|
| À 7 jours | 43,4 | 3,0 | 27,1 | 4,5 |
| À 14 jours | 21,0 | -49,6 | 5,4 | 5,1 |
| À 28 jours | -17,2 | 1,9 | -13,2 | -117,6 |

***Note*** [1] *: $\Delta R_c = (R_{cb} - R_{cf}) / R_{cb}$) avec $R_{cb}$ égal à la résistance du mélange à base de sédiment brut et $R_{cf}$ égal à la résistance du mélange à base de sédiment floculé. Si $\Delta R_c$ est positive $R_{cb} > R_{cf}$; dans le cas contraire $R_{cb} < R_{cf}$.*

L'évolution de la contrainte axiale en fonction de la déformation pour les mélanges confectionnés à base des sédiments « AL-FLU » et « AL-SPO » à 7 jours de cure est donnée à titre d'exemple sur la figure 5-34.

Sur la figure 5-34 on peut constater que les mélanges élaborés à base de floculants tendent à avoir des valeurs du module de Young apparent plus faibles que celles des mélanges confectionnés à base de sédiments « bruts ». Plus le module de Young est élevé, plus le matériau est rigide. Les mélanges élaborés à base de sédiments « floculés » ont des valeurs de déformation à la rupture ($\varepsilon_R$) plus élevées que celles élaborés à base de sédiments « bruts ». Plus la déformation à la rupture est élevée plus le matériau est ductile. La valeur moyenne de la déformation à la rupture obtenue avec le mélange « F-AL-FLU », à 7 jours de cure est de 8,25% et celle du mélange « AL-FLU » est de 3%. De même, les valeurs à la rupture, à 7 jours, du mélange « F-AL-SPO » montrent une augmentation moyenne d'environ 1% par rapport au mélange « AL-SPO ».




$R_c$ (AL-FLU Essai 1) = 100,59ε - 3,9676
$R^2$ = 0,9933

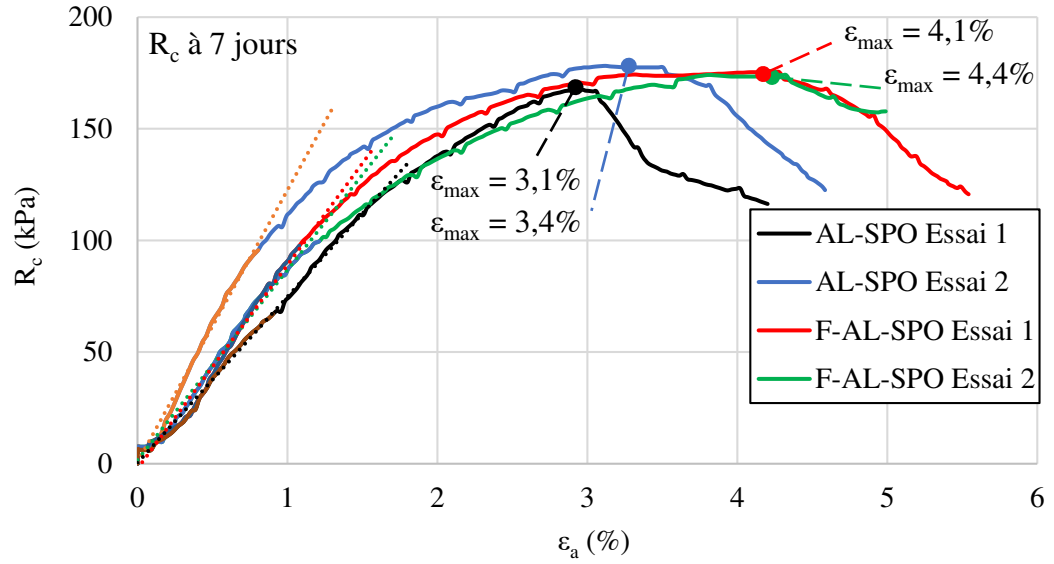
$R_c$ (F-AL-FLU Essai 1) = 52,439ε + 4,4459
$R^2$ = 0,9979

$R_c$ (AL-FLU Essai 2) = 183,81ε - 15,59
$R^2$ = 0,9733

$R_c$ (F-AL-FLU Essai 2) = 32,165ε + 14,621
$R^2$ = 0,9842

$R_c$ (AL-FLU Essai 3) = 71,786ε + 2,8126
$R^2$ = 0,9896

**A**




$R_c$ (AL-SPO Essai 1) = 74,428ε + 0,3663
$R^2$ = 0,9841

$R_c$ (F-AL-SPO Essai 1) = 91,155ε - 2,2335
$R^2$ = 0,983

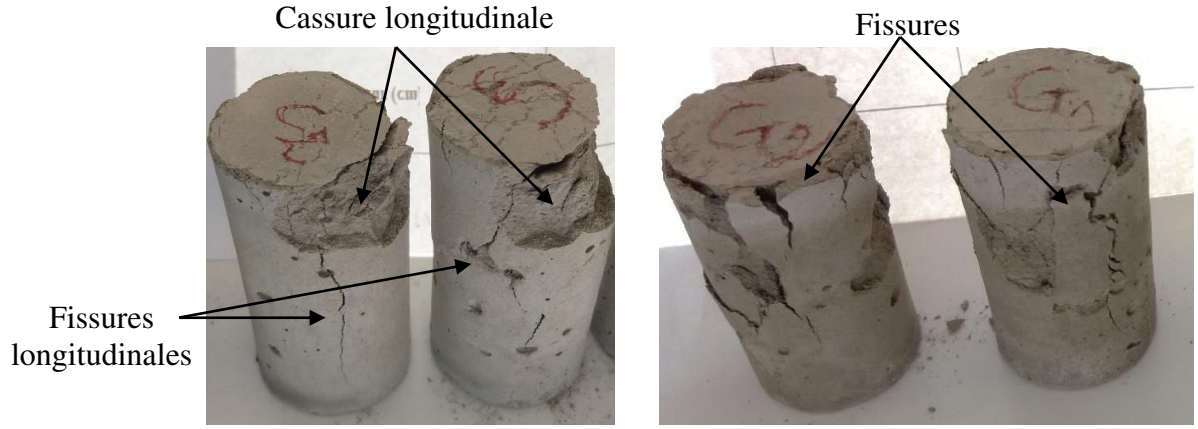
$R_c$ (AL-SPO Essai 2) = 121,83ε + 0,6428
$R^2$ = 0,9895

$R_c$ (F-AL-SPO Essai 2) = 85,184ε + 1,5916
$R^2$ = 0,9907

**B**

*Figure 5-34. Évolution de la contrainte axiale en fonction de la déformation pour les mélanges confectionnés à base des sédiments AL-FLU (figure A) et AL-SPO (figure B).*

En ce qui concerne l'état de rupture des mélanges, les mélanges confectionnés à base de sédiments « bruts » présentent des ruptures localisées comme montré à la figure 5-35.a. Elles sont plus typiques de matériaux fragiles. Les mélanges élaborés à base de sédiments « floculés » ont des ruptures diffuses, voir figure 5-35.b. Elles sont plus indicatrices d'un comportement ductile.




*a) Mélange « AL-SPO » à 7 jours.* *b) Mélange « F-AL-SPO » à 7 jours.*

*Figure 5-35. États de rupture observés pour les mélanges « AL-SPO » et « F-AL-SPO ».*

### *5.7.6. Discussion sur l'influence du floculant sur la résistance en compression simple*

La ductilité correspond à l'aptitude d'un matériau à se déformer de façon permanente avant de se rompre. Plus l'allongement à la rupture est élevé, plus le mélange est considéré comme ductile.

L'effet du floculant a une influence notable sur la ductilité du mélange stabilisé aux liants. Les mélanges à base de sédiments floculés présentent une ductilité plus élevée que les mélanges confectionnés avec des sédiments « bruts ».

En ce qui concerne l'évolution de la résistance en compression simple des mélanges étudiés, il est à noter que le floculant n'a qu'un effet favorable à 28 jours. L'ajout du floculant ferait augmenter la résistance en compression simple à 28 jours. Cette augmentation est de 15% pour les mélanges élaborés avec les sédiments « AL-CLA » et « AL-FLU » et de 117% pour le sédiment « BR-SAI ». Seul un mélange réalisé à base de « AL-SPO » présente une diminution d'environ 2% en ajoutant du floculant.

### *5.8. BILAN*

La déshydratation mécanisée des sédiments est une technique de déshydratation qui permet de réduire la teneur en eau des sédiments, grâce à la combinaison d'actions mécaniques résultant de la gravité, de la filtration, du cisaillement, de la compression, etc… Du fait que cette technique peut être une solution efficace, rapide, peu contraignante vis-à-vis des caractéristiques physico-chimiques des sédiments et indépendante de la météo locale, **elle se présente comme une alternative qui peut résoudre les inconvénients présentés par le séchage naturel**. La forte dépendance des caractéristiques du sédiment et du climat local, l'obtention de produits obtenus pâteux et hétérogènes avec de faibles quantités d'eau déshydratée, les longues périodes de déshydratation qui sont nécessaires pour le séchage naturel, pour le séchage naturel, constituent d'autant d'exemples où la déshydratation mécanisée apporte des solutions et joue un rôle intéressant dans la déshydratation.

Même si les systèmes conventionnels de déshydratation mécanique, comme la centrifugeuse ou le filtre presse, sont les plus utilisés aujourd'hui, un système de travail continu constitue l'atout le plus important de la déshydratation mécanisée des sédiments. **Un système de travail continu permet de réduire le temps de déshydratation en appliquant une méthodologie de déshydratation 24h/24h**. Parmi ces récents procédés, une presse à boues, référencée KDS®, a été proposée pour la déshydratation en continu des sédiments.

La presse à boues KDS®, référencée en France sous l'appellation « EC'eau wave », est une machine de déshydratation composée d'une table à barres oscillantes équipée d'une succession de disques elliptiques et d'une plaque de pression. Elle permet de déshydrater des boues en continu grâce au cisaillement existant entre les disques, les barres oscillantes et la boue, à la compression appliquée par la plaque de pression et à la filtration entre les disques elliptiques et les barres horizontales oscillantes. **Pour des raisons de conception, la presse à boues KDS® n'a jamais été testée avec des matériaux fins comme les sédiments.**

Un plan expérimental a été développé afin d'analyser les paramètres pouvant influer sur le comportement de cette machine et de développer une méthode de travail pour la déshydratation des sédiments avec cette presse. Des matériaux et des sédiments de barrage présentés dans ce chapitre ont été utilisés. Ils concernent un kaolin, du sable de Fontainebleau et des sédiments de barrage de référence « AL-CLA », « AL-FLU », « AL-SPO » et « BR-SAI ». Les résultats obtenus à partir de ce plan expérimental ont été récapitulés dans le présent chapitre. Ils permettent de tirer une série de conclusions qui sont exposées ci-après.

Dans la première étape du plan expérimental concernant la « préparation du matériau », on peut noter que **le choix du floculant et son dosage jouent un rôle crucial dans la déshydratation mécanique des sédiments**. Ils interviennent dans la préparation du matériau à déshydrater et indirectement dans le coût de la déshydratation. Tout processus de déshydratation avec la presse à boues KDS® doit être accompagné d'un essai de floculation.

Le floculant le plus adapté pour la déshydratation de matériaux et de sédiments avec la presse à boues KDS® est celui qui permet de former les flocs les plus grossiers, les plus résistants et les plus spongieux avec un surnageant clair.

**Le choix du floculant et son dosage sont liés aux caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du matériau à déshydrater**. Les résultats des essais de floculation sur les mélanges réalisés à base de kaolin montrent que la densité de charge, le poids moléculaire et le dosage du floculant sont directement proportionnels à la teneur en argiles du mélange.

Les essais de floculation réalisés avec les sédiments de barrage ont révélé que même si un floculant est le plus adapté pour plusieurs types de sédiments, des petites différences de dosage et/ou de floculation peuvent être remarquées. Ces différences sont liées aux caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du sédiment. Il est constaté que le dosage d'un floculant cationique est moins important lorsque le sédiment est très organique. **Le degré d'opacité du surnageant pour un sédiment, ou matériau argileux, est proportionnel à la teneur en argile ou à la matière organique**. La qualité du surnageant pour les sédiments plus organiques et pour les matériaux argileux peut être améliorée en injectant des coagulants.

Quant à la formation des flocs, il est observé que les flocs les plus grossiers et les plus spongieux sont obtenus avec la kaolinite et les mélanges de matériaux argileux et sableux. **Les matériaux avec une teneur en argile élevée** combinés avec un floculant adéquat **forment des flocs très spongieux avec d'importantes quantités d'eau.** Ceci est lié à l'absorption de l'eau des argiles ; à cause de la quantité d'eau de ces flocs, ils sont assez fragiles. **Les sédiments de barrage** mélangés avec un floculant approprié **forment des flocs plus résistants que ceux obtenus avec la kaolinite. Ces flocs sont plus petits et moins visqueux**.

La deuxième étape de ce plan expérimental relative à la « déshydratation mécanisée avec la machine KDS® » a permis d'identifier les paramètres de cette presse à boues. Le prototype de presse utilisé, doté d'une gamme de onze vitesses de rotation des disques elliptiques, allant de 2,9 tr/min jusqu'à 7,04 tr/min permet d'appliquer une pression maximale de 130 kPa. En raison de la conception de la presse à boues KDS® et des problèmes techniques liés au manque d'homogénéité dans le matériau floculé, le débit d'entrée du matériau à déshydrater n'a pas été possible à mesurer. Pour pallier ce problème, le prototype a été modifié et la section de sortie du réservoir de floculation a été définie comme étant constante. Cette modification et d'autres à apporter, seront récapitulées dans le chapitre 6.

Les résultats des essais de déshydratation mécanisée avec des matériaux argileux et sableux et les sédiments de barrage sont toutefois en nombre limité et rendent toute interprétation délicate. Ce type de presse n'a pas été conçu à l'origine pour la déshydratation des boues sableuses. Cependant quelques tendances peuvent être identifiées.

Il est observé que **la teneur en eau finale et la concentration de la matière en suspension sont très liées à la floculation**. Si le matériau à déshydrater a des flocs très fins et/ou peu résistants, à cause d'une altération dans le processus d'agitation du mélange avec le floculant, la concentration de la MES et la teneur en eau tendent à augmenter. Les éventuelles variations dans l'agitation du mélange sont très difficiles à corriger si l'agitation est manuelle.

**La presse à boues KDS® évacue l'eau libre des sédiments par égouttage**. L'eau liée est l'eau restant autour des flocs. Elle dépend de la teneur en eau initiale des mélanges. **L'eau restant à l'intérieur des flocs est évacuée par pression**.

L'application de la pression à la fin de chaque cycle de déshydratation permet d'extraire l'eau contenue dans les flocs, quel que soit le matériau à déshydrater. Les teneurs en argiles et en matière organique sont corrélées à la quantité d'eau retenue dans les flocs. L'effet d'appliquer une pression est plus observable pour les matériaux argileux et/ou organiques. **La pression appliquée fait diminuer la teneur en eau finale. Cependant, une augmentation de la pression implique plus ou moins une concentration de la matière en suspension plus élevée.** Lorsque le matériau à déshydrater est soumis à une pression, les flocs sont comprimés, pouvant être détruits et ainsi libérer des particules pouvant traverser les espaces existants entre les disques elliptiques.

Pour la plupart des matériaux déshydratés, les teneurs en eau les plus faibles sont obtenues avec des vitesses faibles (2,9 tr/min). De petites variations de la teneur en eau finale sont observées et qui tendent à suggérer que **la vitesse de rotation des disques est indépendante de la teneur en eau finale pour la longueur de table d'égouttage du prototype testé.** Les vitesses de rotation des disques les plus réduites, comprises entre 2,9 tr/min et 4,84 tr/min donnent les concentrations de la matière en suspension les plus faibles. Cependant, ces valeurs sont limitées ce qui empêche d'établir un comportement général.

Les résultats de déshydratation de la kaolinite indiquent que le prototype permet de réduire jusqu'à 30% de la teneur en eau initiale sans application d'une pression et de 48% de la teneur en eau initiale quelle que soit la pression appliquée. Les valeurs les plus faibles de la concentration de la MES pour la kaolinite sont obtenues pour des vitesses de 4,03 tr/min et de 6,02 tr/min, sans pression. La valeur de MES la plus importante est constatée avec une pression de 70 kPa et une vitesse de rotation des disques de 2,9 tr/min.

Le prototype de laboratoire KDS® est capable réduire d'environ 30%, 50% et 70% la teneur en eau indépendamment de la vitesse de rotation et sans pression pour les mélanges de kaolin confectionnés avec 5%, 25% et 50% de sable. Ces valeurs de teneur en eau finale peuvent encore diminuer sous l'application de la pression. Les pourcentages de réduction d'eau respectifs sont de 51%, 29% et 7% respectivement. La concentration de la matière en suspension est proportionnelle à la pression appliquée et à la teneur en sable du mélange.

Le prototype permet de réduire la teneur en eau à des hauteurs en pourcentages de 66% jusqu'à 80% si la teneur en eau initiale des sédiments est de 400% et de 82% jusqu'à 90% pour les sédiments de teneur en eau initiale de 800%, sans l'application de pression. Ces pourcentages de réduction de teneur en eau peuvent augmenter entre 13,8% et 45,3% sous l'application d'une pression. La concentration de la MES tend à augmenter avec la pression et la vitesse de rotation de disques, mais les résultats de MES restent en nombre limité.

**Les matériaux argileux, et les mélanges argileux et sableux ont des surnageants avec une couleur translucide et blanche.** La couleur translucide du surnageant est à relier à la présence de colloïdes dans le mélange et des petits flocs qui traversent les espaces existants entre les disques elliptiques. Le degré de turbidité est indépendant de la vitesse de rotation des disques et de la pression appliquée.

**Les sédiments de barrage ont des eaux résiduelles claires avec la présence de flocs agglomérés fins.** La quantité de flocs récupérée dans le surnageant est indépendante de la vitesse de rotation des disques et de la pression appliquée. Le nombre de flocs accumulés dans l'eau résiduelle dépend essentiellement du floculant choisi et de la qualité du processus de floculation.

**La teneur en eau finale est peu ou prou, inversement proportionnelle à la concentration de la MES**. Pour tous les mélanges étudiés, les concentrations les plus élevées de la matière en suspension correspondent aux teneurs en eau les plus faibles.

La troisième étape « analyse et interprétation des résultats » confirme que **la presse à boues KDS® actuelle est capable de déshydrater un sédiment**. Cependant la presse à boues KDS® pour donner des teneurs en eau les plus faibles et les concentrations de matière en suspension les plus réduites nécessite quelques modifications, voir chapitre 6.

**La presse à boues KDS® est susceptible de supporter la présence de sables au sein du sédiment sans une maintenance démesurée selon la granulométrie et le pourcentage de sable grossier.** Les sédiments composés de sable fin, ayant un diamètre inférieur à 0,02 cm, peuvent être déshydratés sur ce type de machine indépendamment du pourcentage de sable fin. En général, du sable est contenu dans une matrice argileuse et/ou limoneuse des sédiments.

Le sable grossier a une masse volumique trop importante pour être floculé, même s'il est mélangé avec des argiles ou des limons, il décantera plus lentement et il ne sera pas emprisonné dans les flocs des sédiments. Dans ce cas, c'est le diamètre du sable grossier et son pourcentage qui définiront le comportement du sédiment pendant son passage par la presse à boues KDS®. Quatre situations peuvent être observées :

- Si le sédiment contient un sable grossier avec une granulométrie supérieure aux espaces existant entre les disques elliptiques, $D > 0{,}1\ cm \pm 0{,}01\ cm$, il sera transporté par les disques elliptiques jusqu'à la fin du processus de déshydratation. Il ne posera pas de problèmes de colmatage.

- Dans le cas contraire, si le diamètre du sable grossier est inférieur aux espaces existant entre les disques de la presse, $0{,}02\ cm < D < 0{,}1\ cm \pm 0{,}01\ cm$, le sable pourra pour une part, traverser ces espaces et sera collecté dans la MES.

- Si un sédiment contient du sable grossier avec un diamètre d'environ 0,1 cm, les grains de sable risqueront de rester coincés entre les espaces des disques elliptiques pouvant abîmer les disques de la presse. Ce colmatage peut être identifié par le bruit émis lors de la rotation des disques. Les mélanges argilo-sableux avec une teneur en sable minimale de 25% ont identifié ce problème. Cette teneur en sable peut constituer une limite acceptable pour déshydrater des sédiments sans une maintenance démesurée.

Les essais de déshydratation mécanisée montrent que **les débits d'entrée relativement élevés ne sont pas accessibles à l'échelle du prototype de presse utilisé en laboratoire**. Les

débits d'entrée de boue très élevés ont une vitesse d'écoulement à la sortie du réservoir trop importante. Les sédiments et/ou matériaux à déshydrater avec de hauts débits passent au-dessus des disques et de la plaque de compression. Dans ce cas les débits sont à adapter ou la longueur de la table à augmenter.

En ce qui concerne l'influence du floculant en valorisation matière après leur passage par la presse à boues KDS®, on constate que **l'effet d'ajout du floculant fait augmenter la plasticité du mélange. Quant au sédiment stabilisé, son comportement à la rupture passe de fragile à ductile. Par ailleurs, l'ajout de floculant se traduit par une légère augmentation de la résistance en compression à partir du 28 jours de cure.**

# *6. PROPOSITION DE CRITÈRES D'APTITUDE AU SÉCHAGE ET À LA DÉSHYDRATATION DES SÉDIMENTS ET ASPECT TECHNIQUES*

## *6.1. INTRODUCTION*

Le séchage naturel des sédiments est la technique de déshydratation la plus économique du point de vue énergétique. Il permet de déshydrater d'importantes quantités de sédiments pour un stockage donné. Cependant, cette méthode a une forte dépendance vis-à-vis des caractéristiques du sédiment et du climat. Le produit qui résulte d'un séchage naturel, est pâteux, hétérogène et une faible quantité d'eau déshydratée nécessite des périodes de temps relativement longues (≥ 6 mois). En outre, la surface occupée pour le séchage naturel est plus importante que pour les autres méthodes de déshydratation.

La déshydratation mécanique de sédiments tend à solutionner quelques inconvénients du séchage naturel. Elle offre une procédure de déshydratation indépendante du climat et peu liées aux caractéristiques du sédiment. Le produit final a un aspect plus homogène et présente des teneurs en eau plus faibles en un temps plus court. La durée de déshydratation et la surface occupée sont réduites par rapport au séchage naturel. Néanmoins, l'investissement économique initial et le coût de déshydratation sont plus importants que le séchage naturel (MÜLLER et al., 2018.b). L'atout le plus important de la déshydratation mécanisée réside dans le fait que cette méthode donne la possibilité de déshydrater des sédiments en discontinu et en continu. Ce dernier système de travail permet de réduire d'une part le temps de déshydratation et d'autre part le coût énergétique. Le système de travail continu est en plein développement.

Les techniques de déshydratation naturelle et mécanisée des sédiments peuvent être améliorées en analysant les paramètres intervenant dans ces deux processus à l'aide d'outils de traitement et d'analyse de données, (logiciels « CurveExpert Professional », « Excel » et « R »).

Le présent chapitre vise à définir des critères d'aptitude communs au séchage naturel et à la déshydratation mécanisée des sédiments en utilisant la presse à boues KDS®. Les paramètres intervenant pendant la déshydratation naturelle et mécanisée de sédiments sont décrits afin d'améliorer ces deux processus. Par ailleurs, une nouvelle technologie de déshydratation des sédiments en utilisant la presse à boues KDS® est proposée. Une série de modifications à apporter à cette presse sont décrites.

## *6.2. PROPOSITION DE CRITÈRES D'APTITUDE AU SÉCHAGE NATUREL DE SÉDIMENTS*

Cette section concerne la proposition de critères d'aptitude au séchage naturel de sédiments. Elle contient cinq sous-sections qui progressivement amènent à l'étude des paramètres essentiels du séchage pour ébaucher quelques critères ou méthodologies. La première explique le phénomène du séchage et son analyse à travers les essais de laboratoire effectués. S'ensuit une récapitulation des paramètres intervenant dans le séchage, étudiés dans la littérature et observés dans les essais réalisés dans le cadre de thèse. La troisième sous-section est une analyse statistique des relations entre les paramètres qui interviennent dans la déshydratation naturelle des sédiments. La sous-section suivante est consacrée à l'étude des critères d'aptitude au séchage naturel de sédiments. Puis la dernière propose une méthodologie de travail et une série de modifications pour le séchage visant à améliorer le processus de déshydratation naturelle.

### *6.2.1. Processus du séchage naturel des sédiments*

Le séchage des sédiments est une technique de déshydratation qui repose sur la combinaison du phénomène du drainage et de l'évaporation atmosphérique. La diminution de la teneur en eau des sédiments grâce à ces deux phénomènes fait l'objet de la déshydratation naturelle.

Le séchage des sédiments est considéré comme la méthode de déshydratation la plus économique et acceptable du point de vue environnemental. Cependant, les inconvénients de ce procédé, comme par exemple, la forte dépendance des caractéristiques du sédiment et du climat, l'obtention de produits hétérogènes et pâteux peu déshydratés ou le besoin d'une grande surface de séchage, font que cette solution de déshydratation ne soit pas efficace d'un point de vue fonctionnel et technique. Dans le but d'améliorer ce procédé, le processus du séchage naturel des sédiments est reproduit à l'échelle du laboratoire. Le mécanisme de séchage des sédiments par lagunage est montré sur la figure 6-1.

#### *6.2.1.1. Étapes du procédé de lagunage et principe de fonctionnement*

Le procédé du lagunage consiste à diminuer la teneur en eau des sédiments dragués à l'aide de la décantation des sédiments et la consolidation par son propre poids. Pour faciliter le drainage de l'eau et ainsi améliorer le séchage des sédiments, les bassins de lagunage sont équipés d'un système de drainage, composés de drains et d'une couche de sable drainant (GLASER, 2009). Pour éviter toute contamination des sols, les bassins sont imperméabilisés par une géomembrane imperméable (DUAN, 2008 ; AMORCE, 2012) ou par une couche imperméable d'argile compactée (LEVACHER et al., 2018), voir figure 6-1.a. Les lagunes de déshydratation de boues doivent être situées près de la zone de dragage de préférence.

Après l'aménagement du bassin, les casiers sont remplis avec des sédiments dragués, voir figure 6-1.b. La teneur en eau des sédiments dragués est très élevée ($w >> 100\%$) dépendant de la méthode de dragage utilisée. Rappelons que la teneur en eau doit être réduite afin de

diminuer les coûts du transport depuis la zone draguée jusqu'à la zone de stockage définitive ou temporaire dans le cas de réutilisations futures.

Après le remplissage des casiers, la décantation des sédiments commence. Les particules des sédiments tendent à se déposer sur le fond de la lagune sous l'action de la pesanteur. L'eau superficielle reste à la surface, voir figure 6-1.c.

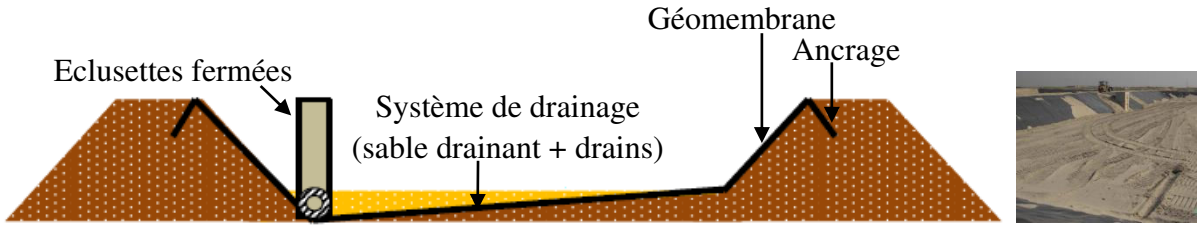
Quand le phénomène de décantation arrive à terme, l'eau superficielle est évacuée par l'ouverture des éclusettes et par le drainage, voir figure 6-1.d. Dans cette étape, d'importantes quantités d'eau sont évacuées pendant des périodes de temps relativement courts. La période de drainage et la quantité d'eau déshydratée dépendent essentiellement *(i)* de la nature des sédiments à déshydrater, *(ii)* de leur teneur en eau initiale et *(iii)* du volume des sédiments à déshydrater.

Un autre phénomène intervenant dans le séchage par lagunage est l'évaporation de l'eau. Le phénomène d'évaporation est presque inexistant au début du processus de déshydratation, voir figure 6-1.d. et il prédomine dès que le drainage s'arrête, voir figures 6-1.e. et 6-1.f. L'évaporation est caractérisée par l'agitation des molécules d'eau permettant d'éliminer l'eau interstitielle des sédiments. Elle est régie principalement par la température du climat et la nature de sédiments. D'ailleurs, l'évaporation tend à augmenter avec l'apparition de fissures en surface dans les sédiments, ceci indique que l'évaporation est directement proportionnelle à la surface en contact avec l'air. La déshydratation complète des sédiments par évaporation nécessite du temps, peu ou prou dépendant du volume de sédiments à déshydrater.

Des phénomènes de retrait et de fissuration sont observés sur les figures 6-1.e. et 6-1.f. Le retrait peut être défini comme le phénomène physique caractérisé par la diminution du volume du sédiment provoqué par un abaissement de la teneur en eau plus ou moins important en fonction des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des sédiments. Le phénomène de retrait a fait l'objet de nombreuses études et recherches comme celles de SERRATRICE (1995, 2007 et 2015) ou celles d'HAINES (1923) et STIRK (1954) qui ont défini les phases du retrait liées aux diminutions de la teneur en eau des sols.

La fissuration est un phénomène physique caractérisé par l'apparition de fentes dans les sédiments pendant le séchage ; ses fentes forment « une toile d'araignée ou un faïençage » en surface. Les fentes dans une couche de sédiments apparaissent quand la déformation de la couche du sédiment génère des contraintes de traction supérieures à la limite de la résistance à la rupture en traction des sédiments (VO, 2017). Les contraintes de déformation du sol peuvent être provoquées par l'effet de contraintes internes dues *(i)* aux variations de densité et de porosité du sédiment pendant le séchage (HALLAIRE, 1988a ; HALLAIRE, 1988b) *(ii)* aux variations de la teneur en eau du sédiment liées à l'hétérogénéité de la couche des sédiments pendant la déshydratation naturelle (LEDESMA et al., 2008 ; HUECKEL, 1992) ou *(iii)* aux contraintes liées au frottement et la traction des particules (STIRLING, 2014). L'apparition de fissures est directement proportionnelle à la teneur en eau initiale (AUVRAY et al., 2013). Le phénomène de fissuration peut être décrit selon deux phases. Une première phase caractérisée par un réseau de fissures fines, voir figure 6-1.d, qui peut commencer dans l'état plastique et par une deuxième phase où l'épaisseur des fentes tend à augmenter (HALLAIRE, 1988a ;

HALLAIRE, 1988b), voir figure 6-1.e. Quand les sédiments ont une teneur en eau adéquate pour le transport et qu'ils sont pelletables, ils sont enlevés à l'aide d'engins de chantier, voir figure 6-1.f.

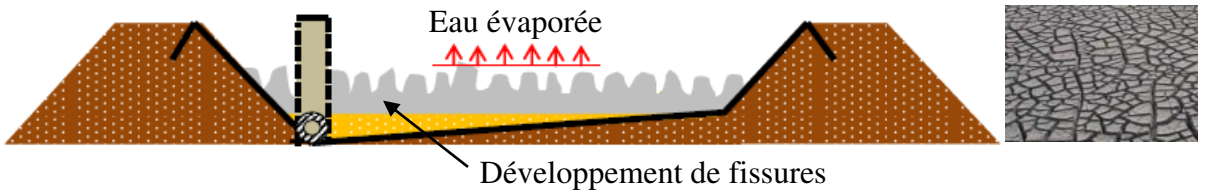



*a) Schéma d'une lagune de déshydratation.*

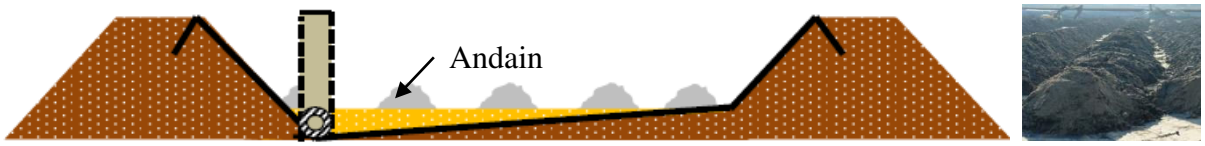
*b) Remplissage de la lagune.*

*c) Phénomènes de décantation et de drainage des sédiments.*

*d) Phénomènes de décantation et de consolidation des sédiments.*




*e) Phénomènes d'évaporation et de fissuration.*




*f) Enlèvement des sédiments déshydratés.*

*Figure 6-1. Mécanismes de séchage des sédiments par lagunage (LEVACHER et al., 2018) et exemple de la lagune dans le Port de Dunkerque (GLASER, 2009).*

### *6.2.1.2. Le séchage des sédiments par lagunage reproduit à l'échelle du laboratoire*

Le comportement d'un sol pendant le séchage naturel peut être analysé à petite échelle à l'aide de l'Essai de Séchage et de Retrait (ESR). Cet essai, non conventionnel, a pour objet la détermination des paramètres d'état du sédiment et l'étude du retrait pendant la déshydratation naturelle. Il consiste à mesurer les variations de volume du sédiment et les baisses de teneur en eau pendant le séchage.

L'évolution de la quantité d'eau drainée, de l'eau évaporée et de l'eau présente dans le sédiment en fonction du temps de déshydratation peut être suivie grâce à l'Essai d'Égouttage et de Séchage (EES). Cet essai permet d'une part de quantifier l'eau évacuée et l'eau restant dans le sédiment, et d'autre part, de calculer les vitesses d'évacuation de l'eau.

Les phénomènes de décantation et de consolidation, illustrés sur les figures 6-1.c. et 6-1.d. peuvent être étudiés avec des essais de décantation et de consolidation. L'essai de décantation détermine d'une part, le tassement sous poids propre du sédiment en fonction du temps, et d'autre part, l'aptitude du sédiment à se laisser traverser par un fluide. L'essai de consolidation permet de mesurer le tassement du sédiment quand il est soumis à des sollicitations importantes, comme le poids des engins de chantier.

La résistance au cisaillement ou cohésion non drainée d'un sédiment peut être mesurée à l'aide de l'essai scissométrique en laboratoire.

### *6.2.1.3. Proposition de méthodes d'amélioration du séchage naturel.*

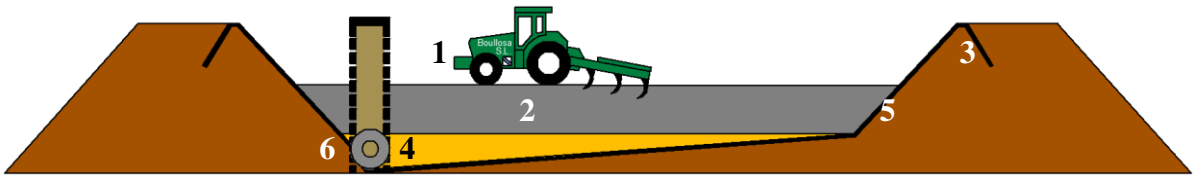
L'analyse des paramètres d'état, comme la teneur en eau, l'indice des vides, le degré de saturation et des paramètres mécaniques, telles que la déformation axiale ou la cohésion non drainée, permet d'une part, de reproduire le processus du séchage naturel des sédiments à petite échelle, et d'autre part, d'améliorer le procédé du séchage naturel. Cette technique de déshydratation peut être accélérée en retournant ou perforant les couches de sédiments. Pour ce faire, le moment le plus adéquat pour le retournement ou la perforation des sédiments doit être déterminé.

En ce qui concerne la méthodologie utilisée, le retournement peut être réalisé avec des engins de chantier adaptés, voir figure 6-2.a. Pour le retournement de sédiments, des engins munis de socs de labour ou disques à forme adaptée (adhésion du sédiment) peuvent convenir. Le moment le plus approprié pour la perforation ou la scarification doit être défini. Ce moment d'intervention est lié à la vitesse de déshydratation des sédiments, déterminée à l'aide de l'essai de décantation, de l'Essai de Séchage et de Retrait et de l'Essai d'Égouttage et de Séchage.

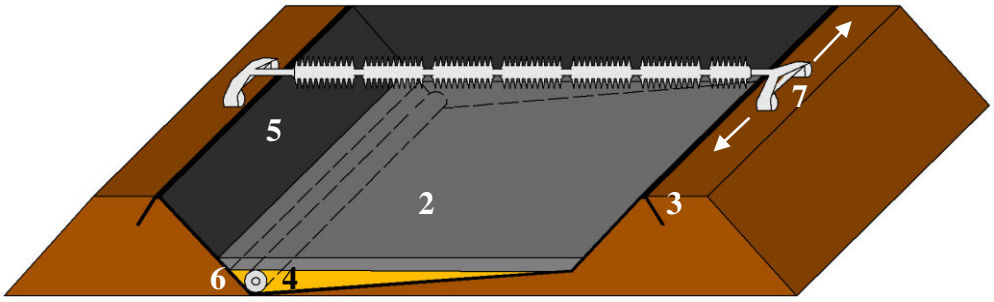
La capacité portante suffisante et nécessaire des sédiments pour supporter le poids d'un engin circulant doit être calculée. La capacité portante peut être déterminée grâce aux relations $S_u = f(w)$ et/ou $S_u = f(I_P)$. Ces relations sont obtenues à partir des résultats de l'essai scissométrique en laboratoire et de l'Essai d'Égouttage et de Séchage.

Les mécanismes de retournement, figure 6-2.a. et de perforation ou de scarification des sédiments figures 6-2.b. et 6-2.c. sont abordés en détail dans la section « 6.2.5. Mise en œuvre de moyens ou de dispositifs d'amélioration du processus de séchage de sédiments ».

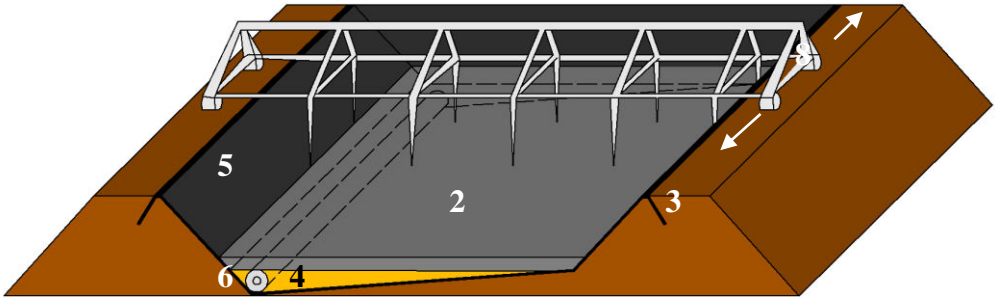
Le séchage des sédiments peut être accéléré en créant des sillons ou perforations dans les couches de sédiments. Des engins circulant sur la couche, comme un rouleau scarificateur qui serait muni d'aiguillons ou dents ou disques, sont envisageables. Ce rouleau pourrait être mû par un moteur disposé sur la banquette du casier (équivalent à un système d'arrosage agricole), voir figures 6-2.b. et 6-2.c.




*a) Retournement à l'aide de dispositifs à base de socs ou disques de labour d'après LEVACHER et al., (2018).*




*b) Réalisation de sillons à l'aide d'un rouleau équipé de dents (aiguilles, socs).*




*c) Réalisation de sillons ou scarifications à l'aide d'un treillis mobile.*

**Légende**

**1** : Engin de retournement
**2** : Sédiment en cours de séchage
**3** : Ancrage de la géomembrane
**4** : Sable drainant
**5** : Géomembrane
**6** : Drains
**7** : Rouleau
**8** : Treillis mobile

*Figure 6-2. Techniques d'amélioration pouvant être apportées au lagunage en vue d'accélérer le séchage naturel des sédiments.*

### *6.2.2. Principaux paramètres intervenant pendant le séchage naturel des sédiments*

La granulométrie du sédiment, la teneur en argiles, la matière organique, la teneur en eau initiale, le volume des sédiments à déshydrater et la géométrie du bassin sont les paramètres les plus influents de la déshydratation naturelle des sédiments. Ces paramètres ont été identifiés par de nombreux auteurs selon la littérature d'une part, et à partir des résultats et observations issus de nos essais de séchage réalisés. Les limites d'Atterberg et la cohésion non drainée ont aussi un rôle essentiel pendant le séchage des sédiments.

#### *6.2.2.1. Les argiles*

Les argiles peuvent être définies, du point de vue granulométrique comme la fraction granulométrique du sédiment de diamètre inférieur à 2 µm (NF X31-107). Au sens minéralogique, elles peuvent être définies comme des minéraux ou roches de structure lamellaire, composés de silicates ou d'aluminosilicates hydratés. Du point de vue chimique, les argiles sont constituées de silicium (Si), d'aluminium (Al) d'hydrogène (H) et d'oxygène (O) (CARDENAS MUGA, 2002).

Les argiles jouent un rôle essentiel pendant le séchage des sédiments dû à la rétention d'eau colloïdale (BIGORRE et al., 2000, LIFE, 2002). Du fait que la molécule de l'eau est polarisée, elle est attirée par polarité par les feuillets des argiles (BERTHAUD et al., 2018). La surface des argiles est directement proportionnelle à la force d'attraction électrique entre les feuillets des argiles et les molécules d'eau (AL MAJOU, 2008). Selon les études réalisées par PEDRO (PEDRO, 1965) et celles de CAILLERE (CAILLERE et al., 1982), la surface spécifique des argiles dépend de la densité de charge. Si les argiles ont un déficit de charge, l'attraction de l'eau par les feuillets est faible, donc les molécules d'eau polaires peuvent traverser les feuillets des argiles et occasionner des problèmes de gonflement. Dans le cas contraire, les feuillets de l'argile sont connectés entre eux par la liaison de van der Waals, ceci empêche l'entrée des molécules d'eau dans la molécule des argiles et le gonflement.

#### *6.2.2.2. Les sables*

Les sables correspondent à la fraction granulométrique ayant un diamètre compris entre 50 µm et 2 mm. Le sable fin a une taille de grains comprise entre 50 µm jusqu'à 200 µm. Le sable grossier possède un diamètre de 200 µm jusqu'à 2 mm (NF X31-107).

À la différence des argiles, les sables sont des matériaux non cohésifs, bien aérés et très drainants. Ils ont une faible capacité d'échange anionique et cationique. Les grains de sable peuvent composer des squelettes granulaires rigides liées à la forme et à la taille des grains. La taille des grains est directement liée à la porosité (WINTERWERP & VAN KESTEREN, 2004).

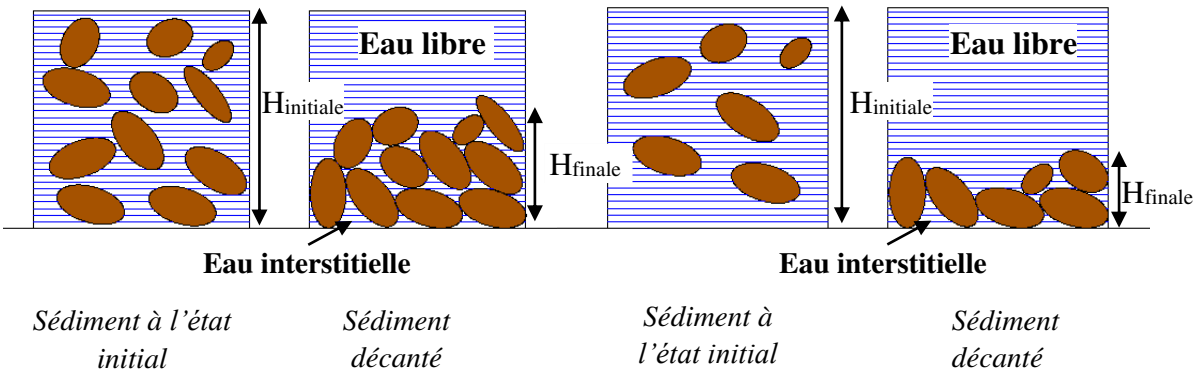
#### *6.2.2.3. La matière organique*

La matière organique est la matière composée d'organismes vivants, de résidus de végétaux, d'animaux et de produits en décomposition. La matière organique perturbe la déshydratation des sédiments par sa rétention de l'eau (DUBOIS, 2006 ; SILITONGA, 2010 et

BEN ABDELGHANI, 2014). Elle peut absorber une quantité maximale d'eau égale à vingt fois leur poids (MULLER, 2016). La rétention de l'eau par la matière organique est due à la densité de charge et à la taille de la MO. La matière organique tend à occuper les espaces existant entre les grains du sédiment.

#### *6.2.2.4. La teneur en eau initiale du sédiment*

La quantité d'eau initiale du sédiment est directement liée au temps de séchage. Plus le pourcentage d'eau initial est élevé plus le temps de déshydratation l'est, voir figure 6-3. Les observations obtenues d'après les essais de déshydratation naturelle, décrites dans les chapitres 3 et 4, indiquent que les sédiments déshydratés avec des teneurs en eau élevées correspondent à d'importantes quantités d'eau libre. Ce type d'eau est évacué par drainage.




*a) Sédiment à faible teneur en eau initiale.* *b) Sédiment à haute teneur en eau initiale.*

*Figure 6-3. Séchage des sédiments à teneurs en eau initiales différentes.*

#### *6.2.2.5. Limites d'Atterberg*

Les limites d'Atterberg sont liées aux changements d'état des sédiments. Ils permettent de définir la plasticité d'un sol (ANGER, 2014 et MOGHRABI et al., 2018). La limite de liquidité ($w_L$) est la teneur en eau correspondant au point de transition entre les états plastique et liquide. La limite de plasticité ($w_P$) est la teneur en eau qui partage les états solide et plastique. Elle correspond à la teneur en eau au moment où l'eau interstitielle ne joue plus son rôle de lubrifiant (METTAUER et al., 1983).

L'indice de plasticité ($I_P$) est la différence entre les limites de liquidité et de plasticité du sédiment. Ce paramètre détermine l'étendue de l'état plastique du sédiment. L'indice de plasticité permet de définir l'intervalle de teneur en eau où le sédiment a une certaine résistance au cisaillement qui lui permet d'être flexible et déformable (METTAUER et al., 1983).

#### *6.2.2.6. Géométrie du casier de réception et de stockage*

L'efficacité du séchage naturel des sédiments dépend de la surface de la lagune ou du lit de séchage, et de la hauteur de remplissage des sédiments à déshydrater.

Le sédiment déshydraté après le séchage naturel a une teneur en eau très hétérogène (MIRAOUI, 2010). La teneur en eau des sédiments est fortement liée à la profondeur (DUAN, 2008 ; SANO, 2012). Plus la hauteur de remplissage est élevée, plus la couche du milieu a une teneur en eau importante.

Les observations faites pendant l'Essai d'Égouttage et de Séchage (EES) montrent que les sédiments situés autour des parois de la zone de déshydratation ont des teneurs en eau plus faibles que celles des sédiments situés dans le milieu de la zone de séchage. Ce fait peut être expliqué par le phénomène de la capillarité (KEITA, 2014 et DAUBERSIES, 2012).

#### *6.2.2.7. Autres paramètres intervenants pendant le séchage*

La porosité (n), l'indice des vides (e), la perméabilité (k), l'activité des argiles (A) et la cohésion non drainée du sédiment ($S_u$) sont des paramètres intervenant dans le séchage naturel des sédiments.

La porosité des sédiments est le volume des vides rapporté au volume total du sédiment. Elle exprime les espaces existant entre les particules du sédiment.

L'indice des vides correspond au volume des vides rapporté au volume des particules solides de l'échantillon. Il permet de caractériser la compacité de l'arrangement des particules du sédiment.

La perméabilité, ou la conductivité hydraulique, permet d'établir l'aptitude d'un sédiment à se laisser traverser par un liquide.

Le coefficient d'activité peut être défini comme l'indice de plasticité rapporté à la fraction argileuse du sédiment (SKEMPTON, 1953).

La contrainte de cisaillement ou cohésion non drainée, dépend de la teneur en eau, elle est indicative du pouvoir portant des sédiments et de l'adhérence (interaction des sédiments dans le cas du retournement).

### *6.2.3. Analyse et relation entre paramètres relatifs au séchage naturel des sédiments*

Les relations entre les paramètres jouant un rôle dans les processus de la déshydratation naturelle des sédiments sont schématisées dans la figure 6-4. Deux groupes de relations sont établies en considérant les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du sédiment à déshydrater et la géométrie de la zone de séchage.

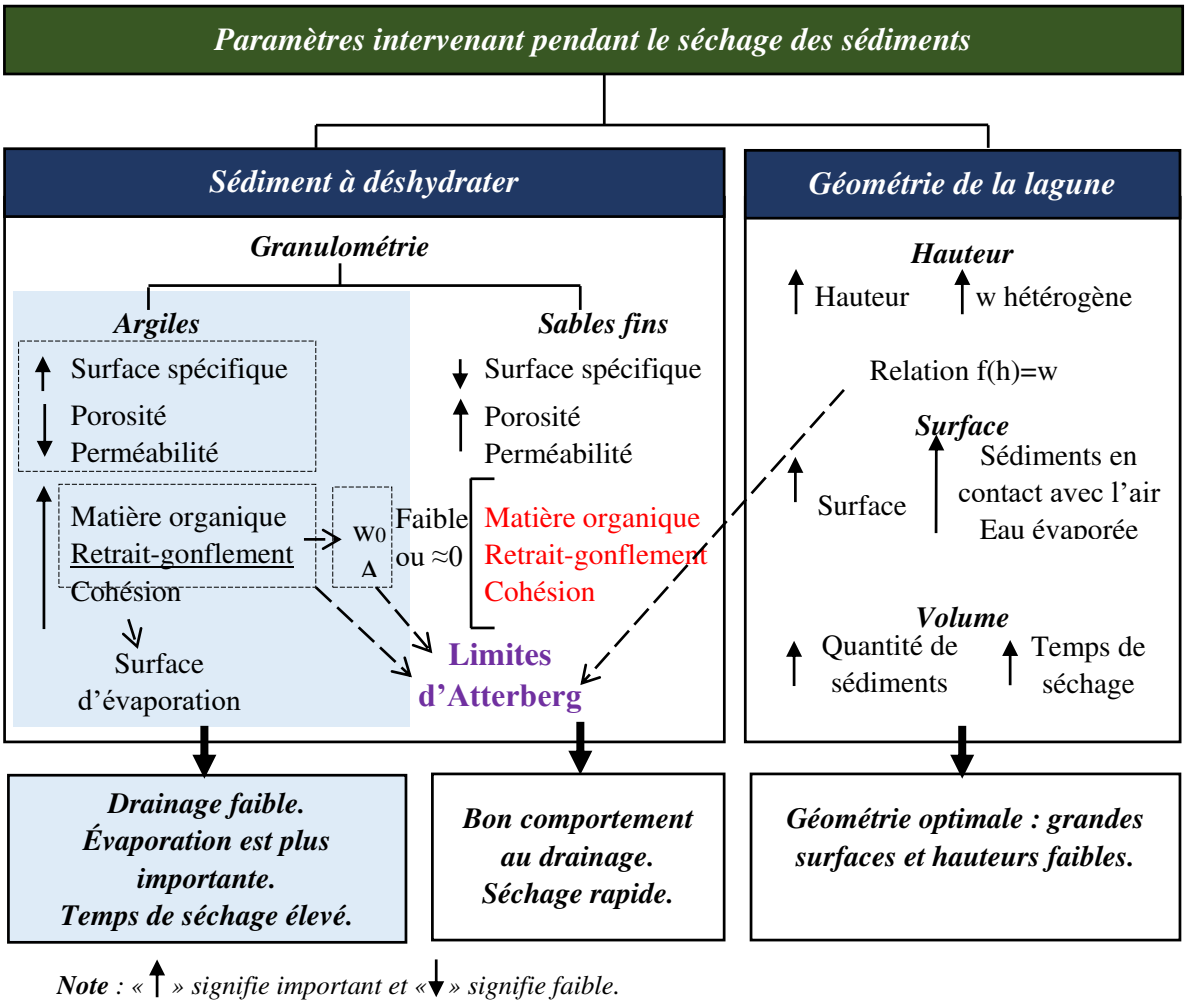



*Figure 6-4. Relations entre les paramètres dans les processus du séchage de sédiments.*

### *6.2.3.1. Paramètres liés aux caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du sédiment à déshydrater*

La teneur en eau finale du sédiment et le temps de déshydratation sont fortement liés aux caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du sédiment à déshydrater. Les paramètres les plus importants dans le séchage naturel sont la teneur en argiles, la granulométrie et la matière organique. Ces paramètres conditionnent les critères d'aptitude au séchage naturel.

#### *Impact de la nature des sédiments pendant le séchage des sédiments*

Le comportement du séchage naturel dépend essentiellement de la nature du sédiment à déshydrater, voir figure 6-4.

Les argiles sont des sédiments, avec une capacité de rétention d'eau élevée. De fait, elles ont une surface spécifique élevée, ce sont des sédiments peu perméables et très peu poreux. Les argiles sont des sédiments très cohésifs. La cohésion dépend de la composition minéralogique des argiles.

Les sédiments argileux tendent à présenter d'importantes teneurs en matière organique en comparaison des sédiments plus sableux. Ainsi, les argiles sont très connues dans le domaine du génie civil pour présenter des problèmes de changement de volume (phénomènes de retrait et de gonflement) sous l'effet de variations de la teneur en eau. Les déformations axiales peuvent être plus ou moins importantes en fonction de la morphologie et disposition des feuillets des argiles (PAINEAU, 2011). Les sédiments argileux peuvent présenter des problèmes de fissuration. Dû à la rétention d'eau par les argiles, l'évaporation est le phénomène le plus important dans la déshydratation naturelle des argiles. Le temps de séchage des argiles est plus long que celui des sables fins.

Les sables sont des sédiments non cohésifs, très poreux et très drainants. Ils ont des déformations axiales insignifiantes par rapport à celles des sédiments argileux. La teneur en matière organique des sédiments sableux est faible. Le temps de séchage des sédiments sableux est très court. L'eau est évacuée principalement par drainage. Le phénomène d'évaporation est presque inexistant.

***Impact de la teneur en eau initiale pendant le séchage des sédiments***

La teneur en eau initiale des sédiments joue un rôle essentiel dans le retrait des sédiments et plus précisément dans les argiles (CHRETIEN, 2010). Elle est proportionnelle à la déformation axiale. Plus la teneur en eau est élevée, plus la déformation axiale est importante, comme il est montré sur la figure 6-3. La teneur en eau initiale est liée au temps de séchage. Les teneurs en eau élevées, supérieures à la limite de liquidité, ont des périodes de drainage plus longues que celles des teneurs en eau initiales faibles.

***Impact de la matière organique sur la perméabilité, la porosité et les limites d'Atterberg***

La matière organique occupe les espaces existant entre les grains du sédiment. Ceci fait diminuer la porosité et la perméabilité des sédiments (COLIN, 2003). Selon les études réalisées par REKIK et BOUTOUIL (REKIK & BOUTOUIL, 2008) et DUBOIS (DUBOIS, 2006) l'augmentation de la matière organique fait accroître la limite de liquidité du sédiment. Ceci confère au sédiment une plasticité plus grande (MIRAOUI, 2010 ; SILITONGA, 2010 ; ANGER, 2014 et MOGHRABI et al., 2018).

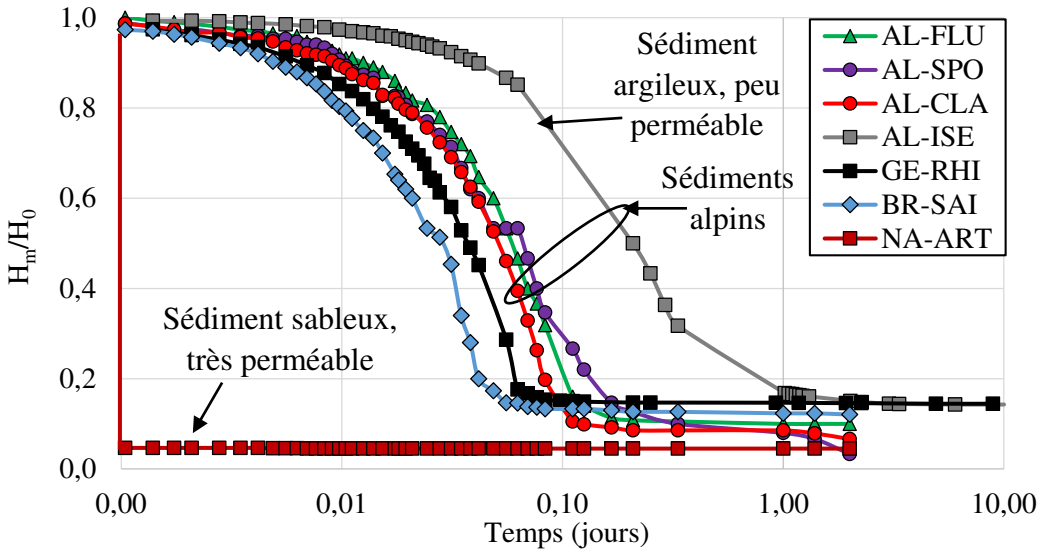
***Relations entre la perméabilité (k), la porosité (n), l'indice des vides (e) et la granulométrie***

La porosité exprime les espaces existant entre les particules du sédiment. Elle est étroitement liée à l'indice des vides, voir la formule [2.21].

L'indice des vides permet de caractériser la compacité de l'arrangement des particules du sédiment. Les argiles ont une porosité faible. En revanche, les sables sont très poreux.

La conductivité hydraulique est liée à la taille des grains et les espaces entre les particules des sédiments. Elle est proportionnelle au carré de la taille des pores (KEITA, 2014). La perméabilité est liée à la fraction d'argile du sédiment, à l'indice des vides (MESRI & CHOI,

1994 et VO, 2017) et à la granulométrie du sédiment. Les sables sont très perméables, en revanche les argiles tendent à être imperméables (HOLTZ & KOVACS, 1991), voir figure 6-5.




***Note** : $H_0$= hauteur de sédiment initiale ; $H_m$=hauteur de sédiment mesurée. Concentration initiale = 100 g/l.*

*Figure 6-5. Relations entre le tassement des sédiments en fonction de la granulométrie et la perméabilité.*

### *Relation entre l'activité (A), la fraction argileuse, le potentiel de retrait-gonflement et les limites d'Atterberg*

Le coefficient d'activité est lié au potentiel de retrait et de gonflement des sédiments, qui a la fois est relié à la fraction argileuse. Plusieurs auteurs se sont basés sur l'étude de SKEMPTON (SKEMPTON, 1953) pour établir une relation entre l'indice de plasticité et le pourcentage d'argiles (SEED et al, 1962) et entre le coefficient d'activité et le pourcentage d'argiles (VAN DER MERWE, 1964). Ces relations sont décrites dans les sections 4.2.6. « Coefficient d'activité » et 4.2.7. « Potentiel de retrait et de gonflement des sols argileux ».

D'autres auteurs, comme ALTMEYER (ALTMEYER, 1955) ont relié le potentiel de retrait-gonflement avec la limite de retrait ($w_R$), voir tableau 6-1. avec l'indice de plasticité (PRIAN et al., 2000), voir tableau 6-2. ou avec le pourcentage d'argiles obtenu avec la valeur VBS (CHASSAGNEUX et al., 1996), voir tableau 6-3.

*Tableau 6-1. Potentiel de retrait-gonflement selon la limite de retrait (ALTMEYER, 1955).*

| **Limite de retrait - $w_R$ (%)** | **Potentiel de retrait-gonflement** |
|---|---|
| < 10 | Fort |
| 10-12 | Critique |
| < 12 | Faible |

*Tableau 6-2. Potentiel de retrait-gonflement selon l'indice de plasticité (PRIAN et al., 2000).*

| Indice de plasticité - $I_P$ (%) | Potentiel de retrait-gonflement |
|---|---|
| < 12 | Faible |
| 12-25 | Moyenne |
| 25 à 40 | Forte |
| ≥40 | Très forte |

*Tableau 6-3. Potentiel de retrait-gonflement selon le pourcentage d'argiles exprimée par la valeur VBS (CHASSAGNEUX et al., 1996).*

| VBS (g/100g) | Potentiel de retrait-gonflement |
|---|---|
| < 2,5 | Faible |
| 2,5-6 | Moyenne |
| 6 -8 | Forte |
| > 8 | Très forte |

***Relation entre la déformation axiale et la teneur en eau***

La déformation axiale ou retrait des sédiments est étroitement lié à la granulométrie, à la teneur en eau et aux limites d'Atterberg. Le retrait des sédiments sableux, comme le sédiment « NA-ART » est faible par rapport au retrait des sédiments plus argileux, comme c'est le cas du sédiment « AL-ISE ». Ceci est dû à la perméabilité et à la rétention de l'eau des sédiments argileux, voir figure 6-6.

Les sédiments saturés, soumis au séchage, ont de fortes diminutions de teneur en eau qui provoquent des déformations axiales importantes, pendant des périodes courtes de temps. La déformation axiale tend à se stabiliser quand la teneur en eau des sédiments s'approche de la limite de liquidité. Ceci est dû à la réorganisation des grains des sédiments.

Le retrait des sédiments pendant l'état de saturation peut être défini comme un « Retrait linéaire » (Rl) selon la norme française NF XP P94-060-2. Il correspond à la pente à l'origine de la droite du graphique $\varepsilon_a = f(w)$. Selon les études réalisées par FLAVIGNY (FLAVIGNY, 1992), le retrait linéaire est lié à la teneur en eau (w), la teneur en eau initiale ($w_0$), la granulométrie et la composition chimique du sédiment et au poids spécifique de l'eau.

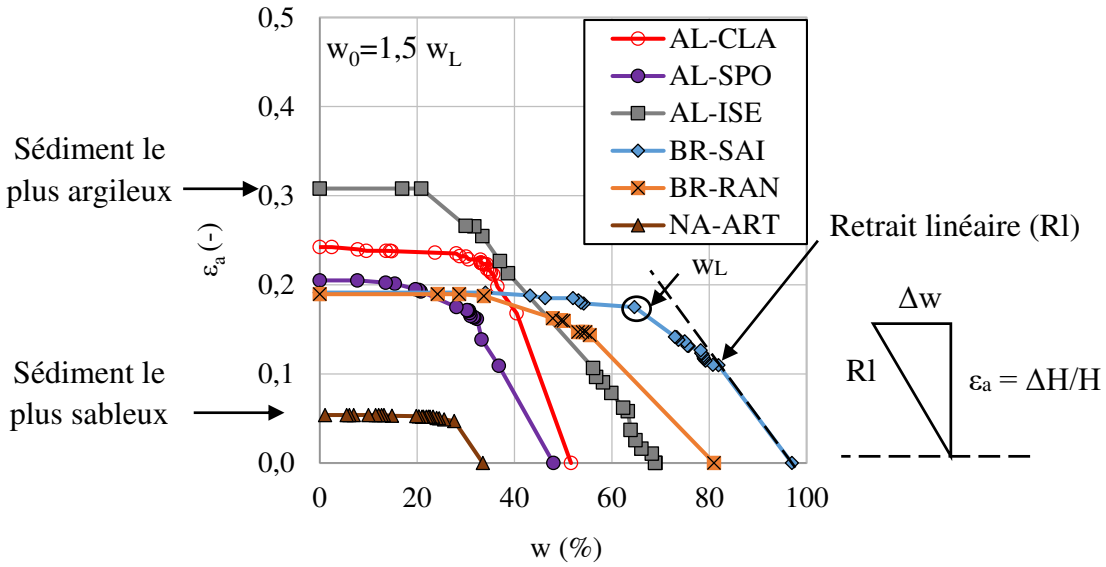



*Figure 6-6. Influence de la nature des sédiments sur la relation $\varepsilon_a=f(w)$.*

***Impact du phénomène de fissuration***

L'apparition de fissures fait augmenter la surface de sédiment en contact avec l'air. Plus les sédiments sont en contact avec l'air, plus le phénomène d'évaporation est important. La fissuration est liée à la fraction argileuse et au type d'argile.

### *6.2.3.2. Géométrie de la zone de séchage*

Le sédiment provenant du séchage naturel est un matériau très hétérogène au niveau de la distribution de l'eau dans le sédiment. La teneur en eau du sédiment varie principalement avec la hauteur de la couche et aux conditions limites (bords des casiers de lagunage). Selon la hauteur, elle résulte du processus lui-même, à savoir, l'eau des sédiments dans la couche inférieure est évacuée par drainage et celle de la couche supérieure est évaporée.

L'évaporation de l'eau de la couche supérieure se produit de manière régulière ; elle commence au début du processus de déshydratation. Elle devient plus importante dès que le drainage s'arrête. L'évaporation se poursuit jusqu'au séchage complet. Ceci se produit quand la teneur en eau des sédiments s'approche de la limite de liquidité. Plus la hauteur de la couche est petite, plus rapide est l'évaporation de l'eau des sédiments situés en milieu de la couche.

L'évaporation est directement proportionnelle à la surface en contact avec l'air. Plus la surface de la lagune ou du lit de séchage est grande, plus l'évaporation est importante. Le phénomène de la capillarité aide à évacuer l'eau des sédiments situés aux parois et frontières de la zone de séchage. Ceci fait que les sédiments situés au milieu de la couche déposée ont les teneurs en eau les plus élevées.

### *6.2.4. Critères d'aptitude au séchage naturel de sédiments*

La recherche de critères d'aptitude au séchage naturel de sédiments s'est appuyée sur une analyse statistique des données acquises à partir des essais. Les logiciels de base utilisés sont les suivants : « CurveExpert Professional », « Excel 2016 » et « R 3.5.1 ». Les principaux résultats de ces analyses sont reportés dans l'annexe « A.3. Critères d'aptitude au séchage naturel des sédiments ». Mais les résultats les plus avancés ou les pertinents sont présentés dans cette sous-section.

#### *6.2.4.1. Paramètres d'état des sédiments*

***Analyse en Composantes Principales (ACP)***

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'analyse de données multivariées. Elle permet de visualiser une série de données contenant des individus décrits par des variables quantitatives. Ces variables sont projetées dans un espace de « x » dimensions, nommé « plan factoriel ». L'objectif de l'ACP est de comparer graphiquement des projections des variables, en longueur et en direction, afin d'identifier les corrélations entre les variables et de classifier les individus par groupes selon la ressemblance de leurs variables.

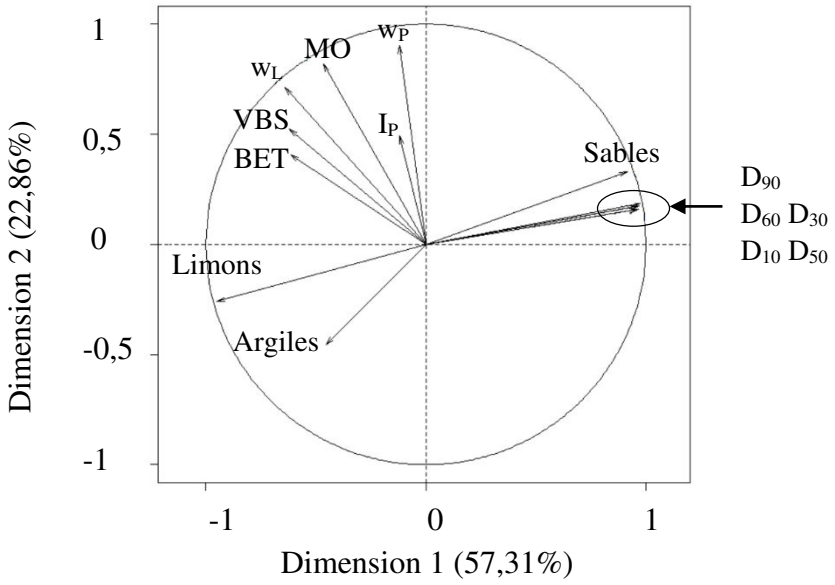
Les individus analysés sont les sédiments alpins « AL-FLU », « AL-CLA », « AL-ISE » et « AL-SPO », les sédiments bretons « BR-SAI » et « BR-RAN » et les sédiments du Grand Est « GE-RHI », de Hauts-de-France « HF-DK » et de la Nouvelle Aquitaine « NA-ART ». Les variables quantitatives considérées sont les caractéristiques physico-chimiques de ces sédiments décrites dans le chapitre 3.

Pour l'ensemble des sédiments étudiés, 80,2 % des caractéristiques physico-chimiques des sédiments peuvent être représentées sur les dimensions 1 (57,3%) et 2 (22,9%). Le cercle de corrélation du plan factoriel 1 et 2 permet de tirer les conclusions suivantes, voir figure 6-7.a. :

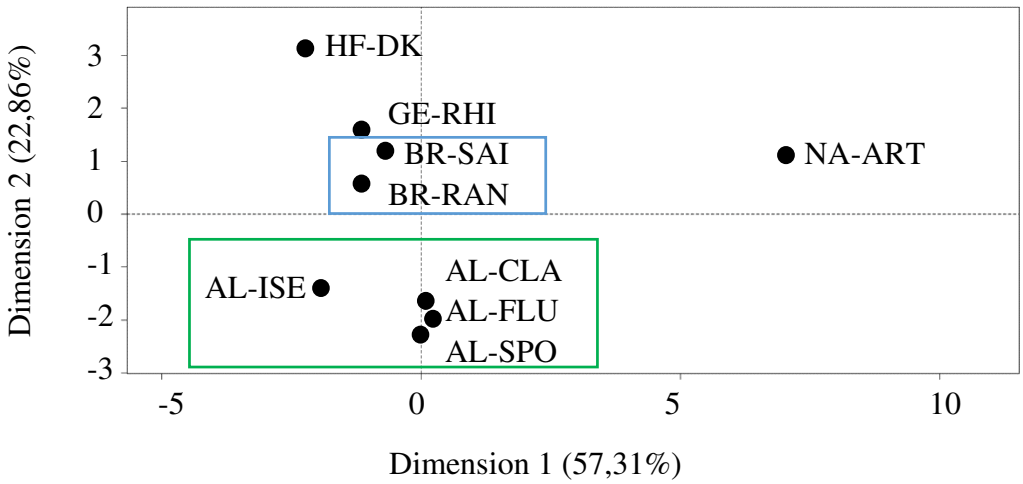
- La dimension 1 représente les projections de la granulométrie (nature et dimension) des sédiments. Les projections des limites d'Atterberg ($w_P$ et $w_L$), de la teneur en matière organique (MO), de la surface spécifique des particules solides (BET) et de la valeur au bleu de méthylène (VBS) peuvent être illustrées sur la dimension 2. La projection de l'indice de plasticité ($I_P$) peut être représentée sur le plan factoriel 3 et 4. Le plan factoriel 3 et 4 ne montre que 13,6% des variables ; pour cela il n'a pas fait l'objet de cette analyse statistique.

- La fraction granulométrique est liée aux diamètres $D_{10}$, $D_{30}$, $D_{50}$, $D_{90}$. Le pourcentage de sables est directement corrélé aux diamètres granulométriques et inversement corrélé aux limons et aux argiles. Plus les valeurs des diamètres sont importantes, plus faibles sont les teneurs en argiles et en limons. La teneur en sable s'opposent à celle des limons. Les fractions argileuse et sableuse sont indépendantes de la teneur en matière organique.

- La teneur en matière organique est essentiellement corrélée aux limites de plasticité et de liquidité. La valeur du bleu de méthylène est liée à la surface spécifique des particules solides du sédiment. Plus importante est la surface spécifique des particules, plus une quantité de bleu de méthylène est absorbée. De même, la surface spécifique est directement reliée à la fraction fine des sédiments (les argiles et les limons).




*a) Projection des variables sur le plan factoriel 1 et 2.*




*b) Projection des individus sur le plan factoriel 1 et 2.*

*Figure 6-7. ACP relative à la caractérisation physico-chimique des sédiments étudiés.*

À l'observation du cercle de corrélations, des groupes de sédiments se distinguent, voir figure 6-7.b.

- Le sédiment de l'Artaude est fortement marqué par sa fraction sableuse. Les caractéristiques physico-chimiques du sédiment « NA-ART » sont opposées au

reste des sédiments. Il est situé du côté opposé du plan factoriel 1 et 2 par rapport aux autres sédiments étudiés.

- Les sédiments alpins sont corrélés entre eux. Ils sont caractérisés par leur granulométrie. Le sédiment « AL-ISE » est le sédiment le plus argilo-limoneux.

- Le sédiment du GPMD est essentiellement caractérisé pour avoir la plus importante teneur en MO et une valeur de la limite de plasticité élevée.

- Les sédiments bretons sont marqués par des valeurs élevées des limites d'Atterberg et des teneurs en matière organique importantes. Ces deux sédiments ont des caractéristiques similaires.

- Le sédiment du Rhin a des caractéristiques physico-chimiques voisines du sédiment « BR-SAI ». Mais le sédiment « GE-RHI » a une valeur de VBS nettement supérieure à celle de « BR-SAI ».

***Relation entre les paramètres d'état des sédiments***

- Relation de la matière organique en fonction de la limite de liquidité

Le cercle de corrélation de l'ACP des caractéristiques physico-chimiques des sédiments étudiés, voir figure 6-7 montre que la teneur en matière organique est étroitement liée à la limite de liquidité. Pour les sédiments étudiés, la teneur en matière organique peut être estimée à partir de l'équation 6.1. Un coefficient de détermination ($R^2$) de 0,632 a été obtenu pour l'ensemble de sédiments étudiés, voir figure 6-8.

$$MO = 0{,}199 w_L - 5{,}4 \qquad [6.1]$$

L'étude réalisée par MOGHRABI et al. (2018) qui a rassemblé une série de sédiments marins, de barrage et de rivière, a suggéré une relation entre la matière organique et la limite de liquidité selon l'équation 6.2. Cette équation a été déterminée à partir de valeurs de MO et $w_L$ de sédiments marins provenant : de Dunkerque (3), de la Méditerranée (11), de la Normandie (2) ; de sédiments de la rivière de Soummam en Algérie (1) ; de sédiments du barrage algérien de Kherrata (1) et des barrages français de : Serre-Ponçon (1), Garonne (1) et Marckolsheim (1). Les caractéristiques de ces sédiments sont récapitulées dans le tableau 6-4. L'équation 6.2 d'après les auteurs, a été déduite avec un coefficient de détermination ($R^2$) égale à 0,788 pour les sédiments considérés.

$$MO = 0{,}28 w_L - 2{,}3 \qquad [6.2]$$

Les équations 6.1 et 6.2 sont légèrement différentes. Cette différence peut être liée aux caractéristiques physico-chimiques des sédiments analysés et à la présence de sédiments marins dans la détermination de l'équation 6.2.

Une combinaison des sédiments récapitulés par MOGHRABI et al. (2018) et des sédiments étudiés dans le cadre de ces travaux de thèse pourrait mieux définir la relation de la matière organique en fonction de la limite de liquidité, voir équation 6.3 et figure 6.8.

$$MO = 0{,}228w_L - 4{,}754 \quad [6.3]$$

*Tableau 6-4. Caractéristiques physico-chimiques des sédiments récapitulés par MOGHRABI et al. (2018).*

| Référence | Origine | $w_L$ (%) | $w_P$ (%) | $I_P$ (%) | MO (%) | VBS (g/100g) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| (ANGER, 2014) | Serre-Ponçon (France) | 30 | 9 | 21 | 3,0 | 0,7 |
| | Garonne (France) | 76 | 50 | 26 | 9,1 | 1,4 |
| | Marckolsheim (France) | 71 | 46 | 25 | 6,9 | 2,4 |
| (BANOUNE et al., 2016) | Soummam (Algérie) | 42 | 26 | 16 | 3,9 | 4,0 |
| | Kherrata rivière (Algérie) | 37 | 23 | 14 | 4,3 | 2,6 |
| (SILITONGA, 2010) | Port-en-Bassin (France) | 47 | 25 | 22 | 4,2 | 4,3 |
| (LIANG, 2012) | Toulon (France) | 76 | 54 | 22 | 12,0 | - |
| | Toulon (France) | 37 | 30 | 7 | 17,0 | - |
| | Bandol (France) | 27 | 22 | 5 | 5,7 | - |
| | Bandol (France) | 33 | 32 | 1 | 5,7 | - |
| | Cannes (France) | 121 | 95 | 26 | 17,2 | - |
| | Cannes (France) | 77 | 58 | 19 | 18,2 | - |
| | Sanary-sur-mer (France) | 77 | 59 | 18 | 20,5 | - |
| | Sanary-sur-mer (France) | 71 | 55 | 16 | 13,1 | - |
| | Marseille (France) | 87 | 73 | 14 | 20,0 | - |
| | Marseille (France) | 72 | 53 | 19 | 14,8 | - |
| | Saint-Mandrier sur mer (France) | 97 | 58 | 39 | 18,5 | - |
| | Fécamp (France) | 43 | 11 | 32 | 5,4 | - |
| (LOUDIA, 2015) | Dunkerque (France) | 57 | 35 | 22 | 12,1 | - |
| (MUNCK, 2015) | Dunkerque (France) | 57 | 36 | 21 | 12,0 | - |
| (WANG et al., 2013) | Dunkerque (France) | 76 | 35 | 41 | 6,3 | 3,1 |

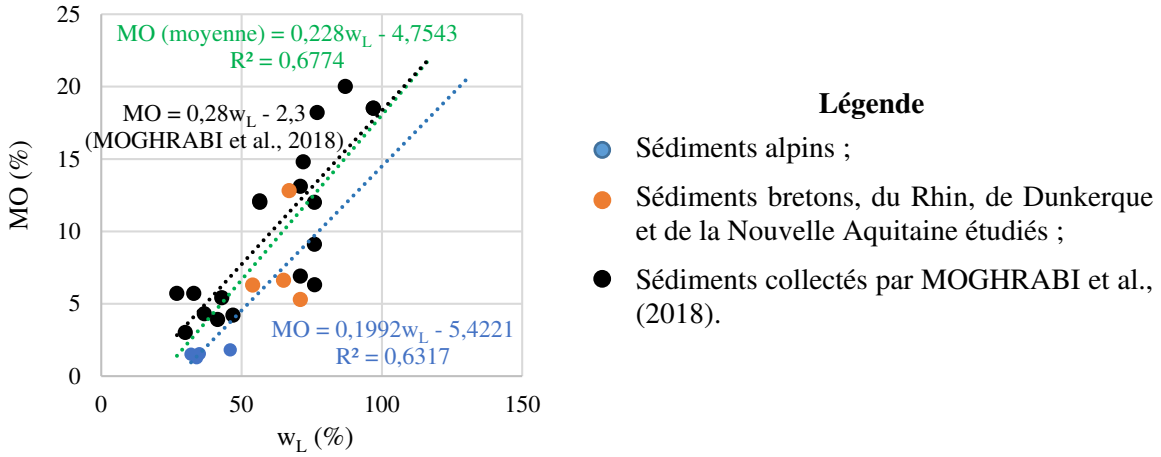



*Figure 6-8. Relations de la matière organique en fonction de la limite de liquidité.*

- Relation entre les limites d'Atterberg

La limite de liquidité est étroitement corrélée à la limite de plasticité, comme le montre l'ACP de la figure 6-7.a. Pour l'ensemble des sédiments étudiés, cette corrélation peut être représentée par l'équation 6.4 avec un coefficient de détermination ($R^2$) égal à 0,82, voir figure 6-9.

$$w_L = 1{,}138 w_P + 6{,}54 \quad [6.4]$$

Pour la détermination de la limite de liquidité en fonction de la limite de plasticité, MOGHRABI et al. (2018) propose l'équation 6.5. Elle a été déduite de l'analyse des sédiments récapitulés dans le tableau 6-4. Pour cette relation 6.5, le coefficient de détermination était de 0,815.

$$w_L = 1{,}13 w_P + 16{,}7 \quad [6.5]$$

Les équations 6.4 et 6.5 permettent de représenter deux droites quasi-parallèles, voir figure 6-9. La valeur de l'ordonnée à l'origine de la fonction $w_L=f(w_P)$ calculée par MOGHRABI et al. (2018) est supérieure à celle de l'équation 6.4. Ceci peut être dû aux teneurs en matière organique élevées des sédiments méditerranéens faisant partie de l'ensemble des sédiments collectés par les auteurs. Rappelons que la teneur en matière organique fait augmenter la valeur de la limite de liquidité.

Pour mieux définir la relation entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, l'équation 6.6 est présentée, voir figure 6-9. L'équation 6.6 est une combinaison des limites d'Atterberg des sédiments récapitulés par MOGHRABI et al. (2018) et nos sédiments étudiés.

$$w_L = 1{,}12 w_P + 14{,}03 \quad [6.6]$$

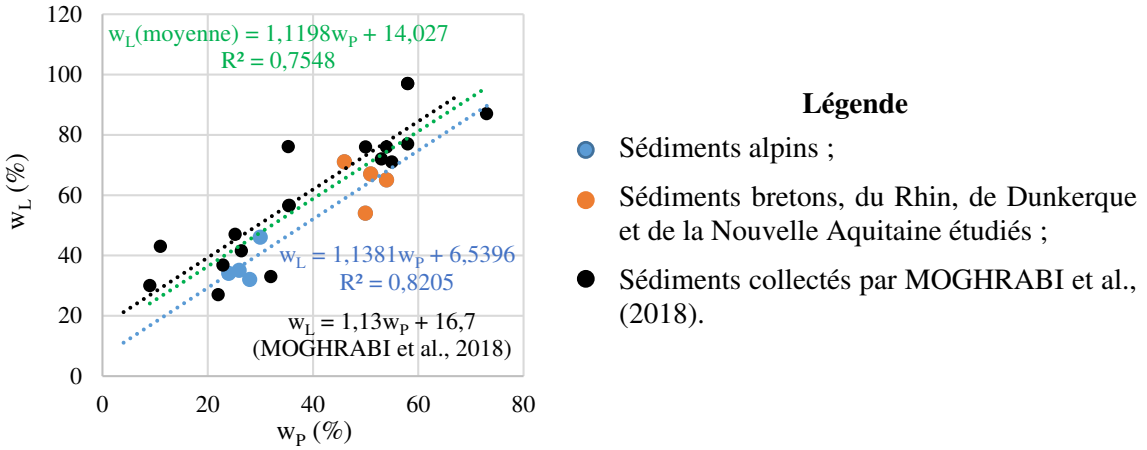



*Figure 6-9. Relation entre les limites de liquidité et de plasticité.*

D'autres relations peuvent être suggérées, elles se trouvent en annexe « A.3.1. Relations entre les paramètres d'état des sédiments ».

### *6.2.4.3. Paramètres mécaniques des sédiments*

#### *Analyse en Composantes Principales (ACP)*

Pour déterminer les paramètres liés à la cohésion non drainée ($S_u$), une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été menée à partir des résultats provenant des essais scissométriques et d'égouttage d'une part, et des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des sédiments d'autre part.

Les variables retenues pour l'étude sont : la cohésion non drainée ($S_u$), la teneur en eau des sédiments (w), les fractions granulométriques, la valeur de bleu de méthylène (VBS), l'indice de liquidité ($I_L$), la teneur en matière organique (MO) et les minéraux principaux qui composent les sédiments étudiés : les phyllosilicates, le quartz, la dolomite et la calcite. Les valeurs de ces variables ont été récapitulées dans le chapitre 3 et 4.

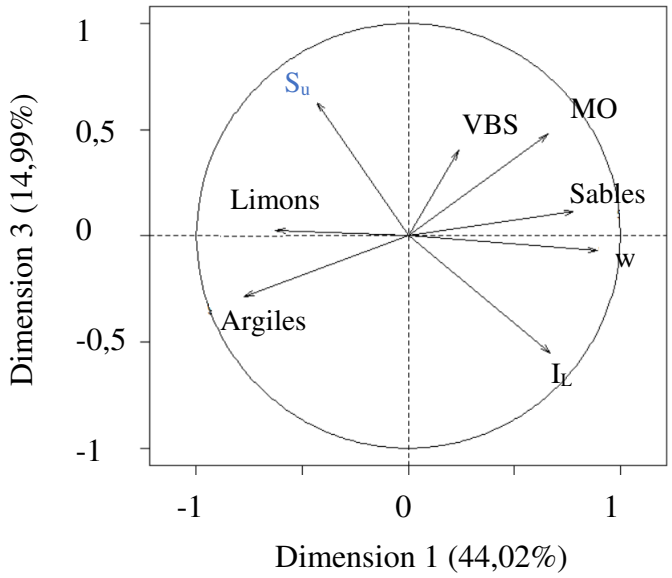
Les individus analysés comprennent les sédiments alpins « AL-FLU », « AL-CLA », « AL-ISE » et « AL-SPO », les sédiments bretons « BR-SAI » et « BR-RAN », le sédiment « GE-RHI » et le sédiment portuaire de Dunkerque « HF-DK ».

59,01% des variables analysées ont été projetées sur le plan factoriel 1 et 3 du cercle de corrélation représenté sur la figure 6-10.a. Ceci a permis d'identifier les caractéristiques physico-chimiques des sédiments liées à la cohésion non drainée des sédiments. Sur ce cercle, on constate que :

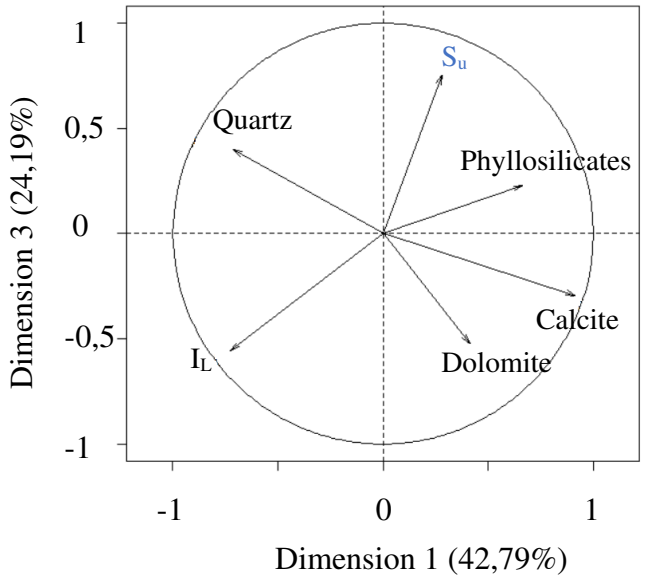
- La contrainte de cisaillement est en opposition vis-à-vis de l'indice de liquidité, celui-ci dépendant à son tour de la teneur en eau des sédiments et des limites d'Atterberg.

- La cohésion non drainée des sédiments est directement corrélée aux fractions fines des sédiments : les argiles et les limons. $S_u$ est indépendante de la teneur en matière organique.

Du point de vue minéralogique, la contrainte de cisaillement est indépendante de la présence de calcite et de quartz. $S_u$ est directement corrélée aux phyllosilicates et *a contrario*, s'oppose à la dolomite. Notons que l'indice de liquidité se trouve ainsi inversement corrélé aux phyllosilicates, voir le cercle de corrélation représenté sur la figure 6-10.b.




*a) Projection de $S_u$ et des caractéristiques physico-chimiques des sédiments sur le plan factoriel 1 et 3.*




*b) Projection de $S_u$ et des principaux minéraux des sédiments sur le plan factoriel 1 et 3.*

*Figure 6-10. ACP relative à la cohésion non drainée et aux caractéristiques physico-chimiques (figure a) et minéralogiques (figure b) des sédiments étudiés.*

### *Relation entre la cohésion non drainée ($S_u$) et l'indice de liquidité ($I_L$)*

D'après les ACP montrées sur la figure 6-10, l'indice de liquidité est la variable la plus liée à la cohésion non drainée. D'ailleurs, l'indice de liquidité permet de relier la teneur en eau des sédiments et les limites de liquidité et de plasticité. $I_L$ dépend des caractéristiques des sédiments.

Une relation fiable entre la cohésion non drainée et l'indice de liquidité présente beaucoup d'intérêt. En effet, elle constitue une relation géomécanique importante, déduite d'une seule mesure de teneur en eau et la connaissance de $S_u$ permet d'aborder des problèmes géotechniques relatifs aux sédiments (adhérence, glissement, cisaillement, capacité portante, ...). La relation $S_u = f(I_L)$ est plus judicieuse que celle de $S_u = f(w)$ car l'indice de liquidité dépend de teneurs en eau caractéristiques.

Pour l'ensemble des sédiments étudiés, la relation $S_u = f(I_L)$ peut être définie par le modèle de Ratkowsky, voir équation 6.7. Pour ce modèle, les coefficients « a », « b » et « c » déterminés pour les sédiments concernés, sont récapitulés dans le tableau 6-5. Les coefficients de détermination sont compris entre 0,944 pour le sédiment « HF-DK » et 0,999 pour le sédiment « AL-CLA ». La relation entre $S_u$ mesurée et $S_u$ prédite est donnée en annexe « A.3.2. Relations entre les valeurs de $S_u$ mesurées et $S_u$ prédites des sédiments étudiés ».

$$S_u = \frac{a}{1+e^{(b-c\cdot I_L)}} \qquad [6.7]$$

*Tableau 6-5. Coefficients de la relation $S_u=f(I_L)$ des sédiments étudiés.*

| | **AL-FLU** | **AL-CLA** | **AL-SPO** | **AL-ISE** | **GE-RHI** | **BR-SAI** | **HF-DK** | **BR-RAN** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **a** | 185,75 | 181,59 | 214,89 | 165,78 | 49,42 | 163,14 | 70357,52 | 118,15 |
| **b** | -3,53 | -4,96 | 3,39 | 4,56 | 1,20 | -1,36 | 8,63 | 0,23 |
| **c** | -3,92 | -5,78 | -1,45 | -5,99 | -5,83 | -1,22 | -1,28 | -0,86 |
| **$R^2$** | 0,998 | 0,999 | 0,997 | 0,994 | 0,995 | 0,984 | 0,944 | 0,993 |

La relation entre la cohésion non drainée et l'indice de liquidité a été étudiée par plusieurs auteurs. L'étude réalisée par LEROUEIL et al., (1983) propose la détermination de $S_u$ à partir de la relation 6.8. Cette équation a été déterminée à partir de la mesure de la cohésion non drainée à l'état remanié obtenue à l'aide de l'essai au pénétromètre à cône ($S_{uR}$) et l'indice de liquidité d'argiles provenant de l'Est du Canada. Cette équation 6.8 est valable et recommandée pour des argiles ayant des valeurs de l'indice de liquidité comprises entre 0,4 et 3.

$$S_{uR} = \frac{1}{(I_L-0{,}21)^2} \qquad [6.8]$$

#### *6.2.4.4. Paramètres liés à la vitesse de drainage (VD) et d'évaporation (VE)*

Les paramètres liés à la vitesse de drainage (VD) et d'évaporation (VE) sont donnés en annexe « A.3.3. Relations entre les paramètres et les vitesses de drainage (VD) et d'évaporation (VE) ».

***Analyse en Composantes Principales (ACP)***

Pour définir les paramètres liés à la vitesse de drainage (VD) et d'évaporation (VE) des sédiments, des analyses en composantes principales ont été effectuées en considérant la caractérisation physico-chimique des sédiments, la géométrie initiale des échantillons des sédiments et les résultats issus de l'Essai d'Égouttage et de Séchage (EES) et de l'Essai de Séchage et de Retrait (ESR).

Les variables des ACP ont été choisies en suivant les critères décrits dans la sous-section « 6.2.2. Principaux paramètres intervenant pendant le séchage naturel des sédiments » du présent chapitre. Elles concernent : la vitesse de drainage (VD) et d'évaporation (VE), la géométrie initiale du sédiment confectionné pour l'essai EES et ESR (hauteur et surface), la teneur en eau initiale des échantillons des sédiments étudiés ($w_0$), les diamètres granulométriques des sédiments ($D_{10}$, $D_{30}$, $D_{50}$, $D_{60}$ et $D_{90}$), la valeur du bleu de méthylène (VBS), les limites d'Atterberg ($w_L$ et $w_P$) et la teneur en matière organique (MO). Les valeurs de ces variables ont été récapitulées dans le chapitre 3 et 4. Les individus analysés sont les sédiments : « AL-FLU », « AL-CLA », « AL-ISE », « AL-SPO », « BR-SAI », « BR-RAN », « GE-RHI », « HF-DK » et « NA-ART ».

L'Analyse en Composantes Principales relative à la vitesse de drainage est représentée sur la figure 6-11. La projection de la vitesse de drainage (VD) peut être donnée sur le cercle de corrélation du plan factoriel 1 et 3, où 52,63% des variables peuvent être illustrées. La vitesse de drainage est très corrélée à la granulométrie, plus les diamètres des sédiments sont importants, plus la fraction sableuse est élevée et plus la vitesse de drainage est élevée. La vitesse de drainage est indépendante de $D_{10}$ et elle est inversement proportionnelle à la hauteur de l'échantillon. Les projections de la matière organique et de la valeur au bleu de méthylène sont représentées sur un plan factoriel diffèrent de celui de la projection de VD. Cela rend impossible de considérer ces variables.

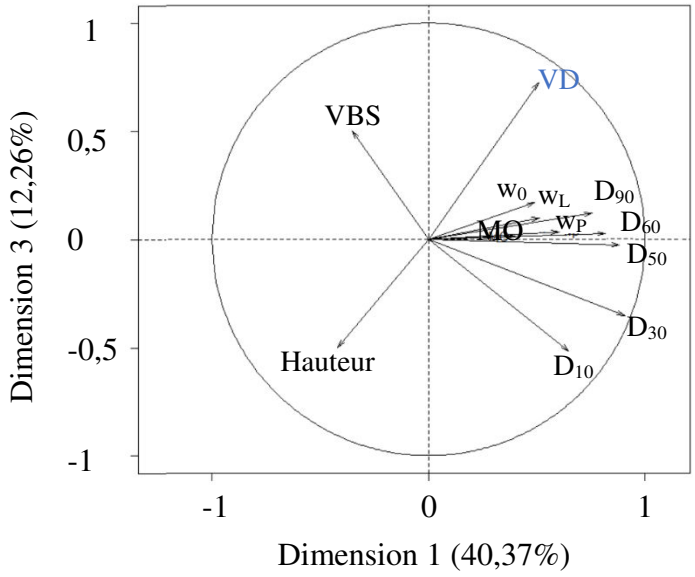



*Figure 6-11. ACP relative à la vitesse de drainage sur le plan factoriel 1 et 3.*

Le cercle de corrélation du plan factoriel 2 et 3, où la vitesse d'évaporation est représentée, permet de projeter 46,14% des variables, voir figure 6-12. La vitesse d'évaporation est inversement corrélée à VBS. La fraction argileuse fait augmenter le temps de déshydratation par évaporation.

Sachant que pour les essais de séchage réalisés dans ces travaux de thèse, la surface de l'échantillon est aussi reliée au volume de sédiments à déshydrater. Les surfaces des tamis sont plus importantes que celles des anneaux œdométriques, et correspondent à des volumes plus élevés de sédiments à déshydrater. De fait, la vitesse d'évaporation est inversement corrélée à la surface.

La vitesse d'évaporation des sédiments est aussi corrélée aux diamètres des particules. Plus le sédiment a une fraction importante de sable, plus la vitesse d'évaporation est élevée.

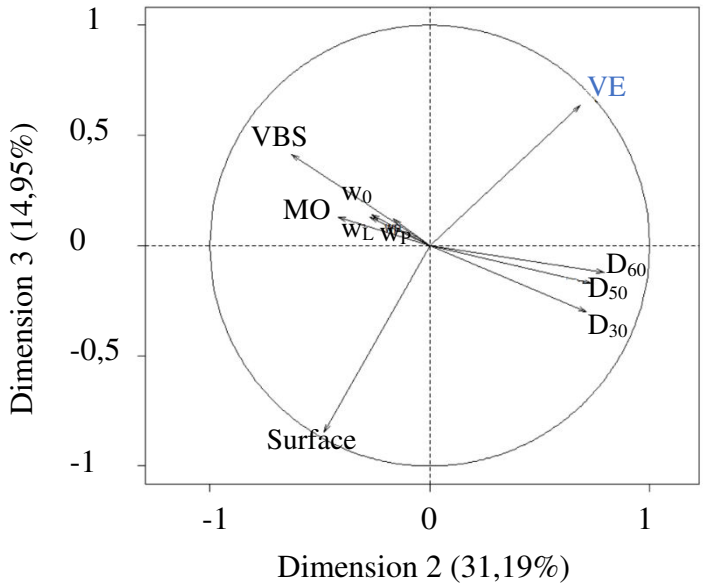



*Figure 6-12. ACP relative à la vitesse d'évaporation sur le plan factoriel 2 et 3.*

***Modèles descriptifs reliés à la vitesse de drainage (VD) et à la vitesse d'évaporation (VE)***

Les vitesses de drainage et d'évaporation peuvent être modélisées à l'aide d'une régression linéaire multiple. Cet outil statistique permet de décrire les variations d'une variable dépendante (VD et VE) associées aux variations de plusieurs variables indépendantes (granulométrie, matière organique, etc.). Les équations pour les vitesses de drainage et d'évaporation ont été déterminées à l'aide du programme « Excel 2016 ». Du fait que les sédiments sont composés essentiellement de fractions argileuses et limoneuses, ils rendent le séchage naturel difficile. Les sables grossiers sont plus faciles à déshydrater. Les équations des vitesses de drainage et d'évaporation ont été définies pour des sédiments avec des teneurs en fines élevées. Rappelons que nos sédiments ayant les fractions granulométriques les plus fines sont les sédiments alpins, bretons, du Rhin et de Dunkerque.

- Vitesse de drainage

La vitesse de drainage peut être définie par l'équation 6.9 avec un coefficient de détermination ajusté ($R_{ajusté}^2$) égal à 0,676. Partant de cette relation, on peut apprécier les écarts entre vitesses de drainage mesurées et prédites. Ces écarts peuvent être observés sur la figure 6-13.A Pour l'ensemble des sédiments étudiés, l'équation 6.9 proposée avec un coefficient de corrélation proposée de 0,903 est satisfaite.

$$VD\ (\%eau/jour) = -697{,}67 \cdot D_{10}\ (\%) + 360{,}76 \cdot D_{30}\ (\%) - 71{,}74 \cdot D_{50}\ (\%) - 45{,}39 \cdot D_{60}\ (\%) + 9{,}93 \cdot D_{90}\ (\%) + 9{,}37 \cdot w_L\ (\%) + 7{,}14 \cdot w_P\ (\%) + 7{,}59 \cdot w_0\ (\%) + 396{,}23 \cdot VBS\ (g/100g) - 79{,}33 \cdot MO\ (\%) - 305{,}72 \cdot Hauteur\ (cm) + 0{,}14 \cdot Volume\ (cm^3) \quad [6.9]$$

La vitesse de drainage dépend essentiellement de la perméabilité du sédiment et de la porosité. Elle peut être définie par la vitesse de Darcy divisée par la porosité, voir équation 6.10.

La vitesse de Darcy ($V_{Darcy}$) est le rapport du débit filtrant (Q) calculée d'après la loi de Darcy divisée par la surface filtrante ($S_{filtrante}$). La loi de Darcy est décrite par l'équation 6.11.

$$VD = \frac{V_{Darcy}}{\text{porosité}} = \frac{\text{Débit filtrant}}{\text{Surface filtrante}\cdot\text{porosité}} \quad [6.10]$$

$$Q = K \cdot S_{filtrante} \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad [6.11]$$

avec les notations suivantes :
Q : Débit volumique filtrant en $m^3/s$ ;
$S_{filtrante}$ : Surface filtrante de la section étudiée en $m^2$ ;
$\Delta H/L$ : Gradient hydraulique.

La vitesse de drainage peut être calculée à l'aide de l'essai de décantation et de consolidation. Les procédures de ces essais ont été décrites dans le chapitre 3.

- Vitesse d'évaporation

La vitesse d'évaporation peut être définie par l'équation 6.12 qui a un coefficient de détermination ajusté ($R_{ajusté}^2$) de 0,843. Avec cette relation, on peut exprimer les valeurs de VE mesurées en fonction des valeurs prédites ce qui permet d'apprécier les écarts entre ces vitesses. Ces écarts peuvent être observés sur la figure 6-13.B. Les points qui correspondent aux valeurs VE mesurées et prédites forment deux groupes distincts, donc sensiblement « deux noyaux » par lesquels on peut faire passer une droite avec un coefficient $R^2$ correct. L'équation 6.12 pourrait être améliorée et validée en réalisant une nouvelle série d'essais de séchage, avec des sédiments de natures différentes à celles des sédiments étudiés.

$$VE\ (\%eau/jour) = 1{,}711\cdot D_{30}\ (\%) + 4{,}405\cdot D_{50}\ (\%) - 2{,}946\cdot D_{60}\ (\%) - 0{,}441\cdot w_L\ (\%) - 0{,}477\cdot w_P\ (\%) + 7{,}077\cdot VBS\ (g/100g) + 1{,}932\cdot BET\ (m^2/g) - 0{,}378\cdot MO\ (\%) - 0{,}001\cdot Volume\ (cm^3) \quad [6.12]$$

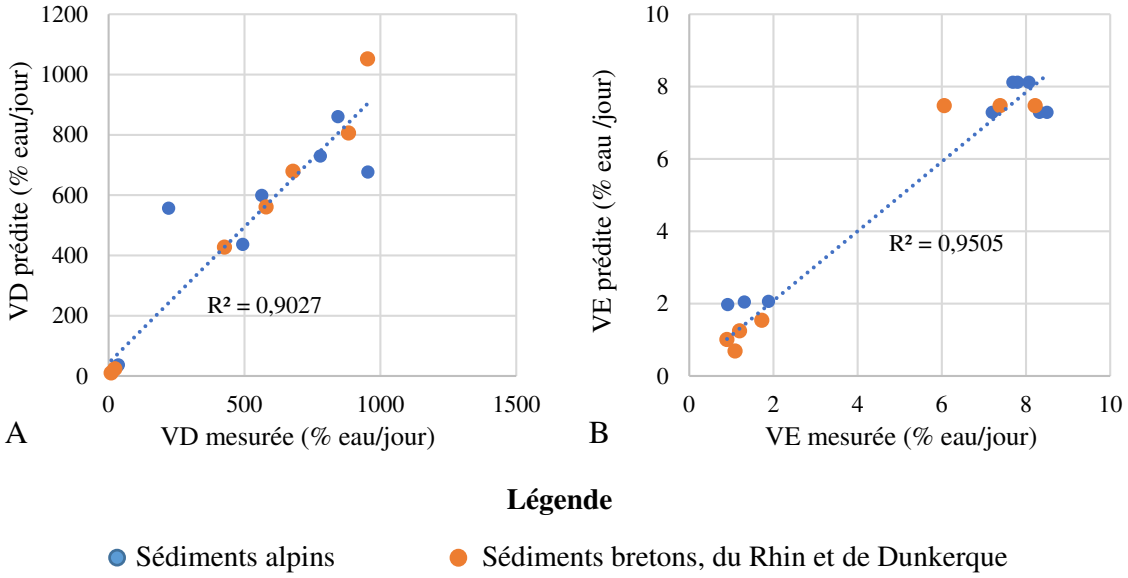



*Figure 6-13. Relation entre les vitesses VD (figure A) et VE (figure B) mesurées et prédites.*

L'étude réalisée par MIRAOUI (2010), sur deux sédiments du port de Dunkerque, a suggéré de prédire la variation de la teneur en eau restant dans le sédiment (w) en fonction du temps (t) à l'aide d'une fonction linéaire, voir équation 6.13. Cette équation ne s'applique seulement quand l'eau des sédiments est évacuée seulement par évaporation.

$$w = w_0 - VE \cdot t \qquad [6.13]$$

Les valeurs de la vitesse d'évaporation pour les sédiments du port de Dunkerque étudiés par MIRAOUI (2010) sont comprises entre 0,62 % d'eau/jour et 1,14 % d'eau/jour pour un échantillon de diamètre 11 cm et une hauteur de 15 cm avec des teneurs en eau initiales de 90% et 180% respectivement. Pour un autre essai avec toujours une teneur en eau initiale de 180% mais un échantillon de diamètre 7 cm (hauteur de 15 cm), la vitesse d'évaporation est de 0,83% d'eau/ jour. Ceci met en évidence que l'eau évaporée (sans le phénomène de drainage) est directement proportionnelle à la teneur en eau initiale du sédiment et au diamètre initial de l'échantillon. Mais la vitesse d'évaporation dépend aussi de la nature du sédiment que MIRAOUI (2010) n'a pu démontré avec deux sédiments portuaires identiques.

D'après les études réalisées par DALTON (1802), la vitesse d'évaporation dépend de la vitesse du vent et du déficit de saturation ($e_s$-$e_a$) de l'air au-dessus d'une surface exposée. Elle peut être calculée en suivant la loi de Dalton, voir équation 6.14. Le déficit de saturation correspond à la quantité d'eau qui peut être stockée par l'air.

$$VE = f(u) \cdot (e_s - e_a) \qquad [6.14]$$

avec les notations suivantes :
VE : Vitesse d'évaporation en mm/jour ;
$e_a$ : Pression effective ou actuelle de la vapeur d'eau dans l'air en mb ;

$e_s$ : Pression de la vapeur d'eau à saturation à la température de la surface de l'échantillon en mb ;
f(u) : Constante de proportionnalité en fonction de la vitesse du vent « u ».

La vitesse d'évaporation peut être calculée à l'aide du potentiel d'évaporation ($E_p$). Le potentiel d'évaporation peut être défini comme étant la quantité d'eau maximale évaporée sous un climat de caractéristiques connues, par unité de temps et de surface (THORNTHWAITE, 1948). Il peut être dénommé comme ÉvapoTranspiration Potentielle (ETP). Le potentiel d'évaporation a été étudié par plusieurs auteurs qui se sont basés sur la loi de Dalton (ROHWER, 1934 et PENMAN, 1948).

ROHWER (1934) détermine le potentiel d'évaporation de l'eau grâce à la température et l'humidité, voir équation 6.15.

$$E_p = 0{,}29572 \cdot (1 - \varphi) \cdot e^{\frac{17{,}27T}{237{,}3+T}} \quad [6.15]$$

avec les notations suivantes :
$E_p$ : Potentiel d'évaporation du sol ou du sédiment, en m/s ;
φ : Humidité relative en % ;
T : Température dans l'enceinte en ºC.

PENMAN (1948) propose de calculer le potentiel d'évaporation à l'aide de l'équation 6.16. Dans cette équation, le potentiel $E_p$ est relié aux paramètres atmosphériques : la densité de l'air, la conductance atmosphérique…, l'irradiance, les variations de pressions, etc.

$$E_p = \frac{m \cdot R_n + \rho_a \cdot c_p \cdot \delta_e \cdot g_a}{\lambda_v \cdot (m + \gamma_1)} \quad [6.16]$$

avec les notations suivantes :
$E_p$ : Potentiel d'évaporation du sol ou du sédiment, en mm/s ;
m : Pente de la courbe de la pression de vapeur saturante en Pa/K ;
$R_n$ : Irradiance nette ou puissance de rayonnement en W/m$^2$ ;
$\rho_a$ : Masse volumique de l'air en kg/m$^3$ ;
$c_p$ : Capacité thermique de l'air en J/(kg·K)
$g_a$ : Conductance atmosphérique en m/s ;
$\delta_e$ : Variation de pression en Pa ;
$\lambda_v$ : Énergie de vaporisation en J/kg ;
$\gamma_1$ : Constante psychrométrique en Pa/K.

### *6.2.5. Mise en œuvre de moyens ou de dispositifs d'amélioration du processus de séchage de sédiments*

Le séchage par lagunage est composé de trois étapes : une première étape de remplissage du casier avec des sédiments à hautes teneurs en eau. Une deuxième, qui englobe le séchage des sédiments par drainage à l'aide d'une sous-couche drainante et par évaporation atmosphérique ; une dernière étape, qui consiste à enlever les sédiments déshydratés.

La vitesse d'évaporation s'accélère en présence du phénomène de retrait et de fissuration, la surface des sédiments en contact avec l'air augmentant. Cette vitesse d'évaporation pourrait être augmentée en retournant ou en perforant les couches de sédiments. Trois techniques de retournement (1) et de scarification (2) peuvent être proposées :

- La technique la plus traditionnelle consiste en retourner les sédiments grâce à des engins spécifiques munis de socs de labour ou des disques à forme adaptée prenant en compte l'adhésion du sédiment.

- La scarification des sédiments pourrait être réalisée à l'aide d'un rouleau scarificateur mobile et motorisé composé d'aiguillons ou dents ou disques, comme celui indiqué dans la figure 6-2.b. Ce rouleau pourrait être tracté par un système motorisé circulant sur la banquette. Il pourrait être aussi autonome et robotisé. Quel que soit le type de rouleau, il permettrait de réaliser des sillons dans les sédiments avec un mouvement de translation horizontal.

- Un treillis mobile et motorisé, équipé des aiguilles ou des dents, comme celui montré dans la figure 6-2.c permettrait de perforer les couches des sédiments et de créer des sillons plus profonds que ceux réalisés avec un rouleau scarificateur. Ce treillis peut être déplacé en suivant une direction horizontale sur la banquette du casier et la profondeur de l'enfouissement des outils (aiguilles, dents, mollettes dentées,...) serait réglable verticalement.

Le retournement ou la scarification des sédiments doivent être effectués à un moment à définir qui serait le plus approprié. Ce moment dépend de la technique utilisée, voir figure 6-14.

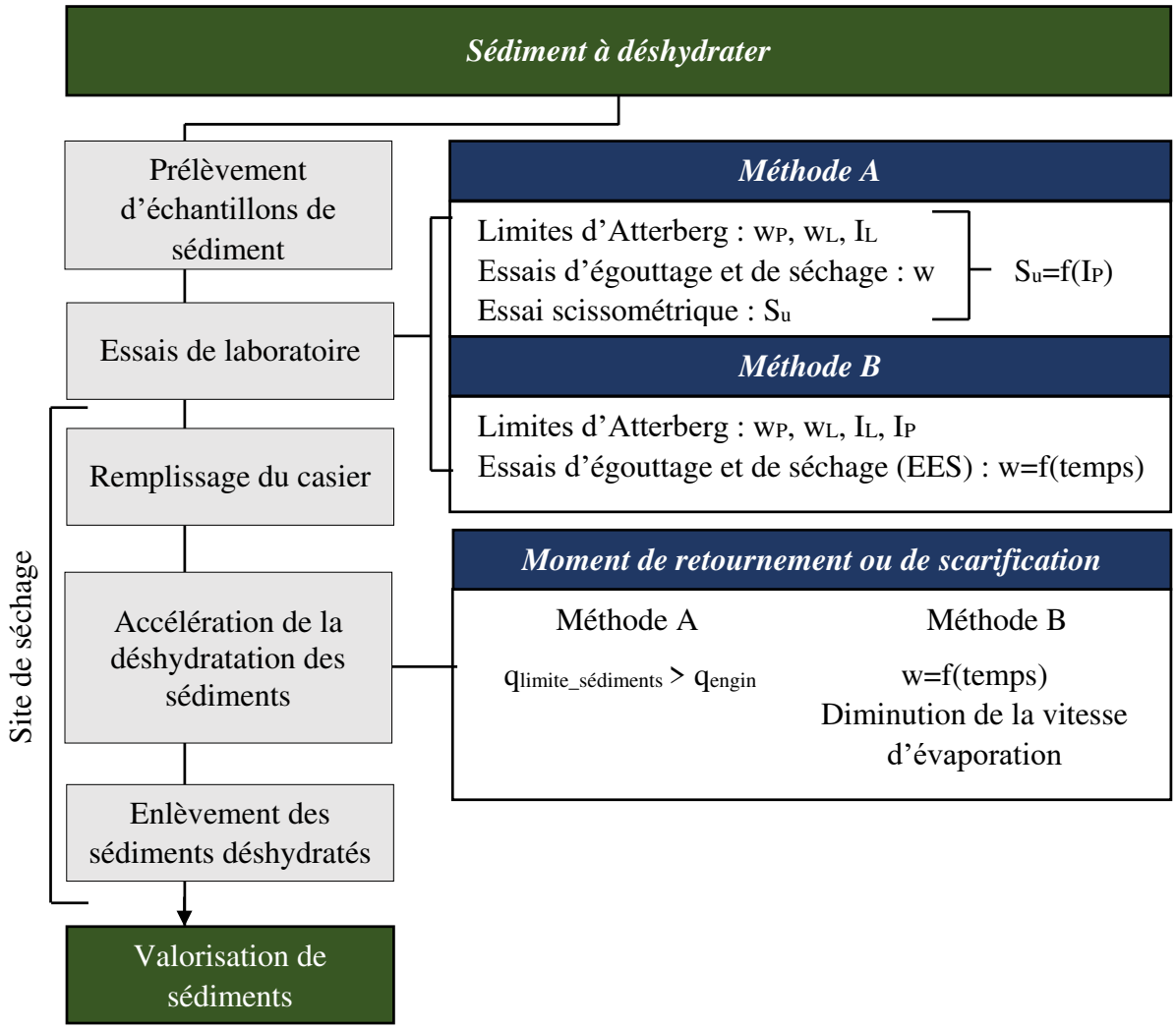
Si les sédiments sont retournés à l'aide d'engins spécifiques, le moment de retournement correspond au moment où la capacité portante des sédiments ($S_u$) est suffisante pour supporter la pression exercée par ces engins, voir figure 6.14. Cette capacité portante peut être estimée à partir de la mesure de teneur en eau des sédiments et grâce à la relation $S_u = f(I_P)$. Pour obtenir cette relation, les limites d'Atterberg doivent être déterminées et un Essai d'Égouttage et de Séchage (EES) doit être mené en laboratoire couplé à un essai scissométrique. La pression exercée par l'engin assurant le retournement est celle des roues au contact de la couche de sédiments. En première approche, la vitesse de l'engin est lente, les effets dynamiques peuvent être négligés. La pression exercée peut s'écrire simplement selon l'équation 6.17 dans laquelle la surface portante de l'aire projetée des socs est négligée. Les caractéristiques techniques (masse totale y compris le conducteur « M », nombre de roues « N », surface de contact par roue « $S_{cr}$ », effort vertical additionnel des socs ou disques enfouis « $F_{v_soc}$ »...) seront obtenues près du fournisseur.

$$q_{engin} = \frac{g \cdot M + F_{v_soc}}{N \cdot s_{cr}} \qquad [6.17]$$

avec les notations suivantes :
$q_{engin}$ : Pression exercée par l'engin sur la couche de sédiments ;

g : Pesanteur ;
M : Masse totale de l'engin, plus conducteur ;
$F_{v_soc}$ : Effort vertical additionnel des socs ou disques enfouis ;
N : Nombre de roues de l'engin ;
$S_{cr}$ : Surface de contact roue/sédiments.

Si les sédiments sont scarifiés à l'aide d'un dispositif circulant sur la banquette du casier, les sédiments doivent être retournés au moment où la diminution de vitesse de déshydratation, se manifeste, voir figure 6-14. La cinétique de déshydratation peut être suivie à l'aide de la fonction w=f(temps) obtenue avec l'Essai d'Égouttage et Séchage (EES). Dès que les sédiments ont une teneur en eau égale ou voisine de la limite de liquidité, les sédiments tendent vers un comportement plastique, dans cet état une diminution de la vitesse d'évaporation est observée.




***Note :***
***Méthode A***. *Retournement à l'aide de dispositifs à base de socs ou disques de labour ;*
***Méthode B***. *Réalisation de sillons ou scarifications à l'aide d'un treillis mobile ou de rouleaux équipés de dents.*

*Figure 6-14. Mise en œuvre d'améliorations au processus de séchage de sédiments.*

## *6.3. PROPOSITION DE CRITÈRES D'APTITUDE À LA DÉSHYDRATATION MÉCANISÉE DE SÉDIMENTS*

Cette section s'intéresse à la proposition et la détermination de critères d'aptitude à la déshydratation mécanisée de sédiments avec la presse à boues KDS®. Elle comporte quatre sous-sections. La première aborde l'étude des paramètres intervenant dans la déshydratation des sédiments et des matériaux argilo-sableux avec la machine KDS®. La deuxième fait état des modifications réalisées sur le prototype de presse en vue d'améliorer le processus de déshydratation. La troisième sous-section est dédiée à un essai de déshydratation de sédiments à l'échelle industrielle ; la dernière est consacrée à l'élaboration d'une méthode de travail pour la déshydratation de sédiments de barrage.

### *6.3.1. Paramètres intervenant dans la déshydratation des sédiments avec la presse à boues KDS®*

Les paramètres influant sur la déshydratation des sédiments avec la presse KDS® peuvent être scindés en deux groupes : ceux qui interviennent dans la préparation du matériau à déshydrater et les paramètres de la machine.

#### *6.3.1.1. Paramètres intervenant pendant la préparation des sédiments*

***Impact de la teneur en eau initiale des sédiments***

Les résultats de la déshydratation mécanique sur les sédiments montrent que la teneur en eau finale du produit déshydraté est indépendante de sa teneur en eau initiale. Une augmentation de la teneur en eau initiale des sédiments peut être traduite par un accroissement de l'eau libre des sédiments, voir figure 6-15.

L'eau libre de la boue est évacuée par égouttage. C'est seulement l'eau retenue par les flocs qui arrive à la fin du cycle d'égouttage. L'eau retenue par les flocs est indépendante de la teneur en eau initiale. Elle est liée à la viscosité et la taille des flocs, ce qui dépend des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du sédiment à déshydrater.

L'augmentation de la teneur en eau initiale des sédiments a un impact positif sur la concentration de la matière en suspension des eaux collectées après la déshydratation mécanique avec la presse KDS®. Les mélanges de sédiments classés comme « boues légères » ou fortement diluées ont les concentrations de matière en suspension les plus faibles, hormis le sédiment « BR-SAI » qui est le sédiment le plus organique.

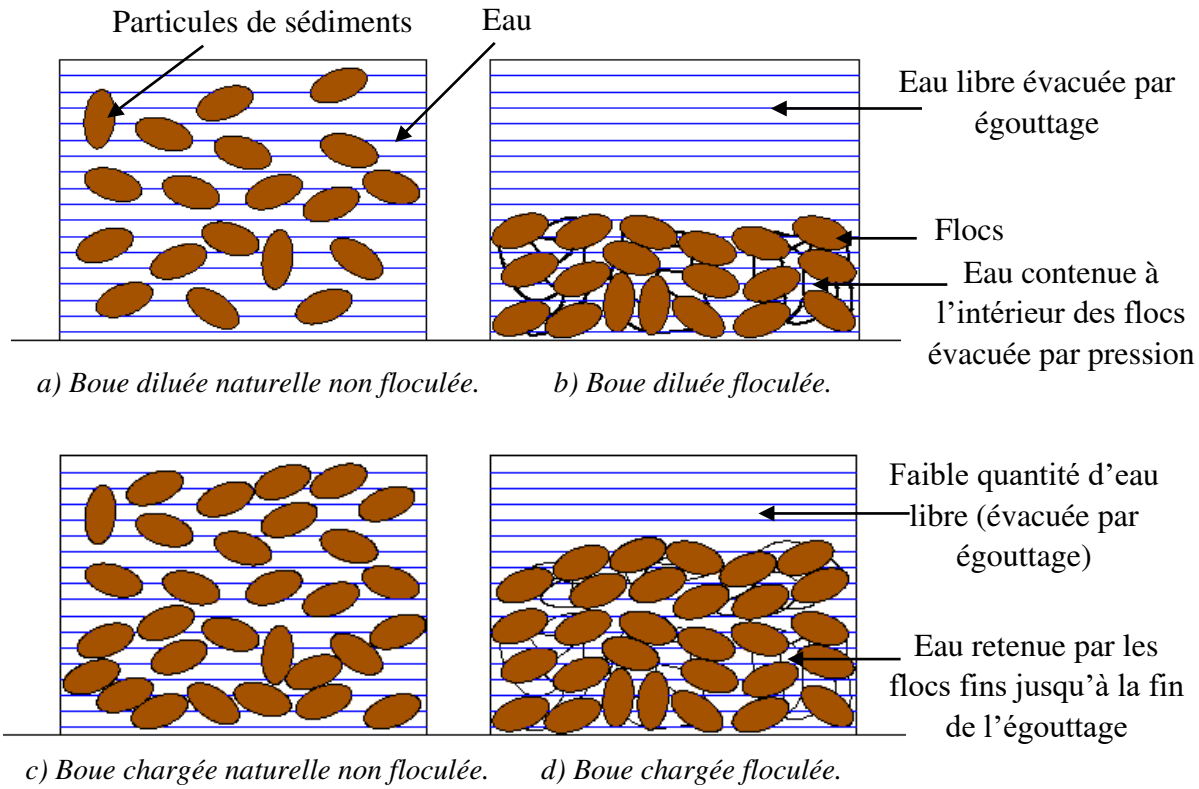



*Figure 6-15. Influence de la teneur en eau initiale des sédiments pour l'essai de déshydratation.*

***Impact du floculant dans la déshydratation des sédiments***

Le choix du polymère ainsi que la quantité de polymère à ajouter sont deux paramètres primordiaux dans la déshydratation mécanique avec la presse KDS®. En effet, ils interviennent dans la préparation de la boue à déshydrater et dans le coût de la déshydratation.

Le processus de floculation, pour ce type de déshydratation mécanique visé est de former des flocs de grande taille, résistants et spongieux. La teneur en eau finale du sédiment et/ou du matériau à déshydrater et la qualité du surnageant dépendent du résultat de ce processus.

Si les flocs formés sont assez grossiers et résistants, ils ne subiront aucun dommage dû au cisaillement relatif au mouvement des barres et des disques et seront transportés sur la table d'égouttage. Ceci évite le passage des flocs fins à travers les espaces existant entre les disques. De même, l'eau collectée est claire et la concentration de la matière en suspension est faible.

Les flocs les plus spongieux et les plus visqueux retiennent la plus importante quantité d'eau. Ceci implique le besoin d'appliquer une force de compression afin de détruire la structure des flocs et évacuer l'eau retenue dans les flocs. De plus, plus les flocs sont spongieux, moins ils sont résistants.

L'effet du floculant dans la déshydratation des sédiments est aussi évoqué dans la section « Impact de la vitesse de rotation des disques elliptiques », sur la figure 6-16. Pour les sédiments

étudiés, la figure 6-16 montre que le floculant permet d'évacuer des pourcentages d'eau libre allant de 568% jusqu'à 723% pour les sédiments qui ont une teneur en eau initiale de 800% et de 216% jusqu'à 300% pour les sédiments qui ont des teneurs en eau initiales de 400%.

***Impact des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du sédiment à déshydrater***

Les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du sédiment à déshydrater sont fortement liées aux processus de floculation et de déshydratation avec la presse KDS®.

Le choix du floculant dépend du type de sédiment et/ou matériau à déshydrater. Rappelons que la floculation est un ensemble de processus physico-chimiques qui permet de former des flocs en diminuant les forces de répulsion entre les particules du matériau à déshydrater (MOTTOT, 2000). Ce procédé est fortement lié aux caractéristiques du produit à déshydrater. De même, la densité de charge, le poids moléculaire et le dosage du floculant sont directement proportionnels à la teneur en argiles du produit à déshydrater.

La teneur en argiles du sédiment à déshydrater est étroitement liée à la formation des flocs. Les sédiments avec des pourcentages élevés en argiles forment des flocs grossiers et très spongieux. Ceci est dû à la capacité d'absorption de l'eau par les argiles. Les flocs formés avec des sédiments peu argileux sont petits et moins visqueux.

Les essais de floculation menés sur les sédiments et les matériaux argilo-sableux indiquent que la présence du sable a un impact favorable quant à la formation des flocs. Le sable est infloculable. Cependant, quand il est mélangé avec des argiles, il diminue la viscosité du mélange. Ceci provoque une diminution de la spongiosité des flocs et l'accumulation d'eau à l'intérieur des flocs.

En ce qui concerne le passage des sédiments par la presse KDS®, il est à noter que la granulométrie des sédiments joue un rôle fondamental pendant la déshydratation. Le sable a un impact négatif quand son diamètre médian est de 0,1 cm ± 0,01 cm, ceci correspond aux espaces entre les disques. Les grains de sable de cette dimension peuvent rester coincés entre les espaces des disques elliptiques.

Les essais de déshydratation réalisés sur les sédiments et les matériaux argilo-sableux montrent d'une part que les teneurs en eau finales les plus réduites sont obtenues avec les mélanges les plus sableux, et d'autre part que la teneur en eau finale est directement proportionnelle à la quantité d'argile.

Quant à la qualité du surnageant, le degré d'opacité de l'eau résiduelle est proportionnel à la teneur en argile ou à la matière organique. La qualité du surnageant pour les sédiments plus organiques et/ou argileux peut être améliorée en injectant des coagulants.

### *6.3.1.2. Paramètres intervenant pendant la déshydratation des sédiments*

#### *Impact du débit d'entrée de la boue*

Le débit d'entrée influe sur le contact entre les disques elliptiques et la boue. Les débits d'entrée relativement élevés ne sont pas accessibles à l'échelle du prototype de presse utilisée en laboratoire. La boue avec un débit très élevée passe au-dessus des disques et la plaque de compression.

Si le débit d'entrée est élevé, la boue a une vitesse d'écoulement à la sortie du réservoir trop importante. Quelques flocs peuvent se casser au moment de l'impact sur les disques elliptiques. Les flocs ainsi brisés risqueront de traverser les espaces entre les disques. Ceci implique une augmentation de la concentration de la matière en suspension.

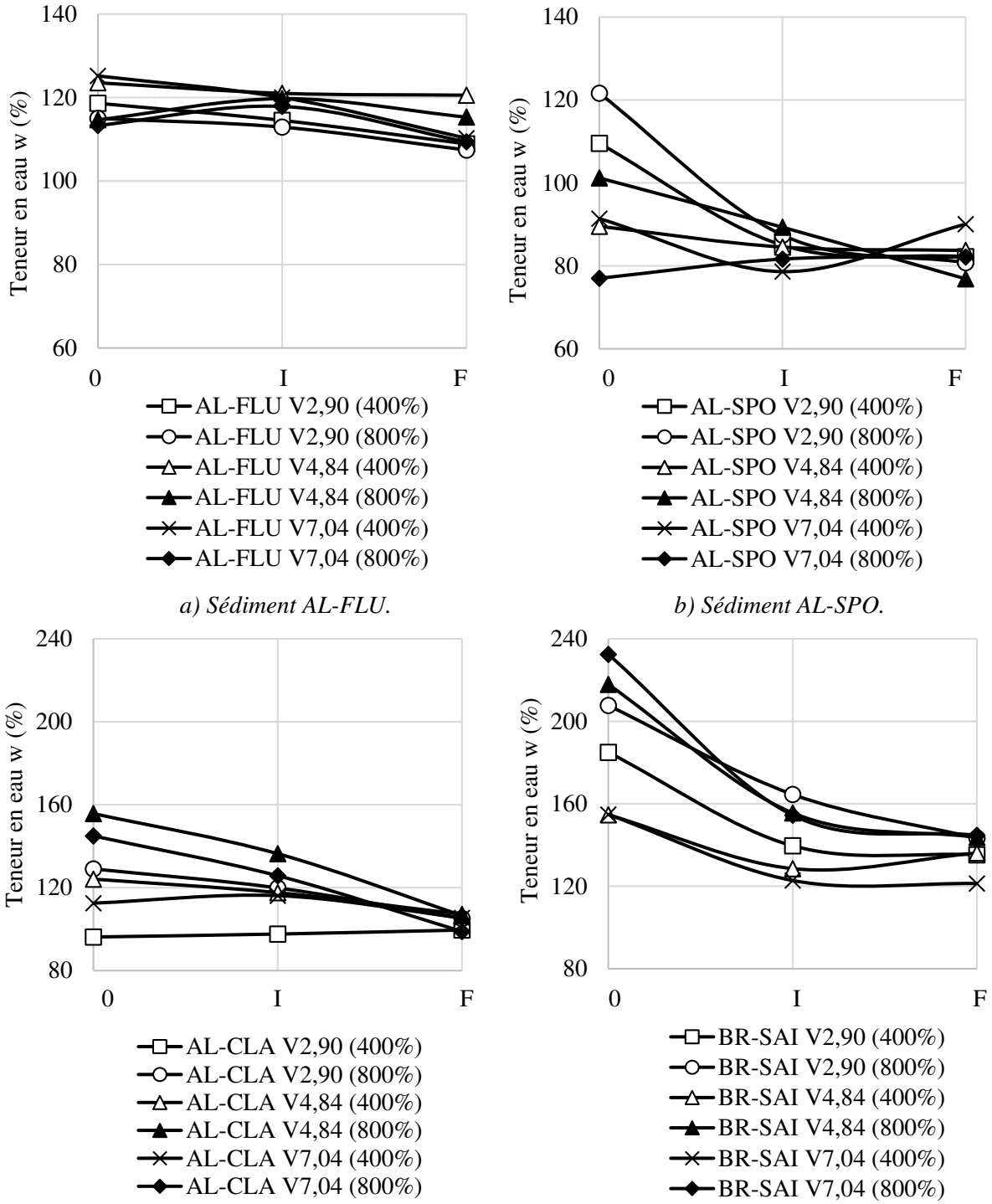
#### *Impact de la vitesse de rotation des disques elliptiques*

La vitesse de rotation des disques est liée au temps de déshydratation et au contact entre les flocs de la boue et les disques elliptiques. Plus la vitesse est élevée, plus le temps de déshydratation et le contact entre les disques et la boue sont réduits.

Les résultats des essais de déshydratation sur les matériaux argilo-sableux et les sédiments indiquent que la vitesse de rotation des disques est indépendante de la teneur en eau finale de la boue, pour la longueur de la table d'égouttage du prototype testé, voir figure 6-16. Ceci est dû au fait que la vitesse de rotation des disques permet d'évacuer uniquement l'eau libre de la boue par égouttage.

Les graphiques de la figure 6-16, montrent l'évolution de la teneur en eau des sédiments pendant leur passage sur la table d'égouttage de la presse KDS® selon la vitesse de rotation des disques et sans application de pression. La plupart de l'eau libre est égouttée à la sortie du réservoir, voir point zéro « 0 » des graphiques, cette quantité d'eau est évacuée seulement par l'effet du floculant. Puis, la boue est transportée et l'eau libre est évacuée par le cisaillement entre les disques et la boue. Une part de l'eau libre restante est drainée jusqu'au niveau du système de pressage, correspondant au point intermédiaire des graphiques « I ». L'eau qui reste à la fin de la table d'égouttage, voir point « F » sur les graphiques, est l'eau retenue dans les flocs à la sortie du système de pressage, voir figure 6-17.

En ce qui concerne la matière en suspension, les vitesses de rotation des disques les plus réduites, comprises entre 2,9 tr/min et 4,84 tr/min donnent les concentrations de la matière en suspension les plus faibles.




*a) Sédiment AL-FLU.*

*b) Sédiment AL-SPO.*

*c) Sédiment AL-CLA.*

*d) Sédiment BR-SAI.*

***Note** : La teneur en eau montrée sur les graphiques est la teneur en eau moyenne de trois mesures de teneur en eau prises aux emplacements « 0 », « I » et « F », voir figure 6-17.*

*Figure 6-16. Évolution de la teneur en eau des sédiments pendant leur passage par la presse KDS® en faisant varier la vitesse de rotation des disques.*

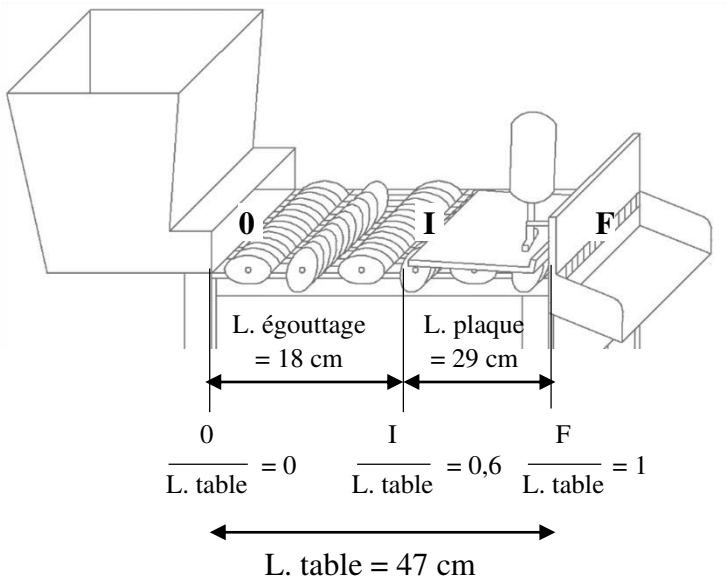
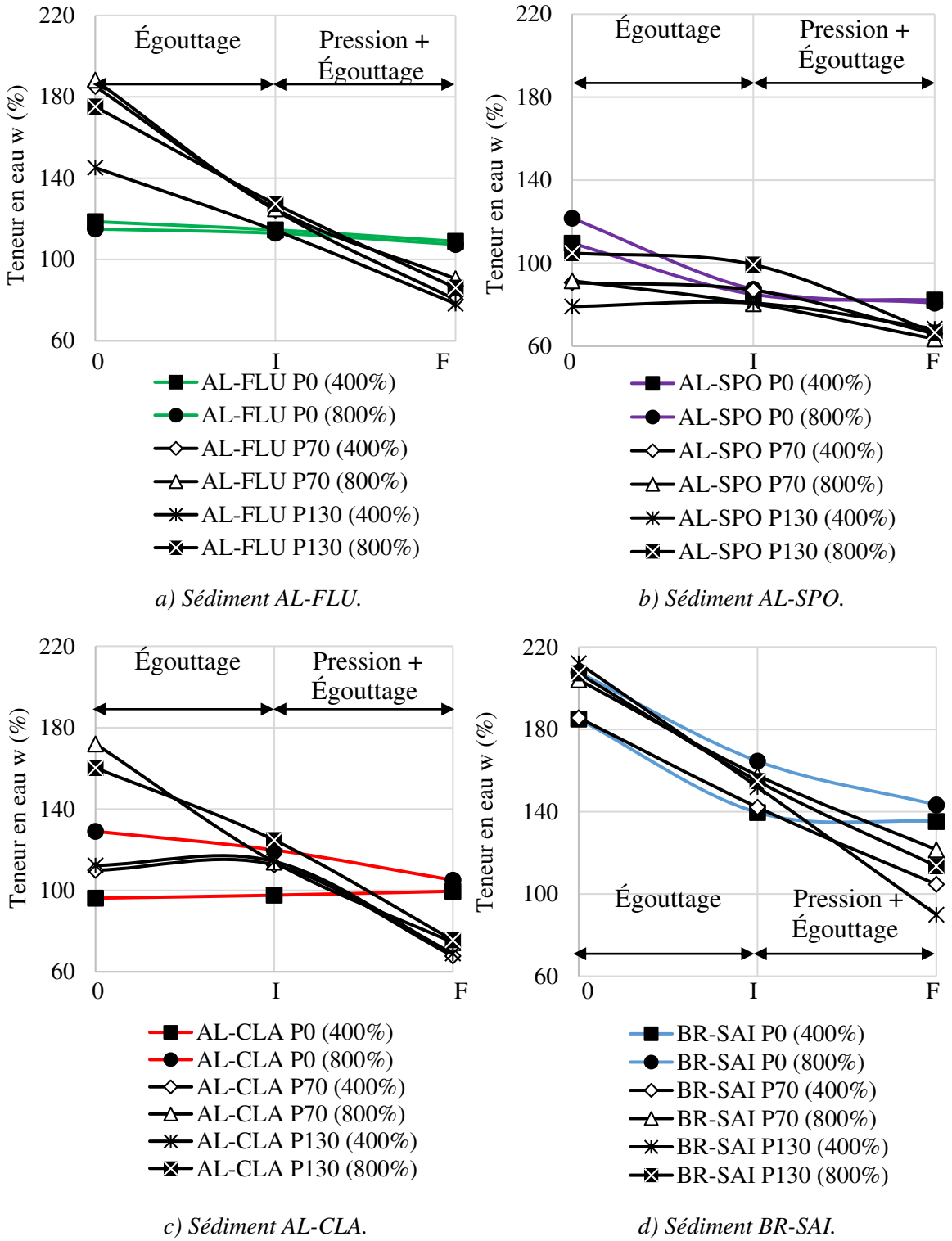



*Figure 6-17. Emplacement des mesures de la teneur en eau.*

***Impact de la pression appliquée***

L'application de la pression à la fin du cycle de déshydratation par égouttage permet d'extraire l'eau contenue dans les flocs, quel que soit le matériau à déshydrater, voir figure 6-18. Lorsque le matériau à déshydrater est soumis à une pression, les flocs sont comprimés, pouvant être détruits et ainsi libérer l'eau des particules pouvant traverser les espaces existants entre les disques elliptiques. Ceci fait diminuer la teneur en eau finale. Cependant, une augmentation de la pression implique plus ou moins une concentration de la matière en suspension plus élevée.




*a) Sédiment AL-FLU.*

*b) Sédiment AL-SPO.*

*c) Sédiment AL-CLA.*

*d) Sédiment BR-SAI.*

*Figure 6-18. Impact de la pression appliquée sur la déshydratation des sédiments avec la presse KDS®.*

Les graphiques relatifs à la figure 6-18, permettent de suivre l'évolution de la teneur en eau des sédiments pendant leur passage par la presse KDS® avec une vitesse de rotation des disques de 2,9 tr/min et en faisant varier la pression appliquée.

Ces graphiques illustrent l'eau égouttée depuis la sortie du réservoir, voir point zéro « 0 » des graphiques, jusqu'à l'arrivée en entrée sous la plaque d'appui, voir point « I » des graphiques. La variation de la teneur en eau allant du point « I » jusqu'au point « F » correspond à l'eau évacuée grâce à l'application de la pression. Pour les sédiments étudiés, les pourcentages de réduction de la teneur en eau, augmentent entre 13,8% et 45,3% sous l'effet de la pression.

### *6.3.2. Modifications à apporter à la machine à déshydrater*

La presse à boues KDS® actuelle a été conçue pour la déshydratation de boues non minérales en continu. Elle offre des produits déshydratés avec des teneurs en eau réduites et des concentrations de matière en suspension faibles quand les boues sont organiques. Les teneurs en eau finales les plus faibles peuvent être de 25% en fonction du type du matériau à déshydrater. Les surnageants collectés tendent à être clairs selon les sociétés AMCON (2017), Atlantique Industrie (2018a) et BENENV & CO (2018).

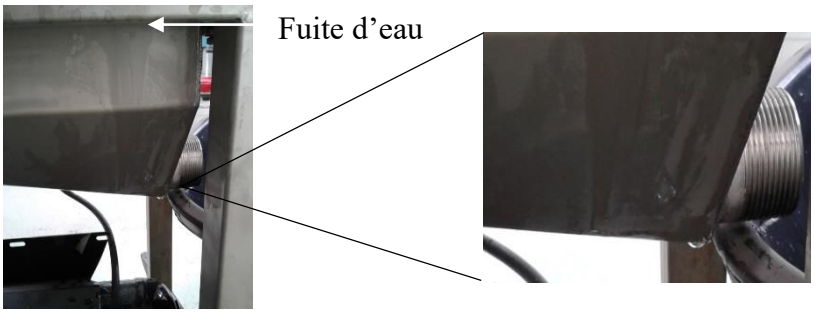
Pour des raisons de conception, cette presse n'a jamais été testée avec des matériaux fins contenant des minéraux comme les sédiments. Ceci a impliqué l'apparition d'une série d'anomalies ou de dysfonctionnements pendant la prise en main et les essais de déshydratation des matériaux argilo-sableux et des sédiments. Ces anomalies sont récapitulées dans la présente sous-section. Elles ont permis d'apporter une série de modifications à la presse actuelle.

#### *6.3.2.1. Modifications dues aux dysfonctionnements pendant la prise en main de la presse*

Quelques problèmes occasionnels ont été détectés pendant la réalisation des essais de déshydratation et la mise en route opérationnelle du prototype de presse. Ils sont énumérés ci-après :

***Problème de fuite d'eau sous le collecteur d'eau de la presse***

Une fuite d'eau a été localisée au niveau du collecteur pendant la réalisation des premiers essais de déshydratation, voir figure 6-19. Ce problème était dû à une mauvaise soudure lors de l'assemblage de la presse. De manière provisoire, l'eau a été collectée à l'aide de seaux. Puis le collecteur a été remis en état par le fournisseur de la presse.




*a) Localisation de la fuite d'eau.* *b) Zoom sur l'image.*

*Figure 6-19. Fuite d'eau sous le collecteur d'eau de la presse.*

***Problème de manomètre et lecture des pressions***

Le prototype de presse utilisé en laboratoire avait deux manomètres qui mesuraient tous les deux la pression dans la cuve à air comprimé. Ceci rendait impossible de connaître la pression appliquée à la plaque de compression. La duplication du manomètre était due à un mauvais design de la presse en laboratoire. Ce problème a été solutionné en ajoutant un troisième manomètre qui permettait de régler la pression appliquée à la plaque de compression, voir figure 6-20. L'installation du manomètre a été réalisée chez le fournisseur de la presse. En raison de problèmes dans le transport, le manomètre est arrivé au laboratoire abîmé et a été remplacé par un autre manomètre du laboratoire M2C.

La presse à boues KDS® utilisée à échelle industrielle possède un système de pression réglable automatique. Elle ne présente plus ce problème.

*a) État initial.* *b) État final.*

*Figure 6-20. Problème de manomètre et de lecture des pressions.*

### *6.3.2.2. Modifications d'adaptation de la presse KDS® à la déshydratation des sédiments*

Les modifications d'adaptation apportées au prototype de presse utilisé en laboratoire sont énumérées ; elles ont été réalisées afin d'adapter la presse à boues KDS® à la déshydratation de sédiments.

***Colmatage des sédiments pendant la déshydratation avec la presse KDS®***

Les petites quantités de matériau à déshydrater, d'environ 3 litres, ont mis en évidence des problèmes de colmatage des sédiments pendant leur passage par la presse à boues KDS®. Quand la quantité de matériau à déshydrater est très faible, le matériau reste immobilisé entre les rangées de disques elliptiques, rendant impossible le transport et l'effet de cisaillement, voir figure 6-21.a. Ce problème a été solutionné en poussant le matériau à l'aide d'une spatule. Ceci peut être une solution abordable à l'échelle du laboratoire.

Mais le colmatage du matériau situé en début de la table d'égouttage, voir figure 6-21.b. peut être évité en modifiant la pente d'entrée du matériau, à l'aide d'une tôle en acier inoxydable. Sachant que le colmatage de quantités de matériaux faibles ne se présenterait pas (volumes bien supérieures de matériau à déshydrater) et ne poserait pas un problème à l'échelle industrielle ; la pente de l'entrée du matériau n'a pas été modifiée.

### *Mise en place d'un système de nettoyage de la presse KDS®*

Le colmatage a été aussi constaté pendant le nettoyage de la machine pour évacuer les sédiments, voir figure 6-21.b. La presse à boues KDS® n'a pas de système autonettoyant automatique. Il serait utile d'en disposer d'un car un nettoyage manuel nécessite du temps. De ce fait, le nettoyage a été réalisé de manière manuelle avec un tuyau à partir d'un réseau d'eau disponible en salle de laboratoire. Au niveau industriel, un système de nettoyage pourrait être automatisé grâce à un système autonettoyant comme celui de la presse à boues Volute®.

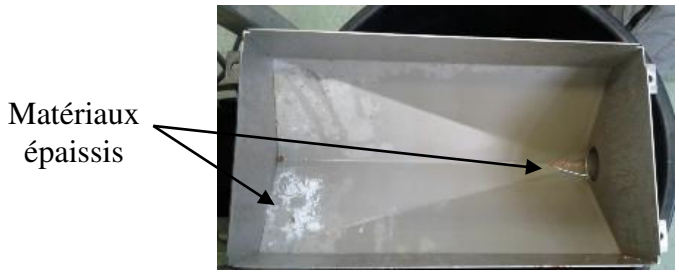
*a) Colmatage pendant la déshydratation des sédiments.*

*b) Colmatage au niveau du nettoyage.*

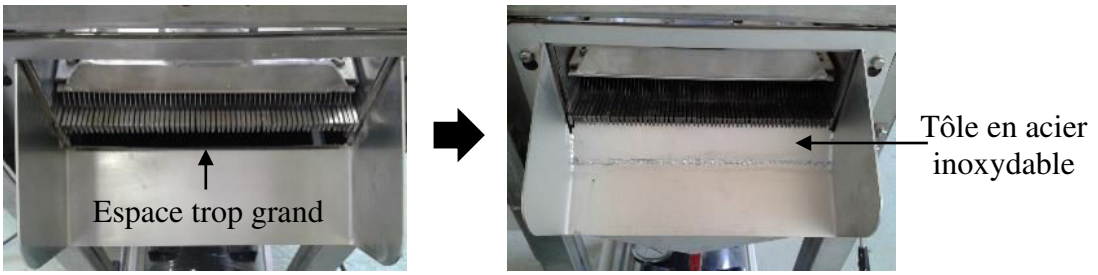
*Figure 6-21. Colmatage des sédiments pendant la déshydratation et le nettoyage de la presse KDS®.*

### *Solution apportée à la rétention du matériau épaissi dans le collecteur d'eau*

Les premiers essais de déshydratation avec le prototype de presse KDS® ont montré qu'une petite quantité du matériau déshydraté était retenue dans le collecteur d'eau, voir figure 6-22.a. Ceci était dû au fait que l'espace existant entre les disques rotatifs et le collecteur du prototype de presse initial est trop grand d'où l'introduction de matériau à l'intérieur du collecteur d'eau, voir figure 6-22.b. Cette ouverture a été modifiée à l'aide d'une tôle en acier inoxydable, voir figure 6-22.c.




*a) Matériaux épaissis retenus dans le collecteur.*



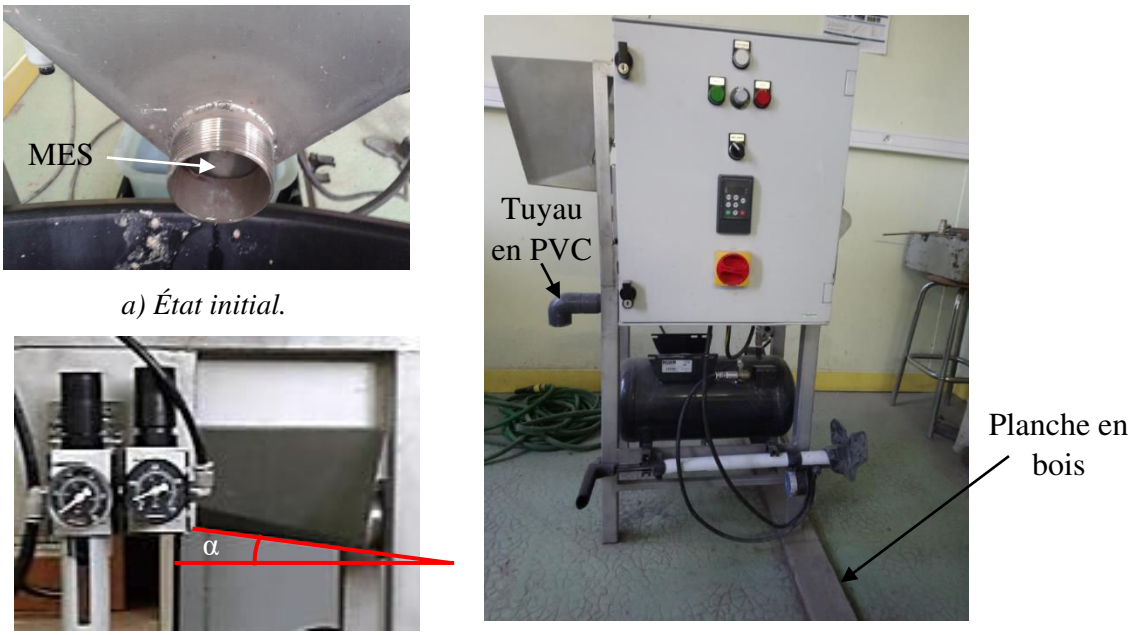

*b) État initial.* *c) État final.*

*Figure 6-22. Solution apportée à la rétention du matériau épaissi dans le collecteur d'eau.*

***Solution apportée à la rétention de la matière en suspension « MES »***

Une quantité de matière en suspension était retenue dans le collecteur du prototype de presse initial. Ceci conduit à des mesures erronées de la concentration de la MES, voir figure 6-23.a. La source du problème résidait dans le fait que la sortie d'eau du prototype était située à une cote supérieure par rapport à la partie inférieure du stockage d'eau. Elle était de 1 cm plus élevée. Cette différence de cote provoquait un stockage de la MES dans le collecteur. Ce problème a été solutionné en modifiant la cote de la sortie d'eau, voir figure 6-23.b. et en accentuant la pente de la presse, voir figure 6-23.c.

La cote de la sortie d'eau a été baissée jusqu'à être mise au même niveau que celle de la partie inférieure du collecteur. Du point de vue technique, la modification de la pente du collecteur entraînait une modification assez compliquée, alors qu'une surélévation de la machine avec la mise en place d'une planche à l'extrême opposé de la presse était la meilleure solution économique et rapide. Une planche en bois de 2 cm d'épaisseur a été placée à l'extrême droite de la presse pour la surélever. Cette surélévation améliore l'évacuation de la matière en suspension et ne présente aucun inconvénient pour le transport de sédiments.




*a) État initial.*

*b) Modification de cote de la sortie d'eau.*

*c) Modification de la pente du collecteur.*

*Figure 6-23. Solution apportée à la rétention de « MES » dans le collecteur.*

***Adaptation du réservoir de floculation et élaboration de la trappe***

En raison de la conception du réservoir du prototype de la presse utilisée en laboratoire, voir figure 6-24.a., le matériau à déshydrater devait être mélangé au préalable avec les polymères floculants et être introduit postérieurement dans le réservoir de floculation. Ceci provoquait une rupture des flocs pendant le pompage à l'aide d'une pompe péristaltique.

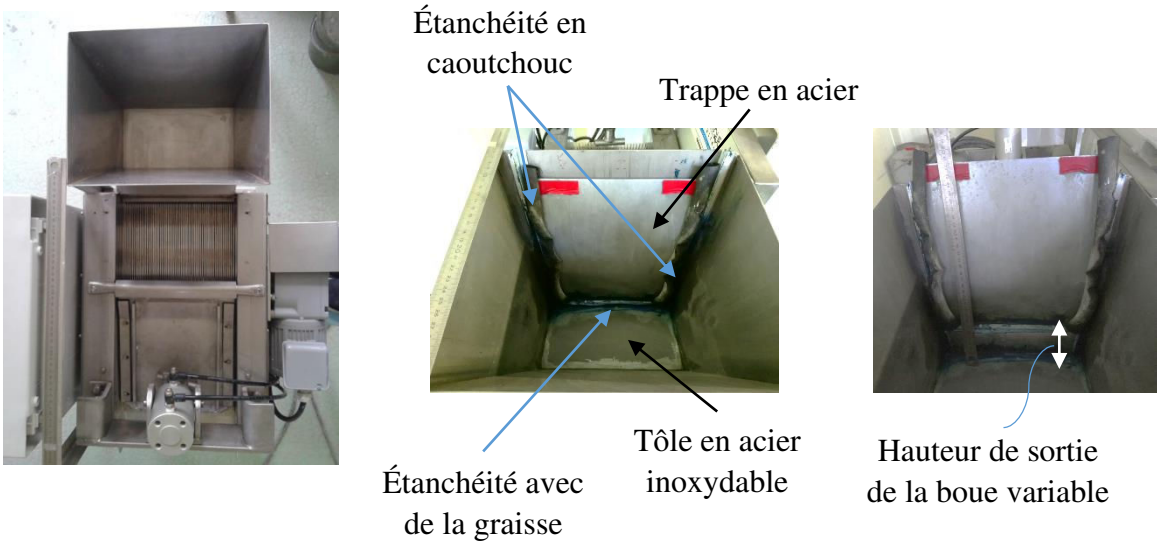
Dans un premier temps, le matériau floculé a été versé lentement dans le réservoir à l'aide d'un seau. Néanmoins, quelques flocs se cassaient au moment de l'impact dans la chute du mélange. Cette situation montrait bien que le matériau à déshydrater devait être floculé dans le réservoir de floculation. Ceci supposait de modifier le réservoir de floculation de la machine.

Trois types de modifications ont été apportées : *(i)* l'élaboration et installation d'une trappe, *(ii)* l'étanchéité du réservoir et *(iii)* la variation de la cote inférieure du réservoir.

La trappe du réservoir, élaborée en acier inoxydable, présente une forme trapézoïdale adaptée à la forme du réservoir. Elle a été conçue, d'une part, pour empêcher la sortie du matériau à déshydrater pendant le malaxage, voir figure 6-24.b, et d'autre part, pour régler la hauteur de sortie de la boue, voir figure 6-24.c.

L'étanchéité latérale du réservoir a été réalisée à l'aide de deux bandes de caoutchouc placées sur les deux côtés du réservoir. Ce matériau permet d'assurer une bonne étanchéité et de faire glisser la trappe. Les bords inférieur et latéraux de la trappe ont été badigeonnés d'une couche de graisse afin d'assurer une totale étanchéité du réservoir, voir figure 6-24.b.

La pente du fond du réservoir a été modifiée à l'aide d'une plaque d'acier inoxydable. Elle a été placée en faisant un angle de 20° avec la surface du fond du réservoir. La plaque a été scellée avec une colle au silicone, ce qui lui confère une propriété anti-humidité, en évitant de possibles fuites du matériau à déshydrater. La pente retenue est suffisamment importante pour améliorer la sortie du matériau à déshydrater, en évitant tout colmatage, et relativement faible pour ne pas être un obstacle pendant le malaxage de la boue, voir figure 6-24.b.




*a) État initial.* *b) Aspect visuel de la trappe et du réservoir.*

*Figure 6-24. Conception de la trappe et modification du réservoir de floculation.*

***Malaxage et floculation du matériau à déshydrater***

Le prototype de presse modifié permet de floculer le matériau à déshydrater dans le réservoir de floculation. L'injection du floculant est réalisée manuellement à l'aide d'une seringue. En raison des dimensions du prototype de presse utilisé en laboratoire, l'agitation du matériau à déshydrater et du floculant a été effectuée de manière manuelle. Ceci est dû au fait que les agitateurs conventionnels n'étaient pas adaptés aux dimensions du réservoir de floculation.

Afin de mécaniser le malaxage, une série d'essais d'agitation ont été réalisés avec un premier agitateur mécanique, qui permet d'obtenir des vitesses de rotation minimales de 200 tr/min et avec un deuxième agitateur qui a été confectionné à l'aide d'un tournevis et d'une tige de malaxeur pour peintures. Même si les vitesses d'agitation pour ces deux agitateurs ont été diminuées à l'aide d'un variateur d'intensité, la vitesse optimale d'agitation, autour de 40 tr/min ± 10 tr/min, n'a pas pu être obtenue. Cet inconvénient a été solutionné en réalisant une agitation manuelle à l'aide d'une cuillère. Ceci est une solution abordable à l'échelle du laboratoire.

Sachant que la presse à boues KDS® utilisée au niveau industriel est équipée d'un système de malaxage et de floculation mécanisé, cet inconvénient à l'échelle industrielle ne se produira pas.

### *6.3.2.3. Modifications proposées pour améliorer la déshydratation des sédiments avec la presse KDS®*

Les modifications proposées pour la presse à boues KDS® sont détaillées ci-après. Elles ont pour objectif l'amélioration de la qualité de l'eau résiduelle collectée à la fin du processus de déshydratation avec cette presse et de réduire la teneur en eau finale des sédiments. Afin de confirmer les paramètres qui peuvent améliorer l'efficacité de la presse, un essai d'égouttage par filtration a été mené avec de la boue floculée.

***Essai d'égouttage par filtration***

Un essai d'égouttage par filtration avec un géotextile a été réalisé sur une boue floculée au sein du laboratoire M2C. Il a pour objet, d'une part, la détermination de l'efficacité d'un géotextile en vue d'améliorer la qualité du surnageant à la sortie de la presse KDS® et d'autre part, de comparer l'efficacité de déshydratation avec cette presse. Cet essai consistait à introduire le mélange floculé sur un géotextile, posé sur un bécher en verre et le laisser reposer jusqu'à la fin de l'égouttage.

Pour une question de disponibilité du matériau en quantité suffisante, le géotextile sélectionné est un type de géotextile de filtration en polypropylène non tissé de 160 g/m$^2$. Le mélange choisi est la boue diluée «AL-FLU 800 ».

Les résultats obtenus avec cet essai montrent que la déshydratation avec un géotextile non tissé permet d'obtenir des sédiments avec une teneur en eau finale de 117% et un surnageant clair avec une concentration de matière en suspension de 0,18 g/l.

La teneur en eau finale obtenue avec le géotextile est assez similaire à celle obtenue avec la presse à boues KDS®. Pour le mélange « AL-FLU 800 » on obtient une teneur en eau de 107%. Elle est de 10% inférieure, à la valeur de $w_f$ obtenue avec la déshydratation en utilisant un géotextile.

La concentration de la MES de l'eau résiduelle après le passage du mélange « AL-FLU 800 » par la presse KDS® est nettement supérieure à celle obtenue avec la filtration. Les valeurs sont comprises entre 6 g/l et 10 g/l, pour ce même mélange.

Les résultats de l'essai d'égouttage par filtration montrent que l'eau libre des sédiments est évacuée par égouttage indépendamment de la méthode de déshydratation utilisée. Néanmoins, la concentration de la matière en suspension varie selon la technique de déshydratation utilisée.

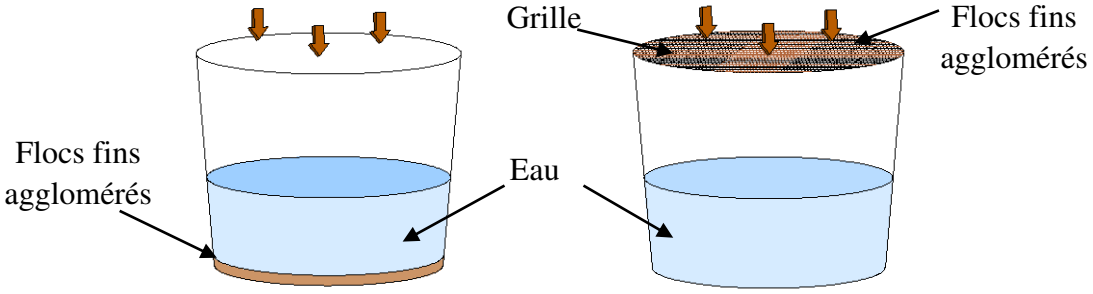
***Modifications proposées en vue d'améliorer la qualité du surnageant***

Les résultats obtenus de l'essai d'égouttage par filtration indiquent que l'ajout d'un géotextile ou d'une toile de filtration avant la sortie d'eau permettrait d'améliorer la qualité du surnageant. Cependant, ce type de solution est incompatible avec un système de travail « en

continu ». La presse devrait être arrêtée à la fin du cycle de déshydratation pour nettoyer les possibles colmatages du géotextile ou de la toile.

Pour résoudre ce problème, trois solutions sont proposées. La solution la plus simple consiste à stocker l'eau résiduelle dans un réservoir à l'aide d'une conduite et la laisser reposer. Les flocs agglomérés fins décanteront par gravité et l'eau claire restera dans la partie supérieure du réservoir et pourrait être réutilisée, voir figure 6-25.a.

La deuxième solution consiste à collecter l'eau dans un réservoir qui dispose d'un géotextile ou d'une toile de filtration. Cette méthode permet de séparer les flocs agglomérés très fins et les particules restant en suspension de manière rapide et efficace, voir figure 6-25.b.



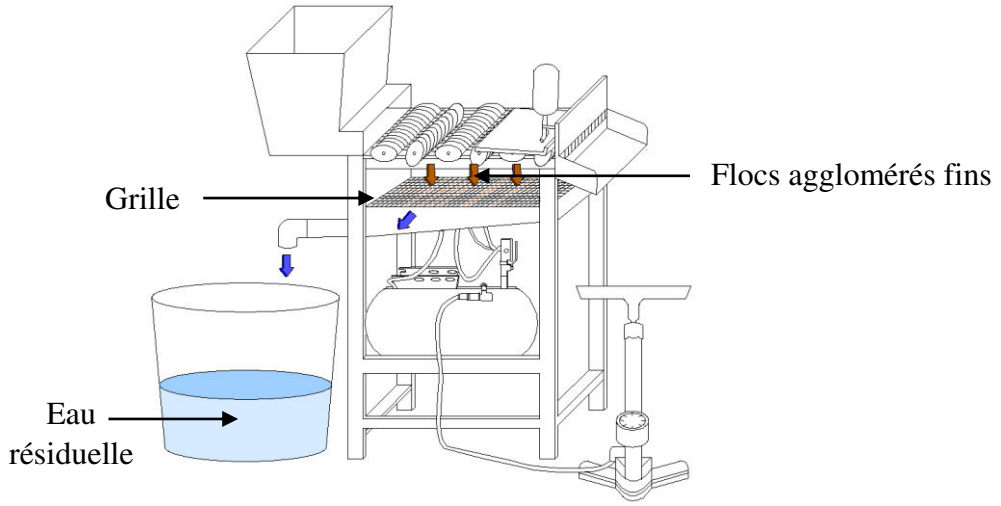

*a) Nettoyage par décantation.* *b) Filtration de l'eau résiduelle.*

*Figure 6-25. Modifications externes en vue d'améliorer la qualité de l'eau résiduelle.*

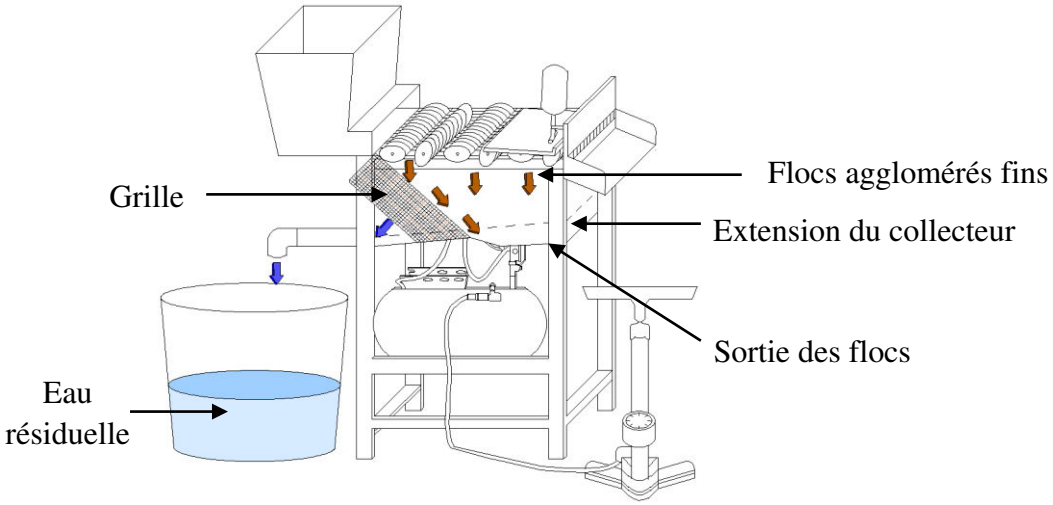
La troisième solution consiste à ajouter un système de grilles de filtration en acier inoxydable, ou un matériau équivalent, dans le collecteur de la presse, placé avant la sortie de l'eau. La position de la grille doit être facilement accessible pour pouvoir enlever les flocs retenus, si nécessaire. Elle peut être placée sur un plan horizontal, voir figure 6-26.a. ou sur un plan incliné, voir figure 6-26.b.

Une position horizontale de la grille pourrait occasionner des problèmes de colmatage fréquents. Les flocs resteraient coincés sur les espaces existants liés à la maille. Cependant, si la grille est installée sur un plan incliné, l'impact de l'eau résiduelle sortant de la table d'égouttage sur la grille pourrait faire avancer les flocs agglomérés fins accumulés sur la grille vers la partie inférieure du collecteur d'eau, diminuant ainsi le colmatage au niveau de la maille.

Par ailleurs, le collecteur peut être équipé d'une aire de stockage de flocs agglomérés fins, voir figure 6-26.b. Ceci peut éviter des problèmes au niveau du colmatage des flocs. Les flocs fins stockés peuvent être évacués à l'aide d'un tuyau et d'un système de nettoyage automatique incorporé dans le réservoir.




*a) Grille sur un plan horizontal.*




*b) Gille sur un plan incliné.*

*Figure 6-26. Modifications internes en vue d'améliorer la qualité de l'eau résiduelle.*

***Modifications proposées en vue de réduire la teneur en eau finale des sédiments***

Les résultats des essais de déshydratation avec la presse KDS® montrent que la quantité d'eau évacuée par égouttage est légèrement indépendante de la vitesse de rotation des disques. Ceci fait que la pression reste un paramètre qui peut jouer un rôle dans l'amélioration de la déshydratation avec la presse KDS®.

La pression appliquée par la presse KDS® actuelle réside dans l'application d'une force de compression sur la plaque d'appui, voir figure 6-27.a. Ceci permet de casser ou briser les flocs sur un plan horizontal et ainsi libérer l'eau restante entre les flocs. Les valeurs des teneurs en eau finales mesurées en faisant varier la pression, montrent qu'il n'y a pas de grande variation de teneur en eau à l'échelle du prototype de presse utilisée en laboratoire. Pour les sédiments étudiés la variation de la teneur en eau finale en appliquant des pressions de 70 kPa et de 130 kPa est inférieure à 4,5%. Elle peut augmenter jusqu'à 15% pour les sédiments plus organiques.

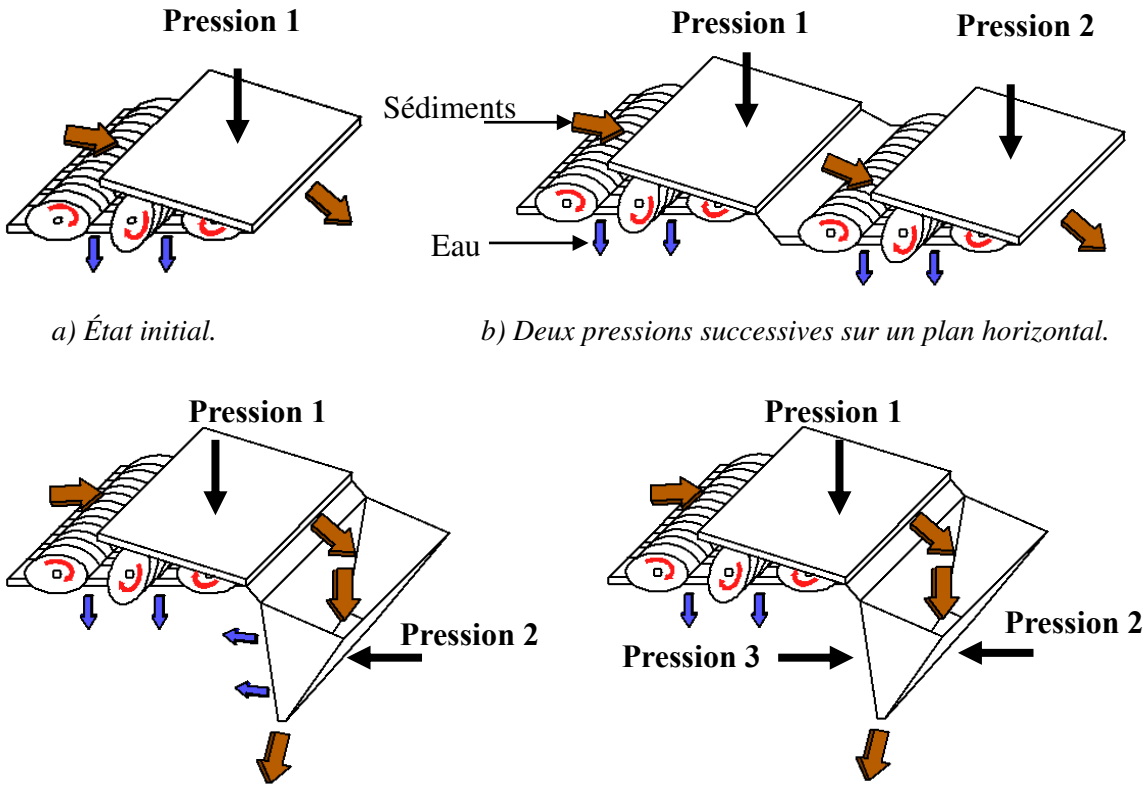
Ajouter une deuxième plaque de compression à un niveau inférieur de la première plaque d'appui, voir figure 6-27.b. peut être une solution pour réduire un peu plus la teneur en eau. Cependant, les résultats issus des essais de déshydratation montrent qu'elle n'assurera pas un abaissement élevé de la teneur loin de la solution optimale. Mais si le produit est de nouveau déshydraté entre deux plaques situées perpendiculairement au plan d'égouttage, une meilleure diminution est possible.

Un pressage sur un plan plus ou moins vertical des sédiments permettrait d'appliquer une force de compression bien supérieure à celle appliquée sur les disques elliptiques. Une inclination à 90º, passage du plan horizontal au vertical, pourrait être réalisée de manière ajustable et mécanique. Avec cette inclinaison deux solutions peuvent être proposées, voir figures 6-27.c et 6-27.d.

La solution montrée sur la figure 6-27.c. consiste à ajouter un réservoir qui permet d'appliquer une pression horizontale « pression 2 » sur une plaque plane verticale. Cette plaque à gauche de ce réservoir pourrait être constituée d'une toile perméable et rigide. Celle-ci permettait de collecter l'eau résiduelle dans le collecteur d'eau.

La solution illustrée sur la figure 6-27.d. permet d'appliquer deux pressions horizontales de part et d'autre du réservoir ajouté : une pression sur la plaque à droite « pression 2 » et une autre pression sur la plaque à gauche « pression 3 ».

De même, une plaque d'appui revêtue d'une texture inférieure rugueuse pourrait faciliter la rupture des flocs, ceci augmenterait le contact entre les flocs et la plaque.




*a) État initial.*

*b) Deux pressions successives sur un plan horizontal.*

*c) Pressions sur des plans horizontal et vertical.*

*d) Pression sur le plan horizontal et deux pressions dans un plan vertical.*

*Figure 6-27. Solutions proposées en vue de réduire la teneur en eau finale des sédiments.*

***Améliorations secondaires***

Quelques améliorations mineures peuvent être apportées à la presse à boue KDS®. Ces modifications sont destinées à rendre plus confortable l'utilisation de la machine et faciliter le processus de déshydratation. Elles n'impliquent pas une amélioration des performances de la presse.

- **Système de nettoyage automatique** : le nettoyage de la presse à boues KDS® se réalise manuellement à l'aide d'un tuyau. L'installation d'un système autonettoyant automatique permettrait de réduire le temps de nettoyage et d'économiser l'eau. Cette eau selon sa qualité pourrait être celle du surnageant collecté.

- **Transport de la presse** : l'un des principaux avantages de la déshydratation mécanique de boues, est la possibilité de transporter et déplacer la machine. Pour la machine de laboratoire, l'installation de roulettes au niveau des pieds de la presse à boues pourrait améliorer le système de positionnement et de transport de la presse KDS® en laboratoire.

- **Pression** : la pression au niveau du prototype de presse utilisé en laboratoire est introduite à l'aide d'une pompe, de manière manuelle. L'installation d'un système

de pression relié au réseau d'air comprimé serait très pratique tout comme un vérin à commande électrique. La presse industrielle possède un système de mis en pression électrique.

- **Sortie des eaux résiduelles** : la récupération des eaux résiduelles doit être améliorée en ajoutant un tuyau de sortie d'eau avec éventuellement un mesureur de MES.

- **Système de criblage** : la presse à boues KDS® est susceptible de supporter la présence de sables au sein du sédiment. Cependant, les sables grossiers et les cailloux peuvent aussi abîmer les disques elliptiques de la presse bien qu'ils soient transportables sur la table d'égouttage. Mais par précaution peut éviter tout dommage comme les sédiments de dragage ont une granulométrie hétérogène, il serait recommandé de réaliser un criblage afin de récupérer la partie la plus fine. Le criblage pourrait être réalisé à l'aide d'une autre machine, ou en ajoutant une trémie avec une grille ou un crible placées au-dessus de la trémie.

### *6.3.3. Essai de déshydratation de sédiments avec la presse à boues KDS® à l'échelle semi-industrielle : cas pratique*

Un essai de déshydratation de sédiments avec une presse à boues KDS® à l'échelle semi-industrielle a été réalisé au sein de l'entreprise Atlantique Industrie à Ancenis (49, région Pays-de-Loire), avec la collaboration de la société SNF FLOERGER.

#### *6.3.3.1. Description de la presse utilisée*

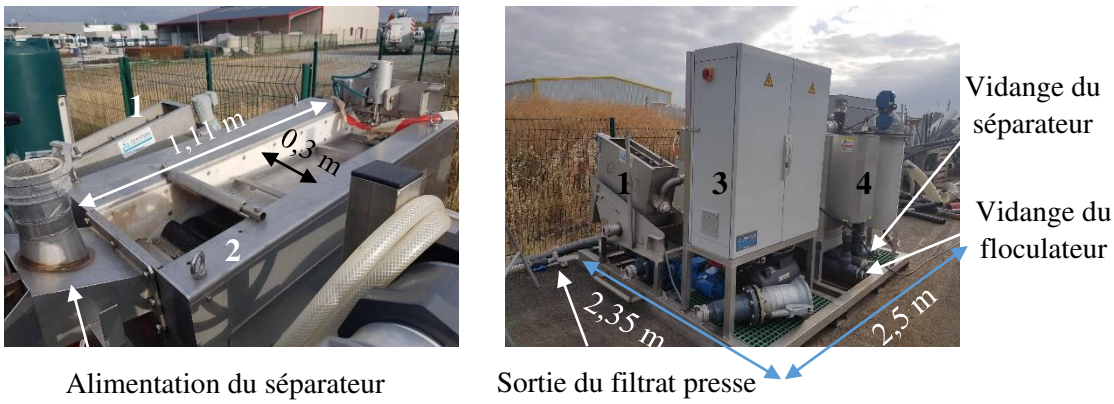
Le modèle de presse utilisé est référencé sous l'étiquette « KDS 311-D » par la société Atlantique Industrie. Ce modèle de presse a une longueur de 1,1 m et une largeur de 0,3 m. Elle est composée d'une table d'égouttage avec des disques elliptiques de 1,11 mètre de long.

Cette table est équipée de onze rangées de disques elliptiques et d'une plaque de pression de 66 cm de longueur et 30 cm de largeur. Les huit premiers disques ont une longueur de grand axe de 8,8 cm et une longueur de petit axe égale à 6,0 cm. Les trois derniers disques ont une longueur de grand axe de 11,3 cm et une longueur de petit axe égale à 6,0 cm. L'augmentation de la taille des disques est liée à une diminution de volume entre les disques et la plaque. Ce rétrécissement favorise l'épaississement de la boue. Tous les disques sont espacés de 0,1 cm ± 0,01 cm.

Le modèle de presse a une masse nette de 120 kg. La consommation électrique est de 0,40 kW. La capacité de traitement pour une boue préparée à 10 kg/m$^3$ est entre 2 et 3 m$^3$/h. Le débit pour une boue préparée avec une concentration de 80 kg/m$^3$ n'est plus que de 0,25 m$^3$/h jusqu'à 0,38 m$^3$/h (EC'eau Concept, 2018). Les autres caractéristiques techniques de ce modèle sont récapitulées dans le tableau 5-1 du chapitre 5.

La plateforme d'essai a une longueur de 2,5 m, une largeur de 2,35 m et une hauteur de 2 m. Sa masse nette est de 1 tonne. Elle est composée *(i)* d'un réservoir de préparation du

polymère, *(ii)* d'un floculateur, *(iii)* d'une armoire de commande, *(iv)* d'une pompe d'alimentation et *(v)* d'une série de câbles et de tuyaux. Cette plateforme dispose aussi d'une presse à boues Volute®, (Atlantique Industrie, 2018b) voir figure 6-28.




*a) Presse KDS 311-D.* *b) Vue de droite.*

*c) Vue arrière.*

**Légende**

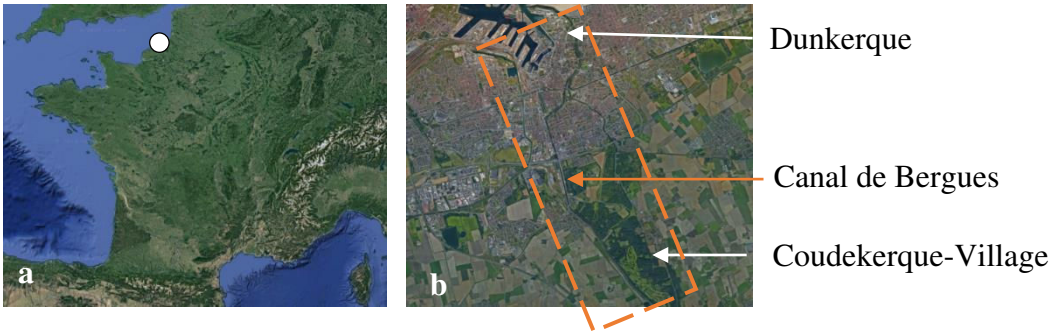
**1** : Volute® modèle « MDS 131 »
**2** : Presse KDS® modèle « KDS 311-D »
**3** : Armoire de commande
**4** : Réservoir de floculation
**5** : Réservoir de préparation du polymère
**6** : Pompe d'alimentation

*Figure 6-28. Plateforme d'essai (d'après Atlantique Industrie, 2018b).*

### *6.3.3.2. Matériaux utilisés pour l'essai de déshydratation*

#### *Sédiment à déshydrater*

Le sédiment testé a été prélevé dans le canal de Bergues. Ce canal est situé dans la commune de Coudekerque-Branche, dans le département du Nord, en Hauts-de-France, voir figure 6-29.




○ **Sédiment du canal de Bergues**, Coudekerque-Branche, (Hauts-de-France)

*Figure 6-29. Lieux de prélèvement (figure a) et zoom sur l'image (figure b) d'après Google Earth.*

Le sédiment du canal de Bergues a été réceptionné le 01/07/2018 au sein de la société Atlantique Industrie, à Ancenis dans le département de la Loire-Atlantique, en région Pays de la Loire. La quantité fournie est d'environ 200 kg conditionnée en deux big bags, voir figure 6-30.a remplis de sédiments à l'état plastique, avec une teneur en eau initiale moyenne de 117%, voir figure 6-30.b. Le sédiment sec de couleur gris clair présente un aspect fin et homogène. Il est caractérisé par une forte odeur provoquée par de la matière organique en cours d'évolution et par une odeur d'hydrocarbure. Des débris végétaux peuvent être observés, voir figure 6-30.c.

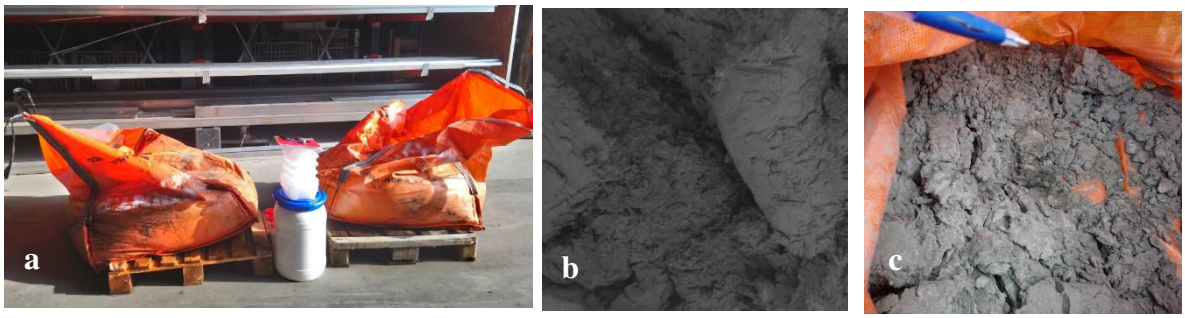



*Figure 6-30. Conditionnement en big bag (figure a) et aspect du sédiment brut et sec (figures b et c).*

L'échantillon de sédiment du canal de Bergues est principalement composé de sables fins (52,96%) et suivi de sables grossiers (28,65%). Les pourcentages de limons, grossiers et fins, sont 8,42% et 7,98% respectivement. Le pourcentage d'argiles est de 1,98%, voir figure 6-31.

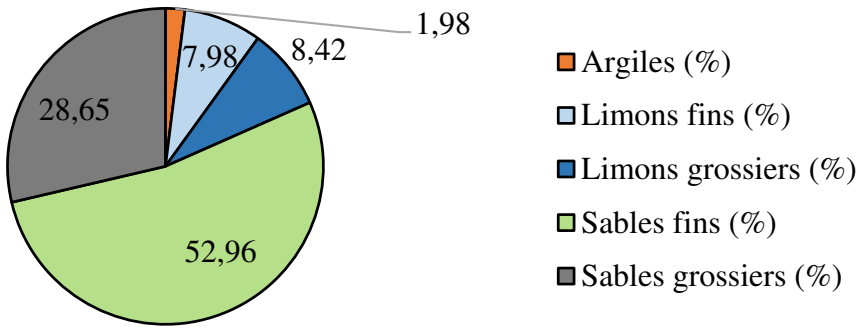



*Figure 6-31. Composition granulométrique du sédiment du canal de Bergues.*

En ce qui concerne la distribution de la courbe granulométrique, le sédiment du canal de Bergues présente un coefficient d'uniformité $C_u$ supérieur à 2 ($C_u$ = 8,57). Il a une granulométrie classée comme « bien étalée ». Le coefficient de courbure $C_c$ de ce sédiment est inférieur à 3 ($C_c$ = 2,76) ce qui fait que sa courbe est « bien graduée ». Cet échantillon de sédiment contient une faible quantité de particules fines, sa teneur en fines (< 80 µm) est égale à 25,46%, voir figure 6-32.

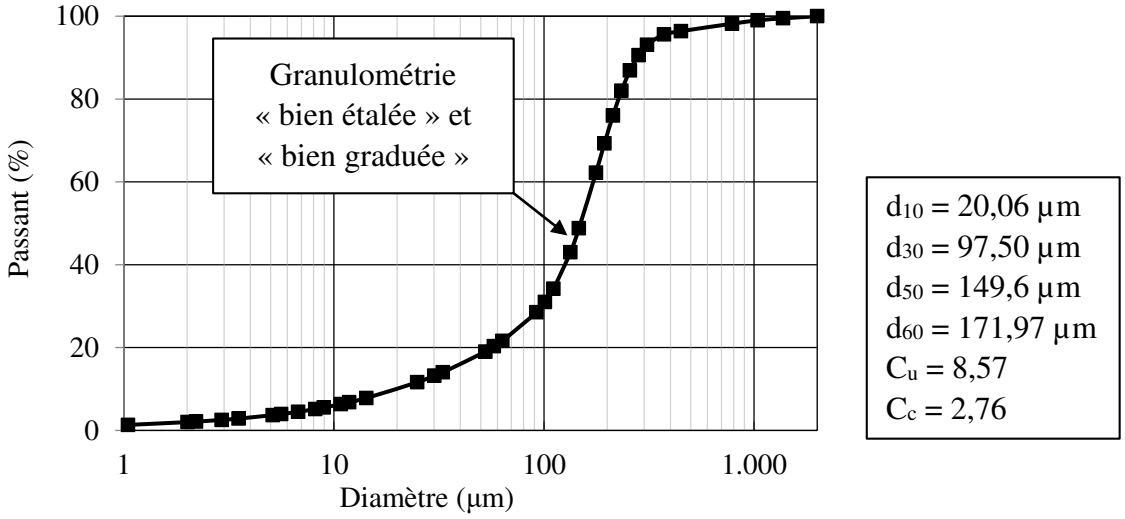



*Figure 6-32. Distribution granulométrique du sédiment du canal de Bergues.*

Le sédiment du canal de Bergues dispose d'une texture « sablo-limoneuse », selon le triangle de texture proposé par Soil Survey Staff (1951), voir figure 6-33.

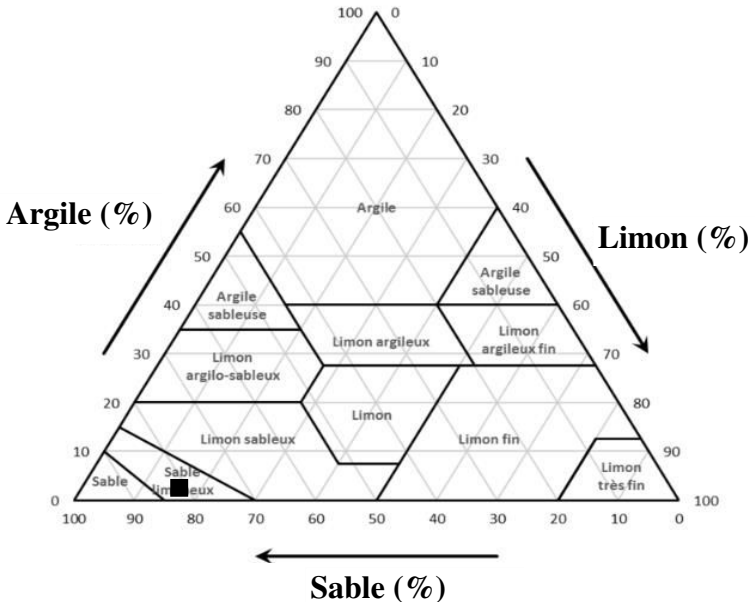



*Figure 6-33. Texture du sédiment du canal de Bergues d'après Soil Survey Staff (1951).*

Le sédiment du canal de Bergues a une teneur en matière organique (MO) égale à 4,93%. La teneur de $CaCO_3$ pour ce sédiment est relativement élevée de 13,9%.

### *Floculant sélectionné*

L'essai de floculation sur le sédiment du canal de Bergues a été réalisé par la société SNF FLOERGER à Andrezieux. La méthode de floculation utilisée est celle du transvasement de bécher suivie d'un égouttage sur une grille métallique carrée de 1 mm x 1 mm. Cette méthode a été menée dans le but de déterminer la résistance des flocs (transvasements successifs) et d'estimer l'effet du floculant pendant le passage dans la presse à boues KDS®.

L'essai de floculation a été réalisé avec une concentration de la boue de 500 g/l. Rappelons que cette concentration correspond à 0,5 kg de sédiments pour un litre d'eau. La concentration des polymères choisie est de 5 g/l. Les résultats de cet essai montrent que les deux floculants les plus aptes sont :

- Le floculant « FLOPAM EM 240 CT » : floculant cationique en émulsion, de densité de charge égale à 20% et un haut poids moléculaire.

- Le floculant « FLOPAM EM 240 BD » : floculant en émulsion, cationique, qui a une densité de charge de 20% et un poids moléculaire bas.

Les caractéristiques des floculants sont récapitulées dans le tableau 6-6 ci-après.

*Tableau 6-6. Caractéristiques des floculants sélectionnés pour le sédiment de Bergues (SNF FLOERGER,2017).*

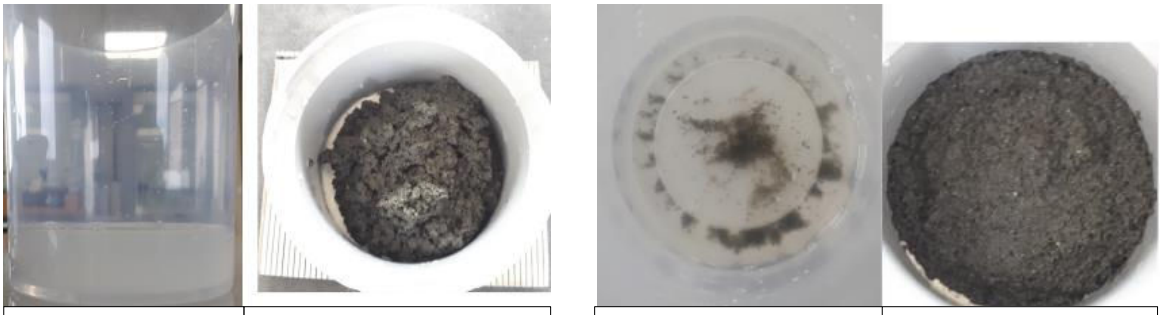
| | **EM 240 CT** | **EM 240 BD** |
|---|---|---|
| Forme | Liquide visqueux | Liquide visqueux |
| Couleur | Opaque | Opaque |
| Caractère ionique | Cationique | Cationique |
| Poids moléculaire | Haut | Bas |
| Densité de charge | Moyenne | Moyenne |
| Densité apparente approximative | 1,03 | 1,02 |
| Viscosité apparente approximative (cps)[1] | 1200 | 1200 |
| Solides non volatiles, pourcentage moyen (%) | 42 | 42,5 |
| Stabilité[2] (en mois) | 6 | 6 |
| Température de stockage (°C) | 0 – 35 | 0 – 35 |
| Dilution pour obtenir une solution à 5 g/l de matière active | 75 | 78 |
| Viscosité approximative d'une solution à 5 g/l de matière active (cps)[1] | 1200 | 1500 |
| Concentration d'utilisation maximale (g/l) | 10 | 5 |
| Stabilité de la solution dans l'eau déionisée (jours) | 1 | 1 |

***Note*** *[1] : 1 centipoise (ou cps) est une unité de viscosité dynamique égale à 1 mPa/s ;*

*[2] : Si le produit est stocké à l'intérieur d'un bâtiment à une température stable située entre 5°C et 30°C.*

Le floculant « FLOPAM EM 240 CT » permet de former des flocs grossiers avec un surnageant très clair, avec un dosage de 1750 ppm, voir figure 6-34.a. La résistance au cassage pour les flocs formés avec ce floculant est de 10 renversements ou transvasements de bécher.

Le floculant « FLOPAM EM 240 BD » permet d'obtenir des flocs moyens présentant des propriétés d'égouttage et de résistance adaptés pour une déshydratation avec une machine de modèle KDS®. Pour cet échantillon, à un dosage de 625 ppm on peut obtenir des filtrats dépourvus de MES et des boues compactes, voir figure 6-34.b. La résistance au cassage pour les flocs formés avec ce floculant est de 5 renversements ou transvasements de bécher (ZEGHDALOU, 2018). Le dosage optimal pour ce floculant, 625 ppm, est presque trois fois plus faible que celui du floculant « FLOPAM EM 240 CT ». Du point de vue économique, le floculant « FLOPAM EM 240 BD » a été privilégié.




*a) FLOPAM EM 240 CT.* *b) FLOPAM EM 240 BD.*

*Figure 6-34. Aspect visuel des flocs et du surnageant du sédiment du canal de Bergues selon le floculant choisi.*

### *6.3.3.3. Protocole suivi pendant les essais de déshydratation*

L'essai de déshydratation pour les sédiments du canal de Bergues à l'échelle industrielle a été réalisé le 6 septembre de 2018 chez Atlantique Industrie. L'essai expérimental comporte trois étapes. La première étape est celle de la « préparation du matériau à déshydrater » pour laquelle on a d'une part, la caractérisation du matériau à déshydrater et le choix du floculant et d'autre part, *in fine*, la préparation du matériau *in situ*. La deuxième étape consiste à déshydrater les sédiments avec la presse KDS®. La dernière vise à analyser et interpréter les résultats obtenus après la déshydratation avec la presse à boues KDS®.

#### *Préparation du matériau à déshydrater*

- Essais préliminaires en laboratoire

Les essais préliminaires en laboratoire englobent les essais de caractérisation physico-chimique du sédiment à déshydrater ainsi que les essais de floculation. La caractérisation du sédiment du canal de Bergues a été réalisée au sein du laboratoire M2C. Le floculant a été choisi par la société SNF FLOERGER. Les caractéristiques du sédiment du canal de Bergues et du floculant choisi, sont récapitulées dans la section « 6.3.3.2. Matériaux utilisés dans l'essai de déshydratation ».

- Préparation du matériau à déshydrater *in situ*

Les sédiments ont été triés de manière manuelle afin d'éliminer divers déchets (tessons, câbles, matières métalliques...) et de séparer les sables grossiers et les cailloux pouvant abîmer les disques elliptiques de la presse. Ensuite ces sédiments ont été dilués dans un réservoir à boues, voir figure 6-35.a. jusqu'à obtenir une teneur en eau voisine de 800%; elle a été de 836%. Pour l'obtention d'une boue homogène, le malaxage du sédiment a été réalisé à l'aide d'un agitateur mécanique. La vitesse d'agitation est de 4800 tr/min (fréquence 80 Hz). Le volume de boue préparé est de 700 l.

Le floculant « FLOPAM EM 240 BD » a été préparé à une dissolution de 5 g/l. La concentration du polymère a été choisie en suivant trois critères : *(i)* consistance du floculant pas très visqueuse, *(ii)* concentration d'utilisation maximale et *(iii)* dosage de floculant pas très élevé. La préparation du floculant a été effectuée à l'aide d'un agitateur mécanique, dans le réservoir de floculation, voir figure 6-35.b. La durée d'agitation a été d'environ 40 minutes. Le volume de floculant préparé est de 100 l.

*a) Préparation de la boue.* *b) Préparation du floculant.*

**Légende**

**1** : Agitateur mécanique
**2** : Réservoir de préparation de la boue
**3** : Sortie de la boue
**4** : Aspiration pompe
**5** : Sédiment dilué
**6** : Réservoir de préparation du polymère
**7** : Pompe d'alimentation
**8** : Sortie du polymère
**9** : Floculant FLOPAM EM 240 BD préparé à 5g/l
**10** : Polymère FLOPAM EM 240 BD

*Figure 6-35. Préparation du matériau à déshydrater (figure a) et du floculant (figure b).*

L'injection du floculant a été réalisée dans le réservoir d'alimentation du séparateur de la plateforme d'essai. Le floculant a été versé de manière manuelle à l'aide d'un bécher gradué. Le dosage de floculant utilisé pour chaque essai a été variable et a fait l'objet de plusieurs essais

de déshydratation. La vitesse d'agitation pour la préparation du floculant était d'environ 200 tr/min.

- Déshydratation mécanisée avec la presse à boues KDS®

Un ensemble de trois essais a été réalisé en faisant varier le dosage en floculant. Pour tous les essais de déshydratation effectués avec la presse KDS®, la vitesse de rotation des disques elliptiques choisie a été de 7,04 tr/min et la pression était de 2 bars, soit 200 kPa.

Sachant que la teneur eau initiale de la boue est de 836% et la concentration du floculant « FLOPAM EM 240 BD » de 5 g/l, le premier essai de déshydratation a été effectué avec un volume de boue de 132,5 litres et un volume de floculant de 35,6 litres. Ceci correspond à un dosage du floculant « FLOPAM EM 240 BD » de 26,8% par rapport au volume de la boue.

Le deuxième essai de déshydratation a été mené avec 85,8 litres de boue et 57,4 litres de floculant. Le dosage du floculant sélectionné est alors de 66,9% pour le volume de boue considérée. Puis, le dernier essai de déshydratation a été réalisé en ajoutant 10,6 litres de floculant à la boue des sédiments du canal de Bergues utilisée dans le deuxième essai.

- Analyse et interprétation des résultats en laboratoire

Une mesure de la teneur en eau finale des sédiments déshydratés a été faite à la fin de chaque essai de déshydratation. La concentration de la matière en suspension du surnageant est aussi mesurée. En ce qui concerne l'influence du floculant en valorisation matière, un échantillon de sédiment déshydraté d'environ 2 kg a bien été stocké au laboratoire M2C pour la réalisation d'éprouvettes de sédiments stabilisés non prévue dans ces travaux.

#### *6.3.3.4. Résultats des essais de déshydratation*

- Teneur en eau des sédiments

Les valeurs de la teneur en eau initiale et finale du sédiment sont données sur la figure 6-36. Pour les trois essais réalisés, le sédiment du canal de Bergues a été déshydraté avec une teneur en eau initiale de 836%.

La teneur en eau finale du sédiment oscille entre 138% et 189% pour les essais respectivement 2 et 1. La teneur en eau finale mesurée dans l'essai 3 est de 157%. Ceci correspond à une réduction de la teneur en eau de 4,4 fois, 6 fois et 5,3 fois pour les essais 1, 2 et 3.

Le sédiment déshydraté avec la presse à boues KDS® obtenu prend la forme de gâteaux de boue (« cake ») rectangulaires de texture épaisse et consistante, voir figure 6-37. Du point de vue visuel, tous les échantillons de sédiment déshydraté présentent la même forme quel que soit le dosage de floculant utilisé.

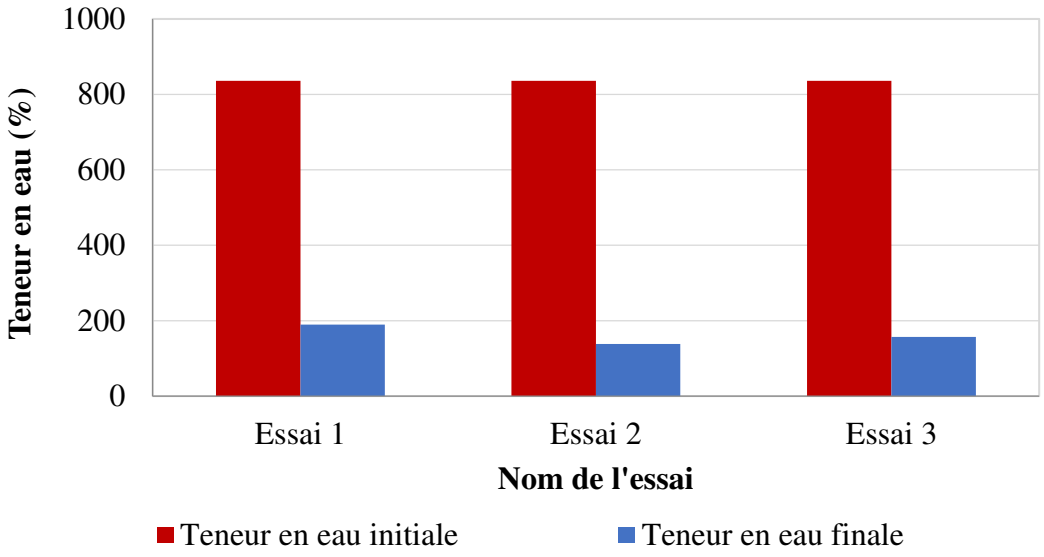



*Figure 6-36. Teneurs en eau des sédiments testés du canal de Bergues.*

*a) Essai 1.* *b) Essai 2.* *c) Essai 3.*

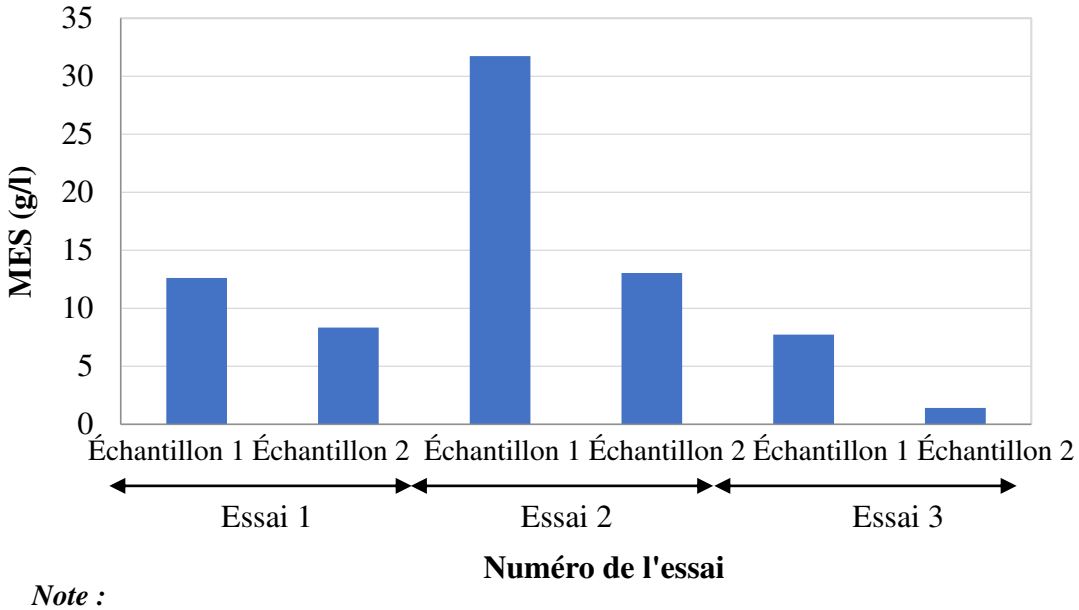
*Figure 6-37. Aspect visuel du sédiment déshydraté.*

- Concentration de la matière en suspension

Pour chaque essai de déshydratation, l'eau résiduelle sortant de la presse a été collectée en deux temps en fin d'essai : une première eau est collectée « échantillon 1 » puis un deuxième prélèvement est fait « échantillon 2 ». Le temps entre les mesures était d'environ 3 minutes.

Les valeurs de la concentration de la matière en suspension de la première eau résiduelle collectée « échantillon 1 » et la concentration de la MES de la dernière eau collectée « échantillon 2 » des essais de déshydratation, sont rassemblées sur la figure 6-38. Sur cette figure, on peut noter que les concentrations de la MES les plus faibles (MES I = 7,7 g/l et MES F = 1,4 g/l) sont obtenus dans l'essai 3. En revanche, le surnageant le plus chargé en matière en suspension correspond aux concentrations de la MES de l'essai 2, avec une valeur de la MES I égale à 31,7 g/l et une valeur de la MES F égale à 13 g/l. Les deux prises montrent un abaissement des MES. La taille des flocs du sédiment floculé est hétérogène, pouvant avoir des particules fines sans floculer. Les flocs agglomérés et les particules fines sont collectés essentiellement dans l'échantillon 1. D'ailleurs, le premier impact entre le sédiment floculé et

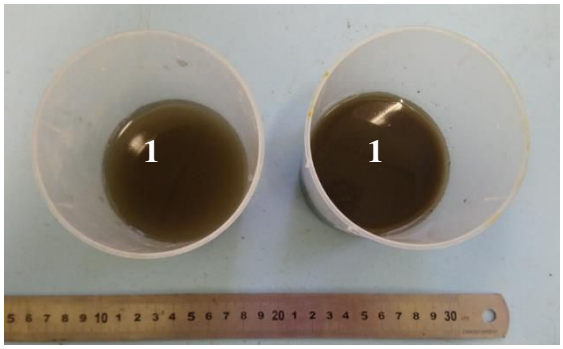
les disques elliptiques peuvent endommager la structure des flocs. Ceci fait que la MES de l'échantillon 1 est supérieure à celle de l'échantillon 2.



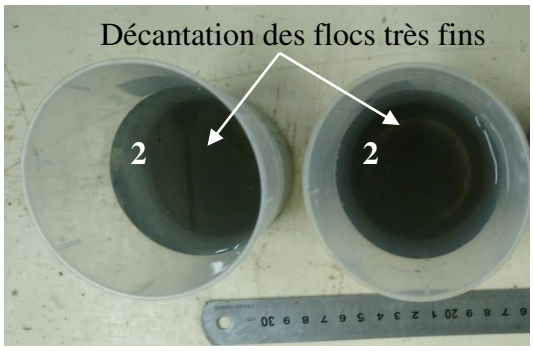

***Note :***
*Les deux échantillons de MES ont été prélevés à la fin de l'essai. L'échantillon 1 correspond à la première eau collectée et l'échantillon 2 correspond à la dernière eau collectée.*

*Figure 6-38. Concentrations de la MES des sédiments testés du canal de Bergues.*

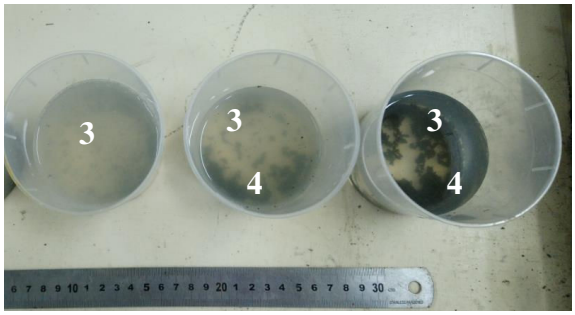
L'aspect visuel des eaux résiduaires obtenues après la déshydratation mécanique est montré sur la figure 6-39. Les eaux collectées à la fin des essais 1 et 2 présentent une couleur translucide, assez noire, avec une importante quantité de flocs fins agglomérés et de particules fines non agglomérées, voir figures 6-39.a. et 6-39.b. L'eau résiduelle collectée de l'essai 3, a une couleur assez transparente, claire, avec une faible quantité de flocs fins agglomérés, voir figure 6-39.c.




*a) Essai 1.*




*b) Essai 2.*




*c) Essai 3.*

**Légende**

**1** : Surnageant très trouble
**2** : Surnageant trouble
**3** : Surnageant clair
**4** : Flocs agglomérés fins

*Figure 6-39. Aspect visuel de l'eau résiduelle collectée.*

### *6.3.3.5. Analyse des résultats des essais de déshydratation*

- Teneur en eau des sédiments

La teneur en eau la plus élevée (189%) est obtenue avec le dosage de floculant le plus faible, qui correspond à l'essai 1. Dans cet essai, le dosage de floculant était très faible par rapport au dosage optimal. La boue n'était pas entièrement floculée.

La variation de la teneur en eau finale de l'essai 2 ($w_f$ = 138%) et de l'essai 3 ($w_f$ = 157%) ne dépasse pas 20%. Cette différence peut être liée à la taille des flocs. Les flocs de l'essai 2 étaient en apparence plus petits que ceux de l'essai 3. Les flocs les plus grossiers retiennent d'importantes quantités d'eau.

- Concentration de la matière en suspension

Les valeurs de la concentration de la matière en suspension initiales « I » mesurées au début des essais de déshydratation sont supérieures aux valeurs de la MES obtenues à la fin de l'essai « F ». Ceci peut être dû à l'impact entre les flocs et les disques elliptiques à l'entrée de la table d'égouttage. Les concentrations de la MES les plus faibles et les surnageants les plus clairs sont obtenus avec une concentration optimale, dans l'essai 3. Le surnageant le plus foncé a été collecté dans l'essai 1 ; il était très chargé en particules non floculées.

### *6.3.4. Processus de déshydratation mécanisée de sédiments avec le prototype de presse KDS®*

Les sédiments de dragage peuvent être soit stockés à terre ou soit valorisés pour des réutilisations futures. En fonction du type de réutilisation, la teneur en eau des sédiments de dragage est trop élevée, ce qui implique une diminution de la teneur en eau des sédiments. La méthodologie de déshydratation mécanisée de sédiments en utilisant la presse à boues KDS® est schématisée sur la figure 6-40.

La procédure à suivre pour la déshydratation des sédiments comprend quatre étapes : *(i)* la première étape « essais de caractérisation » sert à identifier et caractériser les sédiments et, à choisir le floculant le plus adéquat pour la déshydratation avec la presse KDS® ; *(ii)* la deuxième étape concerne la préparation du matériau à déshydrater ; *(iii)* la troisième étape correspond au passage des sédiments par la presse et *(iv)* la dernière étape porte essentiellement sur les mesures post-déshydratation et l'analyse des teneurs en eau et des concentrations de la matière en suspension.

#### *Étape 1. Essais de caractérisation et de floculation*

Les essais de caractérisation concernent tous les essais d'indentification et de caractérisation relatifs au sédiment et les essais de floculation. Ils visent à déterminer le floculant le plus adéquat pour la déshydratation des sédiments avec la presse KDS® et à analyser les propriétés physico-chimiques du sédiment. Les essais de caractérisation nécessaires sont *a minima* :

- Une étude granulométrique pour connaitre la taille des particules (diamètres seuils à déterminer) qui composent le sédiment et sa texture. La teneur en argiles intervient dans la taille des flocs et le dosage du floculant.

- Une évaluation de la teneur en matière organique. Le choix du floculant est aussi fortement lié à la matière organique du sédiment.

- Les essais de floculation ont pour objet le choix du floculant, la concentration de préparation du polymère et le dosage optimal.

#### *Étape 2. Préparation du matériau à déshydrater*

La préparation du matériau à déshydrater concerne la préparation du floculant avec la concentration de polymère et l'injection du floculant dans le sédiment.

Les sédiments sont mélangés dans le réservoir prévu à cet effet jusqu'à obtenir une boue homogène. Puis, le floculant est ajouté. À l'échelle du prototype de presse utilisée en laboratoire, l'injection du floculant est effectuée à petites doses successives à l'aide d'une seringue. En revanche, à l'échelle semi-industrielle, le floculant est introduit dans la boue grâce à des béchers gradués. L'agitation du mélange doit être suffisamment lente pour tenir intacte la structure des flocs et assurer un bon contact entre le polymère et la boue, mais elle doit être

suffisamment rapide pour empêcher la décantation des sédiments. La vitesse d'agitation doit être située entre 30 et 200 tr/min dépendant de la viscosité de la boue.

Il est notamment conseillé de cribler les sédiments avant l'injection du floculant dans la boue afin de séparer les sables grossiers et les cailloux pouvant endommager les disques elliptiques de la presse. Le criblage peut être envisagé de manière manuelle ou de manière mécanique à l'aide de grilles de tamisage.

***Étape 3. Déshydratation mécanisée avec la presse KDS®***

La troisième étape concerne les opérations nécessaires pour le passage du sédiment par la presse. La pression et la vitesse de rotation des disques doivent être choisies et réglées avant de libérer ou d'amener le sédiment à déshydrater. À l'échelle du prototype de presse utilisée en laboratoire, la pression est réglée de manière manuelle à l'aide d'une pompe. À l'échelle semi-industrielle la pression est fixée de manière automatique.

***Étape 4. Analyse du sédiment et de l'eau résiduelle collectée***

L'eau résiduelle obtenue après la déshydratation avec la presse KDS® est collectée pour des fins de mesures à l'aide d'un seau à la fin du cycle de déshydratation. Le surnageant chargé en matière en suspension peut être filtré afin d'améliorer la qualité de l'eau collectée. Si le surnageant est clair, il peut être réutilisé directement. La préparation du floculant ou le nettoyage de la machine sont quelques exemples pour lesquels se posent la réutilisation de l'eau collectée. Par ailleurs, l'eau résiduelle collectée pourra être déversée dans le milieu dont sont issus les sédiments à déshydrater tout en respectant la législation en vigueur.

Le sédiment déshydraté est collecté dans un autre seau pour effectuer des mesures. Une mesure de la teneur en eau finale du sédiment doit être faite tout au moins pour valider le processus de déshydratation mis en œuvre. Le résultat de la teneur en eau est aussi nécessaire pour savoir si la transportabilité des sédiments est possible et pour envisager tout type de valorisation potentielle.

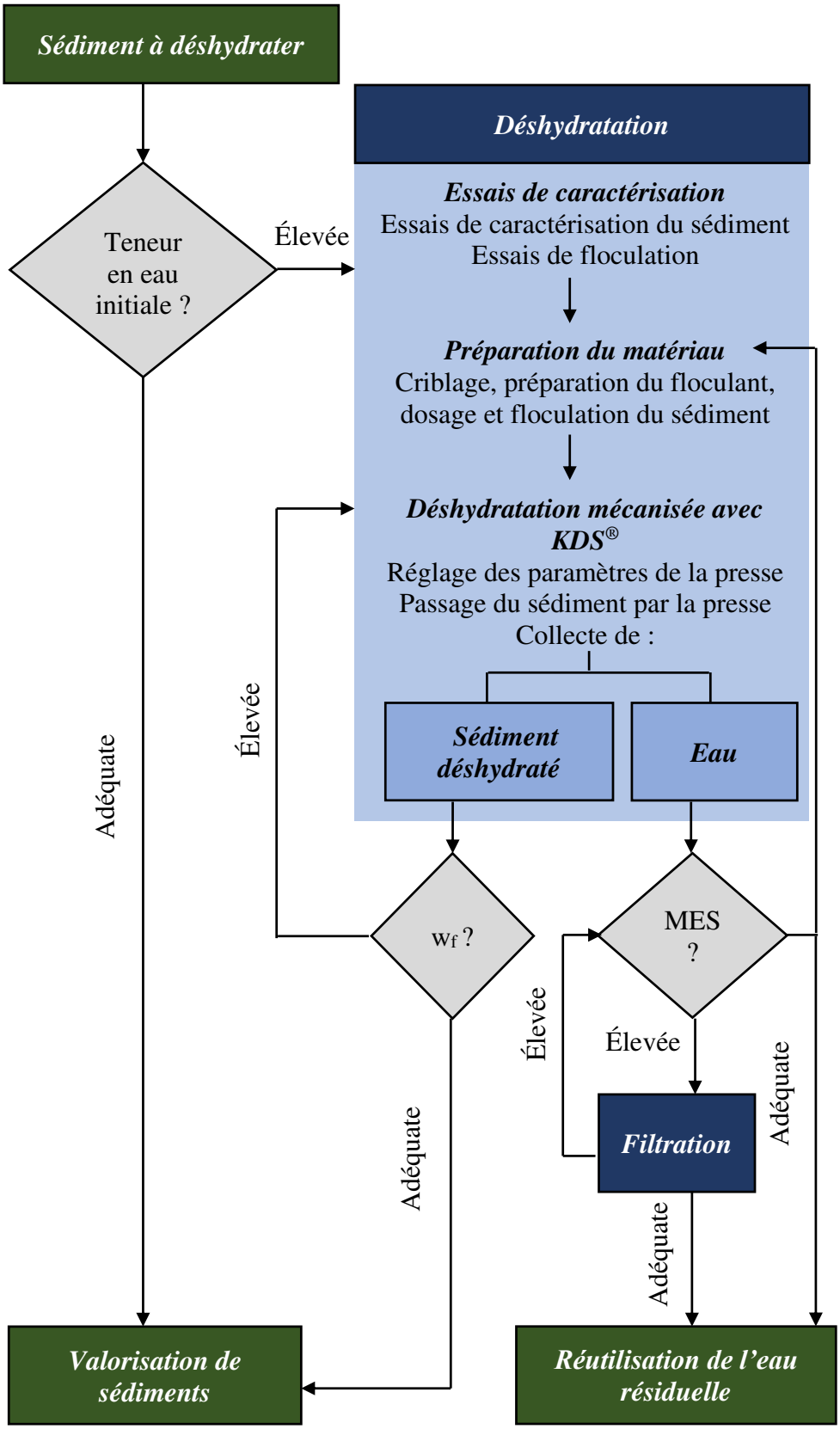



*Figure 6-40. Processus de déshydratation mécanisée de sédiments avec la presse à boues KDS®.*

## *6.4. CONCLUSION DU CHAPITRE*

Les critères d'aptitude au séchage et à la déshydratation mécanisée des sédiments ont été abordés dans le présent chapitre. Ils ont été étudiés à partir des essais de séchage et des essais de déshydratation mécanisée récapitulés dans les chapitres 4 et 5. Ces essais ont été réalisés avec des sédiments caractérisés dans le troisième chapitre. Les résultats obtenus ont permis de tirer les conclusions suivantes.

L'essai scissométrique, l'Essai d'Égouttage et Séchage (EES) et de l'Essai de Séchage et de Retrait (ESR) ont permis d'analyser les critères d'aptitude au séchage de sédiments et de prédire les vitesses de drainage et de séchage grâce à une régression linéaire multiple. Ces **vitesses sont conditionnées essentiellement par la granulométrie, la matière organique, la teneur en eau initiale, les limites d'Atterberg des sédiments et la géométrie du tamis**.

- Les vitesses d'évaporation et de drainage sont étroitement liées aux diamètres des particules. Plus le sédiment a une fraction importante de sable, plus les vitesses d'évaporation et de drainage sont élevées.

- De même, les argiles jouent un rôle essentiel pendant le séchage des sédiments du fait de la rétention d'eau colloïdale. La valeur au bleu de méthylène fait augmenter le temps de déshydratation par évaporation.

- La matière organique perturbe la déshydratation des sédiments à cause de sa rétention de l'eau. Elle tend à occuper les espaces existant entre les grains du sédiment. Ceci fait diminuer la porosité et la perméabilité des sédiments. Elle fait accroître la limite de liquidité du sédiment.

- Les limites d'Atterberg sont liées aux changements d'état des sédiments. Elles sont associées aux points d'inflexion dans la cinétique de déshydratation des sédiments. Au-delà la limite de liquidité, le contact entre particules des sédiments augmente, il provoque un accroissement rapide de la résistance au cisaillement et de faibles diminutions de la teneur en eau et des déformations axiales.

- La géométrie du tamis est liée au volume et à la hauteur de sédiments à déshydrater, plus le volume de sédiments est important, plus les vitesses de drainage et d'évaporation sont élevées. Pour un même volume, la surface des sédiments en contact avec l'air fait accélérer la vitesse d'évaporation.

- La teneur en eau initiale des sédiments est proportionnelle à la déformation axiale et au temps de séchage. Les teneurs en eau élevées, supérieures à la limite de liquidité, ont des périodes de drainage plus longues que celles des teneurs en eau initiales faibles.

Le processus de séchage des sédiments pourrait être amélioré en retournant ou en perforant les couches de sédiments à l'aide *(i)* d'engins spécifiques munis de socs de labour ou des disques à forme adaptée afin d'éviter l'adhésion du sédiment, *(ii)* d'un rouleau scarificateur

mobile et motorisé composé d'aiguillons ou dents ou disques *(iii)* ou d'un treillis mobile et motorisé, équipé d'aiguilles ou de dents. Le retournement (ou la scarification) des sédiments est fortement conditionné par la méthode utilisée.

- **Si les sédiments sont retournés à l'aide d'engins spécifiques, le moment opportun pour les retourner correspond au moment où la capacité portante du sédiment (dépendant de $S_u$) est supérieure à la pression exercée par l'engin utilisé à un coefficient de sécurité près**. La capacité portante du sédiment peut être déterminée à l'aide de la fonction $S_u=f(I_P)$ définie en laboratoire, des limites d'Atterberg et des mesures de teneur en eau sur le site.

- **Si les sédiments sont scarifiés à l'aide d'un rouleau scarificateur ou d'un treillis, mobiles appuyés sur la banquette du casier, le moment de scarification correspond au moment où la vitesse d'évaporation diminue**. Cette diminution peut être observée avec la fonction w=f(temps) provenant de l'Essai d'Égouttage et Séchage (EES). Le moment du retournement correspond à la teneur en eau du sédiment voisine de la limite de liquidité.

En ce qui concerne la déshydratation mécanisée des sédiments, on peut noter que le plan expérimental développé pendant les travaux de thèse a montré que **la presse à boues KDS® est capable de déshydrater un sédiment sableux sans une maintenance démesurée**. De même, ce plan a permis d'identifier les paramètres intervenants pendant la préparation des sédiments et le processus de déshydratation avec la presse KDS®.

Les **paramètres intervenant pendant la préparation des sédiments sont la teneur en eau initiale des sédiments, les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du sédiment à déshydrater et le floculant et son dosage** :

- L'augmentation de la teneur en eau initiale des sédiments, fait augmenter l'eau évacuée par égouttage. Ceci a un impact positif sur la concentration de la MES des eaux résiduelles. La teneur en eau finale du produit déshydraté est indépendante de sa teneur en eau initiale.

- Les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du sédiment à déshydrater sont fortement liées au processus de floculation et à la déshydratation des sédiments avec la presse KDS®. Le choix du floculant dépend du type de sédiment à déshydrater. La présence du sable a un impact favorable quant à la formation des flocs et un impact négatif quand son diamètre médian est de 0,1 cm ± 0,01 cm.

- Le choix et le dosage de polymère sont deux paramètres primordiaux dans la déshydratation mécanique avec la presse KDS®. Ils interviennent dans la préparation du sédiment à déshydrater et dans le coût de la déshydratation. Le processus de floculation vise à former des flocs grands et résistants.

**Les paramètres intervenant pendant la déshydratation des sédiments sont le débit d'entrée du sédiment (sous forme de boue plus ou moins liquide), la vitesse de rotation des disques elliptiques et la pression appliquée**.

- Les débits d'entrée relativement élevés ne sont pas accessibles à l'échelle du prototype de presse utilisée en laboratoire. Un débit d'entrée élevé peut casser les flocs au moment de l'impact sur les disques elliptiques et augmenter la concentration de la MES.

- La vitesse de rotation des disques est indépendante de la teneur en eau finale de la boue, pour la longueur de la table d'égouttage du prototype testé. Les concentrations de la MES les plus faibles sont obtenues avec des vitesses de rotation des disques faibles.

- L'application de la pression permet d'extraire l'eau contenue dans les flocs. Elle diminue la teneur en eau finale. Cependant, elle fait augmenter la concentration de la MES.

Pour adapter la presse KDS® aux sédiments et améliorer le système de déshydratation des sédiments, **une série de modifications ont été apportées à la presse**. Les modifications les plus importantes sont *(i)* **l'augmentation de la pente du réservoir** d'eau afin d'éviter le colmatage des flocs agglomérés fins, *(ii)* **l'élaboration d'une trappe dans le réservoir** de floculation et *(iii)* **la fermeture de l'espace existant entre les disques rotatifs et le collecteur d'eau**.

**La qualité de l'eau collectée peut être améliorée** *(i)* par décantation, *(ii)* en filtrant les flocs agglomérés fins ou *(iii)* **en introduisant un système de grilles de filtration** dans le collecteur de la presse. De même, **la teneur en eau finale des sédiments peut être réduite en ajoutant une deuxième plaque de compression** afin de mieux compresser les sédiments ou en ajoutant un réservoir qui permet d'appliquer des forces de compression horizontales.

# *7. CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES*

## *7.1. RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA THÈSE ET MÉTHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE*

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse avaient pour objet :

- La caractérisation physico-chimique, minéralogique et hydromécanique d'un ensemble de sédiments issus des retenues hydroélectriques et marins.

- L'étude du séchage naturel de sédiments afin de déterminer des critères d'aptitude au séchage naturel et améliorer cette technique de déshydratation.

- L'étude de la déshydratation mécanisée de sédiments en utilisant une presse à boues KDS® et l'adaptation de cette presse à la déshydratation des sédiments étudiés. L'établissement d'une méthodologie de déshydratation des sédiments avec la presse KDS®.

Afin d'atteindre ces objectifs, une série d'essais ont été choisis :

- Des essais de caractérisation de sédiments conventionnels, réalisés selon les normes françaises en vigueur. Ils comprennent *(i)* des essais de caractérisation physico-chimique comme l'analyse granulométrique, la détermination de la surface spécifique, de la masse volumique des particules, de la valeur au bleu de méthylène, des limites d'Atterberg, de la teneur en matière organique et les analyses des éléments majeurs. *(ii)* Des essais de caractérisation du point de vue minéralogique comme la détermination de la teneur en carbonates et les analyses DRX. *(iii)* Des essais de caractérisation hydromécanique avec la décantation des sédiments en colonnes et l'essai œdométrique.

- Des essais qui ont permis de reproduire à plus petite échelle, le comportement des sédiments pendant le séchage naturel ce sont : *(i)* l'Essai d'Égouttage et de Séchage (EES) pour suivre l'évolution des quantités d'eau, présente dans le sédiment et sortie du sédiment, *(ii)* l'Essai de Séchage et de Retrait (ESR) qui a pour objet la détermination des paramètres d'état du sédiment et *(iii)* l'essai scissométrique en laboratoire pour la détermination de la résistance au cisaillement ou cohésion non drainée du sédiment.

## *7.2. CONCLUSIONS GÉNÉRALES*

### *7.2.1. Sédiments étudiés*

Un ensemble de sédiments de barrage et marins ont été caractérisés du point de vue physico-chimique, minéralogique et hydromécanique. Leur caractérisation permet d'établir les conclusions suivantes :

- Les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des sédiments dépendent fortement de leur origine.
- Du point de vue physique, les sédiments alpins étudiés sont composés essentiellement de limons fins. Les sédiments bretons analysés contiennent d'importants pourcentages de limons et de sables fins. Le sédiment de Dunkerque est composé de 50% de limons fins. Le sédiment de la Nouvelle Aquitaine étudié est constitué de sables grossiers. La masse volumique des particules solides est comprise entre 2,47 g/cm$^3$ et 2,77 g/cm$^3$. La valeur au bleu de méthylène va de 0,37 g/100g à 3,17 g/100g. La teneur en matière organique est comprise entre 0,8% et 12,8%. L'indice de plasticité oscille entre 3,5% et 25%.

- En ce qui concerne la minéralogie, les phyllosilicates, le quartz, la muscovite et la calcite sont les minéraux principaux qui constituent les sédiments. Les sédiments alpins sont riches en phyllosilicates et en carbonates. Les sédiments bretons et de la Nouvelle Aquitaine ont des pourcentages de quartz élevés. Les sédiments du Rhin sont composés essentiellement de quartz, de calcite et des phyllosilicates. La teneur en carbonates varie entre 0,69% jusqu'à 23,3% selon les sédiments étudiés.

- Du point de vue chimique, la silice ($SiO_2$) est l'élément le plus abondant dans les sédiments étudiés, avec des pourcentages compris entre 39,5% et 67,9%. L'oxyde de calcium (CaO) et l'alumine ($Al_2O_3$) sont aussi présents avec des pourcentages variant de 1,5% à 30,8% et de 7,9 à 15,6% respectivement.

- Quant au comportement hydromécanique des sédiments, les sédiments bretons et alpins « AL-FLU » et « AL-CLA » peuvent être classés comme sédiments « peu perméables ». Les sédiments alpins « AL-SPO » et « AL-ISE » et les sédiments « GE-RHI » et « DK-DK » sont « très peu perméables ».

  Les sédiments alpins « AL-FLU », « AL-SPO », « AL-CLA » et les sédiments « GE-RHI » et « BR-SAI » sont moyennement compressibles. Les sédiments « AL-ISE » et « BR-RAN » sont considérés comme « peu compressibles » et le sédiment « NA-ART » comme « incompressible ».

### *7.2.2. Séchage naturel*

Le séchage naturel, considéré comme la technique de déshydratation la plus économique et écologique, repose sur deux processus : l'évaporation atmosphérique et le drainage, afin de

réduire la quantité d'eau des sédiments. Le produit obtenu après le séchage naturel est peu déshydraté, pâteux et hétérogène.

L'amélioration de cette technique de déshydratation repose sur l'étude de critères d'aptitude au séchage et sur la détermination des paramètres d'état des sédiments pendant le séchage naturel. Pour ce faire, une reproduction du lagunage à l'échelle du laboratoire a été réalisée avec les sédiments préalablement caractérisés. Les paramètres d'état (w, e, $S_r$ et $\varepsilon_a$) et mécanique ($S_u$) des sédiments ont été déterminés grâce à l'Essai de Séchage et de Retrait (ESR), l'essai d'Égouttage et de Séchage (EES) et l'essai scissométrique en laboratoire. Ceci a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le drainage et l'évaporation sont les deux phénomènes prédominants pendant le séchage naturel. Au début du séchage naturel, l'eau est principalement évacuée par drainage et le phénomène d'évaporation est presque inexistant. La quantité d'eau drainée augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale. Puis le drainage tend à se stabiliser et le phénomène d'évaporation devient de plus en plus important.

  Le drainage permet d'évacuer l'eau libre des sédiments. Il est lié à la nature des sédiments à déshydrater. Il est directement proportionnel à la fraction sableuse, et inversement proportionnel à la teneur en matière organique et à la fraction argileuse. L'évaporation permet d'éliminer l'eau interstitielle des sédiments. Elle est régie principalement par le climat et par la nature de sédiments. Elle est directement proportionnelle à la surface en contact avec l'air, à la teneur en matière organique et à la fraction argileuse.

- Du fait que l'eau de la couche supérieure est évacuée par évaporation et l'eau de la couche inférieure par drainage, le produit déshydraté devient hétérogène. La teneur en eau des sédiments devient plus homogène dans la couche au fur et à mesure du temps écoulé.

- Le drainage et l'évaporation sont accompagnés des phénomènes de tassement et de retrait, puis de fissuration. Les sédiments saturés ($S_r$) soumis au séchage, subissent de fortes diminutions de teneur en eau (w) et de l'indice de vides (e). Ainsi, des déformations axiales ($\varepsilon_a$) importantes se développent. Ces effets s'amenuisent voire se stabilisent quand la teneur en eau des sédiments s'approche de la limite de liquidité.

- Les limites d'Atterberg sont associées aux points d'inflexion dans la cinétique de déshydratation de sédiments. En deçà de la limite de liquidité, les sédiments passent vers un état plastique et dans cet état, le contact entre particules augmente, en provocant un accroissement rapide de la résistance au cisaillement et de faibles diminutions de l'indice des vides et de faibles déformations axiales.

- L'activité des sédiments dépend de la fraction argileuse des sédiments, elle est fortement liée au phénomène de retrait. Selon les modèles proposés par SEED et

al., (1962) et du VAN DER MERWE (1964) les sédiments considérés comme inactifs ont les vitesses de déshydratation les plus élevées.

- La cohésion non drainée est directement proportionnelle au temps de séchage et inversement proportionnelle à la teneur en eau des sédiments testés. La combinaison de l'essai scissométrique et de l'essai d'Égouttage et de Séchage permettent d'établir la relation $S_u = f(w)$.

- Le séchage naturel peut être rendu plus efficace en modifiant la structure de la couche. On peut réaliser des scarifications dans la couche de sédiments à l'aide d'engins de chantier ou d'un rouleau denté motorisé.

  La capacité portante nécessaire aux sédiments pour supporter le poids de tout engin circulant sur la couche peut être déterminée à partir de la mesure de la teneur en eau dans la couche et/ou avec la relation $S_u = f(w)$.

  Le moment le plus approprié pour la perforation ou scarification ou le retournement partiel de la couche peut être défini quand la teneur en eau s'approche à la limite de liquidité.

### *7.2.3. Déshydratation mécanisée*

La déshydratation mécanisée des sédiments se présente comme une alternative pour résoudre les inconvénients du séchage naturel. Elle propose une combinaison d'actions mécaniques afin de réduire la teneur en eau des sédiments d'une manière efficace, rapide et peu dépendante des caractéristiques physico-chimiques des sédiments et de la météo locale. La presse à boues KDS® propose un système de déshydratation mécanique en continu. Cette presse permet d'évacuer *(i)* l'eau libre des sédiments par égouttage grâce au cisaillement entre les disques, les barres oscillantes et la boue et *(ii)* l'eau restant à l'intérieur des flocs par une compression appliquée par une plaque de pression et filtration entre les disques elliptiques et les barres horizontales oscillantes.

La presse à boues KDS® a été adaptée à la déshydratation des sédiments : en augmentant la pente du réservoir d'eau, en élaborant une trappe située dans le réservoir de floculation et en augmentant la pente de ce réservoir, en fermant l'espace existant entre les disques rotatifs et le collecteur d'eau à l'aide d'une tôle en acier inoxydable.

Le plan expérimental développé pendant les travaux de thèse montre que la presse KDS® est capable de déshydrater un sédiment. Ce plan a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La presse à boues KDS® est susceptible de supporter la présence de sables au sein du sédiment sans une maintenance démesurée selon la granulométrie et le pourcentage de sable grossier. En revanche, les débits élevés ne sont pas admissibles à l'échelle du prototype utilisé en laboratoire.

- Le choix du floculant et son dosage jouent un rôle crucial dans la déshydratation mécanique des sédiments. Ils interviennent dans la préparation du matériau à déshydrater et indirectement dans le coût de la déshydratation. Le floculant le plus adapté pour la déshydratation de sédiments avec la presse à boues KDS® est celui qui permet de former des flocs de moyenne ou grande taille, résistants, avec un surnageant clair. La teneur en eau finale et la concentration de la MES sont très liées à la floculation.

- Le prototype de presse utilisé en laboratoire permet de réduire la teneur en eau à des hauteurs en pourcentages de 66% jusqu'à 90%, sans l'application de pression. Ces pourcentages de réduction de teneur en eau peuvent augmenter entre 13,8% et 45,3% sous l'application d'une pression. La teneur en eau finale est semble-t-il inversement proportionnelle à la concentration de la MES.

- La vitesse de rotation des disques est indépendante de la teneur en eau finale pour la longueur de table d'égouttage du prototype testé. Les vitesses de rotation des disques les plus réduites, comprises entre 2,9 tr/min et 4,84 tr/min donnent les concentrations de la matière en suspension les plus faibles.

- La pression appliquée fait diminuer la teneur en eau finale. Cependant, une augmentation de la pression implique une concentration de la matière en suspension plus élevée.

- Les matériaux argileux et les mélanges sablo-argileux ont des surnageants avec une couleur translucide et blanche. Les sédiments de barrage ont des eaux résiduelles claires avec la présence de flocs agglomérés fins.

- L'effet d'ajouter un floculant fait augmenter la plasticité du mélange. Quant au sédiment stabilisé, son comportement à la rupture passe de fragile à ductile. À partir de 28 jours de cure, l'ajout de floculant fait augmenter légèrement la résistance en compression du sédiment.

- La qualité de l'eau collectée peut être améliorée *(i)* par décantation, *(ii)* en filtrant les flocs agglomérés fins ou *(iii)* en introduisant un système de grilles de filtration dans le collecteur de la presse.

- La teneur en eau finale des sédiments peut être réduite en ajoutant une deuxième plaque de compression afin de compresser mieux les sédiments ou en ajoutant un système qui permet d'appliquer des forces de compression horizontales.

## *7.3 PERSPECTIVES*

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse peuvent servir de référence pour développer plusieurs projets de recherche afin de résoudre les problématiques actuelles de déshydratation des sédiments sur le territoire national ou à l'international.

### *7.3.1. Séchage naturel*

#### *Définition et amélioration des critères d'aptitude au séchage naturel des sédiments*

Des essais de séchage naturel réalisés par groupes de sédiments (fluviaux, marins, de barrage) de différentes origines et de caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques diverses, permettrait de mieux définir les paramètres d'état et mécaniques des sédiments pendant le séchage naturel. Ceci viserait à mieux définir :

- des critères d'aptitude au séchage naturel des sédiments ;
- des critères de pelletabilité et de transportabilité ;
- la procédure de l'essai de séchage et retrait.

#### *Connaissance d'une relation $S_u$-w*

Une unique relation de la cohésion non drainée par groupe de sédiments en fonction de la teneur en eau permettrait d'indiquer le moment opportun du retournement indépendamment du sédiment en cours de séchage. L'établissement d'une unique relation $S_u$-w serait possible en réalisant des essais d'Égouttage et de Séchage et scissométriques sur différents groupes de sédiment. Plus sera élevé le nombre de sédiments testés, plus la relation $S_u$-w sera pertinente et fiable.

#### *Développement d'une mise en œuvre du séchage naturel de sédiments*

Les critères d'aptitude au séchage naturel des sédiments permettent de prédire le comportement des sédiments pendant le séchage naturel. Ceci donne la possibilité de mieux gérer le système de lagunage et des lits de séchage avec l'aide d'outils circulant sur la couche de sédiment ou sur les banquettes des casiers. La réalisation de sillons à l'aide de ces équipements permettrait d'accélérer le séchage d'une manière rapide, efficace et économique. Cette technique pourrait être améliorée en réalisant une étude sur les dimensions et les espaces optimaux des sillons ou scarifications.

### *7.3.2. Déshydratation mécanisée*

#### *Connaissance des paramètres « machine » d'une presse à boues KDS®*

Les essais de déshydratation des sédiments en utilisant la presse à boues KDS®, menés dans le cadre de cette thèse, ont été réalisés avec des sédiments de retenues : alpins (3) et breton

(1). Ces sédiments ont été déshydratés avec le même type de floculant sur un même prototype de presse.

Des essais de déshydratation avec des sédiments provenant de plusieurs origines et en utilisant divers floculants, permettront de mieux maitriser le comportement de la presse à boues KDS® par rapport à la déshydratation des sédiments. Et si les essais de déshydratation sont réalisés avec plusieurs modèles d'une presse KDS®, les paramètres de cette machine pourront être mieux définis et optimisés. Une méthodologie de déshydratation plus efficace pourrait faire l'objet d'une procédure spécifique aux sédiments. Des dimensions optimales d'une presse pour la déshydratation des sédiments pourraient être proposées.

***Adéquation des floculants à la valorisation souhaitée***

Tout sédiment peut constituer une ressource comme granulat. Ainsi les sédiments déshydratés peuvent être réutilisés dans divers domaines du génie civil, de l'agronomie, de la céramique… il serait intéressant d'analyser le comportement environnemental et mécanique de plusieurs sédiments traités avec différents floculants. Ceci permettrait d'une part de mieux comprendre l'effet de l'ajout de floculant aux sédiments, et d'autre part, d'adapter le floculant au type de valorisation envisagée. De même, l'eau résiduelle collectée, peut être réutilisée, ceci indique que le floculant doit être adéquat du point de vue environnemental. Un floculant dégradable avec le temps serait apprécié.

***Ampliation du domaine de déshydratation***

La méthodologie de déshydratation en continu utilisée avec une presse à boues KDS® pourrait être utilisée pour déshydrater d'autres matériaux fins de type boues, comme la bentonite. Cette possibilité ou solution pourrait être adaptée pour la gestion des boues de forage comme celles provenant du chantier du Grand Paris Express.

## *LISTE DES RÉFÉRENCES*

### *Références normatives*

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM (1991). Natural Building Stones, Soil and Rock. Annual book of ASTM Standards, 19ème partie, Philadelphie.

ASTM D-427 (2004). Standard test method for shrinkage factors of soils by the mercury method.

DIN 51913 (2013). Essais des matériaux de carbone - Détermination de la masse volumique avec un pycnomètre à gaz en application d'hélium comme gaz à mesurage - Matières solides.

ISO 13320-1 - AFNOR (1999). Analyse granulométrique - Méthodes par diffraction laser - Partie 1 : Principes généraux.

NF EN 196-6 - AFNOR (2012). Méthodes d'essais des ciments - Partie 6 : détermination de la finesse.

NF EN 872 - AFNOR (2005). Qualité de l'eau - Dosage des matières en suspension - Méthode par filtration sur filtre en fibres de verre.

NF EN 13286-41 - AFNOR (2003). Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.

NF EN 15169 - AFNOR (2007). Caractérisation des déchets - Détermination de la perte au feu des déchets, des boues et des sédiments.

NF EN ISO 18757 - AFNOR (2006). Céramiques techniques - Détermination de la surface spécifique (aire massique) des poudres céramiques par adsorption de gaz à l'aide de la méthode BET.

NF P18-560 - AFNOR (1990). Granulats : analyse granulométrique par tamisage.

NF P94-048 - AFNOR (1996). Sols : Reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en carbonate - Méthode du calcimètre.

NF P94-049-1 - AFNOR (1998). Sols : Reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Partie 1 : Méthode de la dessiccation au four à micro-ondes.

NF P94-050 - AFNOR (1995). Sols : Reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage.

NF P94-051 - AFNOR (1993). Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.

NF P94-054 - AFNOR (1991). Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau.

NF P94-056 - AFNOR (1996). Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage.

NF P94-060-2 - AFNOR (1997). Sols : reconnaissance et essais - Essai de dessiccation - Partie 2 : détermination effective de la limite de retrait sur un prélèvement non remanié.

NF P94-068 - AFNOR (1998). Sols : Reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche.

NF P94-072 - AFNOR (1995). Sols : Reconnaissance et essais - Essai scissométrique en laboratoire.

NF P94-112 - AFNOR (1991). Sols : Reconnaissance et essais - Essai scissométrique en place.

NF X31-107 - AFNOR (2003). Qualité du sol - Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol - Méthode à la pipette.

NF X31-419 - AFNOR (1998). Qualité du sol - Dosage du carbone organique par oxydation sulfochromique.

NF XP P94-047 - AFNOR (1998). Sols : Reconnaissance et Essais - Détermination de la teneur pondérale en matière organique – Méthode par calcination.

NF XP P94-060-2 - AFNOR (1997). Sols : Reconnaissance et essais - Essai de dessiccation - Partie 2 : détermination effective de la limite de retrait sur un prélèvement non remanié.

NF XP P94-090-1 - AFNOR (1997). Essai œdométrique. Partie 1 : essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec paliers de chargement.

NF XP 94-100 - AFNOR (1996). Sols : reconnaissance et essais - Glossaire géotechnique – Définitions – Notations - Symboles.

***Références bibliographiques***

AGENCE RÉGIONALE POUR L'ENVIRONNEMENT - ARPE, (2015). *Les lits de séchage plantés de roseaux pour traiter les boues issues de l'épuration.* Dossiers techniques de l'ARPE. 20 p.

AL MAJOU H. (2008). *Étude et prédiction des propriétés de rétention en eau des sols : Prise en compte de la composition et de l'état structural du sol*. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans, France, 265 p.

ALTMEYER W. T. (1955). *Discussion of engineering properties of expansive clays*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 81, Nº SM2, pp. 17–19.

AMERATUNGA J., SIVAKUGAN N., DAS B. M. (2016). *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. Springer India. 228 p. ISBN : 978-81-322-2627-7; doi:10.1007/978-81-322-2629-1.

AMORCE (2012). Boues de Station d'Épuration : techniques de traitement, valorisation et élimination. Rapport technique, 36 p.

ANGER B. (2014). *Caractérisation de sédiments fins de retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière*. Thèse de doctorat, Université de Normandie, Unicaen, France, 316 p.

ANTHONY J. W., BIDEAUX R. A., BLADTH K. W., NICHOLS M. C. (2003). *Handbook of Mineralogy*. Volume 5. Borates, Carbonates, Sulfates. Tucson: Mineral Data Publishing. 813 p. ISBN : 978-0-9622094-4-1.

ATLANTIQUE INDUSTRIE. (2018b). *Fiche technique SKID KDS 311 MDS 131*. Fiche technique, 2 p.

AUVRAY R., ROSIN-PAUMIER S., ABDALLAH A., MASROURI F. (2013). *Étude de la fissuration due à la dessiccation des sols gonflants*. 21éme Congrès Français de Mécanique, 26-30 août 2013, Bordeaux, France, 6 p.

BAGAMBOULA M. (2015). *Hypothèses des sources de contamination des sédiments du port Est de Dunkerque et étude de leurs caractéristiques hydromécaniques*. Rapport de Master 1, Université de Normandie, Unicaen, 31 p.

BANOUNE B., MELBOUCI B., ROSQUOËT F., LANGLET, T. (2016). *Treatment of river sediments by hydraulic binders for valorisation in road construction*. Bulletin of engineering geology and the environment. Volume 75. Issue 4, pp. 1505-1517.

BELARBI A., RACHEDI M. (2017). *Cours II : Généralités sur les sols. Module : Structures Spéciales*. Cours de l'université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen Algérie, 49 p.

BEL HADJ ALI I. (2013). *Contribution à l'étude des sédiments marins tunisiens : cas des ports de Radès et Gabès*. Thèse de doctorat de l'École Centrale de Lille, 194 p.

BEN ABDELGHANI F., MAHERZI W., BOUTOUIL M. (2014). *Caractérisation géotechnique des sédiments de dragage marins en vue de leur valorisation en techniques routières*. Revue Déchets Sciences et Techniques - N°66 - Mars 2014, 11 p.

BEN ALLAL L., AMMARI M., FRAR I., AZMANI A., BELMOKHTAR N.-E. (2011). *Caractérisation et valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc).* Revue Paralia, v.4, p.5.1-5.13, ISSN 1760-8716, doi : 10.5150/revue-paralia.2011.005

BERKAINE D. (2015). *Étude des paramètres de décantation et de consolidation de sédiments portuaires lagunés de Dunkerque*. Rapport de Master 1, Université de Normandie, Unicaen, 62 p.

BERKAINE D. (2016). *Aptitude au séchage et comportement hydromécanique de sédiments de barrage et marins*. Rapport de Master 2, Université de Normandie, Unicaen, 50 p.

BERTHAUD Y., DE BUHAN P., SCHMITT N. (2018). *Aide-mémoire de mécanique des sols*. Éditeur : DUNOD, 3ème édition. 384 p. ISBN : 2100776495.

BERTRAND M. (2010). *Optimisation de l'injection d'un floculant dans un décanteur dynamique.* Rapport de Master 1, Université de Normandie, Unicaen, 20 p.

BERTRAND M., DHERVILLY P., DE GENOUILLAC B., MANCIOPPI L. (2012). *Amélioration de la déshydratation et recherches de valorisations pour les fines de la carrière de Vignats.* Rapport technique, 43 p.

BIGORRE F., TESSIER D., PÉDRO G. (2000). *Significance of CEC and surface area of soils. How clay and organic matter contribute to water retention properties*. Earth and Planetary Science, Vol. 330, 4ème edition, pp. 245-250. Doi: 10.1016/S1251-8050(00)00136-1.

BOUAZIZ T. (2016). *Mélange de sédiments fluviaux et additifs pour une application sol*. Rapport de Master 2, Université de Normandie, Unicaen, 65 p.

BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D. (2016). *Mechanical dewatering solutions for sediments*. 15th Geo-Environmental Engineering – GEE, 2-3 Juin 2016, Nantes, France, pp. 23-32. ISBN 978-2-35921-016-3.

BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D., THERY F., (2017). *Behaviour of dredged dam sediments during natural dehydration*. 16th Geo-Environmental Engineering – GEE, 19-20 Mai 2017, Seoul, Corée du Sud, pp. 105-110.

BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D., THERY F. (2017). *Nouvelles techniques de déshydratation mécanisée en continu des sédiments. La presse à boues KDS®*. 4th Coastal &

Maritime Mediterranean Conference – CM$^2$, 29 novembre -1er décembre 2017, Split, Croatie, doi : 10.5150/cmcm.2017.005.

BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D., THERY F. (2018). *La presse à boues KDS® : une nouvelle technique de déshydratation mécanisée en continu des sédiments*. XVèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 29 au 31 mai 2018, La Rochelle, France, doi :10.5150/jngcgc.2018.070.

BOULLOSA ALLARIZ B., MÜLLER M., LEVACHER D., VIDAL D., C.V.R. DA SILVA D., THERY F., (2018). *Prediction of shear resistance by water content in Alpine sediments*. Revue Environmental Technology (Article en cours d'acceptation).

CABANA H. (2011). *Chapitre 3 – La coagulation, la floculation et l'agitation. GCI 720 - Conception : usine de traitement des eaux potables*. Cours de l'Université de Sherbrooke, 90 p.

CAILLERE S, HENIN S, RAUTUREAU M. (1982). *Minéralogie des argiles*. Ed. Masson, Paris, France, 189 p.

CARDENAS MUGA J. (2002). *Industria Cerámica en el Ecuador: Evaluación de las materias primas no metálicas*. Travail de fin d'études universitaires pour obtenir le titre d'ingénieur en mécanique, École Polytechnique du Littoral, Guayaquil, Équateur, 215 p.

CARLE J. (2017a). *Rapport d'essais traitement de sédiments de barrage, Université de Caen*. Assistance technique de l'entreprise SNF FLOERGER, 10 p.

CARLE J. (2017b). *Rapport d'essai pilote KDS®, traitement de sédiments de barrage, Université de Caen*. Assistance technique de l'entreprise SNF FLOERGER, 3 p.

CEDEX - CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS. (2007). *Matériaux de dragage*. Fiche technique du Ministère de l'Équipement d'Espagne, décembre 2017, 18 p.

CERRA I., DESAGNAT M., DUBART R., JUVEN L., ZHOU N., ZIANI H. (2014). *Traitement des boues des stations d'épuration des petites collectivités*. Rapport de l'École Polytechnique Universitaire de Montpellier, 38 p.

CHASSAGNEUX D., STIELJES L., MOUROUX P., MÉNILLIET F., DUCREUX G.H. (1996). *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse/pluie) à l'échelle départementale. Approche méthodologique dans les Alpes de Haute-Provence*. Rapport BRGM/RR39218-FR, 74 p.

CHRETIEN M. (2010). *Compréhension des mécanismes de retrait-gonflement des sols argileux : approche sur site expérimental et analyse de sinistres sur constructions individuelles*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, France, 372 p.

CIMBETON (2009). *Terrassement et assises de chaussées - Traitement des sols aux liants hydrauliques*. Référence CT70, Collection technique Cimbéton, 151 p.

COLIN D. (2003). *Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière*. Thèse de doctorat, Université de Normandie, Unicaen, France, 180 p.

COLIN F., LE GUYADER C. (2012). *Enquête dragage 2009. Synthèse des données.* CEREMA – CETMEF, 39 p.

COMISIÓN INTERMINISTERIAL DE ESTRATEGIAS MARINAS – CIEM. (2015). *Directrices para la caracterización del material dragado y su reubicación en aguas del dominio público marítimo-terrestre*. Directives du Ministère d'Agriculture, d'Alimentation et de l'Environnement Espagnol, Ports de l'État et CEDEX, 173 p.

CONSEIL GÉNÉRAL DE SEINE ET MARNE. (2010). *Fiche technique n°2 sur les filières de traitement des boues. Les lits de séchage.* Fiche technique, 3 p.

DALTON J. (1802). *Essay IV. On the expansion of elastic fluids by heat*. Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester, vol. 5. Issue 2, pp. 595-602.

DAUBERSIES L. (2012). *Séchage de fluides complexes en géométrie confinée*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, France, 154 p.

DE MAESENEER J. L. (1997). *Constructed wetlands for sludge dewatering*. Water Science and Technology Volume 35. Issue 5, pp. 279-285.

DHERVILLY P. (2010). *Unité de séparation, déshydratation et de valorisation à terre des sédiments de dragage portuaires et fluviaux NEMEAU®*. Présentation orale, Journées Nationales sur la gestion terrestre des sédiments de dragage portuaires et fluviaux, Lille Grand Palais, 9 - 11 juin 2010.

DHERVILLY P. (2013). *The NEMEAU® process.* Présentation orale, Wodcon XX-Congress and Exhibition: The Art of Dredging, Square Meeting Centre, Brussels, Belgium, 3 - 7 juin 2013.

DHERVILLY P., BERTRAND M., THANNEBERGER L., LEVACHER D., HOUISE C., LAFHAJ Z. (2014). *Gestion durable des sédiments : le projet COVASED.* XIII$^{èmes}$ Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil. Dunkerque, 2-4 juillet 2014, doi : 10.5150/jngcgc.2014.108, pp. 977-986.

DHERVILLY P., GREGOIRE P. (2014). *Recyclage des déchets en matériaux alternatifs*. Présentation orale, Salon ENVIRONORD, Lille, France, 11-12 juin 2014. 20 p.

DREAU A., FAUCONNIER N., MONSO A. (2010). *Schéma directeur des dragages des ports des Alpes-Maritimes. Gestion durable des sédiments marins dragués. Évaluation du gisement de sédiments à draguer et identification des filières locales de gestion.* Rapport final du Conseil Général des Alpes-Maritimes, 200 p.

DUAN Z. (2008). *Caractérisation, stabilisation et solidification de sédiments fins marins.* Thèse doctorat, Université de Normandie, Unicaen, 198 p.

DUBOIS V. (2006). *Étude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière*. Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, 298 p.

EC'EAU CONCEPT. (2018). *Solution de traitement des boues EC'eau PRESS® KDS. Fiche de données techniques*, 7 p.

EL FADILI M., MESSAGER M. (2015). *Enquête dragage 2011. Synthèse des données.* CEREMA – CETMEF, 39 p.

FAURE A. (2017). *Capacité d'un sédiment à se substituer à la fraction argileuse de la matière première de l'industrie des liants hydrauliques.* Thèse de doctorat, Université de Limoges, France, 316 p.

FLAVIGNY E. (1992). *Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie*. Revue française de géotechnique nº 57, pp. 75-78.

FOURVEL G. (2018). *Valorisation agronomique des sédiments fins de retenues hydroélectriques en construction d'Anthroposols fertiles*. Thèse de doctorat, Agrocampus-Ouest, Université d'Angers, France, 392 p.

GARCÍA M.A., CHIMENOS J.M., FERNÁNDEZ A.I., MIRALLES L., SEGARRA M., ESPEILL, F. (2004). *Low-grade MgO used to stabilize heavy metals in highly contaminated soils*. Chemosphere, 56, 481-491.

GLASER D. (2009). *Approche novatrice en matière de gestion des sédiments non immergeables dans le port de Dunkerque*. Présentation orale, INTERSOL 2009 Paris, France, 25 mars 2009, 41 p.

GTR - GUIDE DES TERRASSEMENTS ROUTIERS. (2000). *Réalisation des remblais et des couches de forme*. Paris, LCPC, SETRA. 2ème édition, 211 p.

HAINES W.B. (1923). *The volume-changes associated with variations of water content in soil.* Journal of Agricultural Science, Vol. 13, 3ème édition, pp. 296-310.
doi: 10.1017/S0021859600003580.

HALLAIRE V. (1988a). *La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement. I. Modélisation morphologique*. Agronomie, EDP Sciences, 1988, Vol. 8, 2ème édition, pp. 139-145.

HALLAIRE V. (1988b). *La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement. II. Modélisation morphologique*. Agronomie, EDP Sciences, 1988, vol 8, 3ème édition, pp. 273-280

HAURINE F. (2015). *Caractérisation d'atterrissements d'argiles récents sur le territoire français, en vue de leur valorisation dans l'industrie des matériaux de construction en terre cuite.* Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 323 p.

HERRERA TARRILLO M.L. (2018). *Caractérisation et valorisation de sédiments*. Rapport IUT, Université de Normandie, Le Havre, 44 p.

HOLTZ R. D., KOVACS W.D. (1991). *Introduction à la géotechnique*, Édition de l'École Polytechnique de Montréal, 808 p.

HUECKEL (1992). *On effective stress concepts and deformation in clays subjected to environmental loads: Discussion*. Canadian Geotechnical Journal, vol 29, 6ème édition, pp. 1120–1125.

HULIEN M.L., LEKSE J.W., ROSMUS K.A., DEVLIN K.P., GLENN J.R., WISNESKI S.D., WILDFONG P., LAKE C.H., MACNEIL J.H., AITKEN J.A. (2015). *An inquiry-based project focused on the X-ray powder diffraction analysis of common household solids*. Journal of chemical education, vol 92, pp. 2152-2156.

IDJRAOUI M. (2014). *Propriétés hydrauliques d'un sédiment « laguné » de Dunkerque*. Rapport de Master, Université de Normandie, Unicaen, 64 p.

IN VIVO. (2002). *Schéma de gestion des dragages des ports du Ouest-Var et de l'Est -Var – Destinations des déblais*. Rapport IN VIVO, août 2002, 43 p.

KAZI AOUAL-BENSLAFA F., HACINI M., SEMCHA A., MEKERTA B., (2012). *Valorisation des sédiments marins contaminés dans les mortiers dans le cadre de la restauration des darses du port d'Oran et la protection de l'environnement.* XIIème Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Cherbourg, 12-14 juin 2012. pp. 1017-1024, doi : 10.5150/jngcgc.2012.112-K.

KEITA E. (2014). *Physique du séchage des sols et des matériaux de construction*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France, 177 p.

KHADRAOUI S. (2012). *Séchage naturel de sédiments*. Rapport de Master 1, Université de Normandie, Unicaen, 33 p.

KHADRAOUI S. (2013). *Étude des caractéristiques géomécaniques et hydromécaniques de sédiments de barrage*. Rapport de Master 2, Université de Normandie, Unicaen, 67 p.

KOGEL J.E., TRIVEDI N.C., BARKER J.M., KRUKOWSKI S.T. (2006). *Industrial minerals and rocks: Commodities, markets, and uses*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration-SME. 7ème édition, États Unis 1548 p. ISBN : 978-0873352499.

LE V. C. (2014). *Étude sur modèle physique du renforcement des sols par colonnes en « soil-mix » application aux plates-formes ferroviaires*. Thèse de doctorat, Université Paris – Est, France, 228 p.

LEDESMA A., LAKSHMIKANTHA M.R., LEVATTI H., TAPIA J. (2008). *Fracture mechanics for crack propagation in drying Soils*. 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics – IACMAG, 1-6 Octobre, 2008, Goa, Inde, pp. 1060-1067.

LE GUYADER C. (2013). *Enquête dragage 2010. Synthèse des données.* CEREMA – CETMEF, 35 p.

LEROUEIL, S., TAVENAS, F., LE BIHAN, J.-P. (1983). *Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada.* Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20 Issue 4, pp. 681–705.

LEVACHER D. (2015). *Valorisation matière de sédiments : Freins à la valorisation, co-valorisation et récents développements. Les enjeux des sédiments et leur valorisation dans les matériaux de construction.* Présentation orale, Cergy-Pontoise, France, 17 septembre 2015. 60 p.

LEVACHER D. (2017). *Recent management approaches in reuse of sediments in construction field.* 16th Geo-Environmental Engineering – GEE, 18-20 Mai 2017, Seoul, Corée du Sud, pp. 267-272.

LEVACHER D., BOULLOSA ALLARIZ B., MÜLLER M. (2018). *Some aspects of sediment dewatering laboratory testing and useful relationships for practice*. 17th Geo-Environmental Engineering – GEE, 25- 26 Mai 2018, Fukuoka, Japan, pp. 220-228.

LEVACHER D., DHERVILLY P. (2010). *Déshydratation mécanisée in situ de sédiments fraîchement dragués ou mis en dépôts : le projet SEDIGATE®* I, XIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil. Les Sables d'Olonne, 22-25 juin 2010, pp 859-868, doi : 10.5150/jngcgc.2010.093-L.

LEVACHER D., SANCHEZ M., DUAN Z., LE GUERN C. (2008). *Propriétés physiques et hydrauliques de sédiments marins en vue de réutilisation en remblais.* Xèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil. Sophia Antipolis, 14-16 octobre 2008, pp. 761-774, doi : 10.5150/jngcgc.2008.072-L.

LI L. (2011). *Cours CTN 504. Mécanique des sols*. Cours de L'École de Technologie Supérieure - « ÉTS », Québec, Canada, 52 p.

LIANG Y. (2012). *Co-valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et de fibres*. Thèse de doctorat, Université de Normandie, Unicaen, France, 194 p.

LIENARD A. (2010). *Déshydratation des boues par lits de séchage plantés de roseaux*. Ingénieries – E A T, pp. 33-45.

LIENARD A., ESSER D., DEGUIN A., VIRLOGET F. (1990). *Sludge dewatering and drying in reed beds: an interesting solution? General investigation and first trials in France*. Constructed Wetlands in Water Pollution Control (Adv. Wat. Pollut. Control n°11), Ed.COOPER P.F. & FINDLATER B.C. Pergamon Press, Royaume-Uni, pp. 257-267.

LIFE (2002). *Méthodes de gestion et de réutilisation des sédiments pollués*. Projet européen réalisé par In Vivo. Agence de l'eau Artois Picardie. Pôle de Compétence des sites et sols pollués. 126 p.

LIMEIRA DE ARAUJO J. (2011). *The beneficial use of dredge marine sand as alternative material for concrete*. Thèse de doctorat, Université Polytechnique de Catalogne, UPC, Espagne, 169 p.

LOUDIA M. (2015). *Étude du comportement mécanique d'un sédiment traité*. Rapport de Master 2, Université de Normandie, Unicaen, 52 p.

MAKKI L., DUC M., DRONIUC N., REIFFSTECK P., MALOULA A., MAGNAN J-P. (2008). *Essai de retrait pour une meilleure classification de la sensibilité des sols à la sécheresse*. SEC 2008, Magnan, Cojean, Cui et Mestat, Éditions du LCPC, Paris 257-264.

MANCIOPPI L., DHERVILLY P., LEVACHER D. (2012). *Décanteur dynamique NEMEAU®450 et valorisation de matériaux fins.* XII$^{ème}$ Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Cherbourg, 12-14 juin 2012, pp. 1067-1074, doi : 10.5150/jngcgc.2012.117-M.

MAROT F. (1997). *Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques et des matières organiques*. Thèse de doctorat, Université du Havre, 184 p.

MESRI, G., CHOI, Y.K. (1994). *Settlement of embankments on soft clays. In Settlements*. ASCE Geotechnical Special Publication, pp. 8–56.

MESSAGER M., BOUVET T. (2017.a). *Enquête dragage 2012. Synthèse des données.* CEREMA – CETMEF, 40 p.

MESSAGER M., BOUVET T. (2017.b). *Enquête dragage 2013. Synthèse des données.* CEREMA – CETMEF, 40 p.

METTAUER H., TUAL Y., HUCK C., TRENDEL R. (1983). *De la connaissance du comportement physique et mécanique des sols de l'Est de la France*. Agronomie, Vol. 3, 2$^{ème}$ édition, pp. 141-152.

MIRAOUI M. (2010). *Mise en œuvre d'une démarche de prétraitement et de traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil*. Université des Sciences et Technologies de Lille 1, 115-139 p.

MOGHRABI I., RANAIVOMANANA H., BENDAHMANE F., AMIRI O., LEVACHER D. (2018). *Modelling the mechanical strength development of treated fine sediments: a statistical approach*. Environmental Technology, 21 p, doi : 10.1080/09593330.2018.1432697.

MOLLE P., VINCENT J., TROESCH S., MALAMAIRE G. (2013). *Les lits de séchage de boues plantés de roseaux pour le traitement des boues et des matières de vidange*. Guide de dimensionnement et de gestion, 82 p.

MONNIER G. (1994). *Assemblage et organisation physique des particules*. Dans : M. Bonneau & B. Souchier, éds. Pédologie. 2. Constituants et propriétés des sols. 2ème édition, Paris : Masson, pp. 325-348. ISBN : 2-225-84019-2.

MOTTOT Y. (2000). *Coagulant et floculant*. 279ème conférence de l'Université de tous les savoirs, donnée le 5 octobre 2000, 10 p.

MULLER F. (2016). *Matière organique en retour au sol*. Fiche technique de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie –ADEME. 17 p.

MÜLLER M., BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D. (2018a). *Fiche de données techniques : Essais de déshydratation avec la presse à boues KDS®*. Fiche de données techniques, Université de Normandie, Unicaen, France, 18 p.

MÜLLER M., B ALLARIZ B., C.V.R. DA SILVA D., MARASSI R J. (2018b). *Breve estudo comparativo entre soluções de desague: uma abordagem económica e estatística.* II Encontro Acadêmico da Engenharia Ambiental da EEL-USP – EnAmb, 6-7 Août 2018, Lorena, Brésil, 4 p. http://www.enamb.eel.usp.br/system/files/2018/trabalho/192/enambmmvf.pdf

MUNCK R. (2015). *La co-valorisation de matériaux appliquée aux sédiments de dragage*. Rapport de Master 2, Université de Poitiers, France, 55 p.

PAINEAU E-N. (2011). Transitions de phases dans les argiles. Influence de la minéralogie et de la morphologie. Comportement sous écoulement et sous champs. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 311 p.

PEDRO G. (1965). *La classification des minéraux argileux (phyllosilicates): Étude historique et considérations critiques*. Ed. INRA-Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, p. 108.

PELLERIN LE BAS X. (2015). *Valorisation des sédiments du port de Dunkerque en matériaux de construction.* Rapport de Master 2, Université de Normandie, Unicaen, France, 49 p.

PENMAN H.L. (1948). *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, vol. 193, Nº 1032, pp. 120-145.

PERRONI A.C. (2006). *Gestion des sédiments de dragage : Inventaire des méthodes de prétraitement et application aux matériaux du Port Autonome du Havre en vue de leur*

*valorisation*. Rapport de Master 2, Université de Normandie, Unicaen, France, 101 p. et annexes.

PHILIPPONNANT G., HUBERT B. (2000). *Fondations et ouvrages en terre*. 2ème édition, 548 p. ISBN 2-212-07218-X.

PORT AUTONOME DU HAVRE. (2006). *Prétraitement des sédiments de dragage.* Fiche guide, 32 p.

PORTET F., NOËL O., NICAISE S., PORTILLO C., VERMEULEN M. (2011). *La classification des sols. Géotechnique routière.* Cours de l'École Nationale des Techniciens de l'Équipement - « ENTE » Aix-en-Provence, 36 p.

PRIAN J-P., DONSIMONI M., VINCENT M., DENIS L., GALLAS J-C., MARTY F., MOTTEAU M. (2000). *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de l'Essonne*. Rapport du BRGM n° RP-50376-FR, 227 p.

RAUJOUAN P. (2009). *Analyse des données de l'enquête « dragage » 2007.* CETMEF / DELCE / DEML, 25 p.

RAUJOUAN P. (2010). *Analyse des données de l'enquête « dragage » 2008.* CETMEF / DELCE / DEML, 34 p.

REKIK B. (2007). *Propriétés géotechniques des sédiments de dragage traités au ciment.* Thèse de doctorat, Université de Normandie, Unicaen, France, 121 p.

ROHWER C. (1934). *Evaporation from different types of pans*. Transactions A. S. C. E., vol. 99, 673 p.

SANCHEZ M. (2000). *Dynamique des sédiments fins en milieu marin et agitation portuaire*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Normandie, Unicaen, France, 82 p.

SANCHEZ M., GROVEL A. (1993). *Modélisation du tassement sous poids propre des couches de vase molle et saturée, sur un fond imperméable*. La Houille Blanche, pp. 29-34, doi : 10.1051/lhb/1993002.

SANO K. (2012). *Application of site investigation technologies to dam sediments*. Rapport de Master. Université de Caen et IFSTTAR Nantes, 25 p.

SCHLOSSER F. (2003). *Éléments de mécanique des sols*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 276 p. ISBN 2-85978-104-8.

SEED H. B., WOODWARD R.J., LUNDGREN R. (1962). *Prediction of swelling potential for compacted clays*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, vol. 88, No. SM4, pp. 107-131.

SEMCHA A. (2006). *Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug*. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, France, 175 p.

SERRATRICE J-F. (1995). *Comportement d'une argile compactée*. Bulletin de liaison Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Aix-en-Provence - 200 - novembre-décembre 1995 Réf. 4006, 13-23.

SERRATRICE J-F. (2007). *Retrait-Gonflement des sols argileux et des marnes*. Revue française de géotechnique. N°120-121. pp.107-120.

SERRATRICE J-F. (2015). *Une représentation des courbes de retrait des sols argileux*. SEC 2015 International Symposium 179-186.

SETRA-LCPC (1972). *Recommandations pour le traitement en place des sols fins*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°61, pp 49-73.

SETRA-LCPC (2000). *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques : application à la réalisation des remblais et des couches de forme*. Guide technique, 240 p. ISBN 2720838101 9782720838101.

SILITONGA E. (2010). *Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification / stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice*. Thèse de doctorat, Université de Normandie, Unicaen, France, 227p.

SKEMPTON A.W. (1953). *The colloidal activity of clays, proceedings of the third.* International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. I, 57-61.

SNF FLOERGER. (2011). *Coagulants & floculants.* Assistance technique de l'entreprise SNF FLOERGER, 43 p.

SNF FLOERGER. (2012). *Powders beads.* Catalogue de l'entreprise SNF FLOERGER, 63 p.

SNF FLOERGER. (2017). *Fiche de données techniques : FLOPAM EM 340 HIB*. Fiche de données techniques de l'entreprise SNF FLOERGER, 1 p.

SOCIÉTÉ QUÉBÉCOISE DE PHYTOTECHNOLOGIE – SQP. (2004). *Les lits de séchage plantés de macrophytes.* Rapport de SQP, pp. 4-5.

SOIL SURVEY STAFF (1951). *Soil Survey Manual.* USDA Handbook N°. 18, U.S. Department of Agriculture Washington, DC, 503 p.

STIRK G. (1954). *Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into the soil*. Australian Journal of Agricultural Research, Vol. 5, 2ème édition, pp. 279–296.

STIRLING R.A. (2014). *Multiphase modelling of desiccation cracking in compacted soil*. Thèse de doctorat de l'Université de Newcastle, Angleterre, 364 p.

THANNBERGER L. (2016). *Notions sur le lavage des sols (et autres matériaux). Solutions environnementales « clé en main » pour une valorisation active de sites, VALGO copyright 2009*, Licence SSP – UPEM, 23 p.

THIRION-MERLE V. (2014). *Spectrométrie de fluorescence X*. In Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes, Dir. Dillmann P et Bellot-Gurlet L, Collection « Sciences Archéologiques », pp. 291-297.

THORNTHWAITE C. W. (1948). *An approach toward a rational classification of climate*. Geographical Review, Vol. 38, Nº 1, pp. 55-94.

TRANQUILLE N. (2015). *Présentation du programme COVASED et étude de mélanges de sédiments en provenance du port de Dunkerque avec recherche d'un mélange : travail expérimental avec analyse de résultats*. Rapport de Master 2, Université de Normandie, Unicaen, France, 52 p.

VALGO. (2011). *Le lavage des sols et sédiments pollués. Une alternative de gestion pour optimiser les chantiers. Solutions environnementales « clé en main » pour une valorisation active de sites, VALGO copyright 2009*, Pollutec Horizon – Paris 2011, 18 p.

VALGO. (2015). *Traitement et valorisation des sédiments portuaires : lancement du démonstrateur COVASED.* Communiqué de presse, le 16 novembre 2015, 2 p.

VAN DER MERWE D. H. (1964). *The prediction of heave from the plasticity index and the clay fraction*. Civil Engineering, South Africa, vol. 6 N° 6.

VO T D. (2017). *Modélisation numérique et analytique de la fissuration de séchage des sols argileux*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France, 228 p.

WANG D., ABRIAK NE., ZENTAR R. (2013). *Strength and deformation properties of Dunkirk marine sediments solidified with cement, lime and fly ash.* Engineering Geology. Vol. 166, pp. 90-99, doi : 10.1016/j.enggeo.2013.09.007.

WINTERWERP J.C., VAN KESTEREN W.G.M. (2004). *Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment*. Vol. 56 Ed. Elsevier Science, 576 p. ISBN: 9780444515537.

ZEGHDALOU N. (2018). *Rapport d'intervention du 12 juillet 2018*. Assistance technique de l'entreprise SNF FLOERGER, 1 p.

ZERHOUNI M.I., GÉRARD C., FLEUREAU J.M. (1998). *Étude du retrait de deux sols argileux naturels.* Comptes rendus du Colloque MAGI'50 - Matériaux Argileux et Géologie de l'Ingénieur, Nancy, 21-22 Septembre 1998, Sciences de la Terre – ASGA, pp. 15-20.

ZHAO Z., BENZERZOUR M., ABRIAK N., DAMIDOT D. (2015). *Valorisation des sédiments marins dragués en substitution partielle du ciment dans la fabrication de mortiers et de bétons*. Conférence Internationale Francophone NoMaD, Douai, France, 5-6 Novembre 2015, 10 p.

***Références sitographiques***

Alteo environnement Gardanne : http://www.alteo-environnement-gardanne.fr/ (consulté en décembre 2015).

AMCON - Amenity Convenience : http://en.amcon.co.jp/ (consulté en mai 2017).

Asio® - Traitement des eaux : http://www.asio.cz/fr/ (consulté en mai 2017).

ASSERVA - Systèmes d'alimentation et équipements d'élevage : http://www.asserva.fr/ (consulté en novembre 2015).

Atlantique-Industrie : http://www.atlantiqueindustrie.fr/ (consulté en juin 2017 et en mai 2018a).

BENENV & CO - Benenfit the Environment : http://en.benenv.com/ (consulté en juin 2017 et en juin 2018).

BHS SONTHOFEN : http://www.bhs-sonthofen.de/ (consulté en décembre 2015).

BOEEP – Professional Water-treatment Total Solution : http://www.boeep.com/en/ (consulté en juin 2018).

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières : www.brgm.fr/ (consulté en novembre 2017).

Communauté de Communes du Val Vert du Clain : http://www.deshydratation-boues.com/ (consulté en novembre 2015).

DAFIM : http://www.dafim.com/ (consulté en décembre 2015).

DANG NGOC CHAN C. Page personnelle : deuns.chez.com/sciences/drx/drx4.html (consulté en janvier 2018).

EMO France : http://www.emo-france.com/ (consulté en décembre 2015).

FOOD & BEVAGE : https://foodmag.com.au/ (consulté en juin 2018).

FRC® - Systems international : http://www.frcsystems.com/ (consulté en août 2017).

Hidrometálica : http://www.hidrometalica.com (consulté en décembre 2015).

IMERYS performance minerals : http://www.imerys-perfmins.com/ (consulté en juin 2017)

IRSTEA - Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture : http://www.irstea.fr/ (consulté en novembre 2015).

Nrbombas : http://www.nrbombas.no.comunidades.net/filtro-prensa/ (consulté en août 2017).

NTE - Nouvelles Technologies Environnementales : http://www.ntenvironnement.com/ (consulté en novembre 2015).

Office de Tourisme de Rochefort Océan : http://www.rochefort-ocean.com/ (consulté en novembre 2015).

SNF FLOERGER : www.snf-group.com/fr/(consulté en juin 2018).

Syndicat d'Eau et d'Assainissement de la Région de Yerville : http://www.siaepa-yerville.fr/ (consulté en novembre 2015).

WFT - Welders Filtration Technology : http://www.wft.be/ (consulté en décembre 2015).

## *LISTE DES PUBLICATIONS DE L'AUTEUR*

### *Communications nationales*

BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D. (2016). *Quelques aspects de la déshydratation naturelle des sédiments*. XIV$^{ème}$ Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil –JNGCGC, 29 juin au 1$^{er}$ juillet 2016, Toulon, France, pp. 553-560, doi :10.5150/jngcgc.2016.061.

BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D. (2016). *Volute® System for dewatering of sediments*. 25$^{ème}$ Réunion des Sciences de la Terre, Octobre 2016, Caen, France, pp. 59.

BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D., THERY F. (2018). *La presse à boues KDS® : une nouvelle technique de déshydratation mécanisée en continu des sédiments.* XV$^{ème}$ Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil - JNGCGC, 29-31 mai 2018, La Rochelle, France, pp. 607-615, doi : 10.5150/jngcgc.2018.070.

BOULLOSA ALLARIZ B., MÜLLER M., LEVACHER D., THERY F. (2018). *Étude du séchage naturel des sédiments du port de Dunkerque en vue de valorisations futures.* 2$^{èmes}$ Rencontres Scientifiques : Workshop sur la Réhabilitation et la Valorisation des Sites et Sols pollués - RV2S, 29-30 octobre 2018, Saint Etienne, France.

PELLERIN-LEBAS X., BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D. (2016). *Sédiments marins- traités en grand volume avec de la cendre volante papetière.* XIV$^{ème}$ Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil – JNGCGC, 29 juin au 1$^{er}$ juillet 2016, Toulon, France, pp.597-604, doi :10.5150/jngcgc.2016.066.

### *Communications internationales*

AZAIEZ D., BOUASSIDA M., LEVACHER D., BOULLOSA ALLARIZ B. (2018). *Characterization of sediments from dewatering tests*. First International Conference on Advances in Rock Mechanics - TuniRock2018, March 29-31, 2018, Hammamet, Tunisia.

BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D. (2016). *Mechanical dewatering solutions for sediments*. 15$^{th}$ Geo-Environmental Engineering – GEE, 2-3 Juin 2016, Nantes, France, pp. 23-32. ISBN 978-2-35921-016-3.

BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D. (2016). *Valorization of waste paper sludge ash for manufacturing materials*. International Conference on Sustainable Smart Manufacturing - S2M, 20-22 Octobre 2016, Lisbonne, Portugal, pp. 257-261.

BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D., THERY F. (2017). *Behaviour of dredged dam sediments during natural dehydration*. 16$^{th}$ Geo-Environmental Engineering – GEE, 19-20 Mai 2017, Seoul, Corée du Sud, pp. 105-110.

BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D., THERY F. (2017). *State parameters during natural dehydration of dam dredged sediments*. Poster. 10th International SedNet Conference « Sediments on the move », 14-17 Juin 2017, Gênes, Italie, pp. 100.

BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D., THERY F. (2017). *Nouvelles techniques de déshydratation mécanisée en continu des sédiments. La presse à boues KDS®*. 4th Coastal and Maritime Mediterranean Conference, CM2, 29 novembre – 1er décembre 2017, Split, Croatie, pp. 23-26, doi :10.5150/cmcm.2017.005.

BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D., THERY F. (2018). *KDS® press: a new technique to mechanical dewatering of sediments in a continuous manner.* 17th Geo-Environmental Engineering – GEE, 25-26 Mai 2018, Fukuoka, Japan, pp. 151-156.

LEVACHER D., BOULLOSA ALLARIZ B., MÜLLER M. (2018). *Some aspects of sediment dewatering laboratory testing and useful relationships for practice.* 17th Geo-Environmental Engineering – GEE, 25-26 Mai 2018, Fukuoka, Japan, pp. 220-228.

MÜLLER M., B ALLARIZ B., C.V.R. DA SILVA D., MARASSI R J. (2018). *Breve estudo comparativo entre soluções de desague: uma abordagem económica e estatística.* II Encontro Acadêmico da Engenharia Ambiental da EEL-USP – EnAmb, 6-7 Août 2018, Lorena, Brésil, 4 p. http://www.enamb.eel.usp.br/system/files/2018/trabalho/192/enambmmvf.pdf

PELLERIN-LEBAS X., BOULLOSA ALLARIZ B., LEVACHER D. (2016). *Marine sediments reuse as construction materials: a mortar approach.* 15th Geo-Environmental Engineering – GEE, 2-3 Juin 2016, Nantes, France, pp. 65-72.

***Revues***

BOULLOSA ALLARIZ B., MÜLLER M., LEVACHER D., VIDAL D., C.V.R. DA SILVA D., THERY F. (2018). *Prediction of shear resistance by water content in Alpine sediments*. Environmental Technology 21p. En cours d'acceptation.

MÜLLER M., BOULLOSA ALLARIZ B., C.V.R. DA SILVA D., MARASSI R J. (2018). *Estudo comparativo de soluções de desague: abordagem bibliográfica, economica e estatística*. En cours de soumission.

## *LISTE DES FIGURES*


Figure 1-1. Évolution des tonnages de sédiments dragués déposés à terre en France, de 2007 à 2013……..…….…… 3
Figure 1-2. Procédure simplifiée de valorisation des sédiments de dragage…….. 4
Figure 1-3. Description des travaux envisagés……..... 7
Figure 1-4. Schéma de gestion et de traitements des sédiments proposé par le programme COVASED (BOULLOSA ALLARIZ & LEVACHER, 2016) …….. 8
Figure 1-5. Schéma de la plateforme COVASED (TRANQUILLE, 2015)…….. 9
Figure 1-6. Localisation de la plateforme COVASED, dans le GPMD……. 10
Figure 1-7. Schéma de l'organisation du manuscrit…….. 12
Figure 2-1. Différents moyens de déshydratation existants……... 16
Figure 2-2. Diagramme des phases d'un échantillon du sol ou sédiment en fonction de leur masse …….. 18
Figure 2-3. Diagramme des phases d'un échantillon de sol ou de sédiment en fonction de leur poids……. 21
Figure 2-4. Volume d'un échantillon de sol ou sédiment en fonction de l'indice des vides ..……. 22
Figure 2-5. Diagramme des phases d'un échantillon du sol ou de sédiment en fonction de l'indice des vides et du degré de saturation pour un volume unitaire…… 22
Figure 2-6. Volume d'un échantillon de sol ou sédiment en fonction de l'indice des vides et de la porosité…….. 24
Figure 2-7. Relation siccité et teneur en eau…….. 25
Figure 2-8. Seuils de pelletabilité et transportabilité de sédiments (DHERVILLY, 2013) ...……... 25
Figure 2-9. Exemples de déshydratation par lagunage…….. 28
Figure 2-10. Représentation schématique d'un lit de séchage…… 29
Figure 2-11. Exemple et schéma représentatif d'un lit de séchage planté avec des roseaux ....……... 32
Figure 2-12. Coupe longitudinale d'une centrifugeuse (www.asserva.fr)..... 33
Figure 2-13. Vue générale et schéma représentatif du filtre presse à plateaux…… 35
Figure 2-14. Filtre presse à bandes sous pression (www.frcsystems.com)..... 37
Figure 2-15. Filtre à bandes sous vide, (www.bhs-sonthofen.de)..... 37
Figure 2-16. Filtre presse à membrane (www.hidrometalica.com)..... 38
Figure 2-17. Schéma de fonctionnement du filtre presse à membrane (www.dafim.com)..... 38
Figure 2-18. Principe de fonctionnement du filtre presse à vis (www.emo-france.com)..... 39
Figure 2-19. Vue générale et schéma représentatif du système Hydrosplit®, (THANNBERGER, 2016)…….. 41
Figure 2-20. Éléments constituant du décanteur dynamique Nemeau®. 42
Figure 2-21. Principe de fonctionnement du décanteur dynamique Nemeau® (BOULLOSA ALLARIZ & LEVACHER, 2016)…….. 42
Figure 2-22. Compartimention de la presse à boues Volute®, (www.asio.cz)..... 44
Figure 2-23. Principe de fonctionnement de la presse à boues Volute®……... 45
Figure 2-24. Étapes du procédé de valorisation des sédiments (LEVACHER, 2017). 50
Figure 3-1. Classification granulométrique, (NF X 31-107)……. 61

Figure 3-2. Triangle de texture des sédiments proposé par la FAO et l'USDA, (SOIL SURVEY STAFF, 1951)……. 62
Figure 3-3. États du sol ou du sédiment en fonction de la teneur en eau (HOLTZ & KOVACS, 1991)…… 65
Figure 3-4. Matériel nécessaire pour la détermination des limites d'Atterberg…….. 66
Figure 3-5. Protocole à suivre pour la détermination des limites d'Atterberg…… 67
Figure 3-6. Protocole et exemple d'essai au bleu de méthylène……. 67
Figure 3-7. Catégories de sols en fonction de la valeur de VBS, (GTR, 2000)…….. 68
Figure 3-8. Principe et exemple de l'analyse par diffraction des rayons X (DRX)… 70
Figure 3-9. Exemple d'un essai de décantation, (BERKAINE, 2016)……... 71
Figure 3-10. Représentation d'une courbe de tassement, (SANCHEZ & GROVEL, 1993) …….. 72
Figure 3-11. Vue générale de l'œdomètre, (BELARBI & RACHEDI, 2017)……. 74
Figure 3 12. Détermination de la valeur de $C_v$ par la méthode de la racine carrée mise au point par Taylor, (LI, 2011)…… 74
Figure 3-13. Comportement des sols selon leur état de consolidation, (PHILIPPONNANT & HUBERT, 2000)……... 75
Figure 3-14. Répartition géographique des sites de prélèvement des sédiments de barrage…… 78
Figure 3-15. Contexte général de la géologie des sédiments de barrage, (d'après la carte du BRGM, 2017)…… 79
Figure 3-16. Aspect visuel des sédiments de barrage…….. 80
Figure 3-17. Distribution granulométrique des sédiments de barrage……. 82
Figure 3-18. Texture des sédiments de barrage……... 83
Figure 3-19. Relation entre la teneur en matière organique et la masse volumique des particules solides des sédiments de barrage……. 85
Figure 3-20. Relation $I_P$-$w_L$ pour les sédiments de barrage……. 85
Figure 3-21. Distribution de la matière organique dans les sédiments de barrage….. 86
Figure 3-22. Distribution des carbonates dans les sédiments de barrage…… 90
Figure 3-23. Courbes de tassement des sédiments de barrage (concentration initiale = 100 g/l)…… 91
Figure 3-24. Courbes de tassement des sédiments de barrage (concentration initiale = 250 g/l)…… 92
Figure 3-25. Relation entre le coefficient de perméabilité et la concentration des sédiments de barrage……... 93
Figure 3-26. Coefficient de consolidation des sédiments de barrage en fonction de la contrainte appliquée…… 94
Figure 3-27. Courbes œdométriques des sédiments de barrage……... 95
Figure 3-28. Relation de l'indice de fluage et la teneur en matière organique des sédiments de barrage……... 95
Figure 3-29. Relation entre le coefficient de perméabilité et la concentration des sédiments de barrage. ……. 96
Figure 3-30. Bassins du Grand Port Maritime de Dunkerque (MUNCK, 2015)……. 100
Figure 3-31. Répartition géographique des sites de prélèvement des sédiments marins……. 101
Figure 3-32. Information géologique des sédiments marins (d'après la carte du BRGM, 2017)……. 102
Figure 3-33. Aspect visuel des sédiments marins…… 103
Figure 3-34. Distribution granulométrique des sédiments marins……... 104
Figure 3-35. Texture des sédiments marins……. 104

Figure 3-36. Relation entre la teneur en matière organique et la masse volumique des particules solides des sédiments marins…… 105
Figure 3-37. Relation $I_P$-$w_L$ pour les sédiments marins……... 106
Figure 3-38. Courbes de tassement des sédiments marins pour une concentration initiale de 100 g/l. …….. 109
Figure 3-39. Courbes de tassement des sédiments marins pour une concentration initiale de 250 g/l. ……..…… 110
Figure 3-40. Relation entre le coefficient de perméabilité et la concentration des sédiments marins…… 110
Figure 3-41. Coefficient de consolidation des sédiments marins en fonction de la contrainte appliquée ……... 111
Figure 3-42. Courbes œdométriques des sédiments marins…… 112
Figure 3-43. Relation entre le coefficient de perméabilité et la concentration des sédiments marins…… 113
Figure 3-44. Distribution granulométrique de la kaolinite Speswhite…… 116
Figure 3-45. Texture de la kaolinite Speswhite……... 117
Figure 3-46. Relation $I_P$-$w_L$ pour la kaolinite Speswhite…… 117
Figure 3-47. Courbes de tassement du kaolin pour des concentrations initiales de 100 g/l et de 250 g/l…… 119
Figure 3-48. Relation entre le coefficient de perméabilité et la concentration de la kaolinite…….. 120
Figure 3-49. Coefficient de consolidation de la kaolinite en fonction de la contrainte appliquée ...……..……... 120
Figure 3-50. Courbe œdométrique de la kaolinite……... 121
Figure 3-51. Distribution granulométrique du sable de Fontainebleau…… 122
Figure 3-52. Texture du sable de Fontainebleau……. 123
Figure 4-1. États du sol et comportement du sol en fonction de la teneur en eau d'après HOLTZ & KOVACS (1991)……. 129
Figure 4-2. Abaque du potentiel de gonflement proposé par SEED et al., (1962)….. 133
Figure 4-3. Abaque du potentiel de gonflement proposé par VAN DER MERWE, (1964) ...……. 133
Figure 4-4. Confection d'un échantillon cylindrique de petite taille……. 134
Figure 4-5. Confection d'un échantillon cylindrique de grande taille…… 135
Figure 4-6. Phases de séchage naturel des sédiments (BOULLOSA ALLARIZ et al, 2017)…….. 136
Figure 4-7. Protocole à suivre pour le carottage et la mesure de la teneur en eau…. 137
Figure 4-8. Essais de séchage et de retrait : cas de sédiments alpins « AL-SPO » et « AL-CLA »…… 138
Figure 4-9. Scissomètre de laboratoire…….. 139
Figure 4-10. Essai scissométrique : mesures et formules…… 140
Figure 4-11. Courbes d'étalonnages des ressorts utilisés…… 140
Figure 4-12. Pourcentages d'eau selon le temps de séchage pour le sédiment « AL-CLA »……. 141
Figure 4-13. Évolution des pourcentages d'eau (E1) dans les sédiments selon le temps de séchage…… 143
Figure 4-14. Évolution des pourcentages d'eau drainée (E2) des sédiments selon le temps de séchage…… 144
Figure 4-15. Évolution des pourcentages d'eau évaporée (E3) des sédiments selon le temps de séchage……. 145
Figure 4-16. Évolution des pourcentages d'eau pour le kaolin…… 146

Figure 4-17. Évolution de l'eau évaporée (E3) des sédiments alpins selon le temps de séchage……... 147
Figure 4-18. Évolution de l'eau évaporée (E3) des sédiments bretons, de Dunkerque et du Rhin selon le temps de séchage…….. 147
Figure 4-19. Évolution des pourcentages d'eau (E1) dans les sédiments alpins selon le temps de séchage……. 148
Figure 4-20. Évolution des pourcentages d'eau (E1) dans les sédiments bretons, de Dunkerque et du Rhin selon le temps de séchage…… 148
Figure 4-21. Évolution de la teneur en eau selon la profondeur de la couche du sédiment « AL-CLA »…… 150
Figure 4-22. Évolution de la teneur en eau par rapport au temps de séchage des sédiments de barrage (à gauche) et des sédiments « AL-CLA » (à droite) ...……. 151
Figure 4-23. Évolution de l'indice des vides par rapport au temps de séchage des sédiments de barrage (à gauche) et des sédiments « AL-CLA » (à droite). 153
Figure 4-24. Évolution de l'indice des vides par rapport à la teneur en eau des sédiments « AL-CLA »……... 153
Figure 4-25. Évolution du degré de saturation par rapport au temps de séchage (à gauche) et en fonction de la teneur en eau des sédiments (à droite)…… 155
Figure 4-26. Évolution de la déformation axiale par rapport à la teneur en eau des sédiments de barrage (à gauche) et des sédiments « AL-CLA » (à droite) ...……. 156
Figure 4-27. Évolution générale de $S_u$ en fonction du temps de séchage pour l'ensemble des sédiments……... 157
Figure 4-28. Évolution de $S_u$ en fonction du temps de séchage pour les sédiments « AL-CLA » ……..…. 157
Figure 4-29. Évolution générale de $S_u$ en fonction de w pour l'ensemble de sédiments…… 158
Figure 4-30. Évolution w-$S_u$ pour les sédiments « AL-CLA »…… 159
Figure 4-31. Abaques d'évaluation du potentiel de retrait pour les sédiments étudiés. 160
Figure 4-32. Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage…… 164
Figure 4-33. Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage…… 165
Figure 4-34. Évolution du degré de saturation par rapport au temps de séchage…… 166
Figure 5-1. Vue extérieure des presses à boues KDS® et Volute®…… 174
Figure 5-2. Modifications apportées dans le design de la presse à boues KDS® par rapport à la presse Volute®……. 175
Figure 5-3. Présentation de la machine prototype d'essai……. 177
Figure 5-4. Principe de fonctionnement du prototype de la presse à boues KDS® testé en laboratoire…….. 178
Figure 5-5. Rapport entre la vitesse de rotation des disques et leur fréquence……. 180
Figure 5-6. Méthode de sélection des floculants par rapport au matériau à déshydrater……. 183
Figure 5-7. Présentation schématique du plan expérimental……. 185
Figure 5-8. Résultats de l'essai de floculation avec la kaolinite…… 189
Figure 5-9. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la vitesse de rotation des disques V pour la kaolinite……. 191
Figure 5-10. Déshydratation mécanisée de la kaolinite sans pression : aspect visuel du produit déshydraté……. 191

Figure 5-11. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la pression appliquée P pour la kaolinite……. 192
Figure 5-12. Déshydratation mécanisée de la kaolinite sous pression : aspect visuel du produit déshydraté……. 192
Figure 5-13. Évolution de la concentration en MES selon la vitesse de rotation des disques V pour la kaolinite……. 193
Figure 5-14. Aspect visuel de la concentration de la MES pour la kaolinite…….. 193
Figure 5-15. Évolution de la concentration en MES selon la pression appliquée P pour la kaolinite…….. 194
Figure 5-16. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la matière en suspension pour la kaolinite, (figure A) et zoom sur le graphique (figure B)…….. 195
Figure 5-17. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la vitesse de rotation des disques V pour les matériaux argileux et sableux…… 198
Figure 5-18. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la pression appliquée P pour les matériaux argileux et sableux…… 198
Figure 5-19. Évolution de la concentration en MES selon la vitesse de rotation des disques pour les matériaux argileux et sableux……... 199
Figure 5-20. Évolution de la concentration en MES selon la pression appliquée P pour les matériaux argileux et sableux…… 200
Figure 5-21. Aspect visuel de la concentration de la MES des matériaux argileux et sableux…… 200
Figure 5-22. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la matière en suspension pour les matériaux argilo-sableux…….. 201
Figure 5-23. Essai de floculation avec la presse à boues KDS®. Mélange AL-SPO + floculant AN 923 VHM, $w_0$=800%..... 203
Figure 5-24. Aspect visuel des flocs et du surnageant. Sédiments de barrage, floculant EM 340 HIB…… 205
Figure 5-25. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la vitesse de rotation des disques V pour les sédiments…….. 208
Figure 5-26. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la pression appliquée P pour les sédiments de barrage……. 209
Figure 5-27. Évolution de la concentration en MES selon la vitesse de rotation des disques pour les sédiments de barrage (figure A) avec $w_0$= 400% (figure B) et $w_0$= 800% (figure C)…….. 211
Figure 5-28. Évolution de la concentration en MES selon la pression appliquée P pour les sédiments de barrage (figure A) avec $w_0$= 400% (figure B) et $w_0$= 800% (figure C)……... 212
Figure 5-29. Aspect visuel de la concentration de la MES pour les sédiments de barrage…… 213
Figure 5-30. Évolution de la teneur en eau finale $w_f$ selon la concentration en MES pour les sédiments de barrage (figure A) et selon la teneur en eau initiale (figure B)…… 214
Figure 5-31. Relations entre la teneur en eau finale et la MES selon la vitesse de rotation des disques (figure A) et la pression (figure B) pour la kaolinite…….. 217
Figure 5-32. Exemple d'essai de résistance en compression simple…… 230
Figure 5-33. Évolution de la résistance en compression simple des mélanges étudiés d'après HERRERA TARRILLO (2018)……. 232

Figure 5-34. Évolution de la contrainte axiale en fonction de la déformation pour les mélanges confectionnés à base des sédiments AL-FLU (figure A) et AL-SPO (figure B)……. 233
Figure 5-35. États de rupture observés pour les mélanges « AL-SPO » et « F-AL-SPO »…….. 234
Figure 6-1. Mécanismes de séchage des sédiments par lagunage (LEVACHER et al., 2018) et exemple de la lagune dans le Port de Dunkerque (GLASER, 2009)…… 246
Figure 6-2. Techniques d'amélioration pouvant être apportées au lagunage en vue d'accélérer le séchage naturel des sédiments……. 248
Figure 6-3. Séchage des sédiments à teneurs en eau initiales différentes……. 250
Figure 6-4. Relations entre les paramètres dans les processus du séchage de sédiments…… 252
Figure 6-5. Relations entre le tassement des sédiments en fonction de la granulométrie et la perméabilité……. 254
Figure 6-6. Influence de la nature des sédiments sur la relation $\varepsilon_a=f(w)$…….. 256
Figure 6-7. ACP relative à la caractérisation physico-chimique des sédiments étudiés…… 258
Figure 6-8. Relations de la matière organique en fonction de la limite de liquidité… 261
Figure 6-9. Relation entre les limites de liquidité et de plasticité……. 262
Figure 6-10. ACP relative à la cohésion non drainée et aux caractéristiques physico-chimiques (figure a) et minéralogiques (figure b) des sédiments étudiés……..……... 263
Figure 6-11. ACP relative à la vitesse de drainage sur le plan factoriel 1 et 3…… 266
Figure 6-12. ACP relative à la vitesse d'évaporation sur le plan factoriel 2 et 3……. 267
Figure 6-13. Relation entre les vitesses VD (figure A) et VE (figure B) mesurées et prédites……... 269
Figure 6-14. Mise en œuvre d'améliorations au processus de séchage de sédiments... 272
Figure 6-15. Influence de la teneur en eau initiale des sédiments pour l'essai de déshydratation…… 274
Figure 6-16. Évolution de la teneur en eau des sédiments pendant leur passage par la presse KDS® en faisant varier la vitesse de rotation des disques…… 277
Figure 6-17. Emplacement des mesures de la teneur en eau…… 278
Figure 6-18. Impact de la pression appliquée sur la déshydratation des sédiments avec la presse KDS®……... 279
Figure 6-19. Fuite d'eau sous le collecteur d'eau de la presse…… 280
Figure 6-20. Problème de manomètre et de lecture des pressions…… 281
Figure 6-21. Colmatage des sédiments pendant la déshydratation et le nettoyage de la presse KDS®……... 282
Figure 6-22. Solution apportée à la rétention du matériau épaissi dans le collecteur d'eau……... 283
Figure 6-23. Solution apportée à la rétention de « MES » dans le collecteur……. 284
Figure 6-24. Conception de la trappe et modification du réservoir de floculation….. 285
Figure 6-25. Modifications externes en vue d'améliorer la qualité de l'eau résiduelle. 287
Figure 6-26. Modifications internes en vue d'améliorer la qualité de l'eau résiduelle.. 288
Figure 6-27. Solutions proposées en vue de réduire la teneur en eau finale des sédiments…… 290
Figure 6-28. Plateforme d'essai (d'après Atlantique Industrie, 2018b)……... 292
Figure 6-29. Lieux de prélèvement (figure a) et zoom sur l'image (figure b) d'après Google Earth……... 293

Figure 6-30. Conditionnement en big bag (figure a) et aspect du sédiment brut et sec (figures b et c)……. 293
Figure 6-31. Composition granulométrique du sédiment du canal de Bergues…… 293
Figure 6-32. Distribution granulométrique du sédiment du canal de Bergues…… 294
Figure 6-33. Texture du sédiment du canal de Bergues d'après Soil Survey Staff (1951)……. 294
Figure 6-34. Aspect visuel des flocs et du surnageant du sédiment du canal de Bergues selon le floculant choisi…… 296
Figure 6-35. Préparation du matériau à déshydrater (figure a) et du floculant (figure b) …… 297
Figure 6-36. Teneurs en eau des sédiments testés du canal de Bergues…….. 299
Figure 6-37. Aspect visuel du sédiment déshydraté…… 299
Figure 6-38. Concentrations de la MES des sédiments testés du canal de Bergues…. 300
Figure 6-39. Aspect visuel de l'eau résiduelle collectée……. 301
Figure 6-40. Processus de déshydratation mécanisée de sédiments avec la presse à boues KDS®…… 304

## *LISTE DES TABLEAUX*


| | | |
|---|---|---|
| Tableau 2-1. | Récapitulatif des techniques de séchage thermique, (NTE, 2015)…… | 18 |
| Tableau 2-2. | Récapitulatif des paramètres fondamentaux d'une centrifugeuse…… | 34 |
| Tableau 2-3. | Classification de filtre presse sous pression……. | 36 |
| Tableau 2-4. | Récapitulatif des paramètres fondamentaux du décanteur dynamique Nemeau®. (BERTRAND et al., 2012 ; DHERVILLY, 2013)……... | 43 |
| Tableau 2-5. | Récapitulatif des caractéristiques principales de la presse à boues Volute® …… | 46 |
| Tableau 2-6. | Récapitulatif des techniques de séchage naturel et de déshydratation mécanique, (LEVACHER, 2015)……. | 49 |
| Tableau 3-1. | Relation entre l'ordre de grandeur du coefficient de perméabilité, les caractéristiques de drainage et le type de sol, (HOLTZ & KOVACS, 1991)…… | 73 |
| Tableau 3-2. | Récapitulatif des essais réalisés et sources utilisées……. | 81 |
| Tableau 3-3. | Récapitulatif des paramètres granulométriques des sédiments de barrage ……. | 82 |
| Tableau 3-4. | Surface spécifique des sédiments de barrage…… | 84 |
| Tableau 3-5. | Masse volumique des particules solides des sédiments de barrage….. | 84 |
| Tableau 3-6 . | Valeurs des limites d'Atterberg des sédiments de barrage…… | 86 |
| Tableau 3-7. | Valeur au bleu de méthylène des sédiments de barrage…… | 86 |
| Tableau 3-8 . | Composition chimique des sédiments de barrage…… | 87 |
| Tableau 3-9. | Composition minéralogique des sédiments de barrage…… | 89 |
| Tableau 3-10. | Paramètres de consolidation des sédiments de barrage…… | 97 |
| Tableau 3-11. | Récapitulatif des caractéristiques physico-chimiques des sédiments de barrage……. | 98 |
| Tableau 3-12. | Récapitulatif des caractéristiques minéralogiques des sédiments de barrage……. | 99 |
| Tableau 3-13. | Récapitulatif des paramètres de consolidation des sédiments de barrage……. | 99 |
| Tableau 3-14. | Récapitulatif des essais réalisés et sources utilisées……..… | 103 |
| Tableau 3-15. | Récapitulatif des paramètres granulométriques des sédiments marins. | 104 |
| Tableau 3-16. | Surface spécifique des sédiments marins.……. | 105 |
| Tableau 3-17. | Valeurs des limites d'Atterberg des sédiments marins……. | 106 |
| Tableau 3-18. | Valeur au bleu de méthylène des sédiments marins……. | 106 |
| Tableau 3-19. | Composition chimique des sédiments « HF-DK » par micro-spectrométrie de fluorescence X, (MUNCK, 2015)……. | 107 |
| Tableau 3-20. | Composition chimique des sédiments « BR-RAN » exprimée en pourcentage massique...……... | 107 |
| Tableau 3-21. | Composition minéralogique des sédiments marins…….. | 108 |
| Tableau 3-22. | Récapitulatif des paramètres de consolidation des sédiments marins... | 113 |
| Tableau 3-23. | Récapitulatif des caractéristiques physico-chimiques des sédiments marins……... | 114 |
| Tableau 3-24. | Récapitulatif des caractéristiques minéralogiques des sédiments marins……... | 115 |
| Tableau 3-25. | Récapitulatif des paramètres de consolidation des sédiments marins.. | 115 |
| Tableau 3-26. | Récapitulatif des paramètres granulométriques de la kaolinite Speswhite……. | 116 |
| Tableau 3-27. | Valeurs des limites d'Atterberg de la kaolinite Speswhite…… | 118 |
| Tableau 3-28. | Paramètres de consolidation de la kaolinite……. | 121 |

| | | |
|---|---|---|
| Tableau 3-29. | Composition chimique du sable de Fontainebleau exprimée en pourcentage massique…….. | 124 |
| Tableau 4-1. | Données relatives au tassement et au retrait des sédiments pendant le séchage naturel……. | 149 |
| Tableau 4-2. | Coefficients d'activité des sédiments étudiés……... | 159 |
| Tableau 5-1. | Récapitulatif des caractéristiques principales de la presse à boues KDS® ……... | 176 |
| Tableau 5-2. | Caractéristiques des floculants (COLIN, 2003)…… | 181 |
| Tableau 5-3. | Caractéristiques des floculants testés avec la kaolinite (SNF FLOERGER, 2012)…….. | 189 |
| Tableau 5-4. | Caractéristiques des floculants testés avec les matériaux argileux et sableux (SNF FLOERGER, 2012)……... | 196 |
| Tableau 5-5. | Récapitulatif des dosages optimaux pour les matériaux argileux et sableux……. | 197 |
| Tableau 5-6. | Caractéristiques des floculants testés avec les sédiments de barrage (SNF FLOERGER, 2012 et 2017)…… | 202 |
| Tableau 5-7. | Résultats des essais de floculation après déshydratation avec la presse KDS® (CARLE, 2017b)……... | 204 |
| Tableau 5-8. | Récapitulatif des dosages optimaux par rapport à la teneur en eau initiale…….. | 205 |
| Tableau 5-9. | Observations réalisées après l'exécution des essais effectués au sein de SNF FLOERGER (CARLE, 2017a.)…….. | 222 |
| Tableau 5-10. | Récapitulatif des variations de la teneur en eau finale ($\Delta w_f$) selon la pression appliquée pour une vitesse de 2,9 tr/min…… | 225 |
| Tableau 5-11. | Variations relatives de la résistance en compression simple des mélanges étudiés…….. | 232 |
| Tableau 6-1. | Potentiel de retrait-gonflement selon la limite de retrait (ALTMEYER, 1955)……... | 254 |
| Tableau 6-2. | Potentiel de retrait-gonflement selon l'indice de plasticité (PRIAN et al., 2000)…….. | 255 |
| Tableau 6-3. | Potentiel de retrait-gonflement selon le pourcentage d'argiles exprimée par la valeur VBS (CHASSAGNEUX et al., 1996)……. | 255 |
| Tableau 6-4. | Caractéristiques physico-chimiques des sédiments récapitulés par MOGHRABI et al. (2018)…… | 260 |
| Tableau 6-5. | Coefficients de la relation $S_u=f(I_L)$ des sédiments étudiés…… | 264 |
| Tableau 6-6. | Caractéristiques des floculants sélectionnés pour le sédiment de Bergues (SNF FLOERGER,2017)……... | 295 |

# *ANNEXES*

## *A.1. EXPRESSION DES DIFFÉRENTES RELATIONS UTILES*

### *A.1.1. Expression du poids volumique sec*

***En fonction de l'indice des vides***

À partir de la formule 2.7 :

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V_T}$$

Par définition, le volume total de l'échantillon $V_T$ est la somme du volume du sol ou sédiment sec $V_s$ et le volume occupé par les vides $V_v$ : $V_T = V_s + V_v$. En divisant par $V_s$ la relation 2.7 on obtient :

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V_s+V_v} = \frac{\frac{P_s}{V_s}}{\frac{V_s+V_v}{V_s}} = \frac{\gamma_s}{1+e} \qquad [A1\text{-}1]$$

***En fonction de la porosité***

En multipliant la formule 2.7 par $\frac{V_s}{V_s}$ et avec la relation 2.6 on a :

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V_T} \cdot \frac{V_s}{V_s} = \frac{\gamma_s \cdot V_s}{V_T} \qquad [A1\text{-}2]$$

Comme $V_s = V_T - V_v$, la formule A1-2 devient :

$$\gamma_d = \gamma_s \cdot \frac{V_T - V_v}{V_T} = \gamma_s \cdot \left(\frac{V_T}{V_T} - \frac{V_v}{V_T}\right) \qquad [A1\text{-}3]$$

En simplifiant :

$$\gamma_d = \gamma_s \cdot \left(1 - \frac{V_v}{V_T}\right) \qquad [A1\text{-}4]$$

En considérant la formule 2.13, on retrouve la formule 2.16 :

$$\gamma_d = (1 - n) \cdot \gamma_s$$

### *A.1.2. Expression du poids volumique d'un échantillon*

***En fonction du degré de saturation, de la porosité, du poids volumique de l'eau et du poids volumique sec***

En partant de la formule 2.4 et la relation $P_T = P_s + P_w$, on déduit :

$$\gamma = \frac{P_T}{V_T} = \frac{P_s}{V_T} + \frac{P_w}{V_T} \quad [A1\text{-}5]$$

D'après la définition du poids volumique sec et du poids volumique :

$$\gamma = \gamma_d + \frac{P_w}{V_T} = \gamma_d + \frac{V_w \cdot \gamma_w}{V_T} \quad [A1\text{-}6]$$

En multipliant $\frac{V_w \cdot \gamma_w}{V_T}$ par $\frac{V_v}{V_v}$ et en utilisant les formules 2.11 et 2.13, on obtient 2.17 .

$$\gamma = \gamma_d + \frac{V_w}{V_T} \cdot \frac{V_v}{V_v} \cdot \gamma_w = \gamma_d + n \cdot S_R \cdot \gamma_w \quad [A1\text{-}7]$$

***En fonction de la teneur en eau et du poids volumique sec***

À partir de A1-5 et selon la définition du poids volumique sec, on a :

$$\gamma = \frac{P_T}{V_T} = \frac{P_s}{V_T} + \frac{P_w}{V_T} = \gamma_d + \frac{P_w}{V_T} \quad [A1\text{-}8]$$

Si on multiplie $\frac{P_w}{V_T}$ par $\frac{P_s}{P_s}$ et connaissant la définition de la teneur en eau, on peut écrire :

$$\gamma = \gamma_d + \frac{P_w}{P_s} \cdot \frac{P_s}{V_T} = \gamma_d + w \cdot \gamma_d \quad [A1\text{-}9]$$

Si on réécrit A1-9, celle-ci correspond à la formule 2.18 :

$$\gamma = \gamma_d(1 + w)$$

***En fonction de la teneur en eau, du poids spécifique des particules solides et de l'indice des vides***

À partir de la formule 2.18 et sachant que $\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e}$ (A1-1), on obtient la formule 2.19 :

$$\gamma = \frac{\gamma_s}{1+e}(1 + w)$$

### *A.1.3. Expression de la concentration en matières solides*

En partant de la formule 2.8 et en sachant que $V_T = V_s + V_v$ on a :

$$C = \frac{m_s}{V_T} = \frac{m_s}{V_v + V_s} \quad [A1\text{-}10]$$

En remplaçant $V_v$ et $V_s$ par les formules 2.5 et 2.6 et sachant que le volume des vides $V_v$ est la somme du volume d'eau $V_w$ et le volume d'air $V_a$ : $V_v = V_w + V_a$ , comme $\frac{m_a}{V_a} \approx 0$, la relation [A1-10] s'écrit :

$$C = \frac{m_s}{\frac{m_w}{\rho_w}+\frac{m_s}{\rho_s}} = \frac{1}{\frac{m_w}{m_s \cdot \rho_w}+\frac{1}{\rho_s}} \quad [A1\text{-}11]$$

La formule de 2.10 et en simplifiant, on retrouve la formule 2.20 :

$$C = \frac{1}{\frac{w}{\rho_w}+\frac{1}{\rho_s}} = \frac{\rho_s}{\frac{w \cdot \rho_s}{\rho_w}+1} \quad [A1\text{-}12]$$

### *A.1.4. Expression de la porosité*

Considérant la formule 2.13 et, en remplaçant $V_T$ par la somme $V_v + V_s$, on obtient :

$$n = \frac{V_v}{V_T} = \frac{V_v}{V_s+V_v} \quad [A1\text{-}13]$$

Divisant la relation [A1-13] par $V_s$, numérateur et dénominateur et avec la définition de l'indice de vides, on a :

$$n = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{\frac{V_s}{V_s}+\frac{V_v}{V_s}} = \frac{e}{1+e} \quad [A1\text{-}14]$$

### *A.1.5. Expression de l'indice des vides*

#### *En fonction de la porosité*

Partant de la définition de l'indice des vides et en remplaçant $V_s$ par $V_T$ - $V_v$, on a :

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V_{T-V_v}} \quad [A1\text{-}15]$$

En divisant l'expression par $V_T$ et selon la définition de la porosité, on retrouve la formule 2.22

$$e = \frac{\frac{V_v}{V_T}}{\frac{V_T}{V_T}+\frac{V_v}{V_T}} = \frac{n}{1-n} \quad [A1\text{-}16]$$

#### *En fonction de la teneur en eau*

À partir de la formule 2.12 et que $V_v = V_T - V_s$, on a ainsi :

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_T-V_s}{V_s} = \frac{V_T}{V_s} - 1 \quad [A1\text{-}17]$$

Sachant que $V_s = \frac{m_s}{\rho_s}$, on obtient :

$$e = \frac{V_T}{\frac{m_S}{\rho_S}} - 1 = \frac{V_T \cdot \rho_S}{m_S} - 1 \qquad [A1\text{-}18]$$

Considérant la formule 2.10, on peut écrire :

$$e = \frac{V_T \cdot \rho_S}{\frac{m_T}{(1+w)}} - 1 \qquad [A1\text{-}19]$$

La formule A1-19 peut s'écrire finalement suivant la formule 2.23 :

$$e = \frac{V_T \cdot \rho_S \cdot (1+w)}{m_T} - 1$$

***En fonction du poids volumique sec et du poids spécifique des particules solides***

À partir de l'équation 2.15, l'indice des vides peut être écrit en remplaçant $\gamma_d$ par $\frac{gM_S}{V_T}$, on retrouve aussi la formule 2.24 :

$$e = \frac{\gamma_S}{\gamma_d} - 1 = \frac{\gamma_S}{\frac{gM_S}{V_T}} - 1$$

***En fonction de la concentration***

En partant de la formule 2.12, utilisant la relation 2.8 et $V_s = V_T - V_v$, on écrit alors :

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V_T - V_v} = \frac{V_v}{\frac{m_S}{C} - V_v} \qquad [A1\text{-}20]$$

Le volume des vides peut être défini comme étant de l'indice des vides multiplié par le volume des particules solides ($V_v = V_s \cdot e$) :

$$e = \frac{V_S \cdot e}{\frac{m_S}{C} - V_S \cdot e} \qquad [A1\text{-}21]$$

On écrit :

$$V_S \cdot e = \left(\frac{m_S}{C} - V_S \cdot e\right) \cdot e \qquad [A1\text{-}22]$$

En simplifiant, on peut écrire :

$$V_S = \frac{m_S}{C} - V_S \cdot e \qquad [A1\text{-}23]$$

$$V_S(1 + e) = \frac{m_S}{C} \qquad [A1\text{-}24]$$

Étant donné que: $V_S = \frac{m_S}{\rho_S}$ on a :

$$\frac{m_s}{\rho_s}(1+e) = \frac{m_s}{C} \qquad [A1\text{-}25]$$

En simplifiant, on obtient finalement la formule 2.25 :

$$e = \frac{\rho_s}{C} - 1$$

### *A.1.6. Expression de la teneur en eau*

***En fonction du degré de saturation, des poids volumiques de l'eau et des particules solides du sol ou sédiment***

À partir de la formule 2.17 :

$$\gamma = \gamma_d + n \cdot S_R \cdot \gamma_w$$

Avec les formules 2.4 ; 2.7 et 2.13 on obtient :

$$\frac{P_T}{V_T} = \frac{P_s}{V_T} + \frac{V_v}{V_T} \cdot S_R \cdot \gamma_w \qquad [A1\text{-}26]$$

En multipliant A1-26 par le volume de l'échantillon $V_T$, on écrit :

$$P_T - P_s = V_v \cdot S_R \cdot \gamma_w \qquad [A1\text{-}27]$$

Par définition le poids total de l'échantillon $P_T$ est la somme du poids du sédiment $P_s$ et du poids de l'eau $P_w$ : $P_T = P_s + P_w$ et le volume des vides $V_v$ est la différence entre le volume de l'échantillon $V_T$ et le volume des particules solides $V_s$ : $V_v = V_T - V_s$. On peut écrire la formule A1-27 comme suit :

$$P_w = (V_T - V_s) \cdot S_R \cdot \gamma_w \qquad [A1\text{-}28]$$

Et si l'on divise par le poids des particules solides $P_s$, on obtient :

$$\frac{P_w}{P_s} = \left(\frac{V_T}{P_s} - \frac{V_s}{P_s}\right) \cdot S_R \cdot \gamma_w \qquad [A1\text{-}29]$$

D'après les formules 2.6 et 2.7, l'expression [A1-29] devient la formule 2.28 :

$$w = \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s}\right) \cdot S_R \cdot \gamma_w$$

***En fonction du degré de saturation, de l'indice des vides et des poids volumiques de l'eau et des particules solides***

En partant de la formule 2.28 et en s'appuyant sur la formule 2.24, on écrit les équations A1-30 et A1-31 :

$$w = \gamma_w \cdot S_R \cdot \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s}\right)$$

$$w \cdot \gamma_s = \gamma_w \cdot S_R \cdot \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1\right) \quad \text{[A1-30]}$$

$$w \cdot \gamma_s = \gamma_w \cdot S_R \cdot e \quad \text{[A1-31]}$$

L'équation A1-31 fournit la relation pour w conforme à la formule 2.29.

$$w = \frac{\gamma_w \cdot S_R \cdot e}{\gamma_s}$$

### *A.1.7. Expression du degré de saturation*

Écrivant l'équation 2.29, sous une autre forme, $S_r$ peut être exprimé selon la formule 2.30.

$$S_r = \frac{w \cdot \gamma_s}{e \cdot \gamma_w}$$

## A.2. DÉSHYDRATATION NATURELLE DES SÉDIMENTS ET DES ARGILES

### A.2.1. Évolution des pourcentages d'eau par rapport au temps de séchage naturel

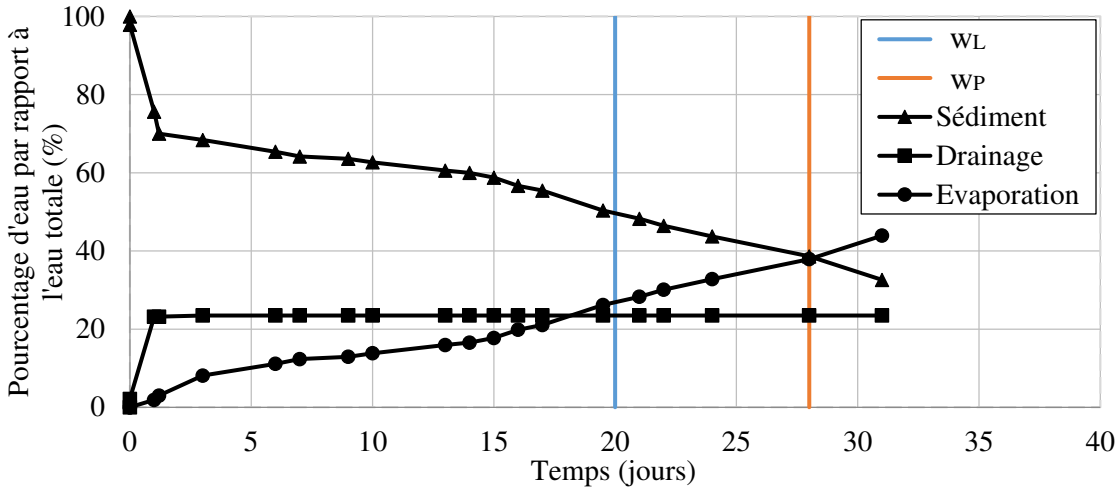



***Figure A.2.1-1.*** *Pourcentages d'eau dans le sédiment AL-FLU selon le temps de séchage.*

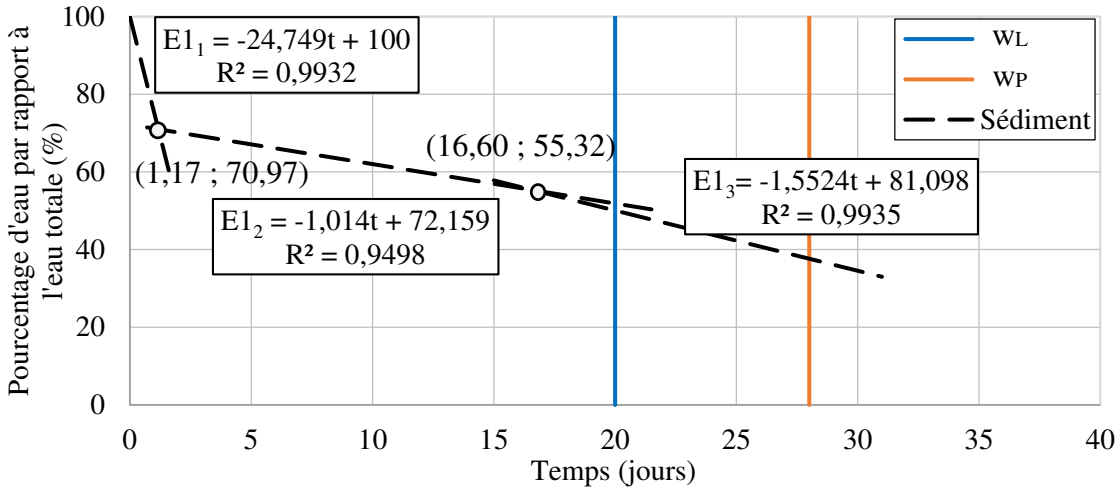



***Figure A.2.1-2.*** *Tendances de l'évolution de l'eau dans le sédiment AL-FLU.*

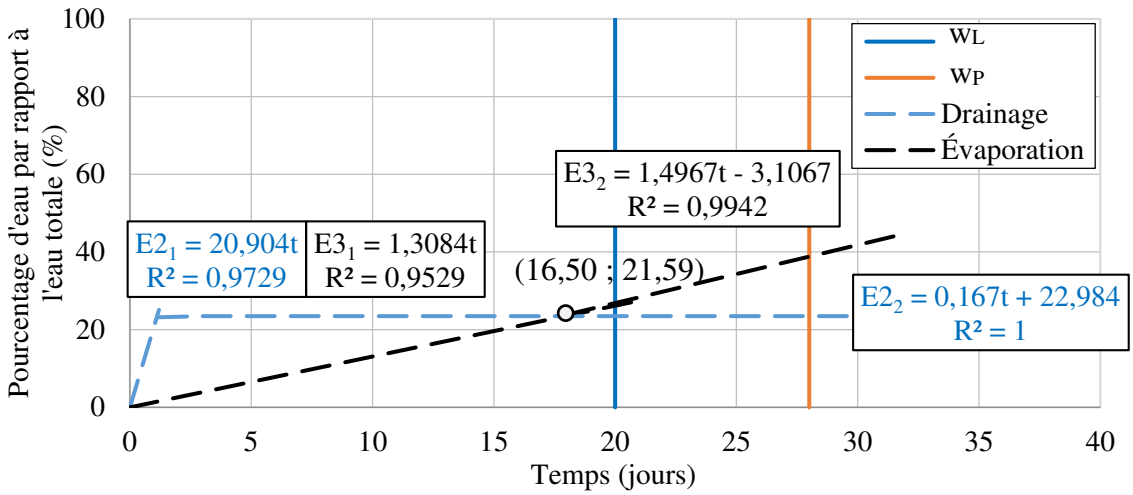



***Figure A.2.1-3.*** *Tendances de l'évolution du drainage (en bleu) et de l'évaporation (en noir) pour le sédiment AL-FLU.*

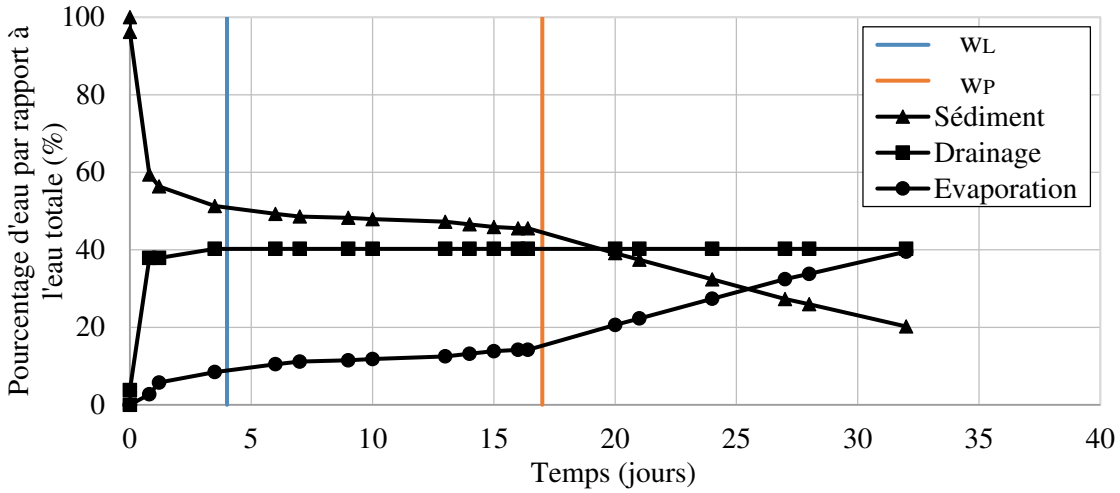



***Figure A.2.1-4.*** *Pourcentages d'eau dans le sédiment AL-SPO selon le temps de séchage.*

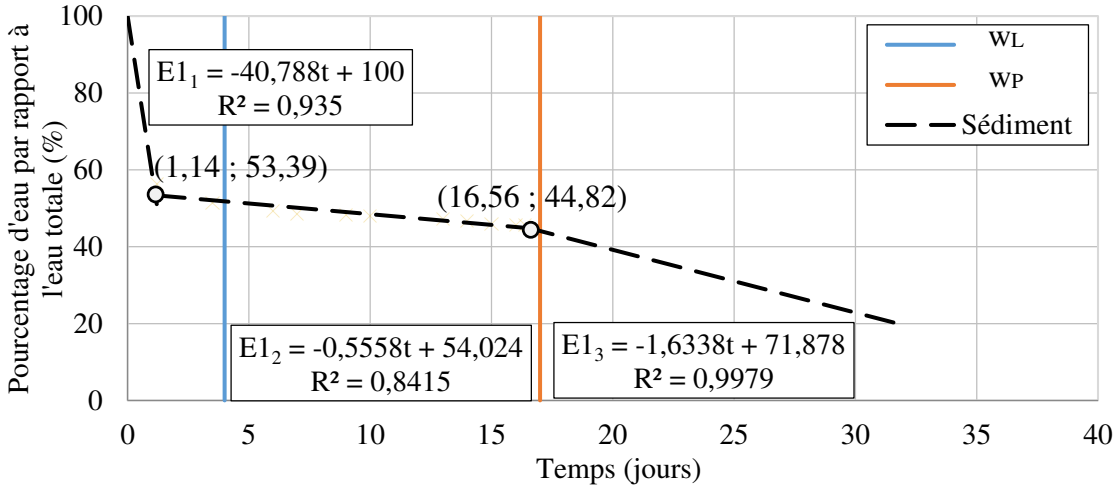



***Figure A.2.1-5.*** *Tendances de l'évolution de l'eau dans le sédiment AL-SPO.*

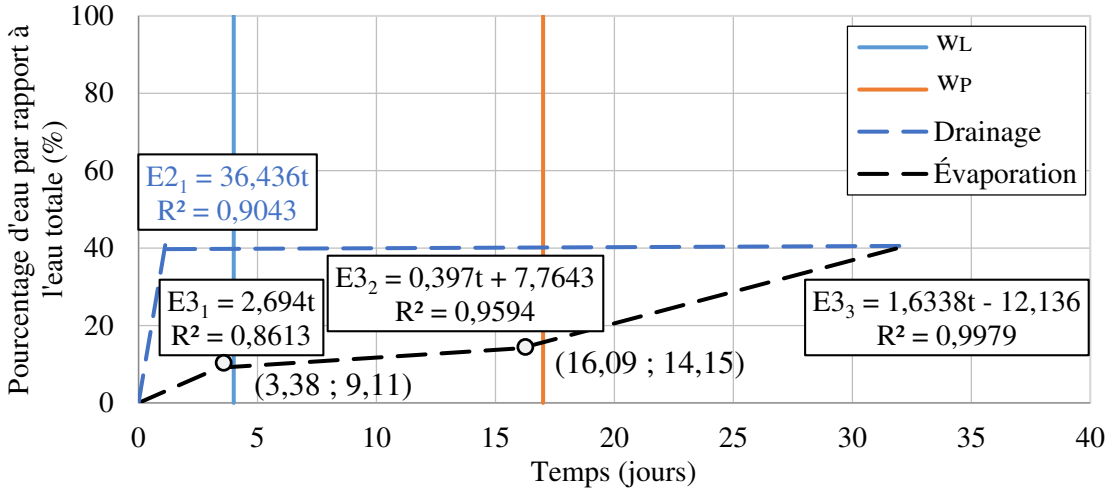



***Figure A.2.1-6.*** *Tendances de l'évolution du drainage (en bleu) et de l'évaporation (en noir) pour le sédiment AL-SPO.*

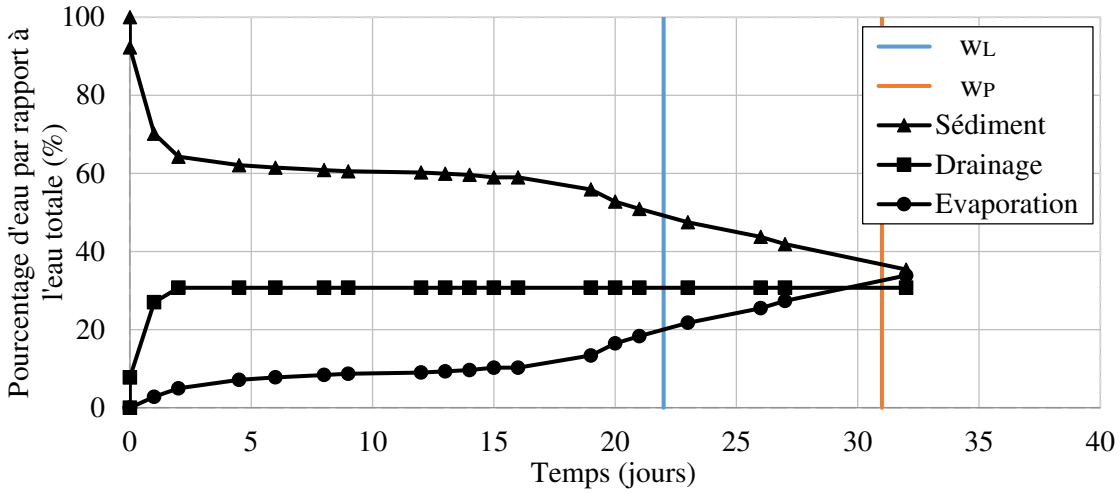



***Figure A.2.1-7.*** *Pourcentages d'eau dans le sédiment AL-CLA selon le temps de séchage.*

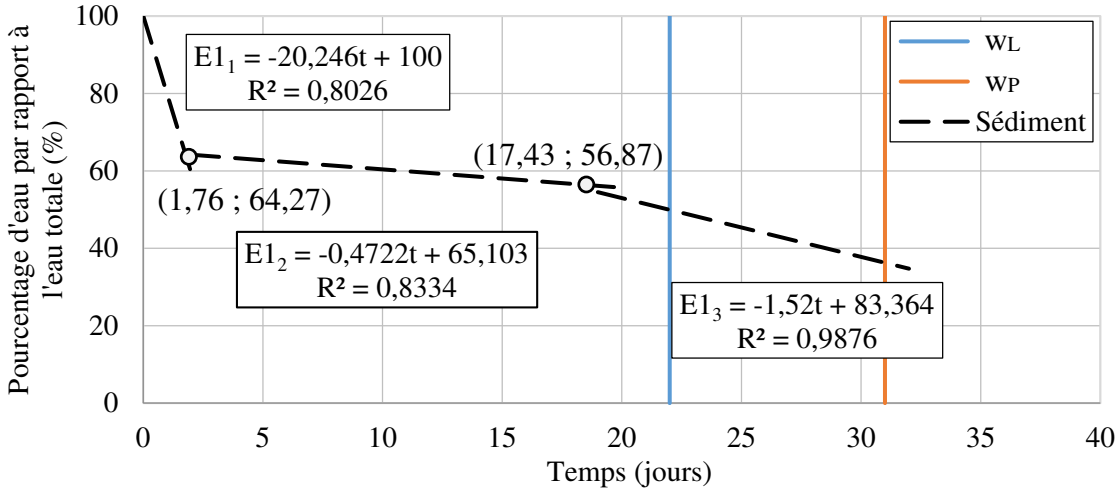



***Figure A.2.1-8.*** *Tendances de l'évolution de l'eau dans le sédiment AL-CLA.*

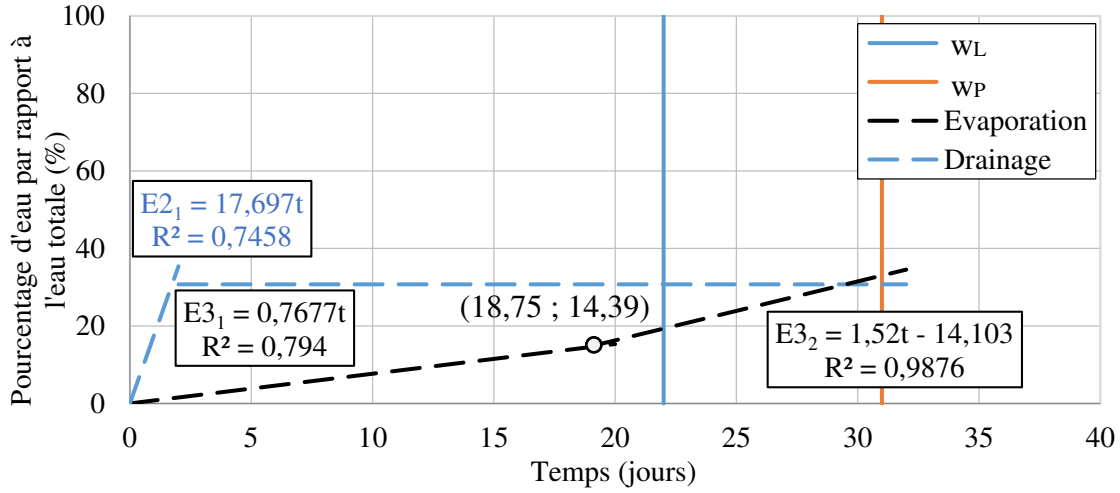



***Figure A.2.1-9*** *Tendances de l'évolution du drainage (en bleu) et de l'évaporation (en noir) pour le sédiment AL-CLA.*

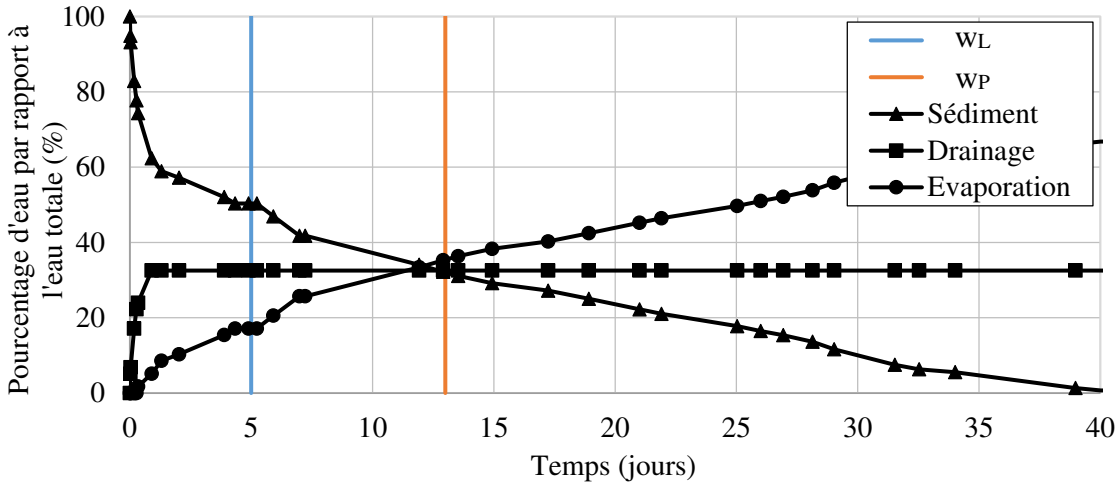



***Figure A.2.1-10.*** *Pourcentages d'eau dans le sédiment AL-ISE selon le temps de séchage.*

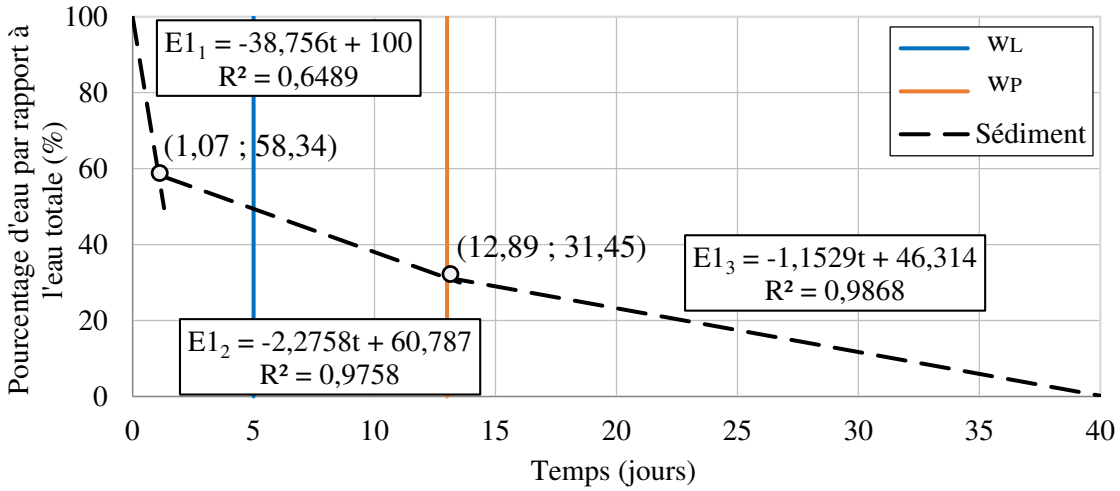



***Figure A.2.1-11.*** *Tendances de l'évolution de l'eau dans le sédiment AL-ISE.*

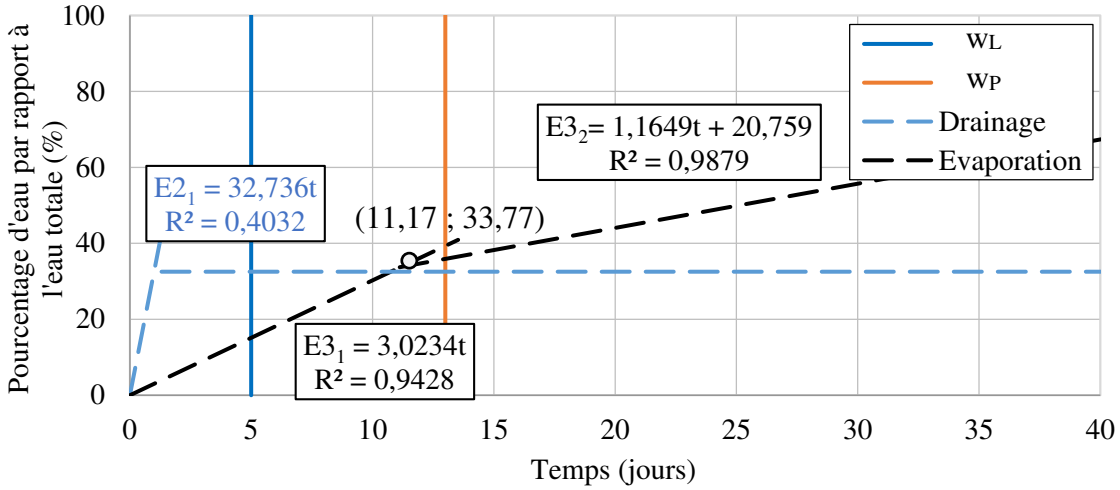



***Figure A.2.1-12.*** *Tendances de l'évolution du drainage (en bleu) et de l'évaporation (en noir) pour le sédiment AL-ISE.*

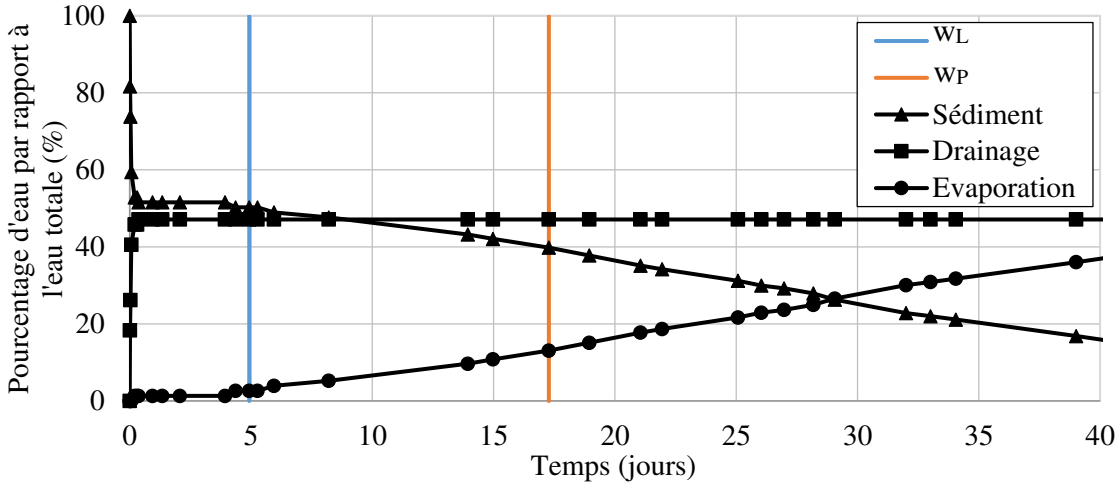



***Figure A.2.1-13.*** *Pourcentages d'eau dans le sédiment GE-RHI selon le temps de séchage.*

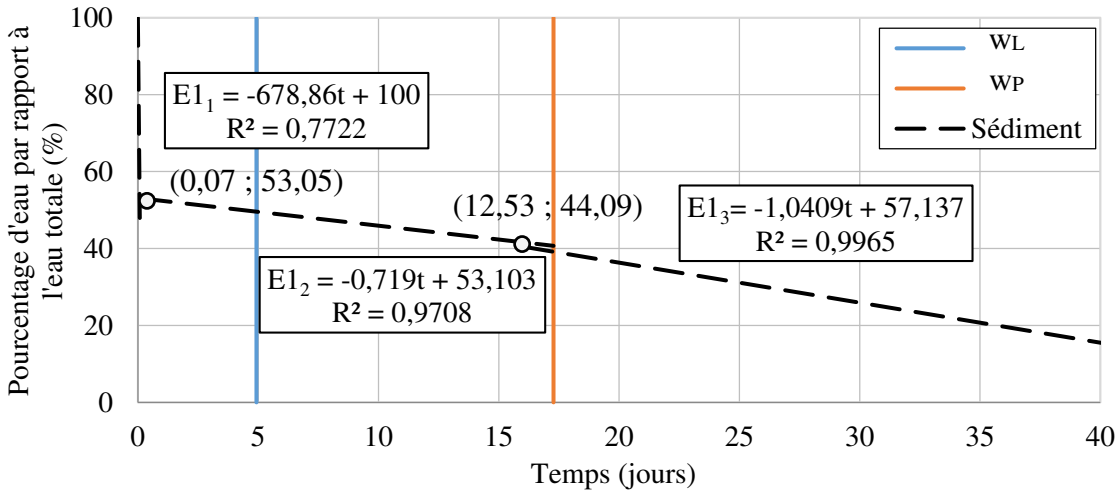



***Figure A.2.1-14.*** *Tendances de l'évolution de l'eau dans le sédiment GE-RHI.*

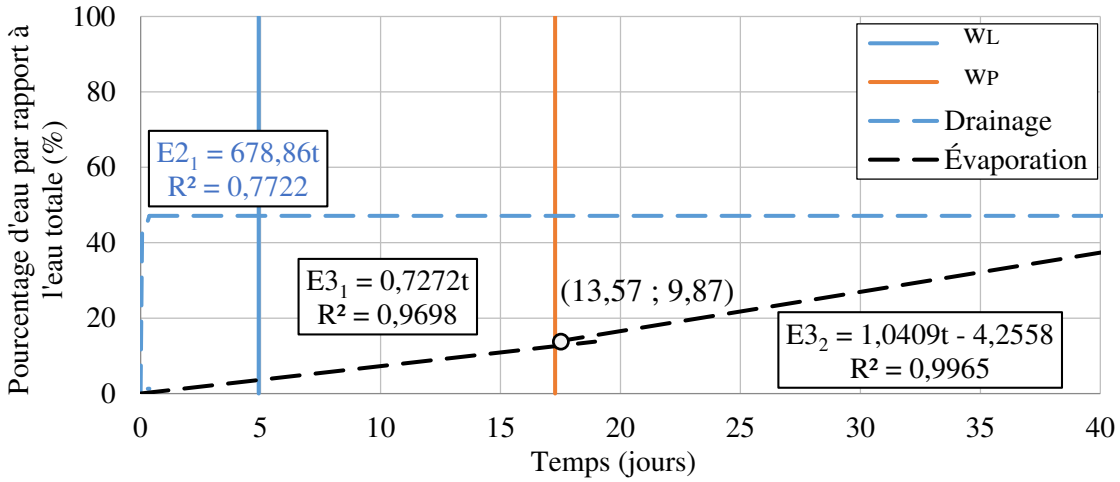



***Figure A.2.1-15.*** *Tendances de l'évolution du drainage (en bleu) et de l'évaporation (en noir) pour le sédiment GE-RHI.*

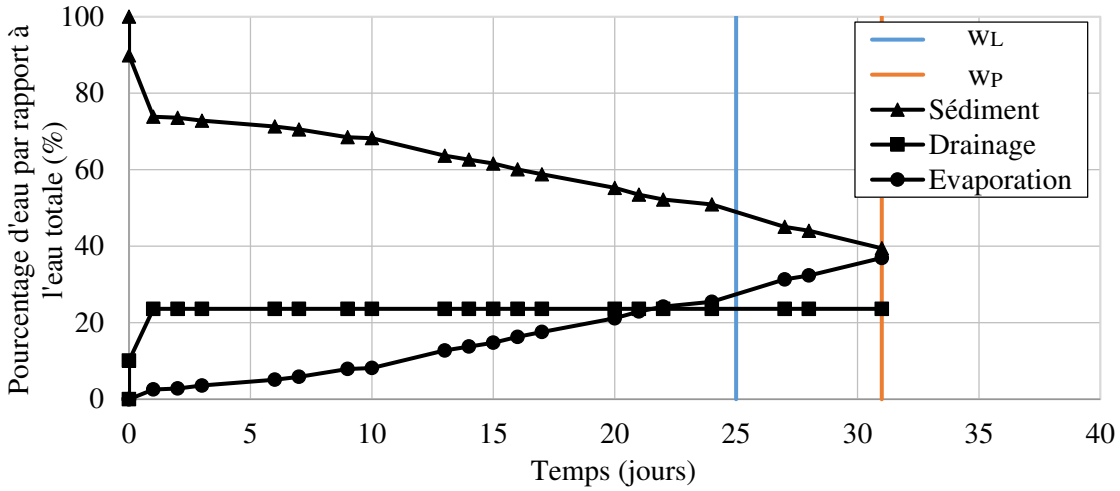



***Figure A.2.1-16.*** *Pourcentages d'eau dans le sédiment BR-SAI selon le temps de séchage.*

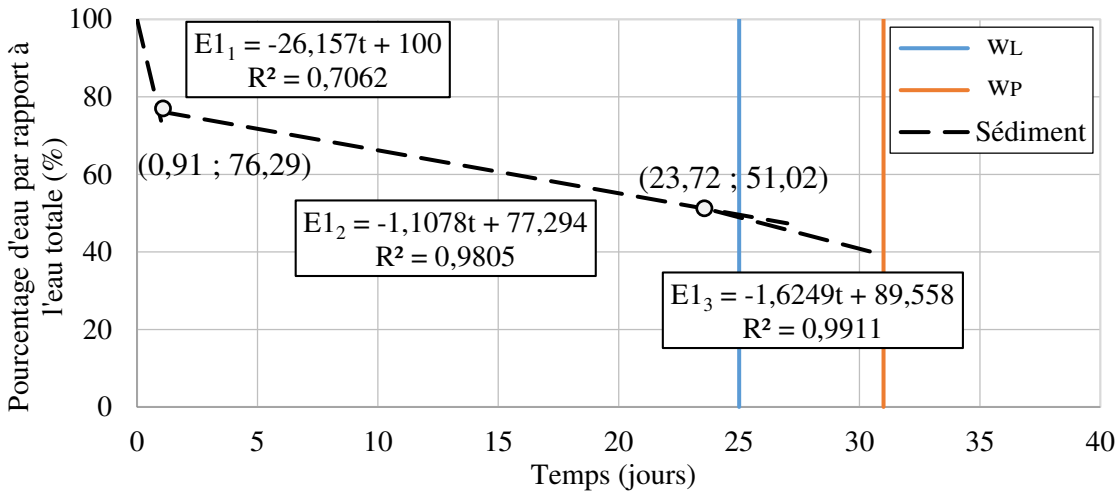



***Figure A.2.1-17.*** *Tendances de l'évolution de l'eau dans le sédiment BR-SAI.*

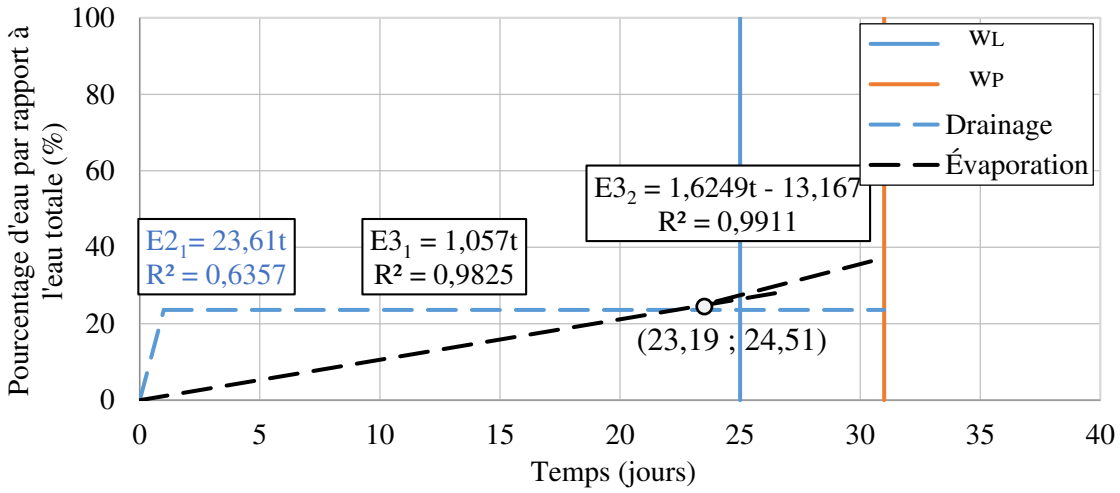



***Figure A.2.1-18.*** *Tendances de l'évolution du drainage (en bleu) et de l'évaporation (en noir) pour le sédiment BR-SAI.*

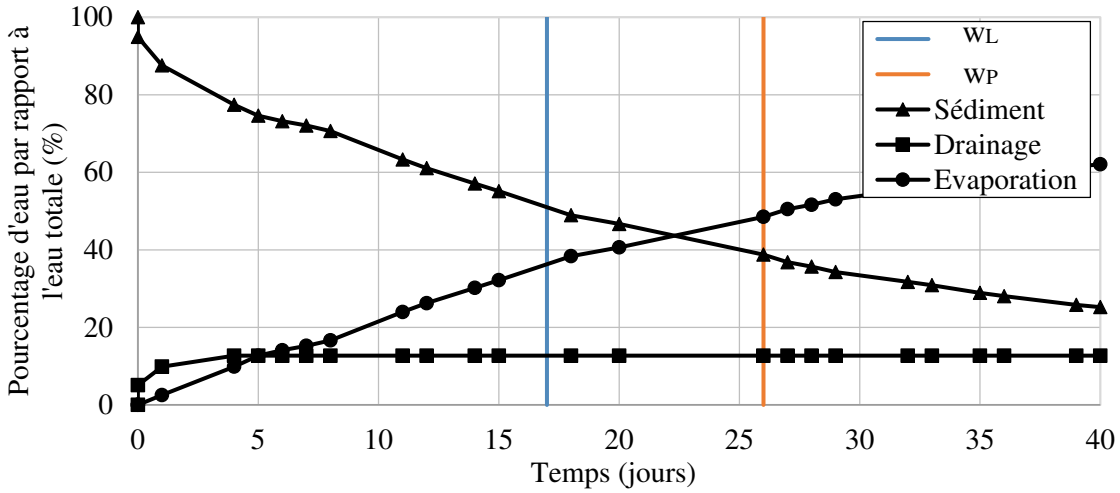



***Figure A.2.1-19.*** *Pourcentages d'eau dans le sédiment HF-DK selon le temps de séchage.*

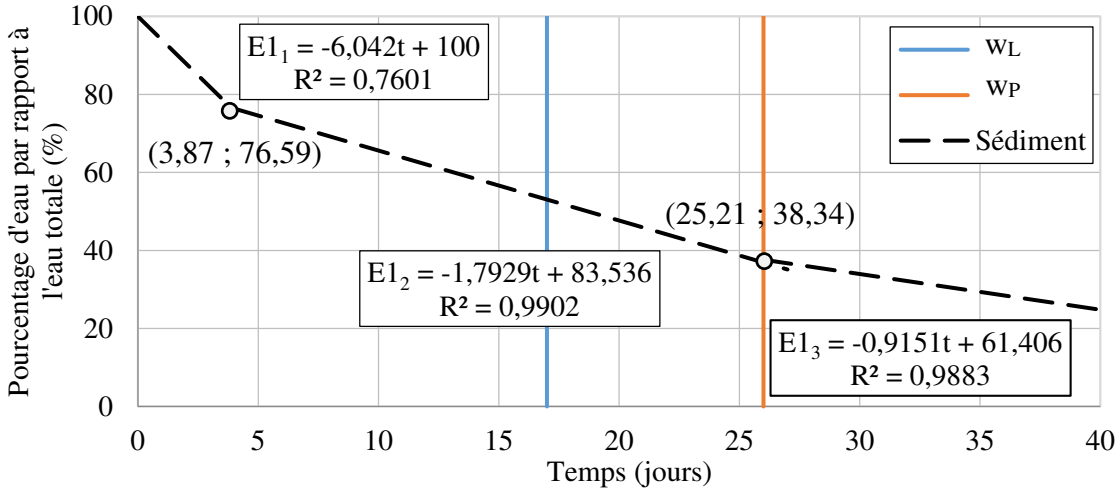



***Figure A.2.1-20.*** *Tendances de l'évolution de l'eau dans le sédiment HF-DK.*

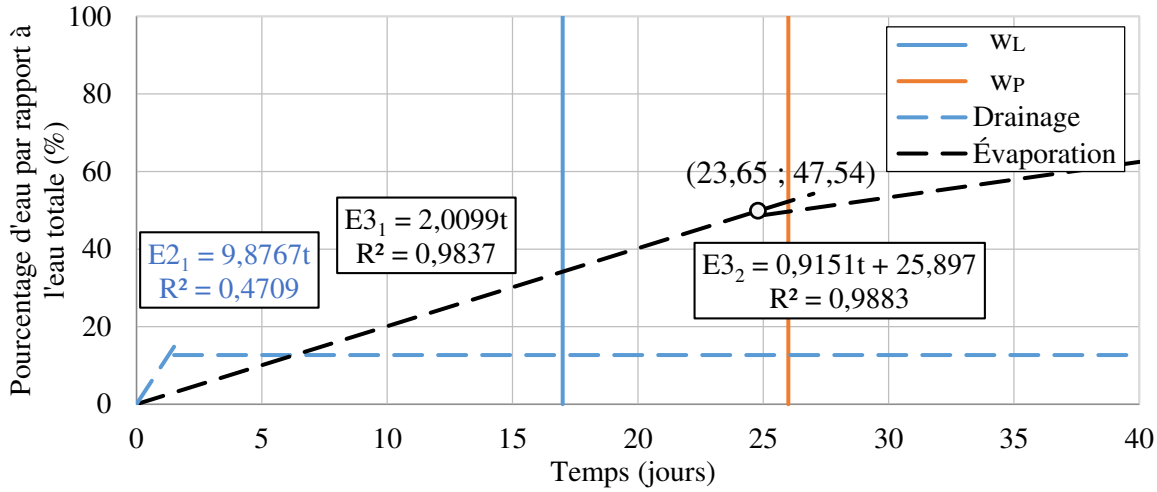



***Figure A.2.1-21.*** *Tendances de l'évolution du drainage (en bleu) et de l'évaporation (en noir) pour le sédiment HF-DK.*

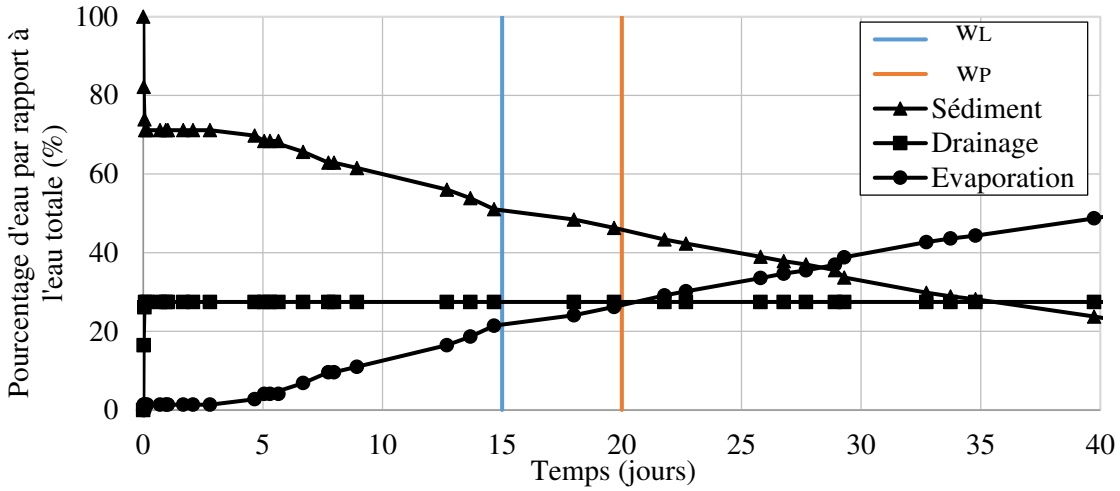



***Figure A.2.1-22.*** *Pourcentages d'eau dans le sédiment BR-RAN selon le temps de séchage.*

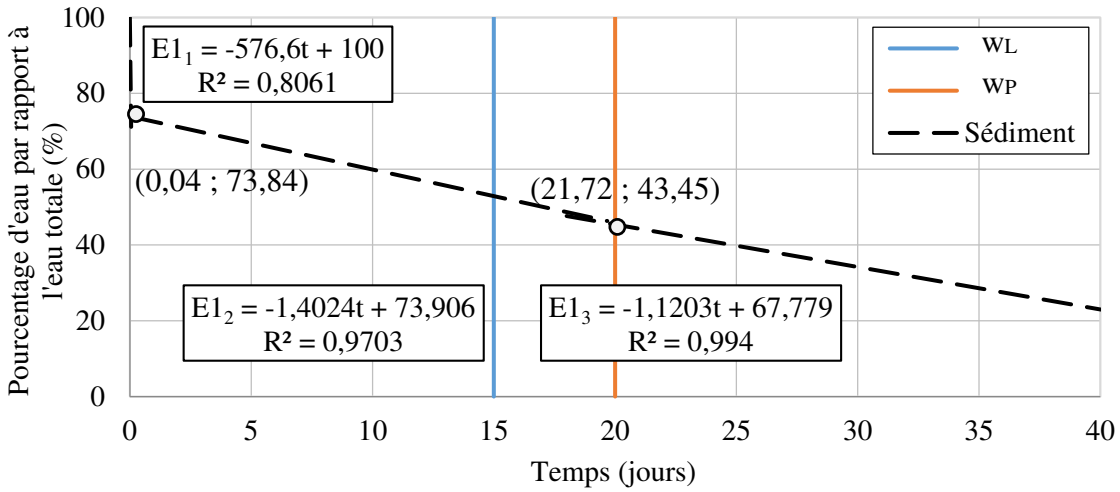



***Figure A.2.1-23.*** *Tendances de l'évolution de l'eau dans le sédiment BR-RAN.*

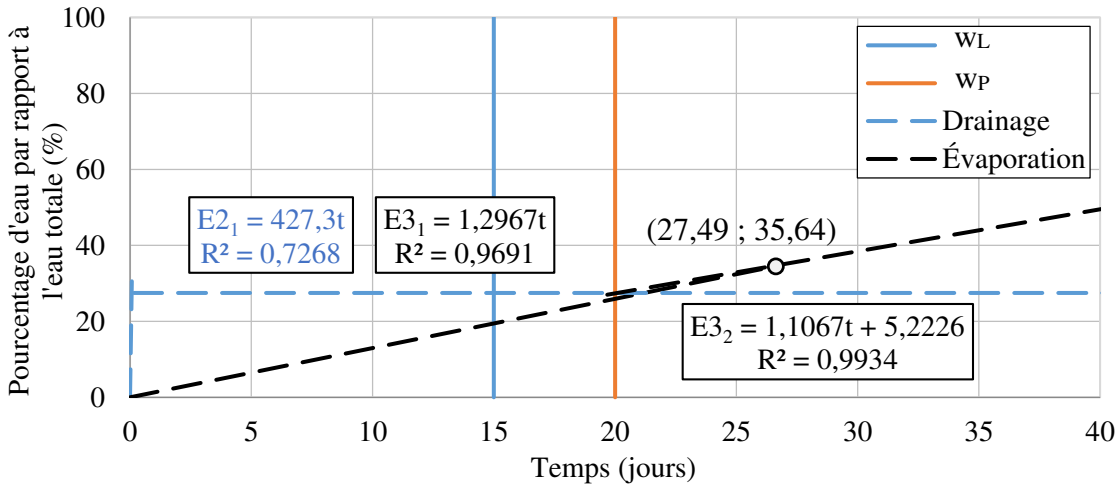



***Figure A.2.1-24.*** *Tendances de l'évolution du drainage (en bleu) et de l'évaporation (en noir) pour le sédiment BR-RAN.*

### *A.2.2. Évolution de la teneur en eau par rapport à la profondeur de la couche*

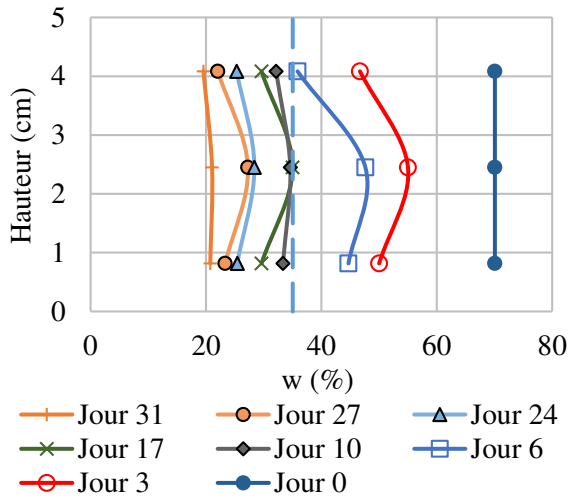



***Figure A.2.2-1.*** *Sédiments « AL-FLU ».*

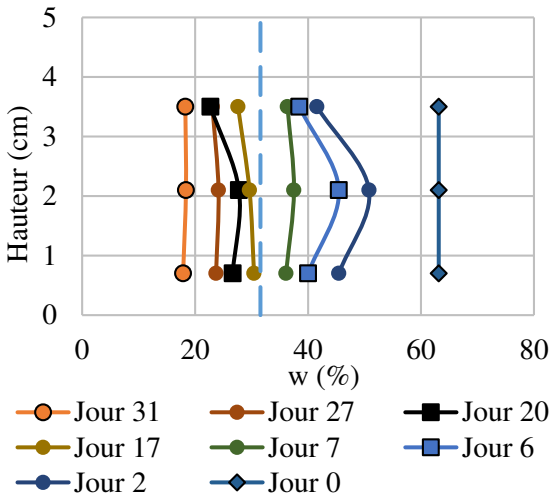



***Figure A.2.2-2.*** *Sédiments « AL-SPO ».*

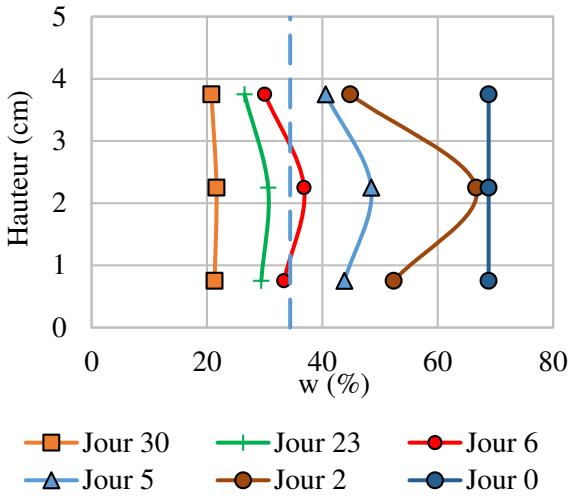



***Figure A.2.2-3.*** *Sédiments « AL-CLA ».*

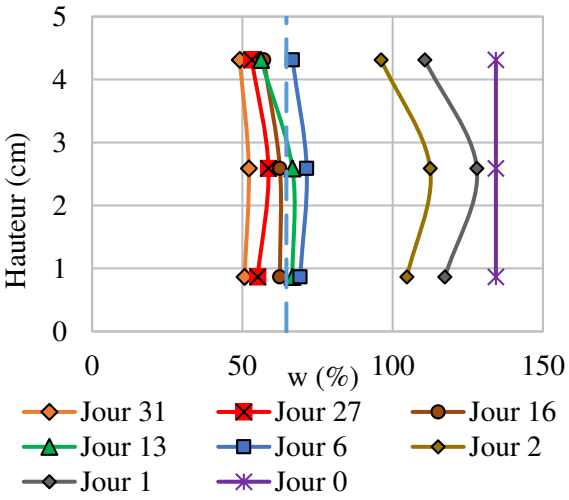



***Figure A.2.2-4.*** *Sédiments « BR-SAI ».*

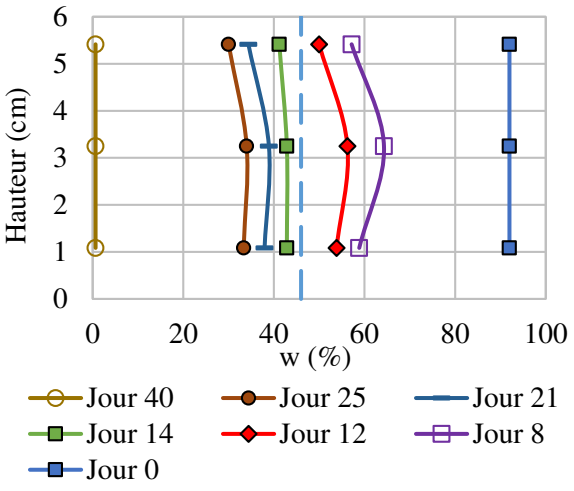



***Figure A.2.2-5.*** *Sédiments « AL-ISE ».*

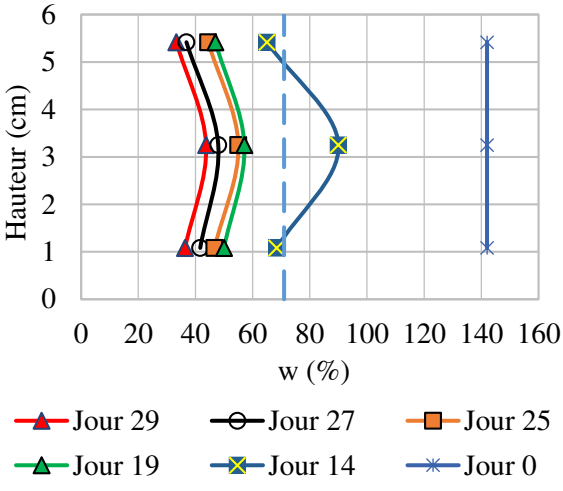



***Figure A.2.2-6.*** *Sédiments « GE-RHI ».*

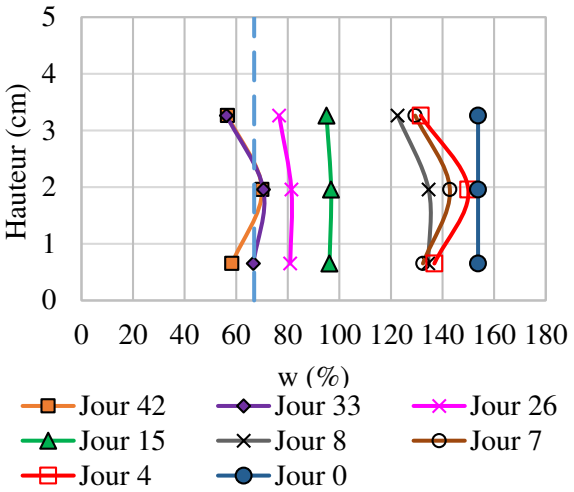



***Figure A.2.2-7.*** *Sédiments « HF-DK ».*

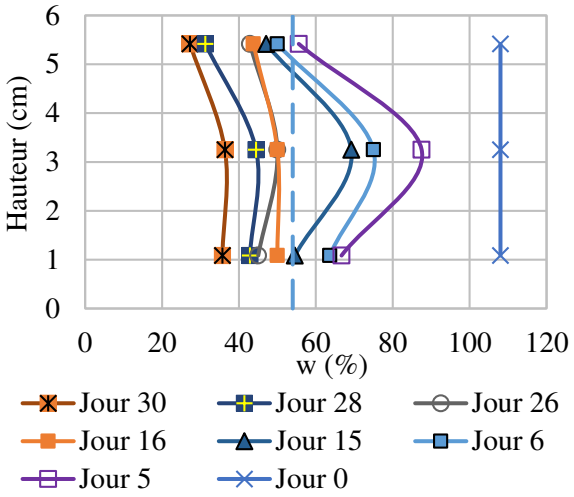



***Figure A.2.2-8.*** *Sédiments « BR-RAN ».*

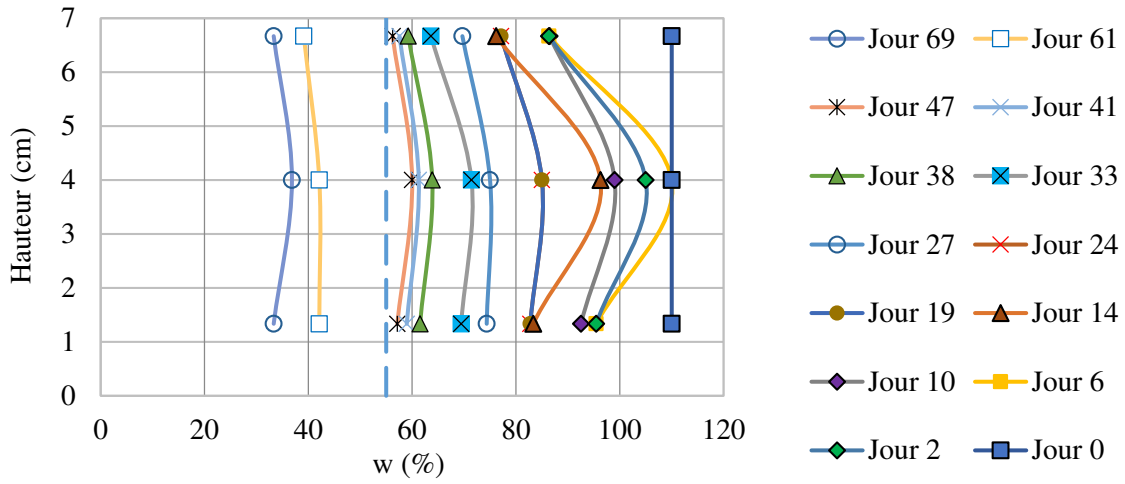
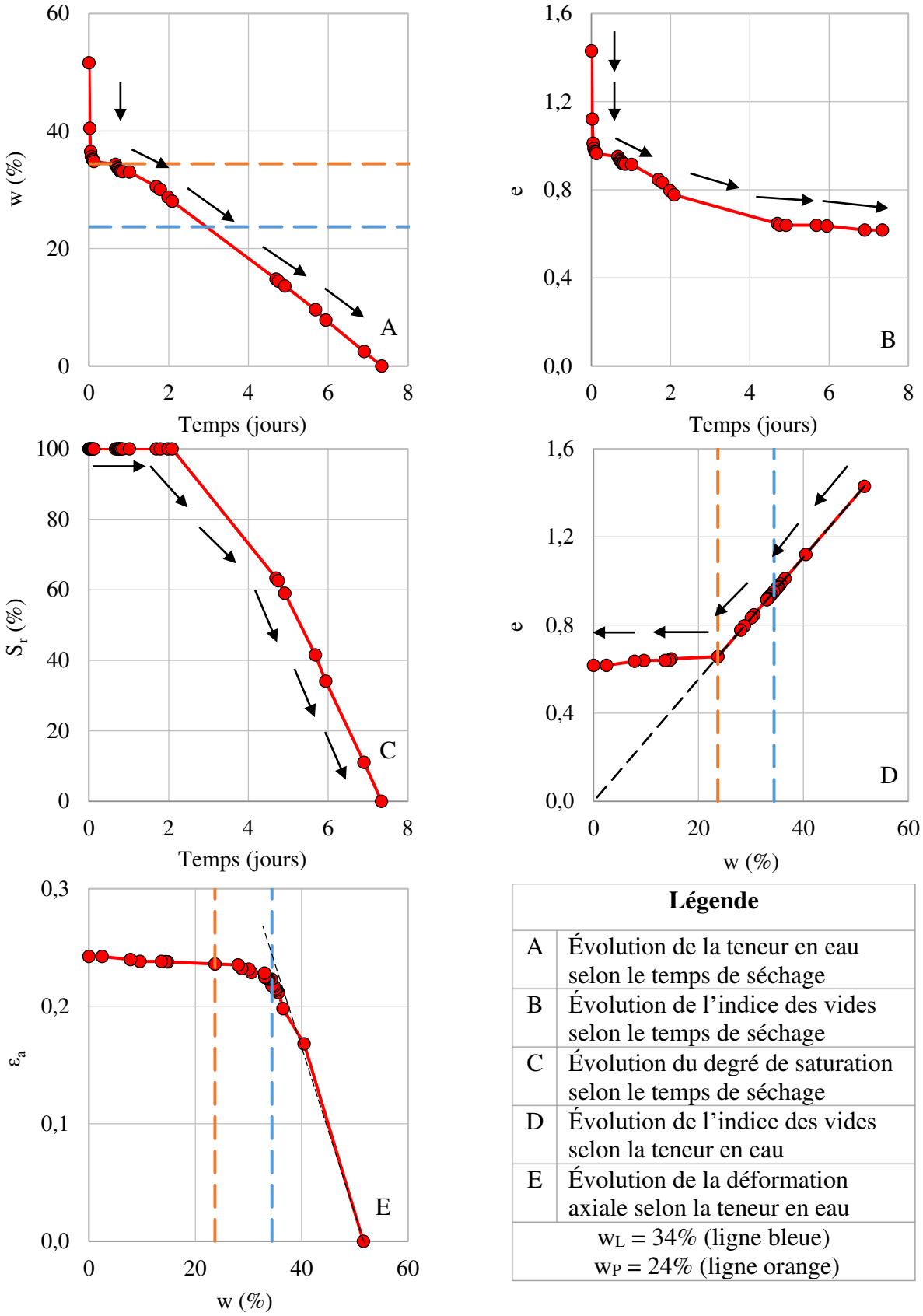



***Figure A.2.2-9.*** *Matériaux argileux : « KAO ».*

### *A.2.3. Évolution des paramètres d'état lors du séchage naturel*




| Légende | |
|---|---|
| A | Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage |
| B | Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage |
| C | Évolution du degré de saturation selon le temps de séchage |
| D | Évolution de l'indice des vides selon la teneur en eau |
| E | Évolution de la déformation axiale selon la teneur en eau |
| $w_L$ = 34% (ligne bleue)<br>$w_P$ = 24% (ligne orange) | |

***Figure A.2.3-1**. Courbes de séchage-retrait des sédiments AL-CLA, $w_0=1,5w_L$.*

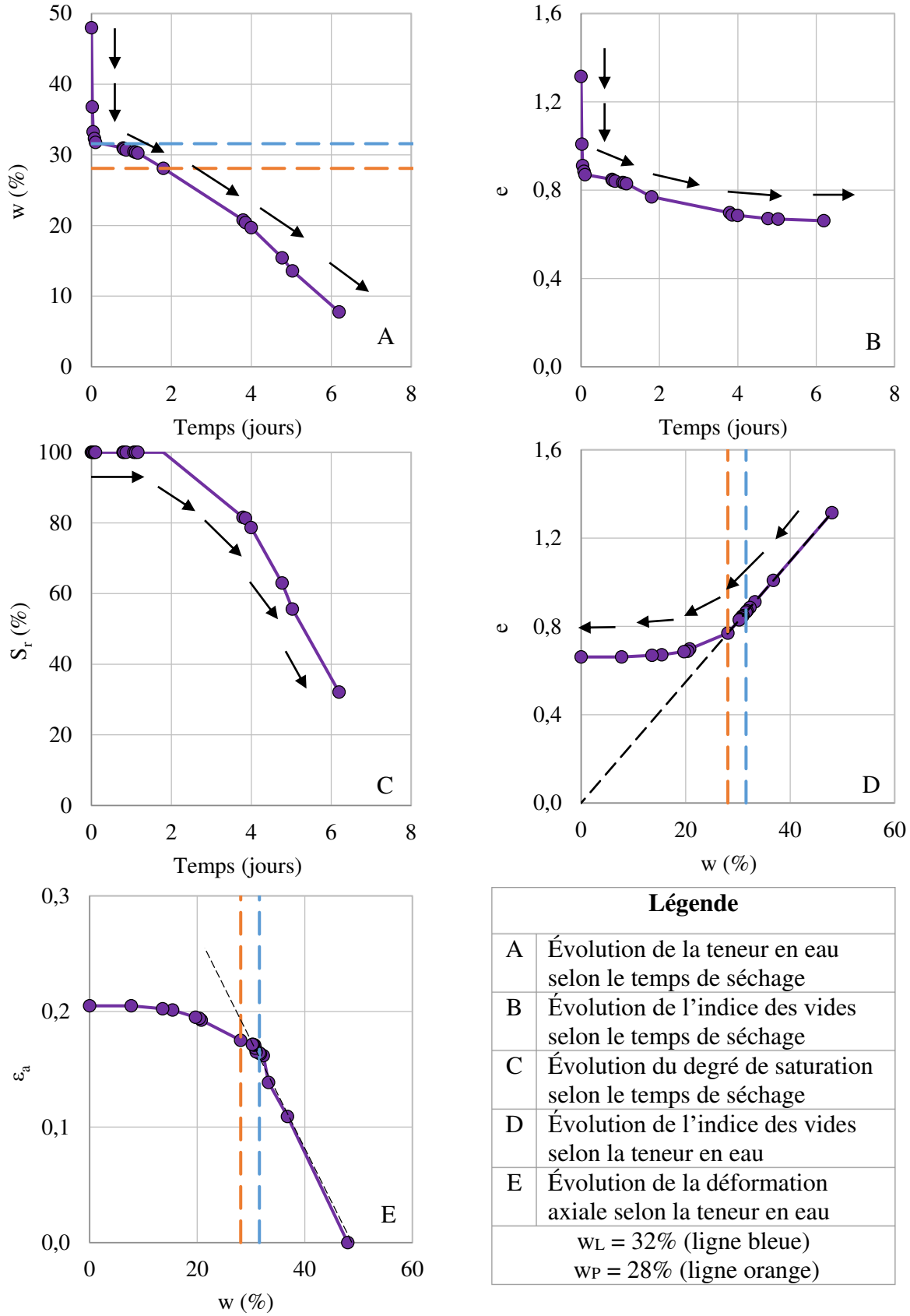
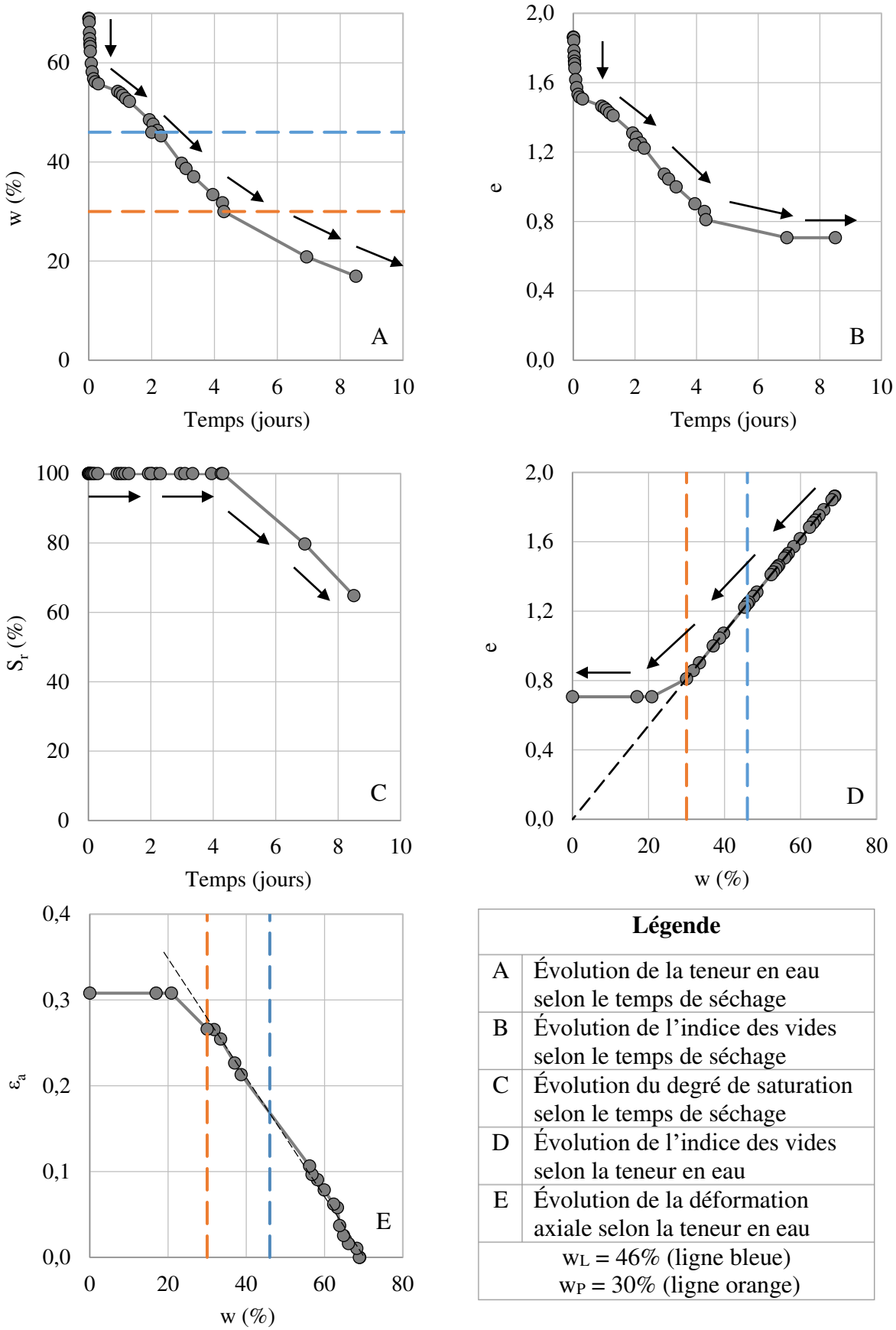



***Figure A.2.3-2**. Courbes de séchage-retrait des sédiments AL-SPO, $w_0$=1,5$w_L$.*




| Légende | |
|---|---|
| A | Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage |
| B | Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage |
| C | Évolution du degré de saturation selon le temps de séchage |
| D | Évolution de l'indice des vides selon la teneur en eau |
| E | Évolution de la déformation axiale selon la teneur en eau |
| $w_L$ = 46% (ligne bleue)<br>$w_P$ = 30% (ligne orange) | |

***Figure A.2.3-3**. Courbes de séchage-retrait des sédiments AL-ISE, $w_0$=1,5$w_L$.*

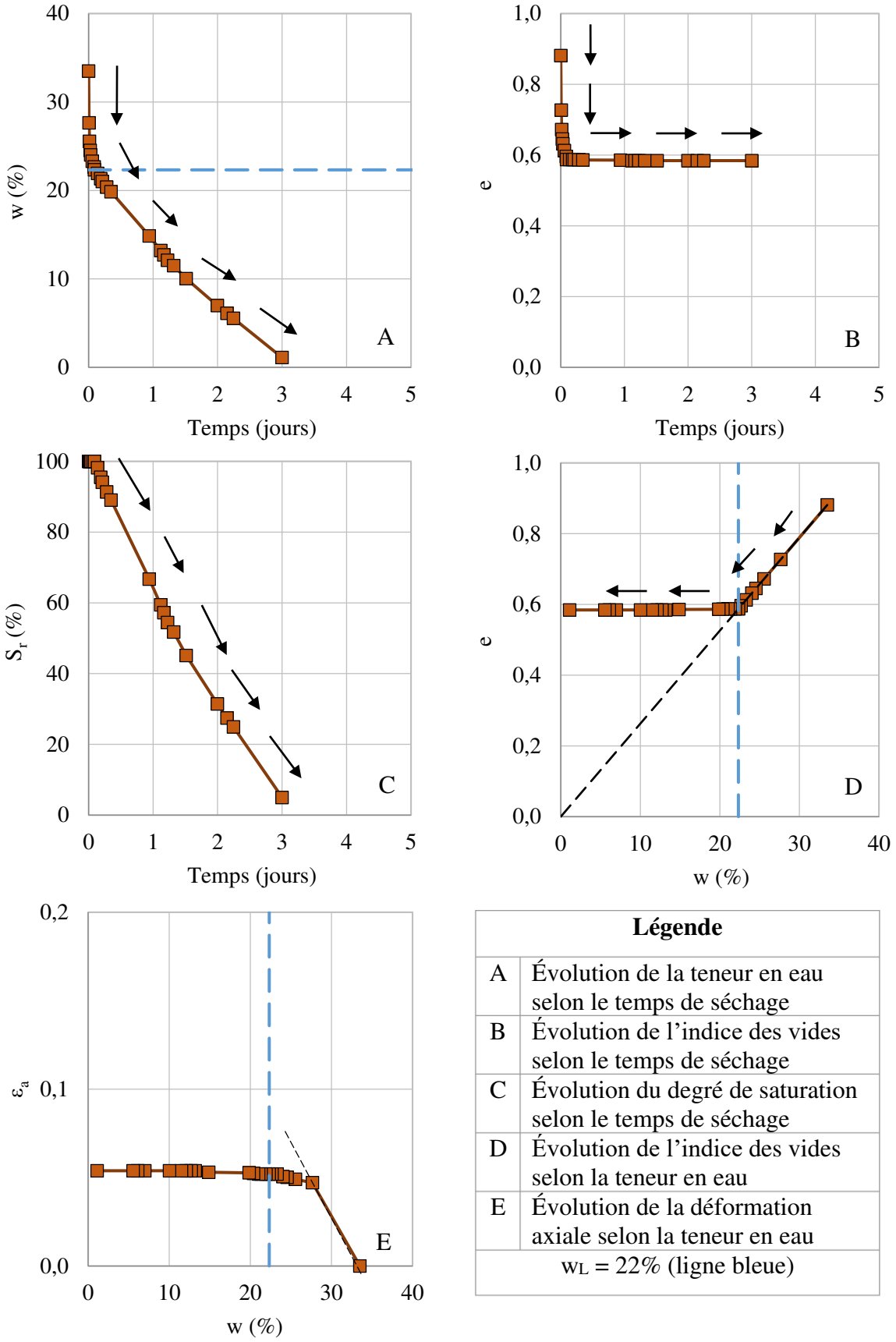
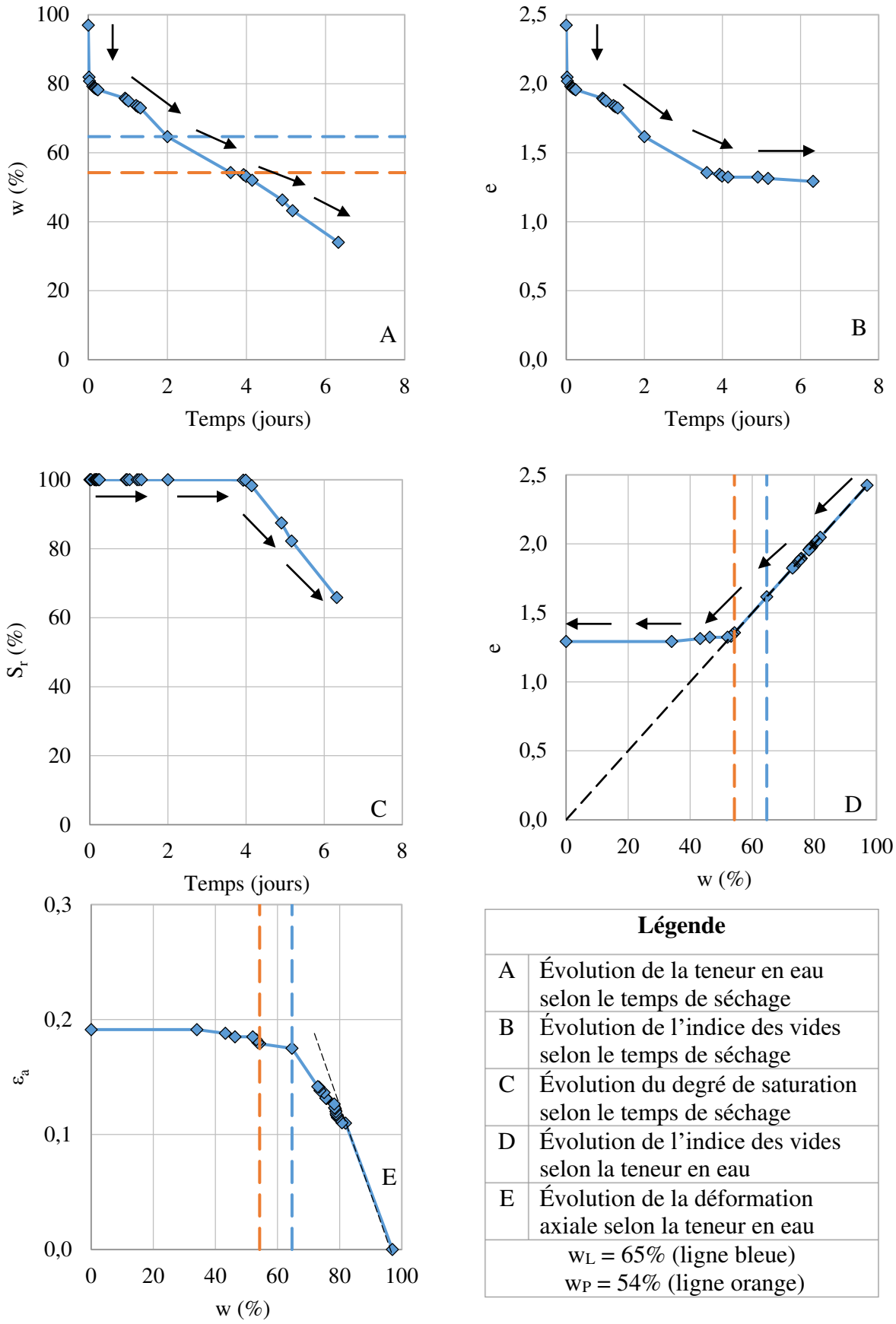
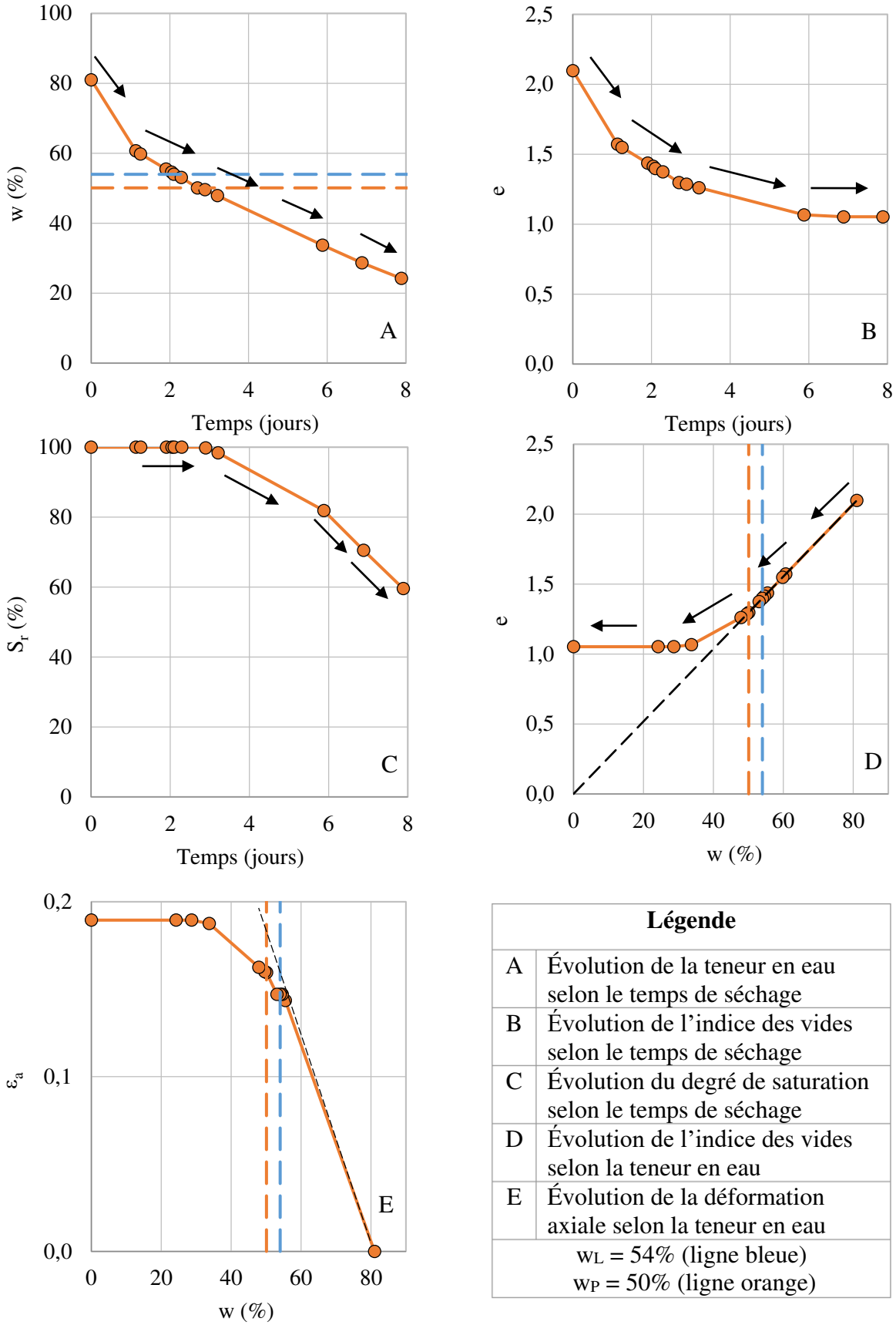



***Figure A.2.3-4**. Courbes de séchage-retrait des sédiments NA-ART, $w_0$=1,5$w_L$.*



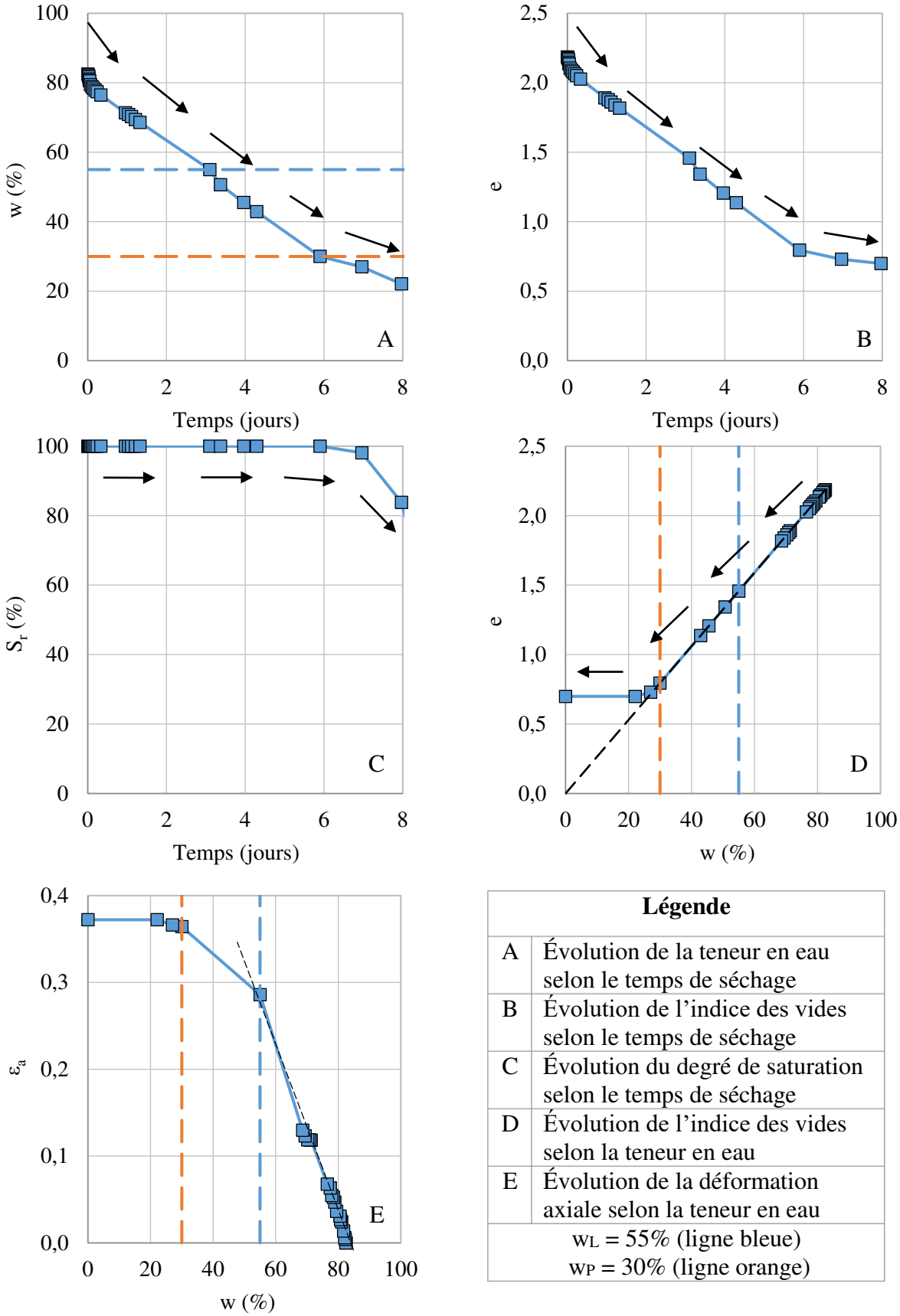

| Légende | |
|---|---|
| A | Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage |
| B | Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage |
| C | Évolution du degré de saturation selon le temps de séchage |
| D | Évolution de l'indice des vides selon la teneur en eau |
| E | Évolution de la déformation axiale selon la teneur en eau |
| $w_L$ = 65% (ligne bleue)<br>$w_P$ = 54% (ligne orange) | |

***Figure A.2.3-5****. Courbes de séchage-retrait des sédiments BR-SAI, $w_0$=1,5$w_L$.*




| Légende | |
|---|---|
| A | Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage |
| B | Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage |
| C | Évolution du degré de saturation selon le temps de séchage |
| D | Évolution de l'indice des vides selon la teneur en eau |
| E | Évolution de la déformation axiale selon la teneur en eau |
| $w_L$ = 54% (ligne bleue)<br>$w_P$ = 50% (ligne orange) | |

***Figure A.2.3-6**. Courbes de séchage-retrait des sédiments BR-RAN, $w_0$=1,5$w_L$.*




| Légende | |
|---|---|
| A | Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage |
| B | Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage |
| C | Évolution du degré de saturation selon le temps de séchage |
| D | Évolution de l'indice des vides selon la teneur en eau |
| E | Évolution de la déformation axiale selon la teneur en eau |
| $w_L$ = 55% (ligne bleue)<br>$w_P$ = 30% (ligne orange) | |

***Figure A.2.3-7**. Courbes de séchage-retrait de la kaolinite, $w_0$=1,5$w_L$.*

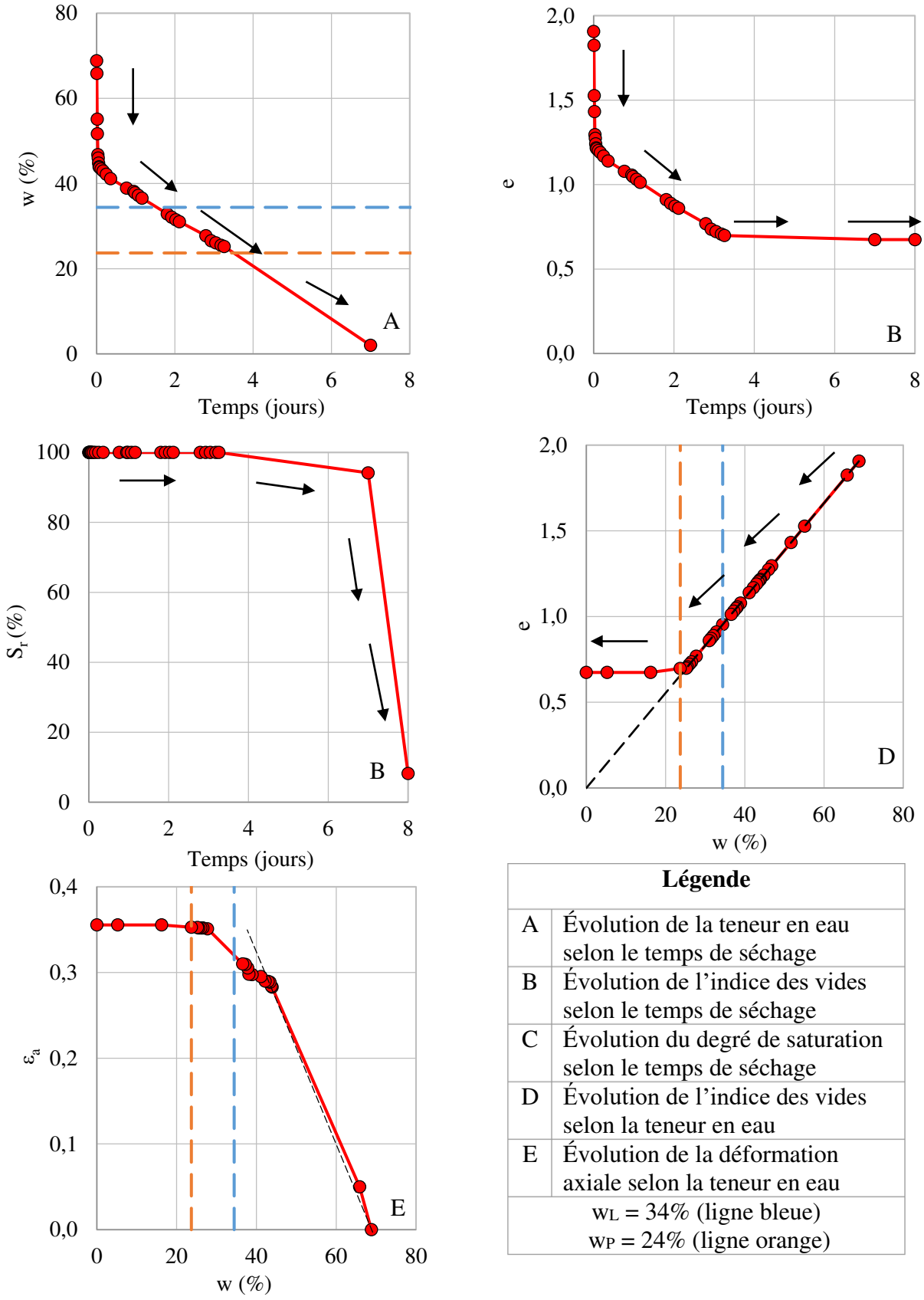



***Figure A.2.3-8**. Courbes de séchage-retrait des sédiments AL-CLA, $w_0=2w_L$.*

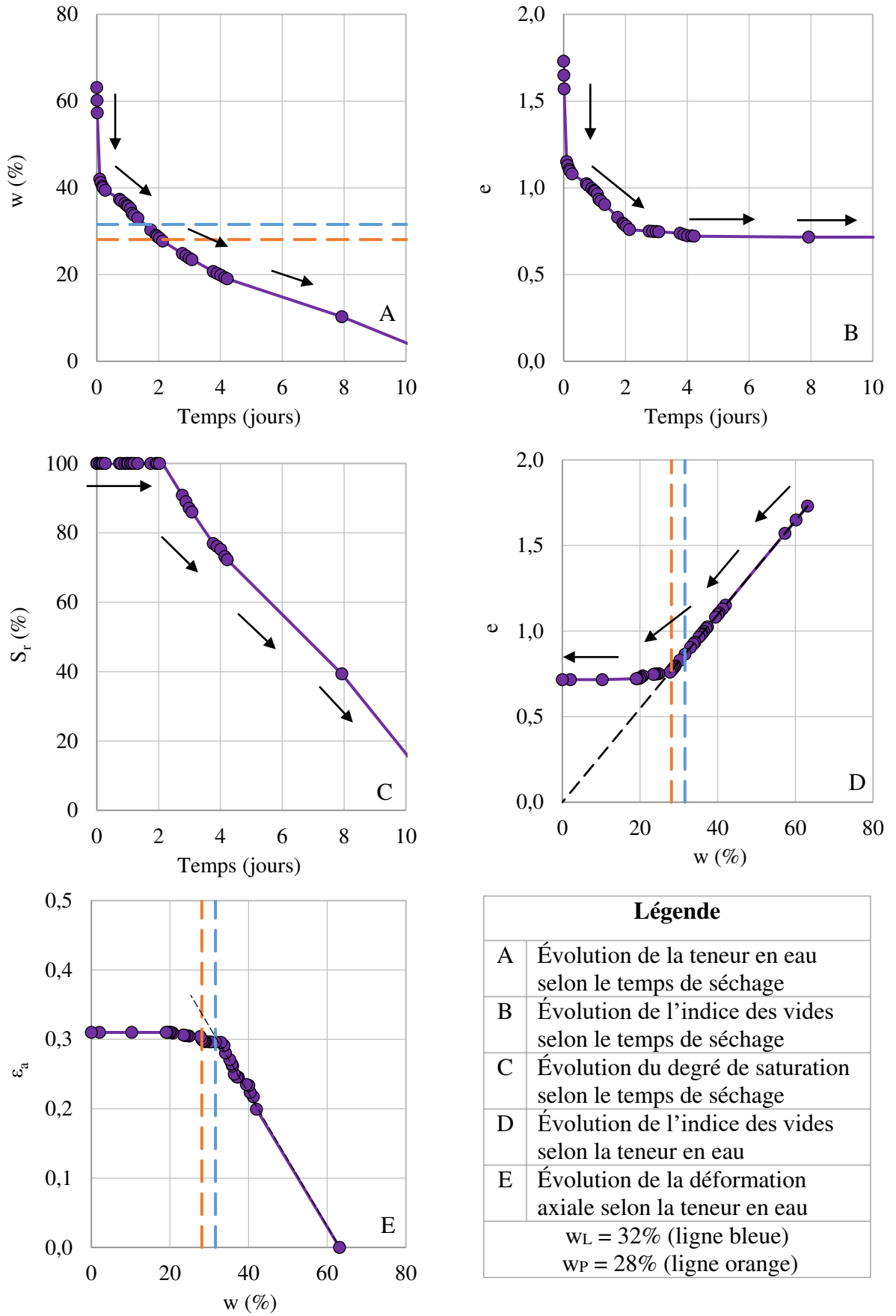
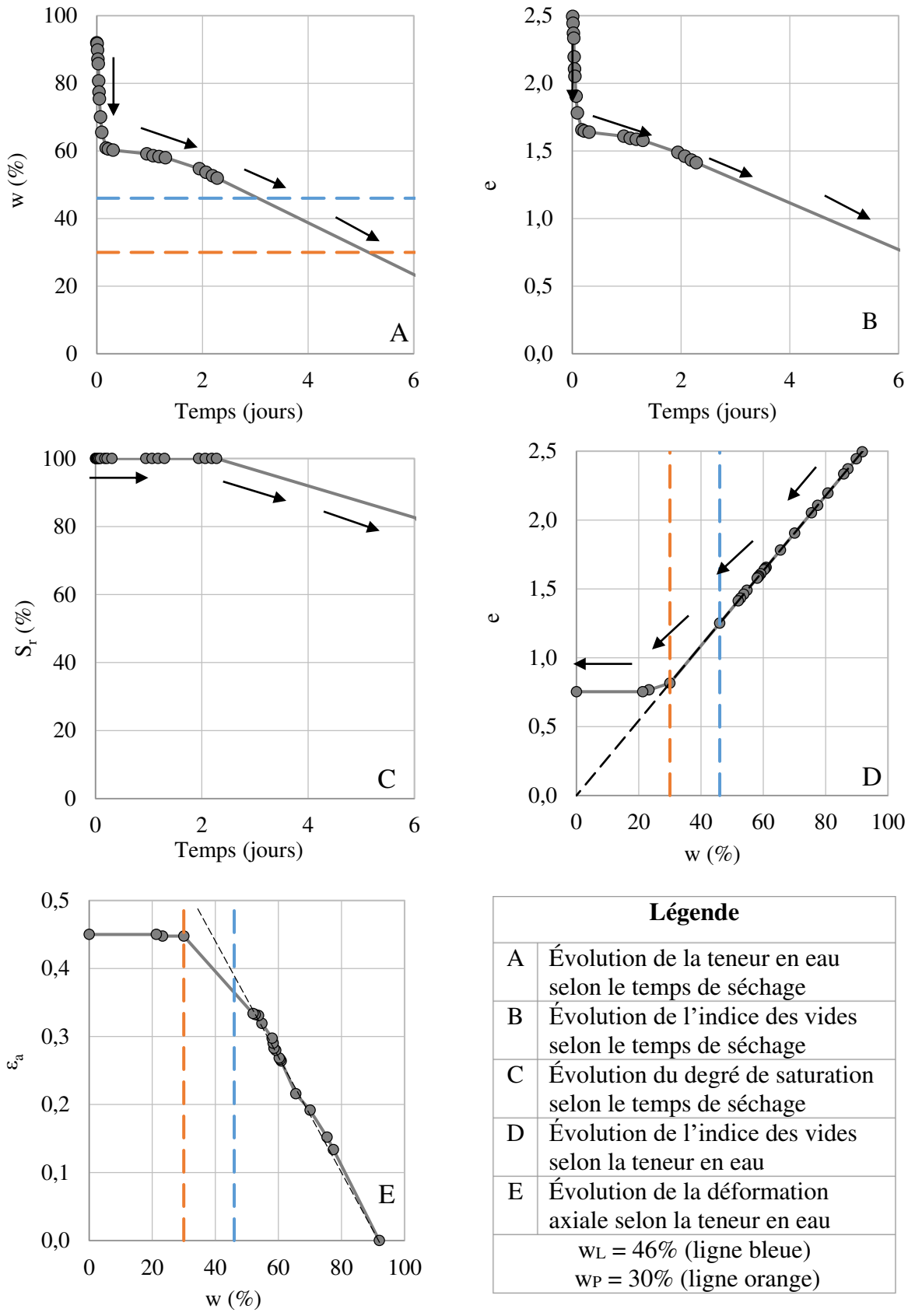
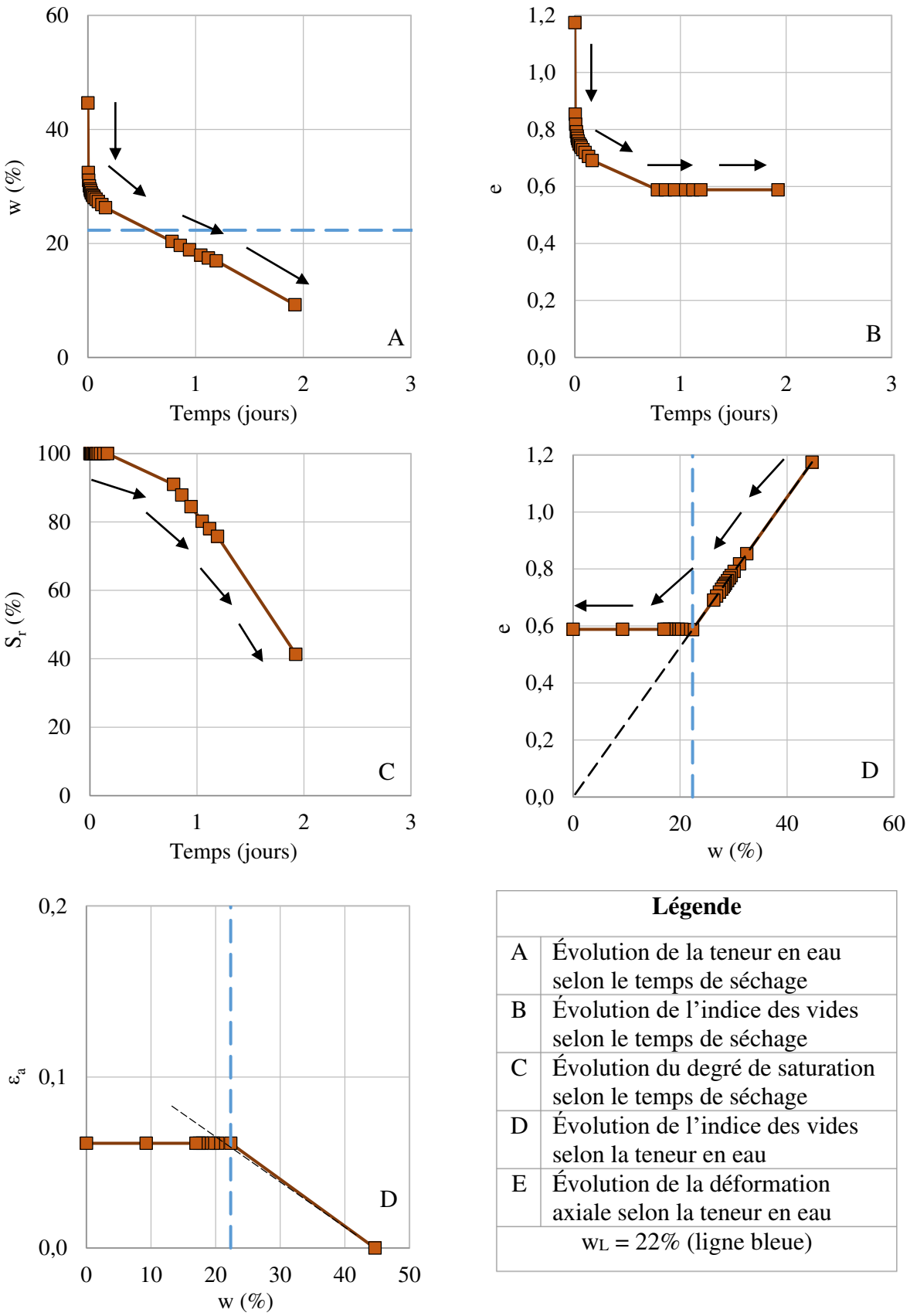



***Figure A.2.3-9**. Courbes de séchage-retrait des sédiments AL-SPO, $w_0=2w_L$.*



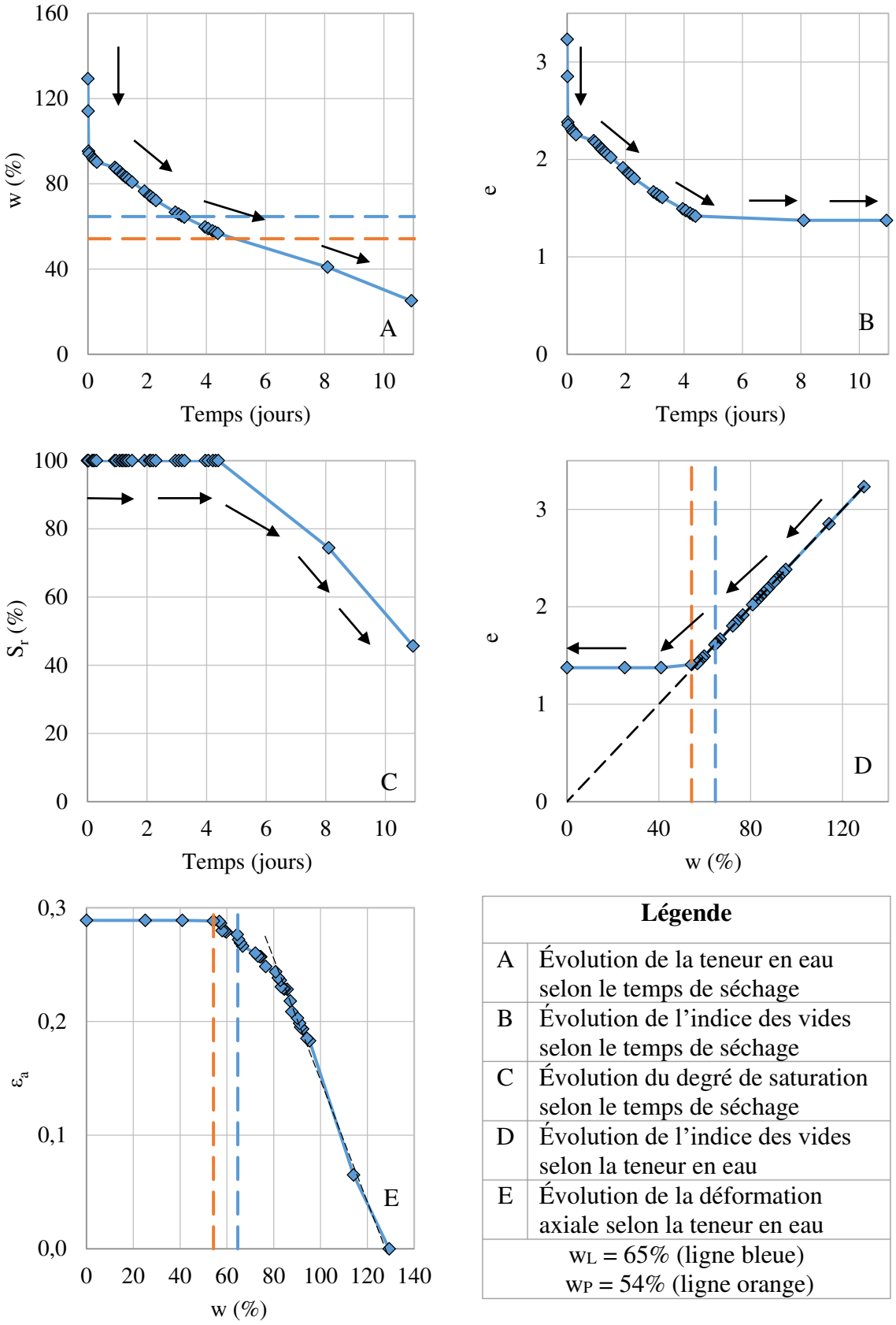

| Légende | |
|---|---|
| A | Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage |
| B | Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage |
| C | Évolution du degré de saturation selon le temps de séchage |
| D | Évolution de l'indice des vides selon la teneur en eau |
| E | Évolution de la déformation axiale selon la teneur en eau |
| $w_L$ = 46% (ligne bleue)<br>$w_P$ = 30% (ligne orange) | |

***Figure A.2.3-10**. Courbes de séchage-retrait des sédiments AL-ISE, $w_0=2w_L$.*



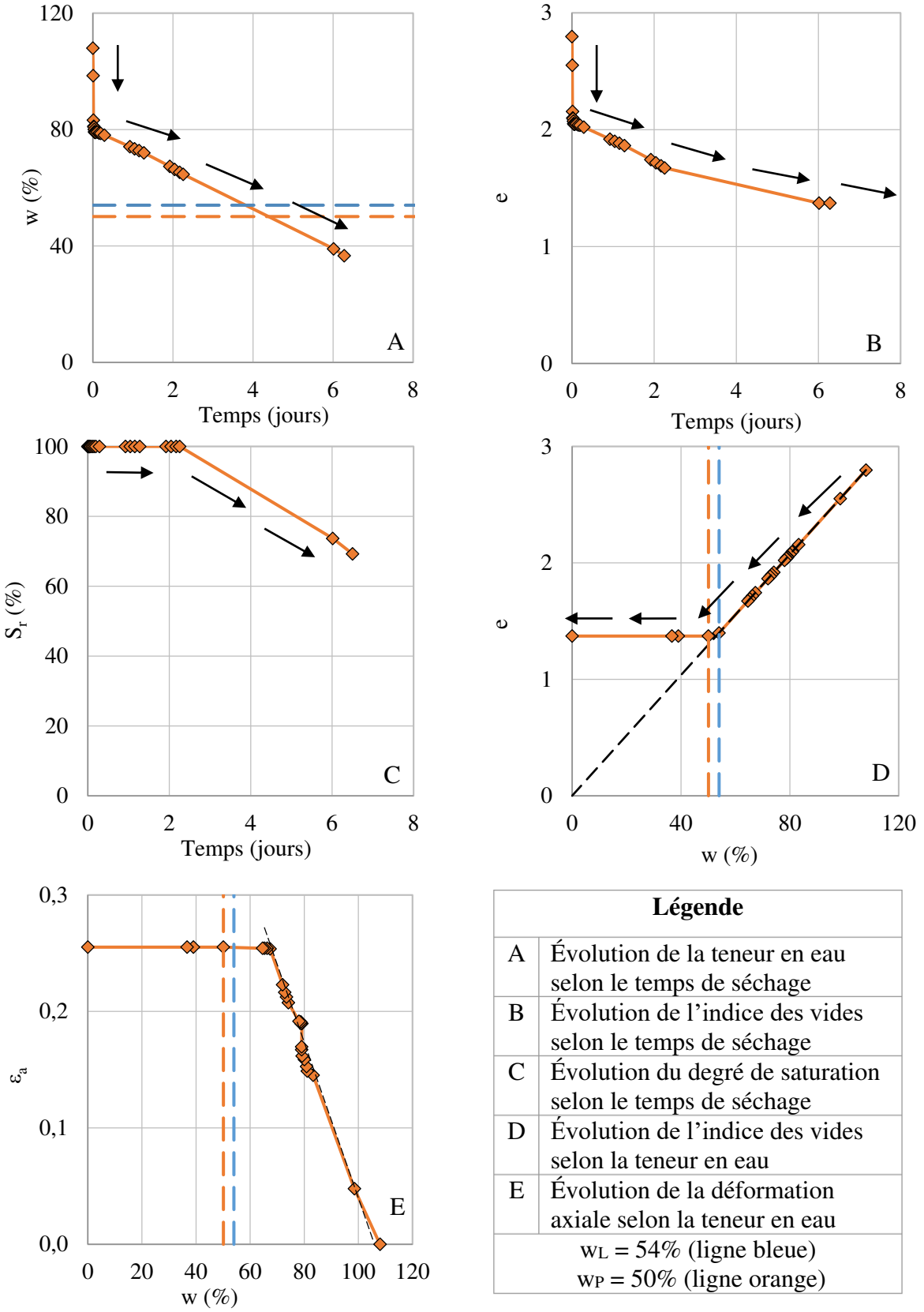

| Légende | |
|---|---|
| A | Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage |
| B | Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage |
| C | Évolution du degré de saturation selon le temps de séchage |
| D | Évolution de l'indice des vides selon la teneur en eau |
| E | Évolution de la déformation axiale selon la teneur en eau |
| $w_L$ = 22% (ligne bleue) | |

***Figure A.2.3-11**. Courbes de séchage-retrait des sédiments NA-ART, $w_0=2w_L$.*



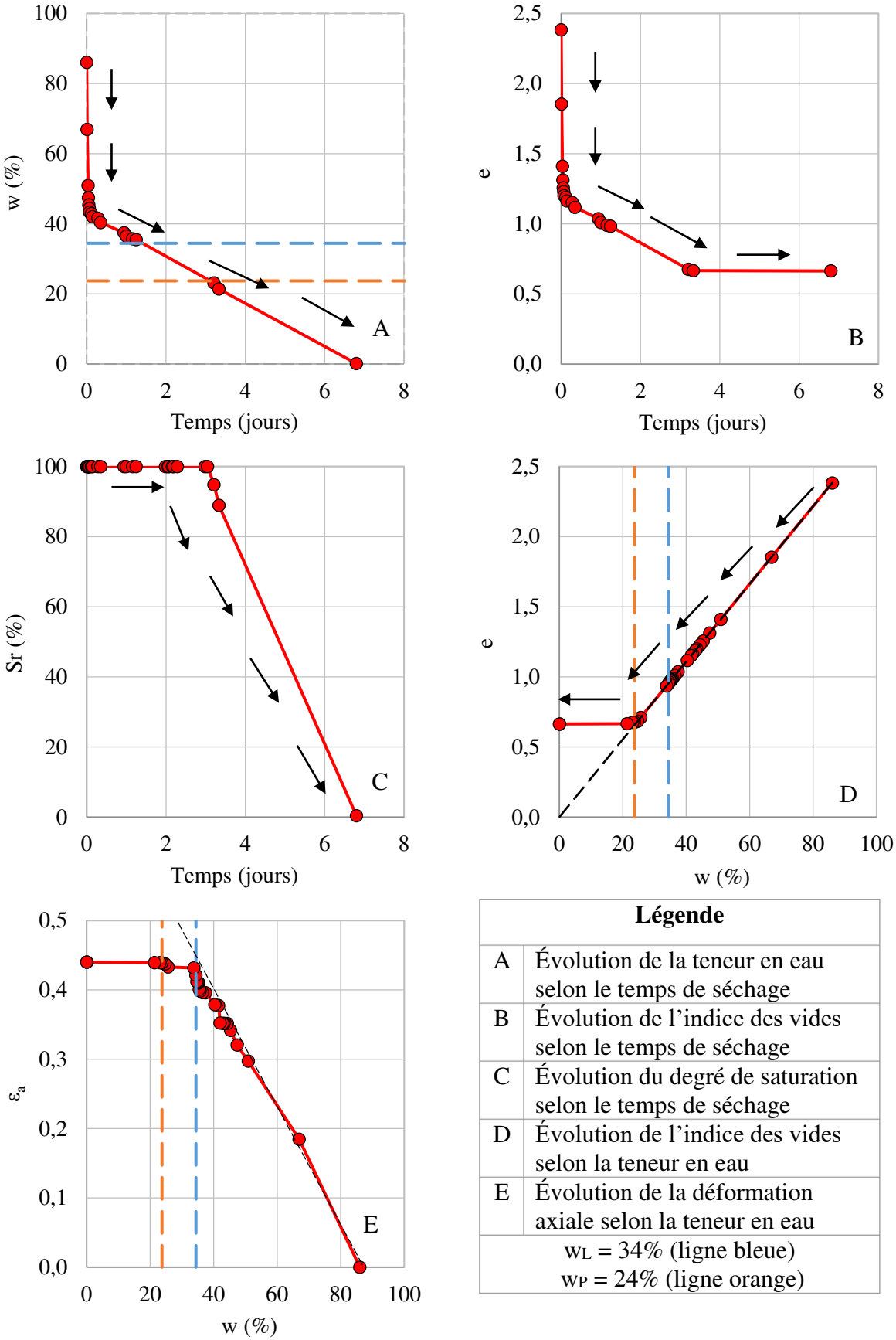

| Légende | |
|---|---|
| A | Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage |
| B | Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage |
| C | Évolution du degré de saturation selon le temps de séchage |
| D | Évolution de l'indice des vides selon la teneur en eau |
| E | Évolution de la déformation axiale selon la teneur en eau |
| $w_L$ = 65% (ligne bleue)<br>$w_P$ = 54% (ligne orange) | |

***Figure A.2.3-12**. Courbes de séchage-retrait des sédiments BR-SAI, $w_0=2w_L$.*



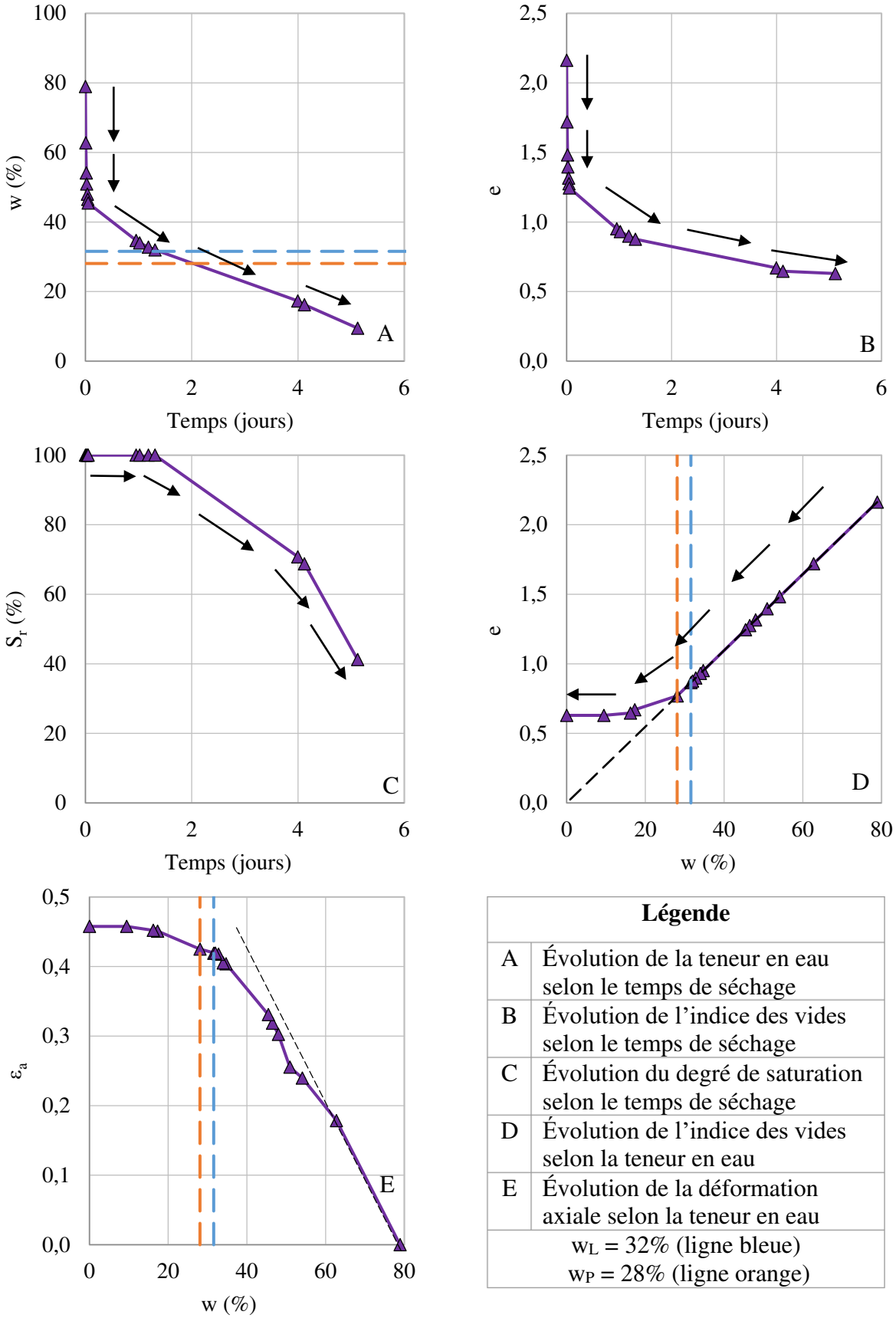

| Légende | |
|---|---|
| A | Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage |
| B | Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage |
| C | Évolution du degré de saturation selon le temps de séchage |
| D | Évolution de l'indice des vides selon la teneur en eau |
| E | Évolution de la déformation axiale selon la teneur en eau |
| $w_L$ = 54% (ligne bleue)<br>$w_P$ = 50% (ligne orange) | |

***Figure A.2.3-13**. Courbes de séchage-retrait des sédiments BR-RAN, $w_0=2w_L$.*



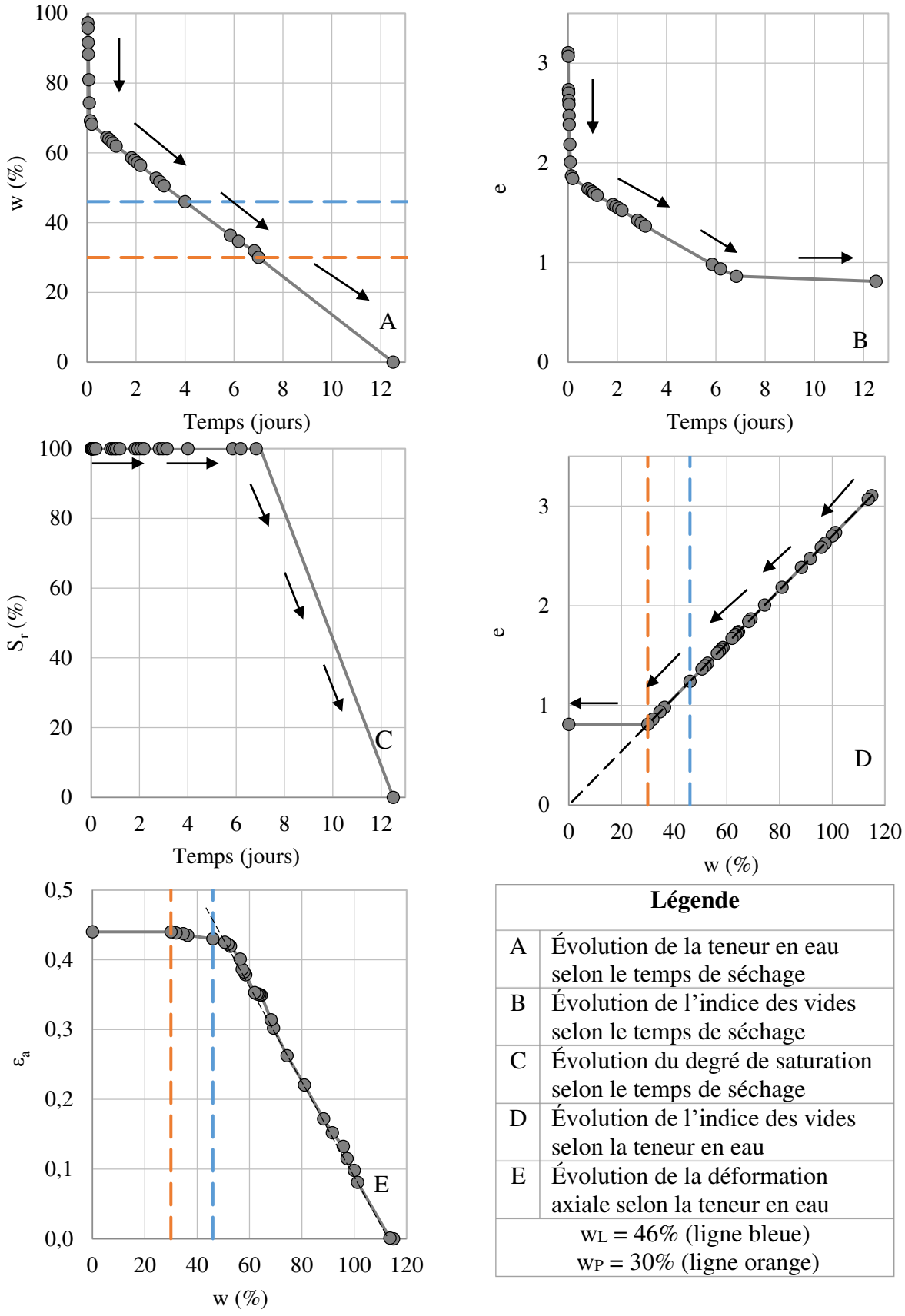

| Légende | |
|---|---|
| A | Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage |
| B | Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage |
| C | Évolution du degré de saturation selon le temps de séchage |
| D | Évolution de l'indice des vides selon la teneur en eau |
| E | Évolution de la déformation axiale selon la teneur en eau |
| $w_L$ = 34% (ligne bleue)<br>$w_P$ = 24% (ligne orange) | |

***Figure A.2.3-14**. Courbes de séchage-retrait des sédiments AL-CLA, $w_0$=2,5$w_L$.*



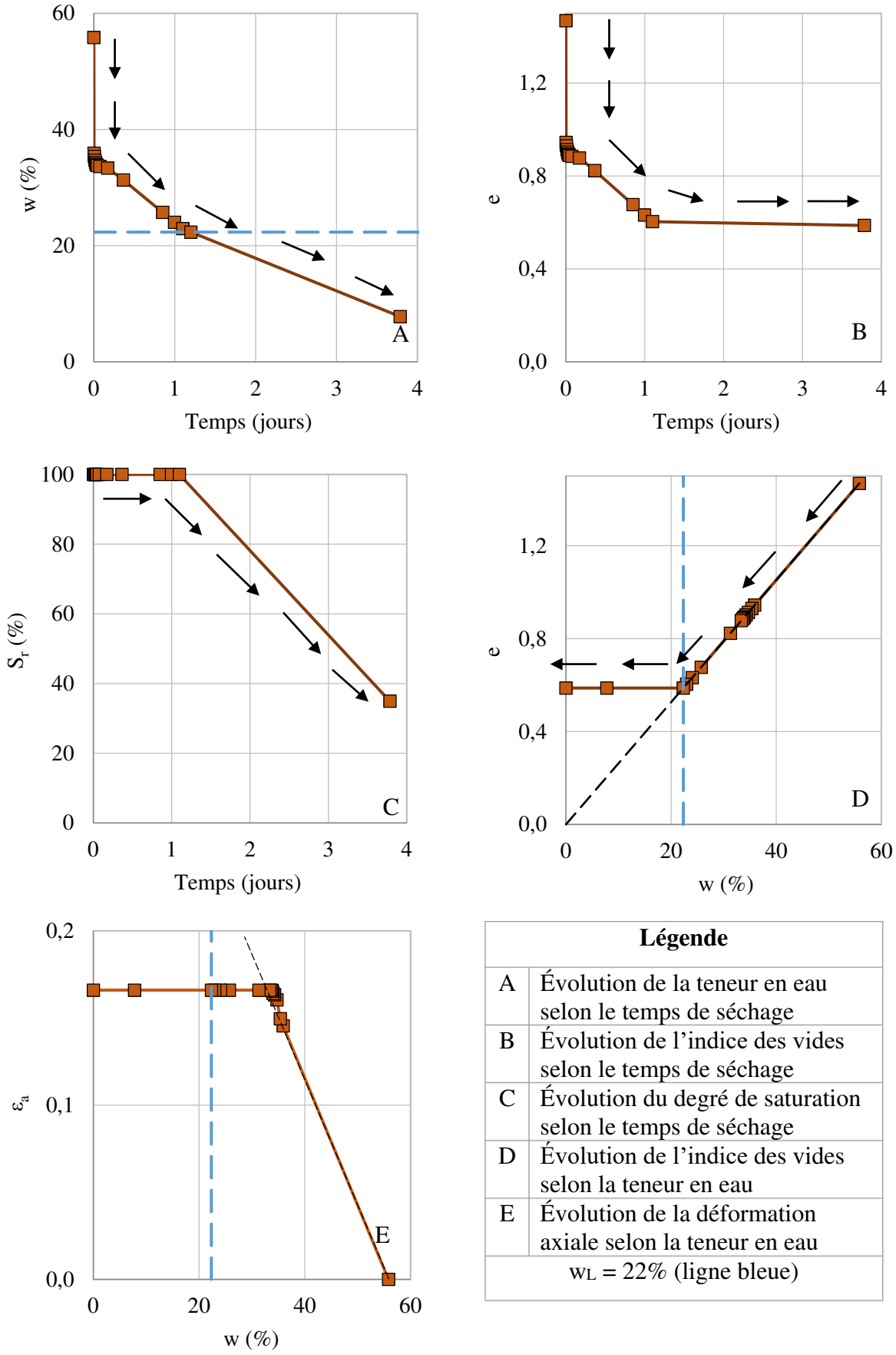

| Légende | |
|---|---|
| A | Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage |
| B | Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage |
| C | Évolution du degré de saturation selon le temps de séchage |
| D | Évolution de l'indice des vides selon la teneur en eau |
| E | Évolution de la déformation axiale selon la teneur en eau |
| $w_L$ = 32% (ligne bleue)<br>$w_P$ = 28% (ligne orange) | |

***Figure A.2.3-15**. Courbes de séchage-retrait des sédiments AL-SPO, $w_0$=2,5$w_L$.*



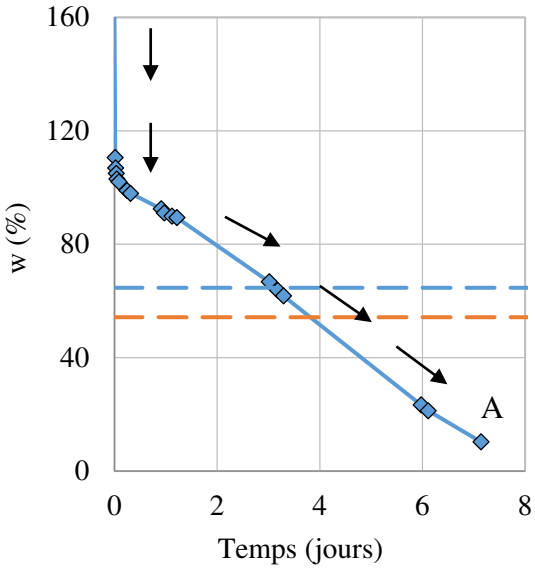

| Légende | |
|---|---|
| A | Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage |
| B | Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage |
| C | Évolution du degré de saturation selon le temps de séchage |
| D | Évolution de l'indice des vides selon la teneur en eau |
| E | Évolution de la déformation axiale selon la teneur en eau |
| $w_L$ = 46% (ligne bleue)<br>$w_P$ = 30% (ligne orange) | |

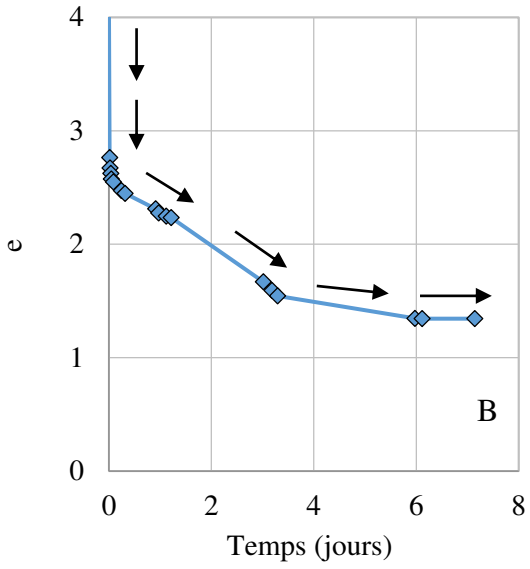
***Figure A.2.3-16**. Courbes de séchage-retrait des sédiments AL-ISE, $w_0$=2,5$w_L$.*

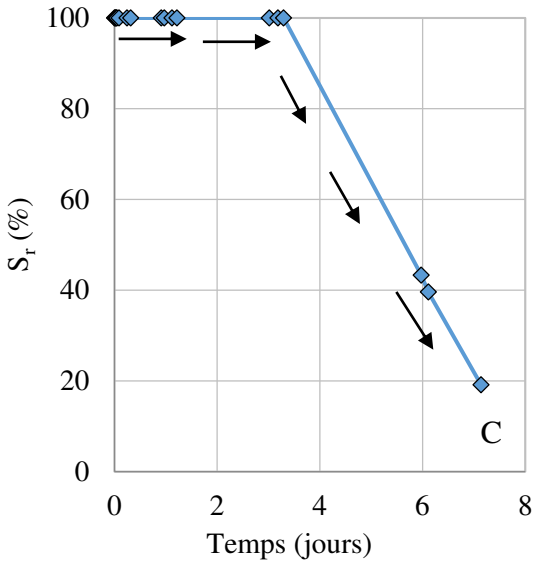


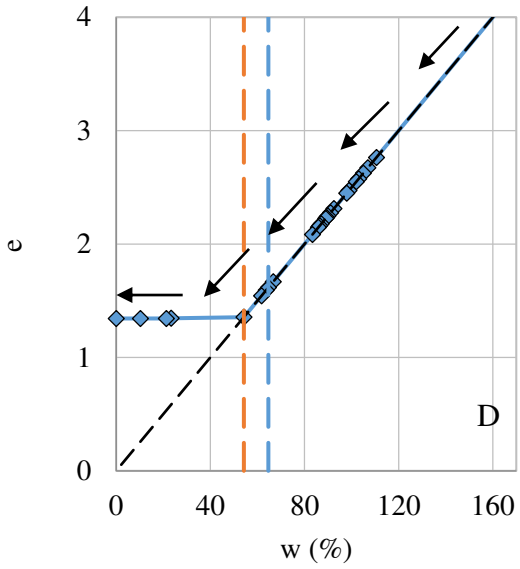

| Légende | |
|---|---|
| A | Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage |
| B | Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage |
| C | Évolution du degré de saturation selon le temps de séchage |
| D | Évolution de l'indice des vides selon la teneur en eau |
| E | Évolution de la déformation axiale selon la teneur en eau |
| $w_L$ = 22% (ligne bleue) | |

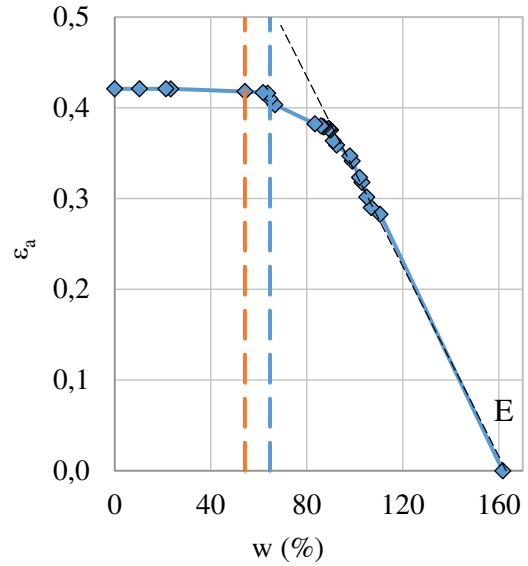
***Figure A.2.3-17**. Courbes de séchage-retrait des sédiments NA-ART, $w_0$=2,5$w_L$.*



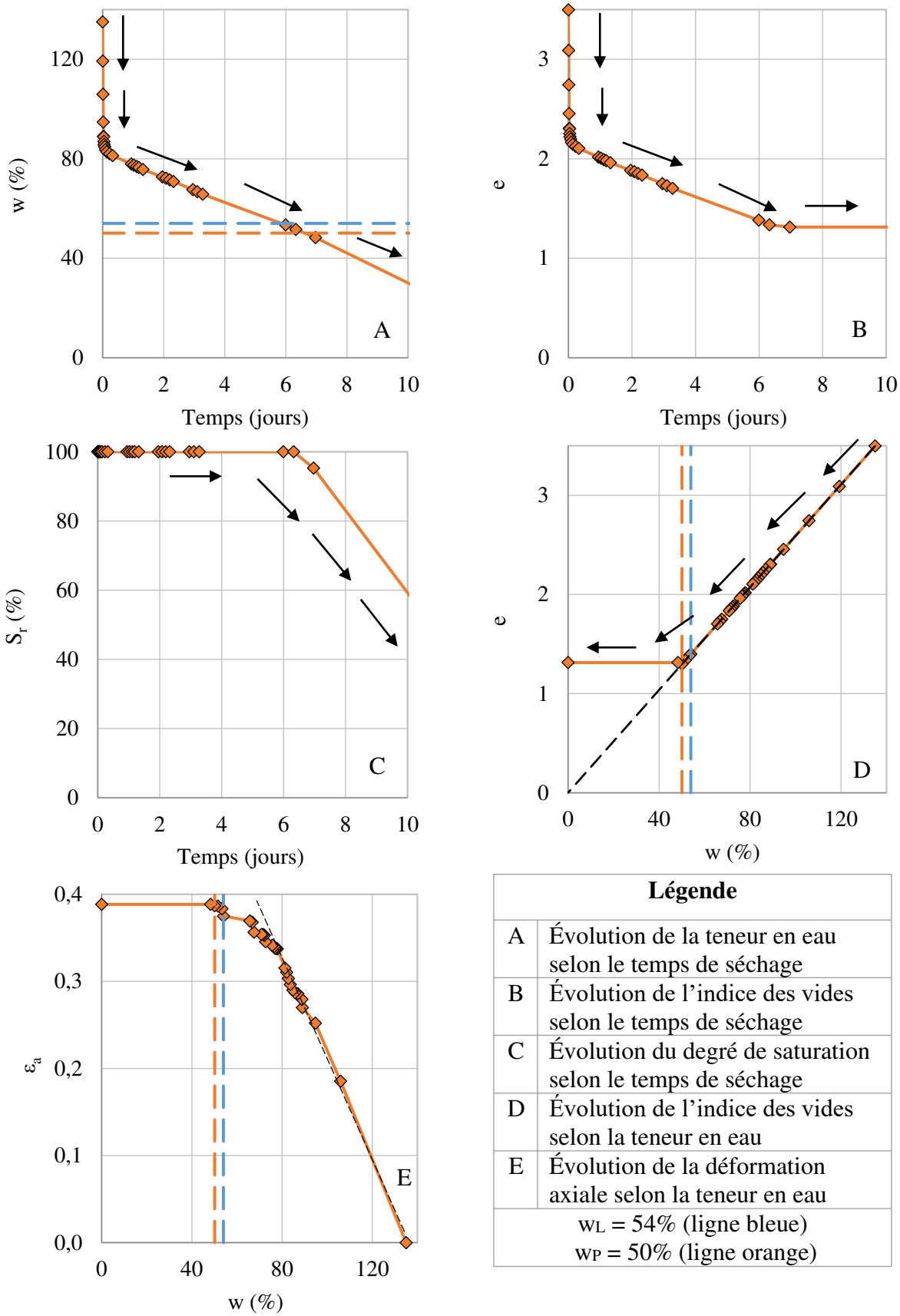




| Légende | |
|---|---|
| A | Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage |
| B | Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage |
| C | Évolution du degré de saturation selon le temps de séchage |
| D | Évolution de l'indice des vides selon la teneur en eau |
| E | Évolution de la déformation axiale selon la teneur en eau |
| $w_L$ = 65% (ligne bleue)<br>$w_P$ = 54% (ligne orange) | |

***Figure A.2.3-18**. Courbes de séchage-retrait des sédiments BR-SAI, $w_0$=2,5$w_L$.*




| Légende | |
|---|---|
| A | Évolution de la teneur en eau selon le temps de séchage |
| B | Évolution de l'indice des vides selon le temps de séchage |
| C | Évolution du degré de saturation selon le temps de séchage |
| D | Évolution de l'indice des vides selon la teneur en eau |
| E | Évolution de la déformation axiale selon la teneur en eau |
| $w_L$ = 54% (ligne bleue)<br>$w_P$ = 50% (ligne orange) | |

***Figure A.2.3-19**. Courbes de séchage-retrait des sédiments BR-RAN, $w_0$=2,5$w_L$.*

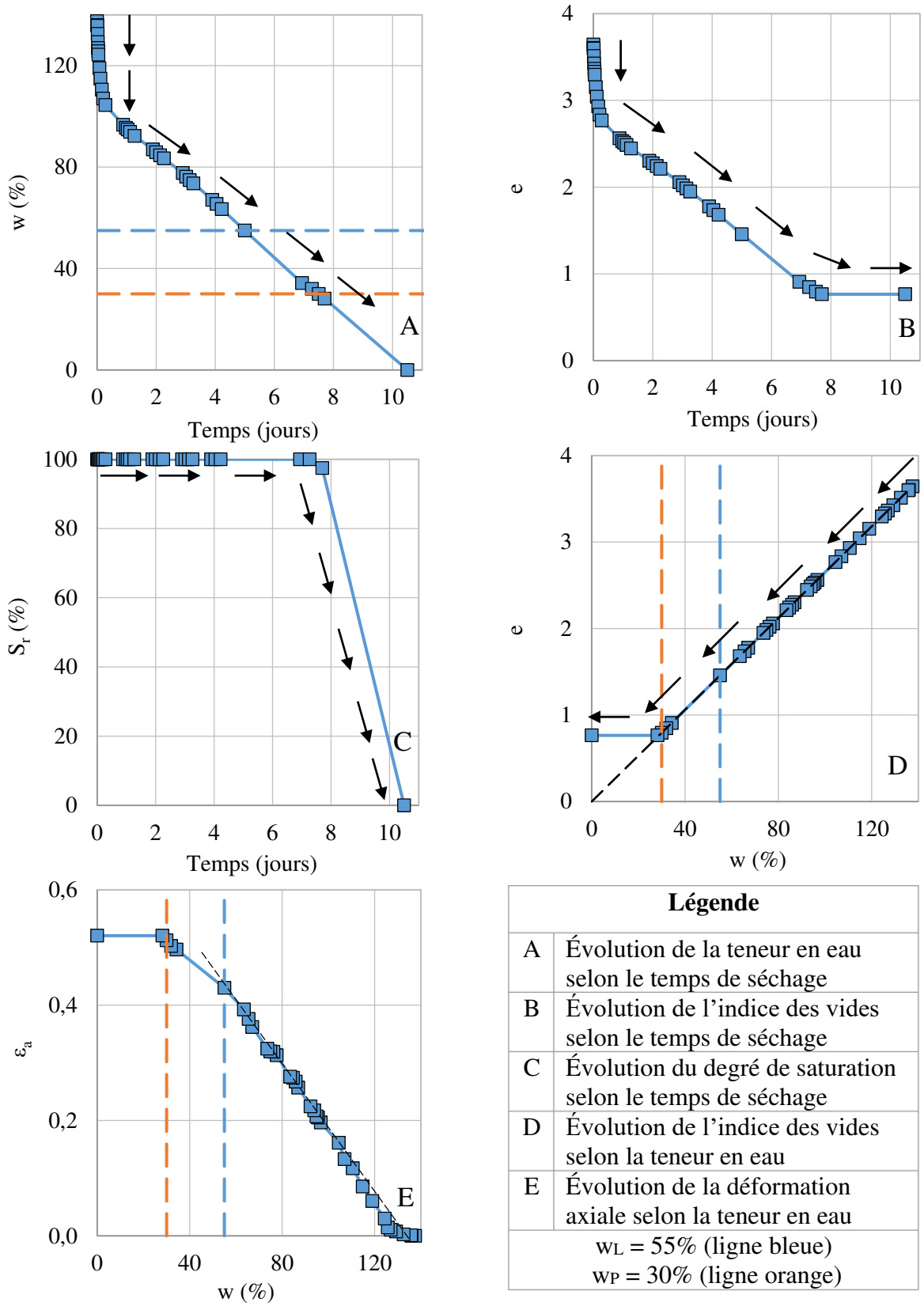



***Figure A.2.3-20**. Courbes de séchage-retrait de la kaolinite, $w_0$=2,5$w_L$.*

### *A.2.4. Évolution de la cohésion non drainée par rapport au temps de séchage*

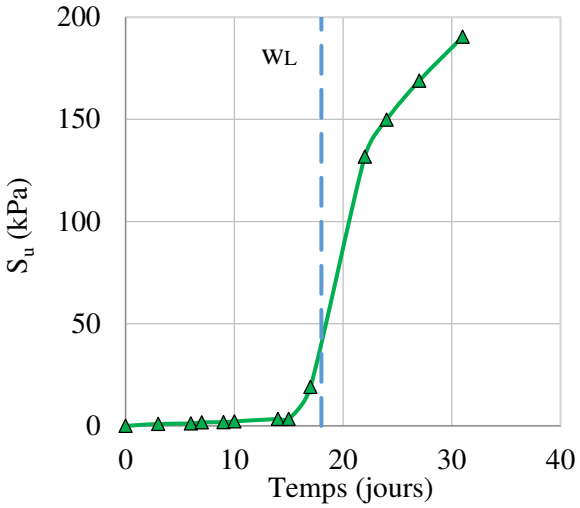



***Figure A.2.4-1.*** *Sédiments « AL-FLU ».*

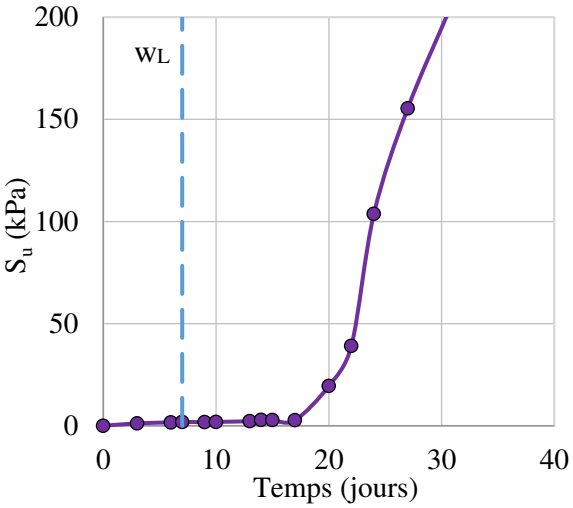



***Figure A.2.4-2.*** *Sédiments « AL-SPO ».*

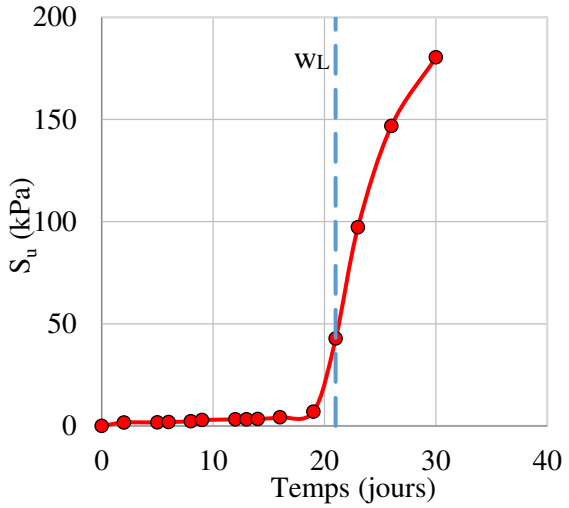



***Figure A.2.4-3.*** *Sédiments « AL-CLA ».*

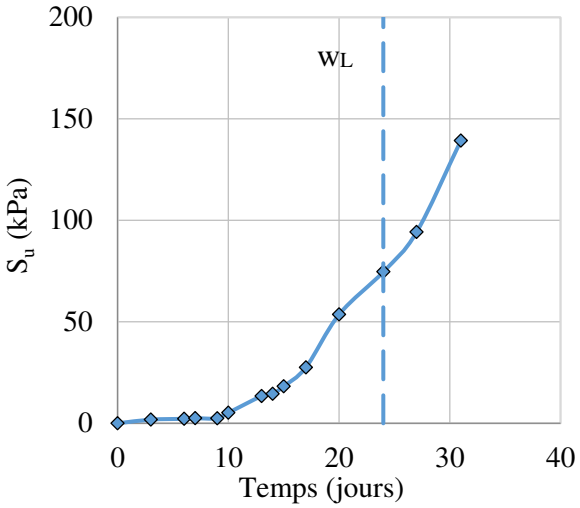



***Figure A.2.4-4.*** *Sédiments « BR-SAI ».*

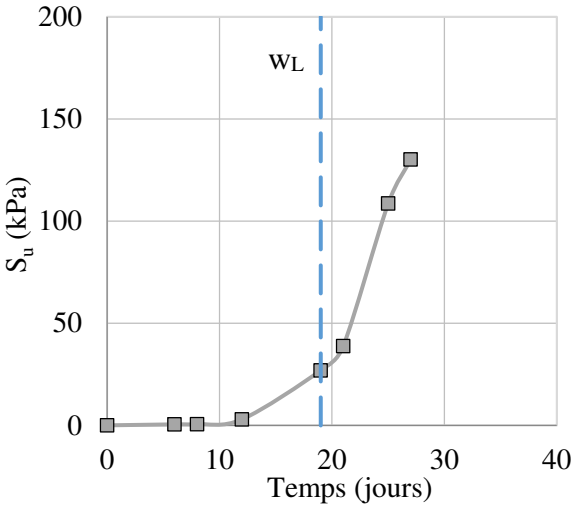



***Figure A.2.4-5.*** *Sédiments « AL-ISE ».*

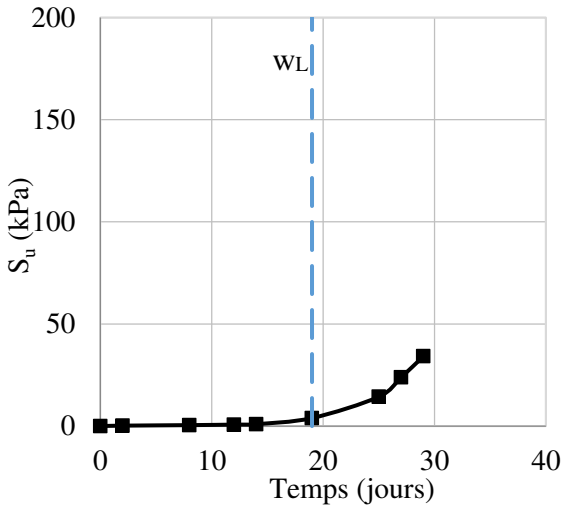



***Figure A.2.4-6.*** *Sédiments « GE-RHI ».*

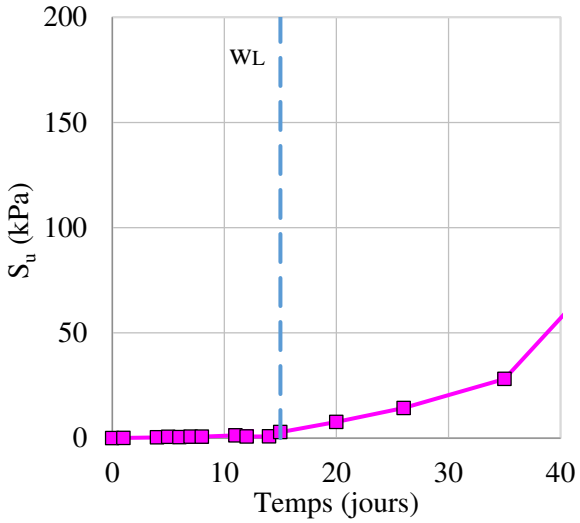



***Figure A.2.4-7.*** *Sédiments « HF-DK ».*

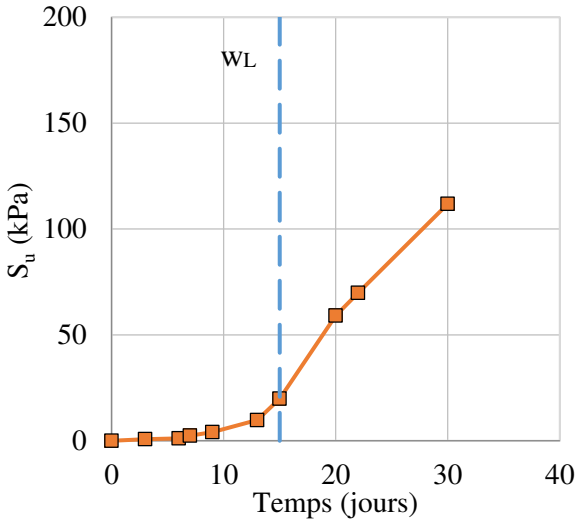



***Figure A.2.4-8.*** *Sédiments « BR-RAN ».*

### *A.2.5. Évolution de la cohésion non drainée avec la teneur en eau*

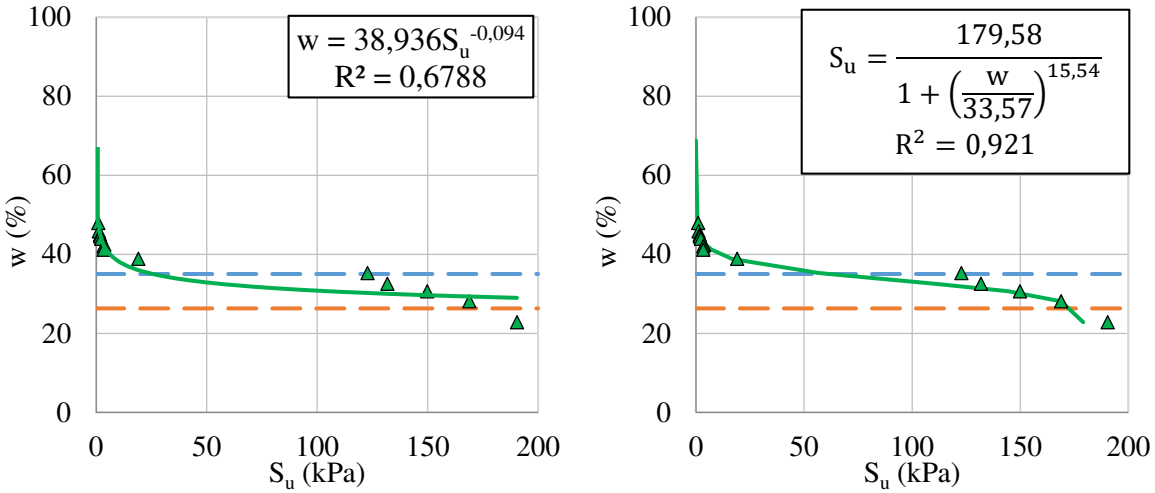



***Figure A.2.5-1.*** *Évolution w-$S_u$ pour les sédiments « AL-FLU » ajustée avec Excel (à gauche) et avec le programme Curve Expert Basic (à droite).*

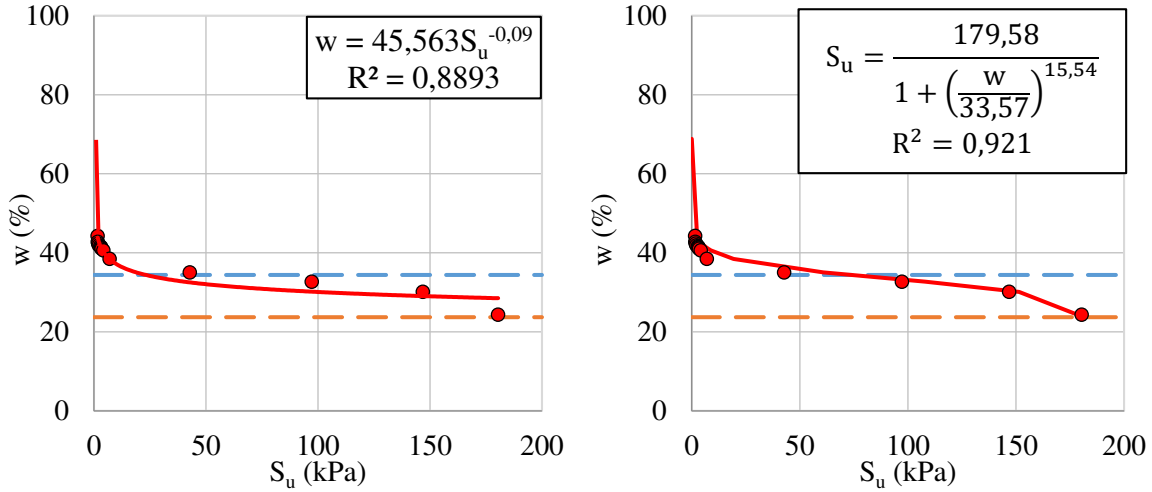



***Figure A.2.5-2.*** *Évolution w-$S_u$ pour les sédiments « AL-CLA » ajustée avec Excel (à gauche) et avec le programme Curve Expert Basic (à droite).*

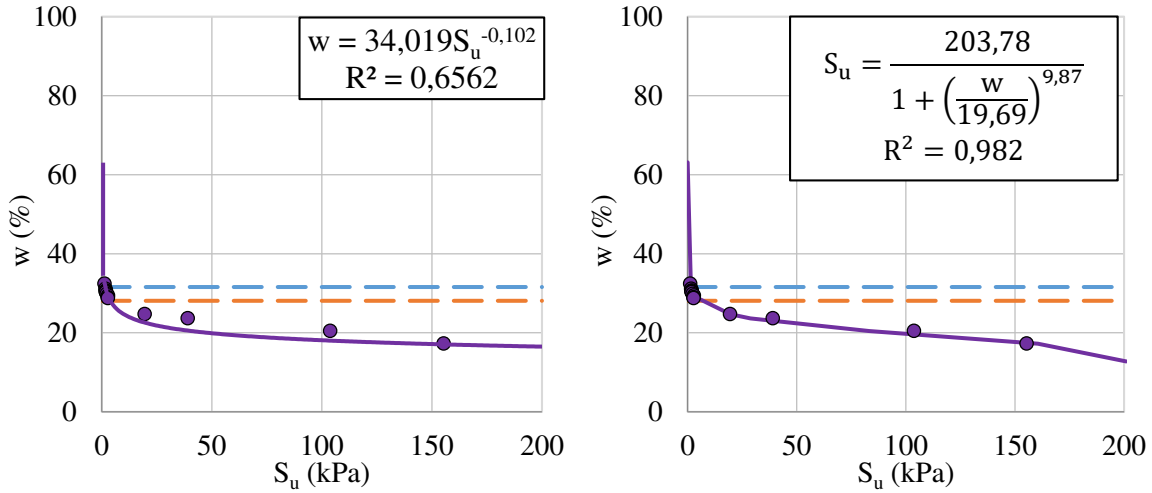



***Figure A.2.5-3.*** *Évolution w-$S_u$ pour les sédiments « AL-SPO » ajustée avec Excel (à gauche) et avec le programme Curve Expert Basic (à droite).*

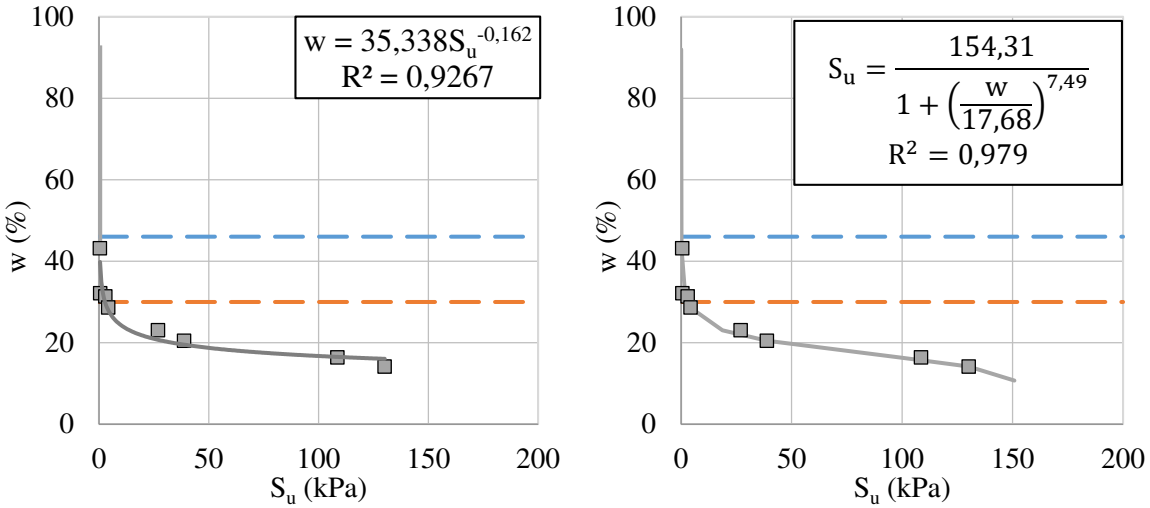



***Figure A.2.5-4.*** *Évolution w-$S_u$ pour les sédiments « AL-ISE » ajustée avec Excel (à gauche) et avec le programme Curve Expert Basic (à droite).*

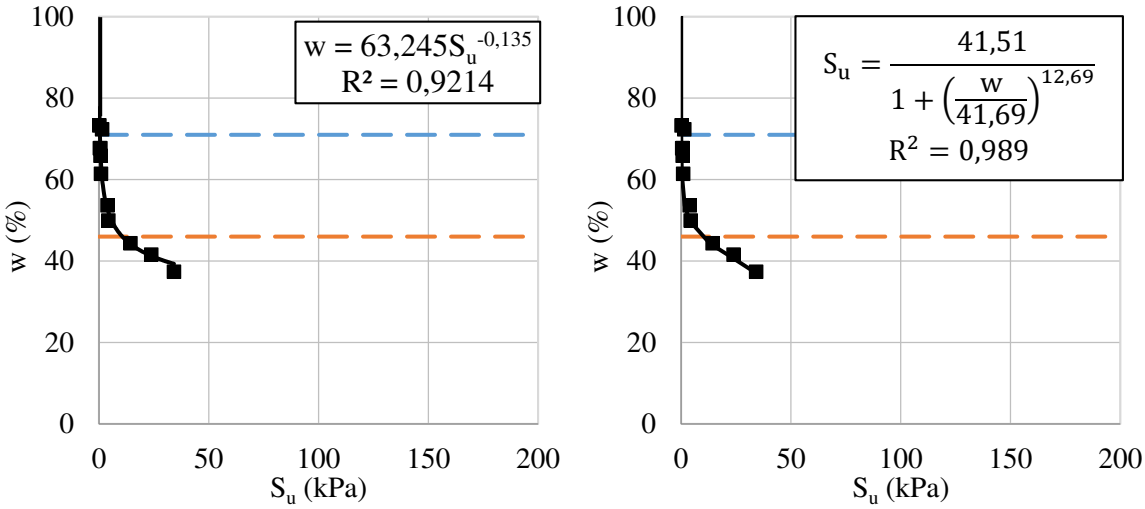



***Figure A.2.5-5.*** *Évolution w-$S_u$ pour les sédiments « GE-RHI » ajustée avec Excel (à gauche) et avec le programme Curve Expert Basic (à droite).*

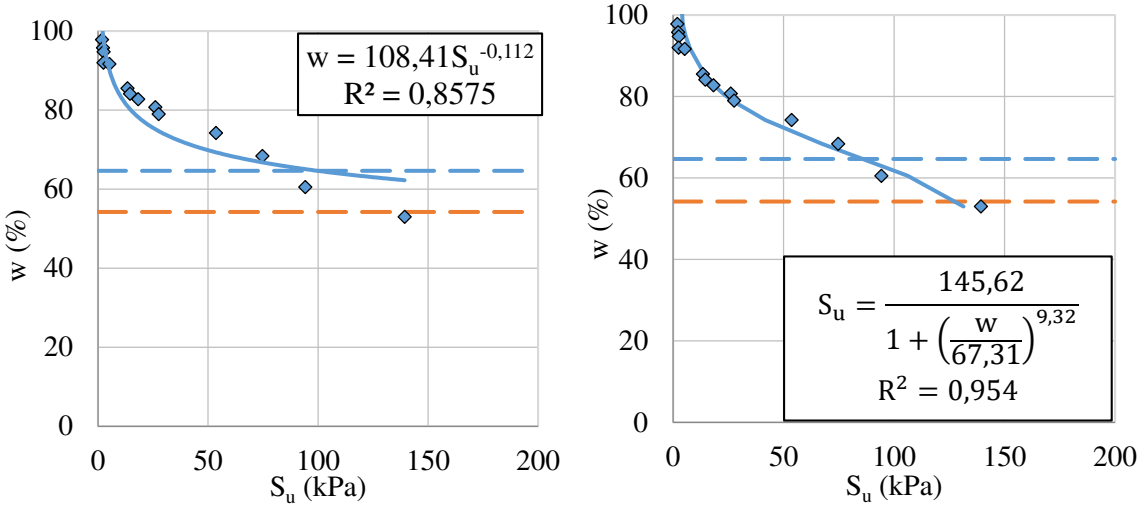



***Figure A.2.5-6.*** *Évolution w-$S_u$ pour les sédiments « BR-SAI » ajustée avec Excel (à gauche) et avec le programme Curve Expert Basic (à droite).*

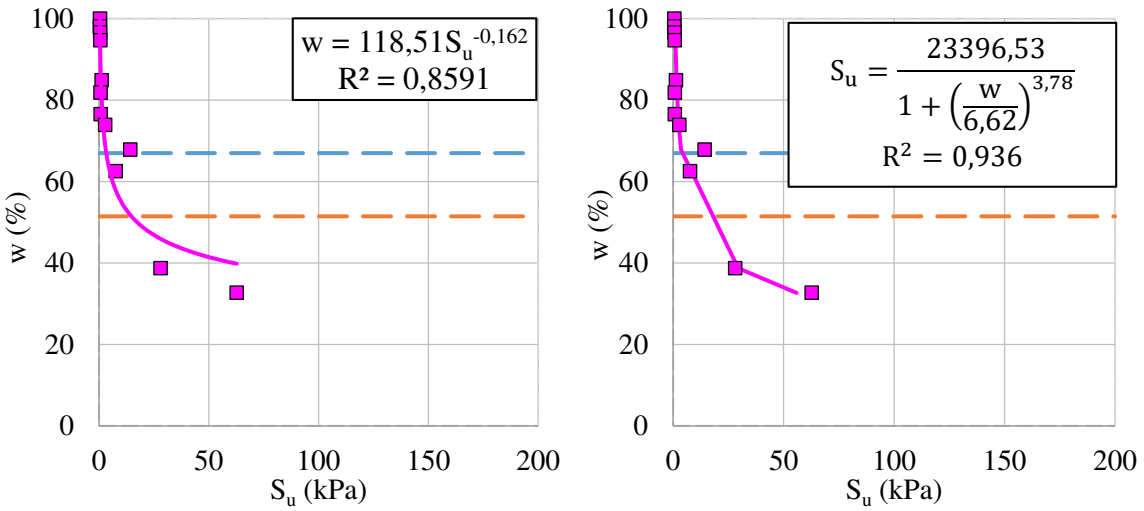



***Figure A.2.5-7.*** *Évolution w-$S_u$ pour les sédiments « HF-DK » ajustée avec Excel (à gauche) et avec le programme Curve Expert Basic (à droite).*

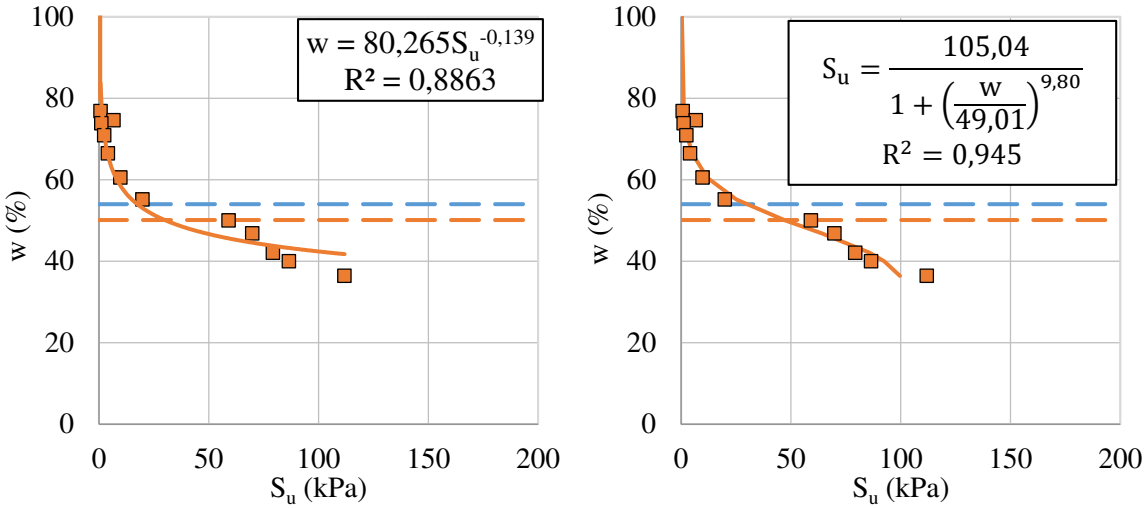



***Figure A.2.5-8.*** *Évolution w-$S_u$ pour les sédiments « BR-RAN » ajustée avec Excel (à gauche) et avec le programme Curve Expert Basic (à droite).*

## *A.2.6. Aspect visuel des sédiments et de la kaolinite pendant le séchage naturel*

*(a) Jour 1* *(b) Jour 15* *(c et d) Jour 71*

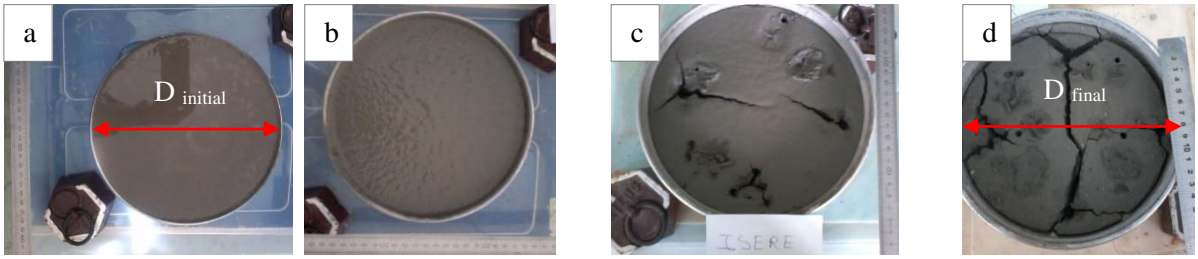
***Figure A.2.6-1.*** *Tassement et retrait des sédiments « AL-FLU ».*

*(a) Jour 1* *(b) Jour 15* *(c et d) Jour 71*

***Figure A.2.6-2.*** *Tassement et retrait des sédiments « AL-SPO ».*

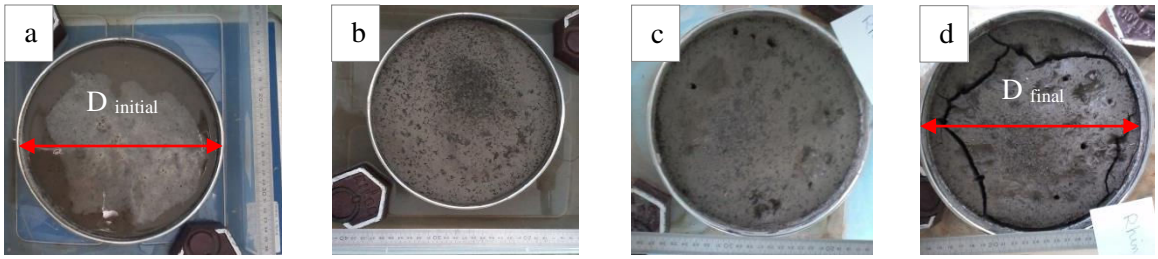
*(a) Jour 1* *(b) Jour 15* *(c et d) Jour 71*

***Figure A.2.6-3.*** *Tassement et retrait des sédiments « AL-CLA ».*




*(a) Jour 0* *(b) Jour 1* *(c) Jour 13* *(d) Jour 27*

***Figure A.2.6-4.*** *Tassement, retrait et état de fissuration des sédiments « AL-ISE ».*

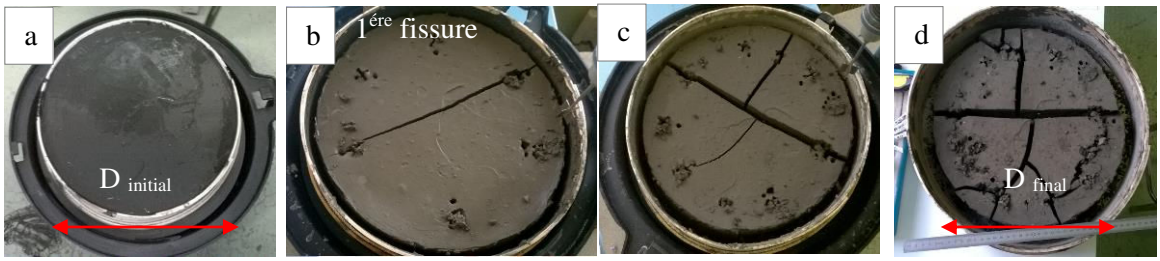



*(a) Jour 0* *(b) Jour 1* *(c) Jour 13* *(d) Jour 27*

***Figure A.2.6-5.*** *Tassement, retrait et état de fissuration des sédiments « GE-RHI ».*

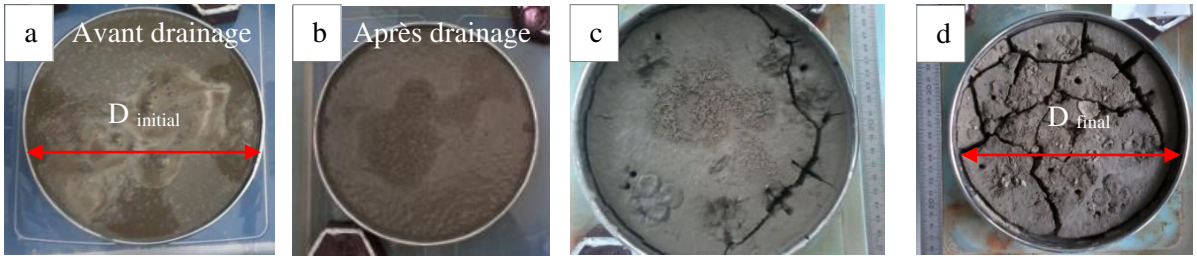
*(a) Jour 0 après drainage* *(b) Jour 15* *(c et d) Jour 71*

***Figure A.2.6-6.*** *Tassement et retrait des sédiments « BR-SAI ».*



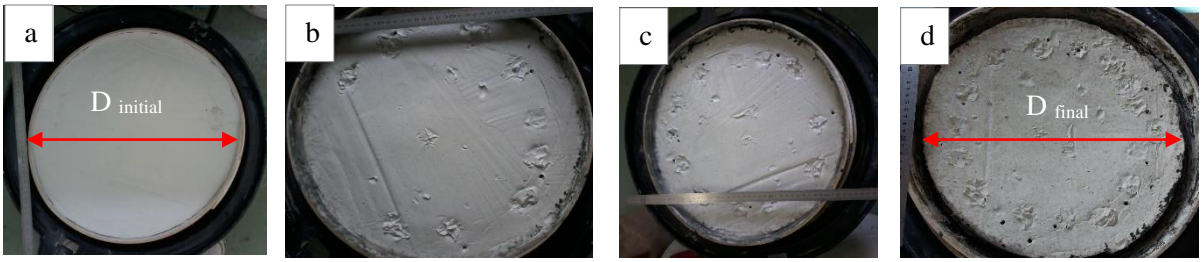

*(a) Jour 0* *(b) Jour 11* *(c) Jour 21* *(d) Jour 42*

***Figure A.2.6-7.*** *Tassement, retrait et état de fissuration des sédiments « HF-DK ».*




*(a et b) Jour 0* *(c) Jour 13* *(d) Jour 33*

***Figure A.2.6-8.*** *Tassement, retrait et état de fissuration des sédiments « BR-RAN ».*




*(a) Jour 2* *(b) Jour 17* *(c) Jour 24* *(d) Jour 39*

***Figure A.2.6-9.*** *Tassement et retrait de la kaolinite.*

## A.3. CRITÈRES D'APTITUDE AU SÉCHAGE NATUREL DES SÉDIMENTS

### A.3.1. Relations entre les paramètres d'état des sédiments

Les sédiments alpins sont représentés en bleu. Les sédiments bretons, du Rhin, de Dunkerque et de la Nouvelle Aquitaine sont représentés en orange.

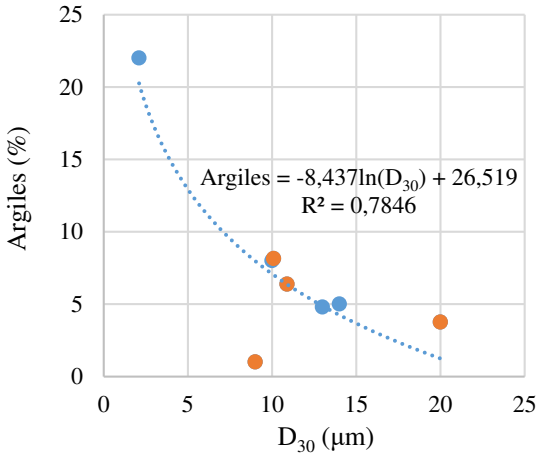



***Figure A.3.1-1.*** *% d'argiles = f(D30).*

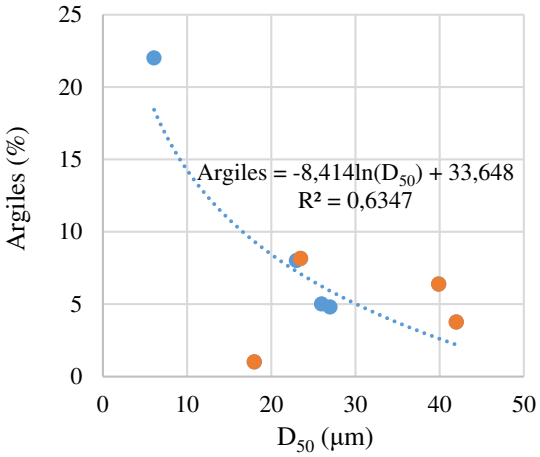



***Figure A.3.1-2.*** *% d'argiles = f(D50).*

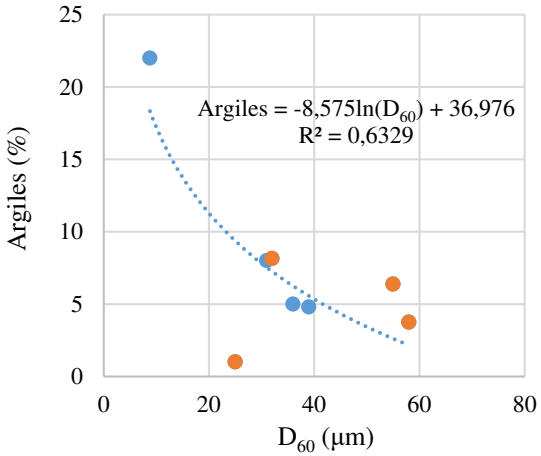



***Figure A.3.1-3.*** *% d'argiles = f(D60).*

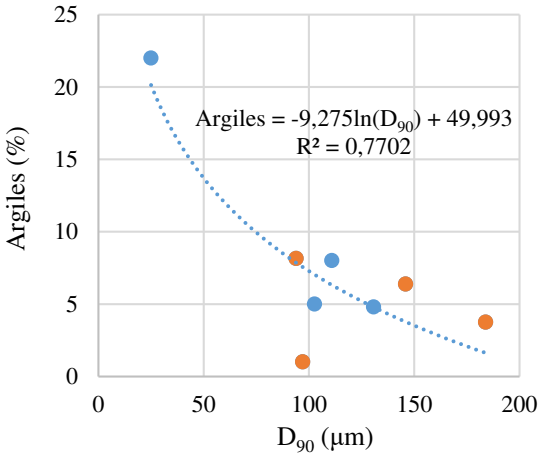



***Figure A.3.1-4.*** *% d'argiles = f(D90).*

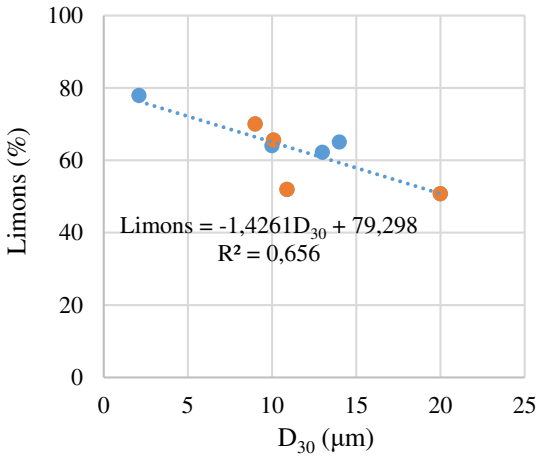



***Figure A.3.1-5.*** *% de limons = f(D30).*

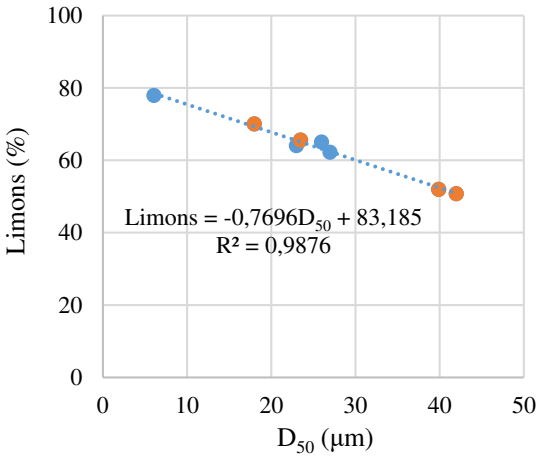



***Figure A.3.1-6.*** *% de limons = f(D50).*

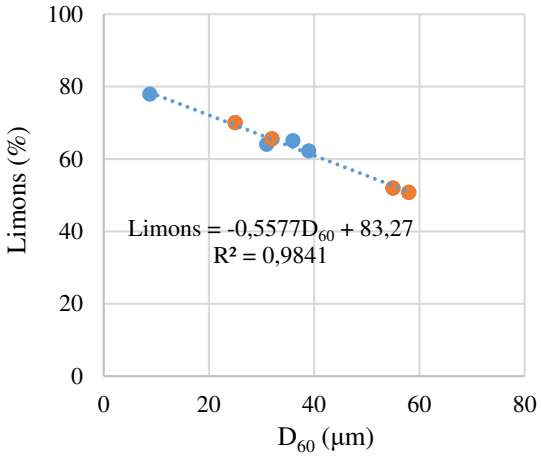



***Figure A.3.1-7.*** *% de limons = f(D60).*

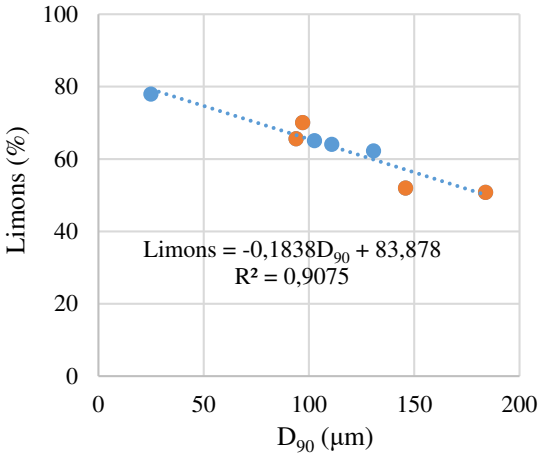



***Figure A.3.1-8.*** *% de limons = f(D90).*

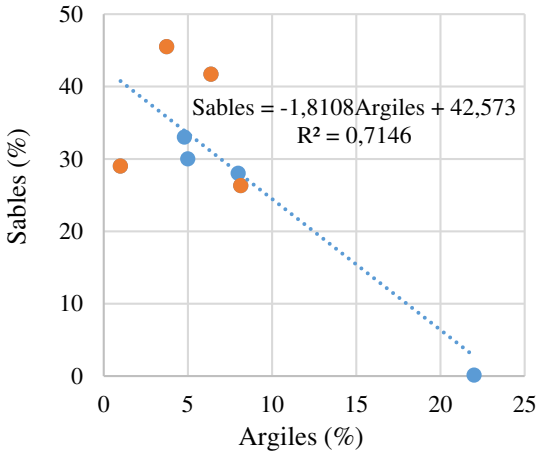



***Figure A.3.1-9.*** *% de sables = f(% d'argiles).*

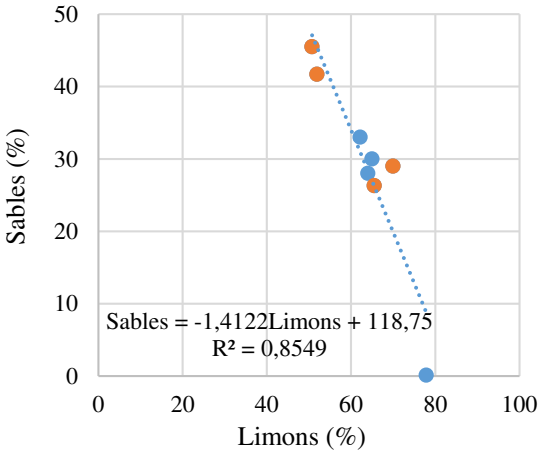



***Figure A.3.1-10.*** *% de sables = f(% de limons).*

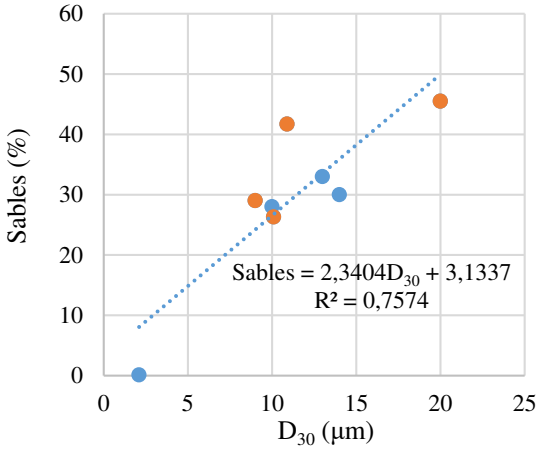



***Figure A.3.1-11.*** *% de sables = f(D30).*

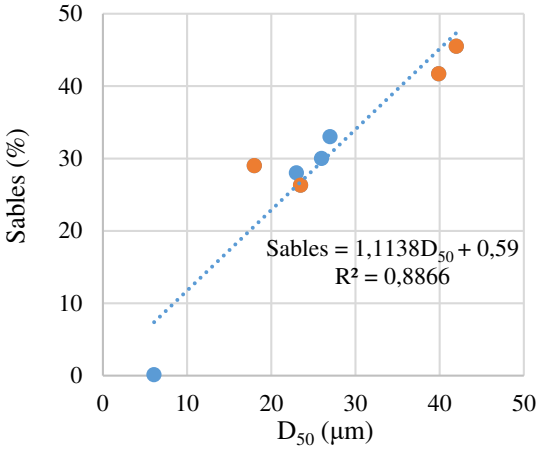



***Figure A.3.1-12.*** *% de sables = f(D50).*

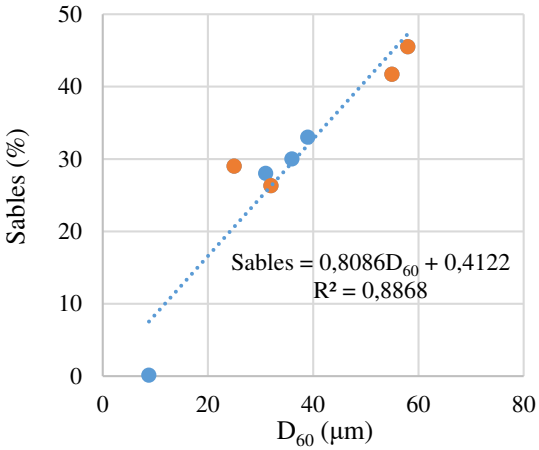



***Figure A.3.1-13.*** *% de sables = f(D60).*

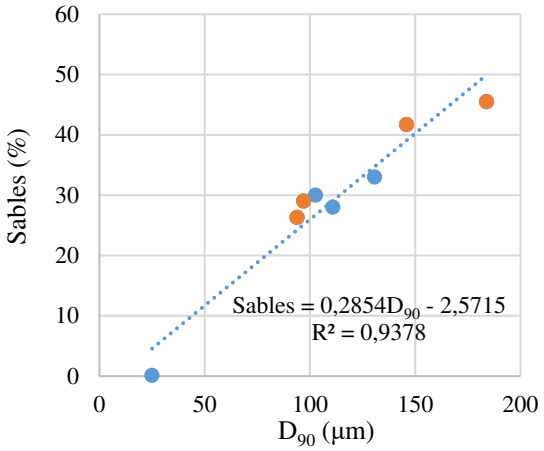



***Figure A.3.1-14.*** *% de sables = f(D90).*

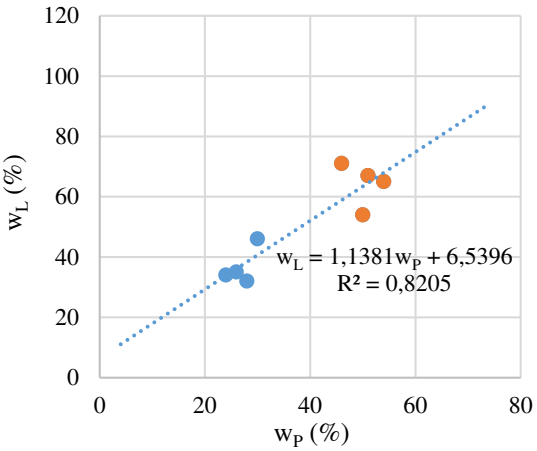



***Figure A.3.1-15.*** *$w_L$ = f($w_P$).*

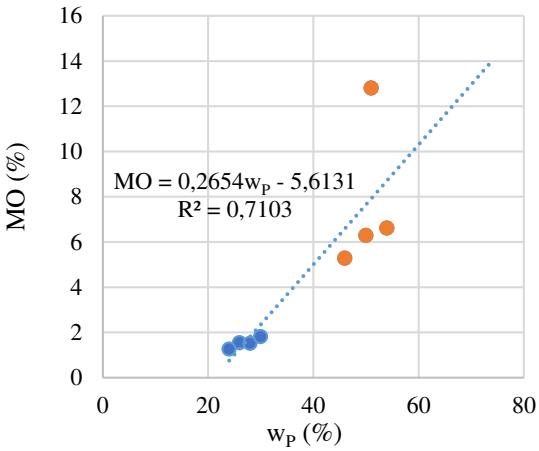



***Figure A.3.1-16.*** *MO = f($w_P$).*

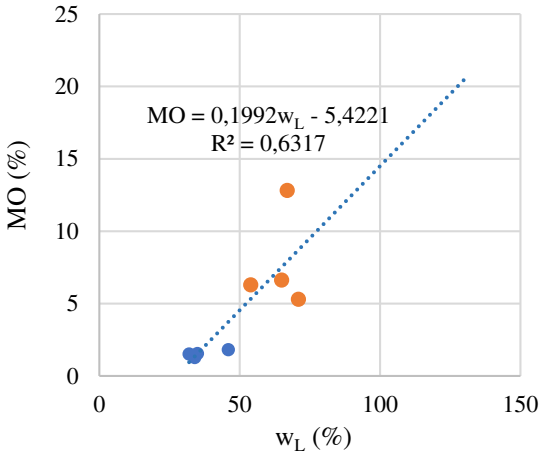



***Figure A.3.1-17.*** *MO = f($w_L$).*

### *A.3.2. Relations entre les valeurs de $S_u$ mesurées et prédites des sédiments étudiés*

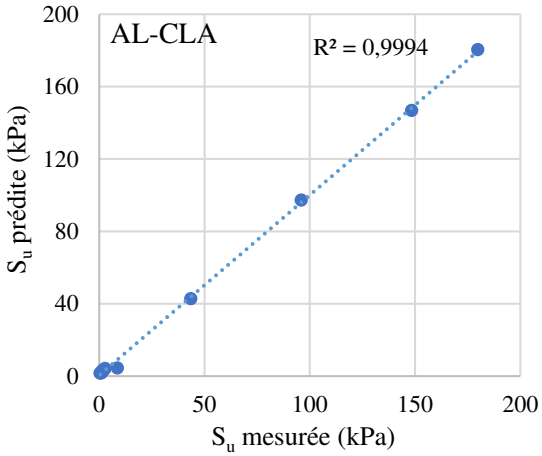



***Figure A.3.2-1.*** *Sédiment AL-CLA.*

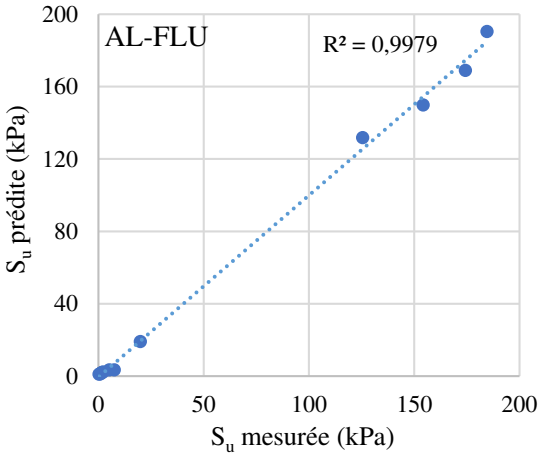



***Figure A.3.2-2.*** *Sédiment AL-FLU.*

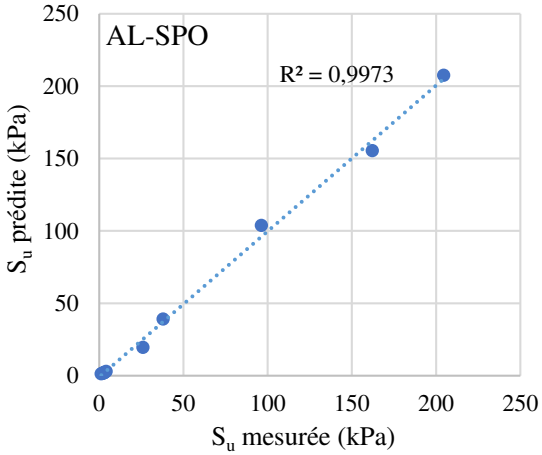



***Figure A.3.2-3.*** *Sédiment AL-SPO.*

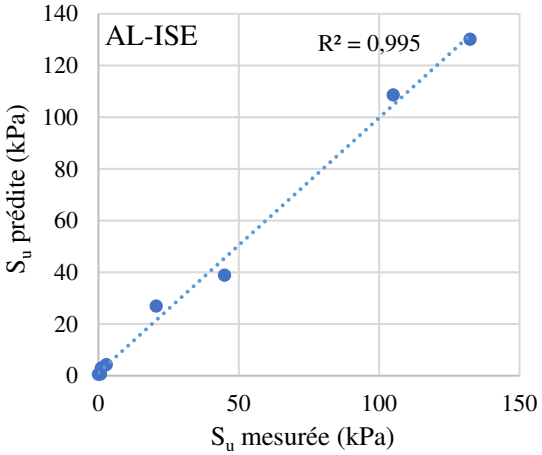



***Figure A.3.2-4.*** *Sédiment AL-ISE.*

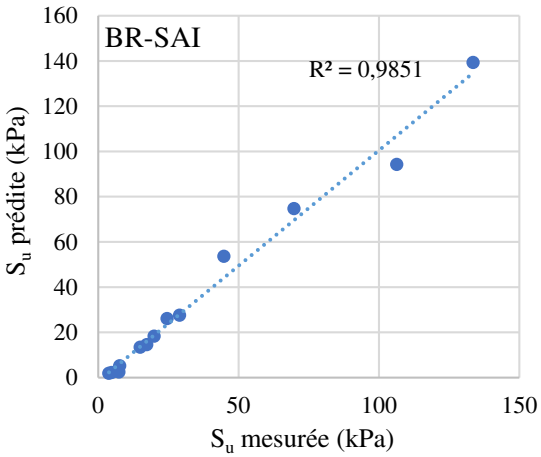



***Figure A.3.2-5.*** *Sédiment BR-SAI.*

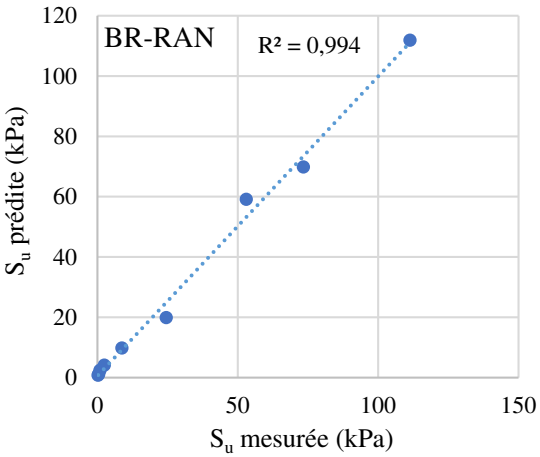



***Figure A.3.2-6.*** *Sédiment BR-RAN.*

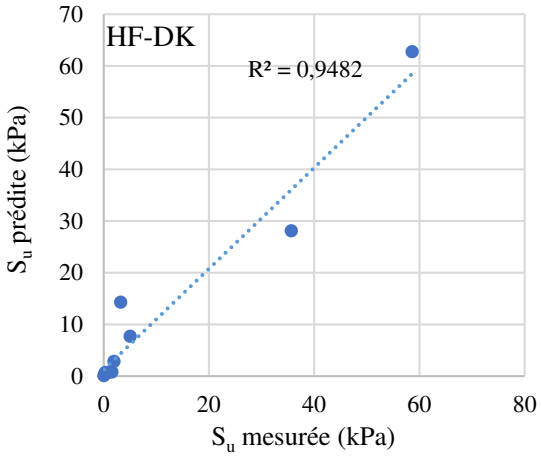



***Figure A.3.2-7.*** *Sédiment HF-DK.*

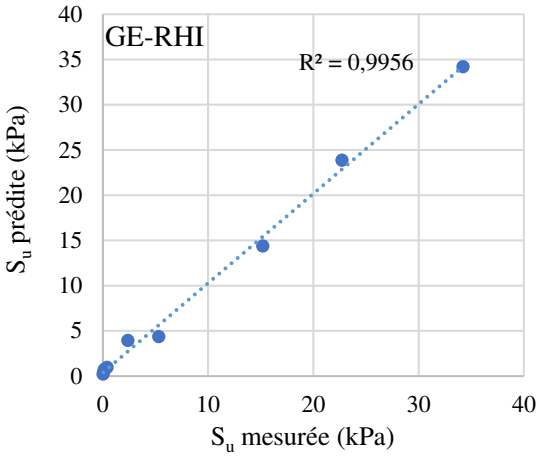



***Figure A.3.2-8.*** *Sédiment GE-RHI.*

### *A.3.3. Relations entre les paramètres et les vitesses de drainage (VD) et d'évaporation (VE)*

Les sédiments alpins sont représentés en bleu. Les sédiments bretons, du Rhin, de Dunkerque et de la Nouvelle Aquitaine sont représentés en orange.

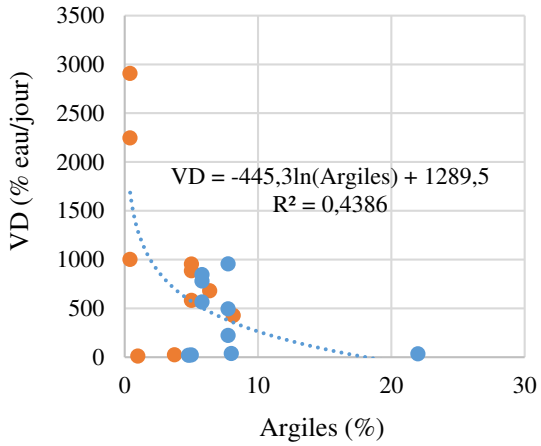



***Figure A.3.3-1.*** *VD = f(% d'argiles).*

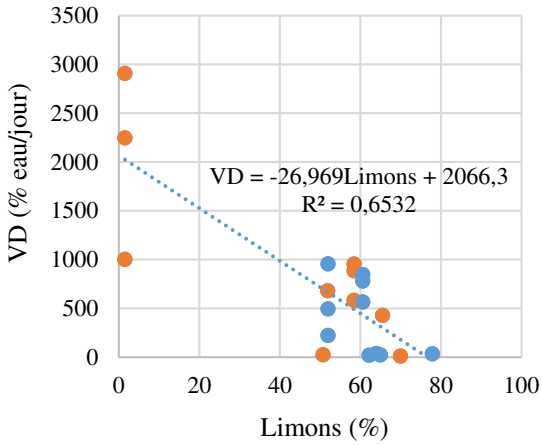



***Figure A.3.3-2.*** *VD = f(% de limons).*

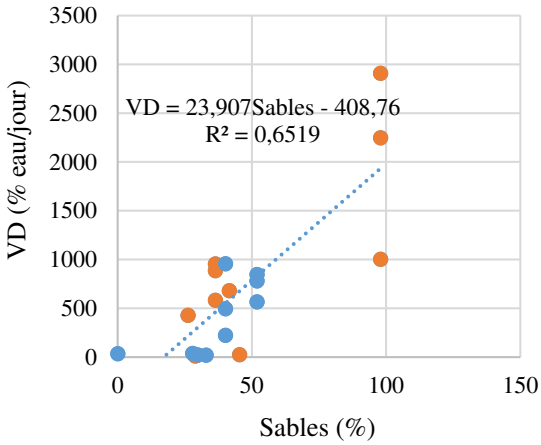



***Figure A.3.3-3.*** *VD = f(% de sables).*

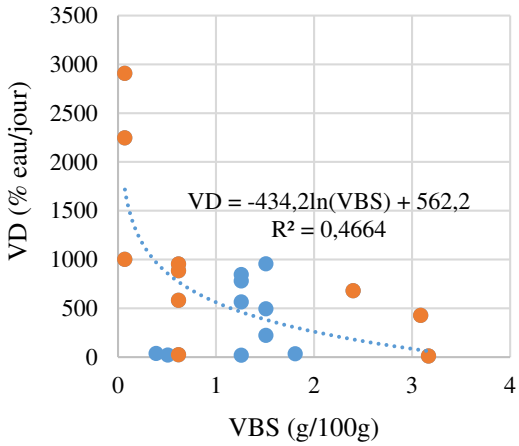



***Figure A.3.3-4.*** *VD = f(VBS).*

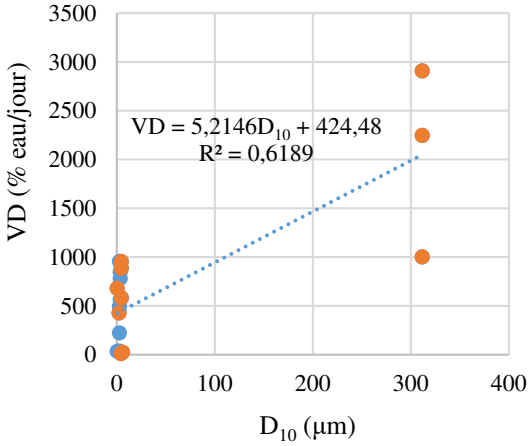



***Figure A.3.3-5.*** *VD = f($D_{10}$).*

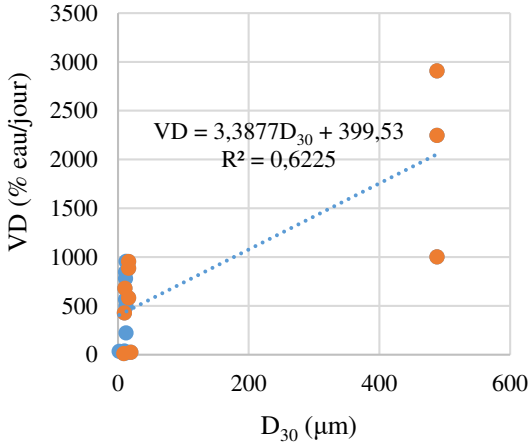



***Figure A.3.3-6.*** *VD = f($D_{30}$).*

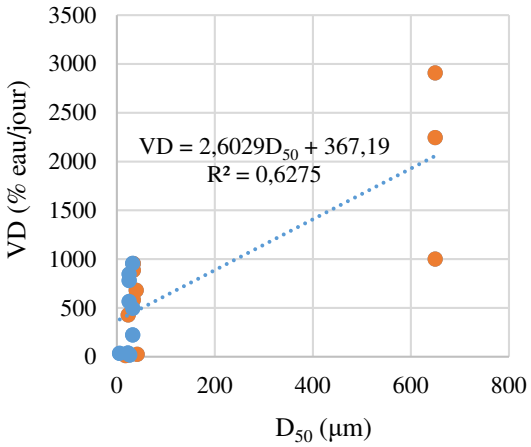



***Figure A.3.3-7.*** *VD = f($D_{50}$).*

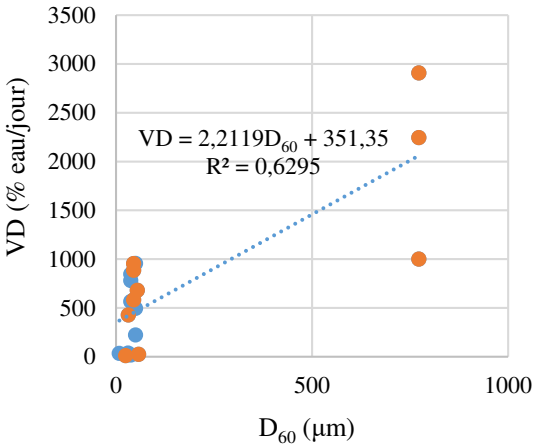



***Figure A.3.3-8.*** *VD = f($D_{60}$).*

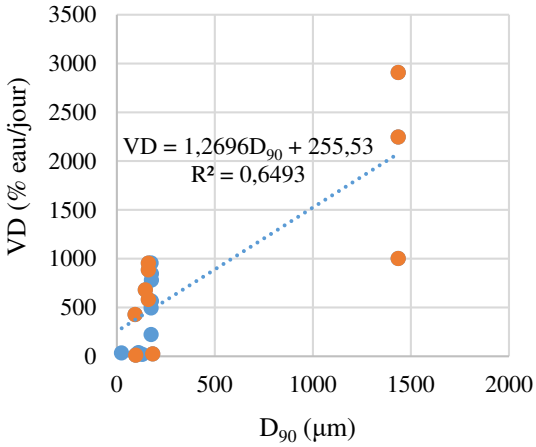



***Figure A.3.3-9.*** *VD = f($D_{90}$).*

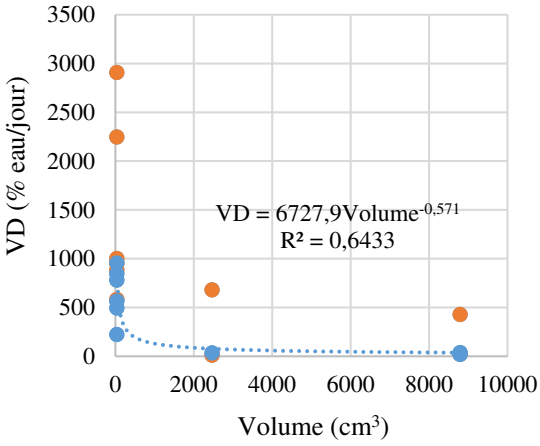



***Figure A.3.3-10.*** *VD = f(Volume).*

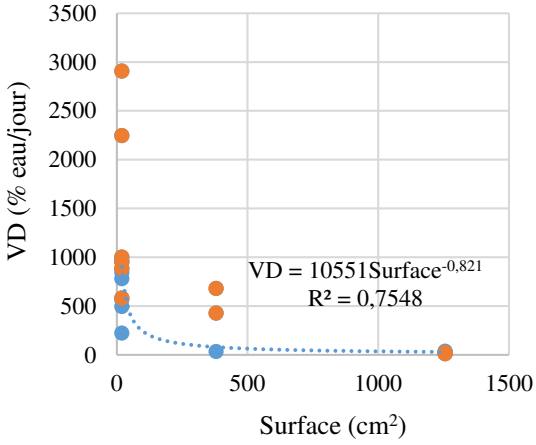



***Figure A.3.3-11.*** *VD = f(Surface).*

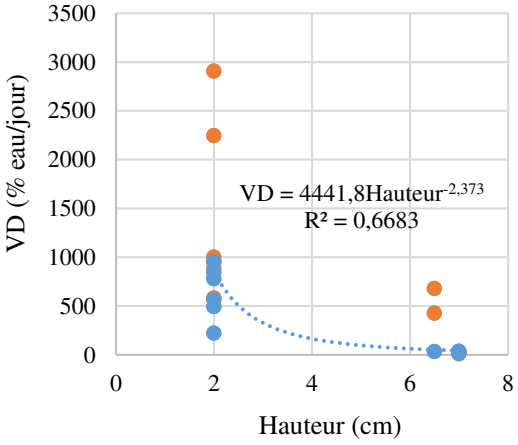



***Figure A.3.3-12.*** *VD = f(Hauteur).*

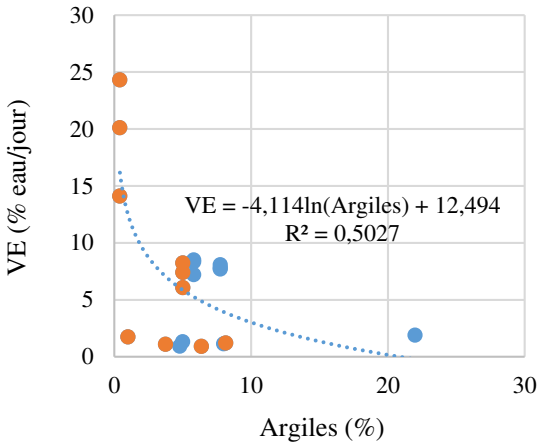



***Figure A.3.3-13.*** *VE = f(% d'argiles).*

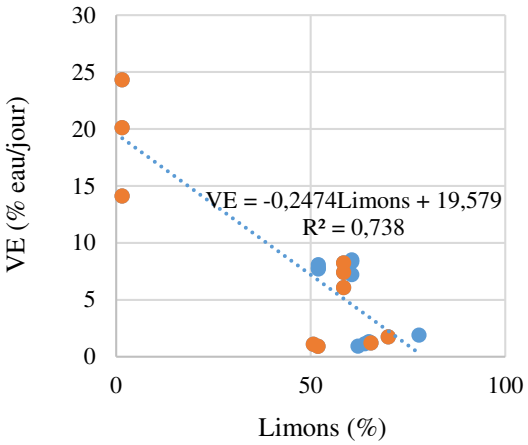



***Figure A.3.3-14.*** *VE = f(% de limons).*

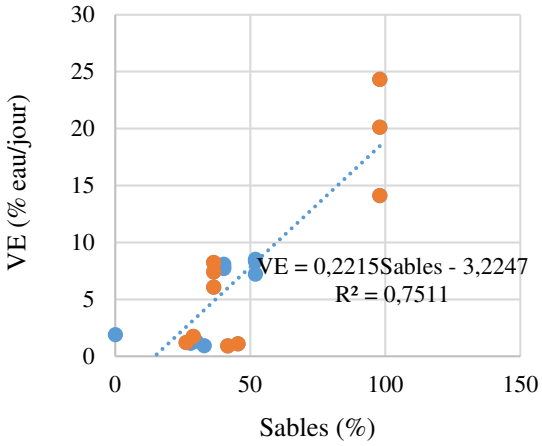



***Figure A.3.3-15.*** *VE = f(% de sables).*

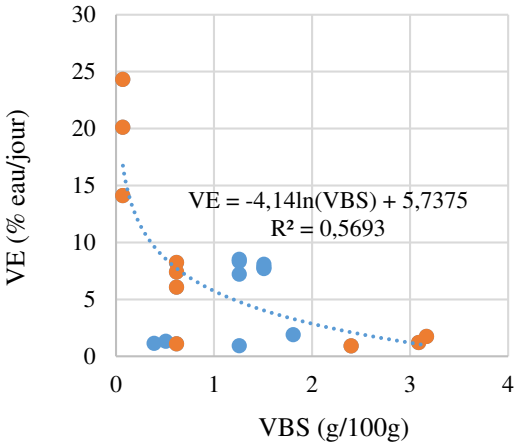



***Figure A.3.3-16.*** *VE = f(VBS).*

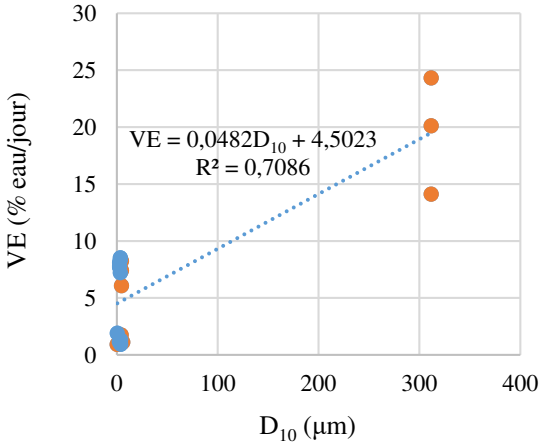



***Figure A.3.3-17.*** *VE = f($D_{10}$).*

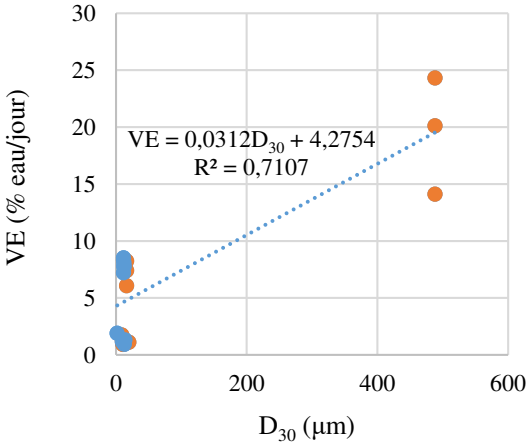



***Figure A.3.3-18.*** *VE = f($D_{30}$).*

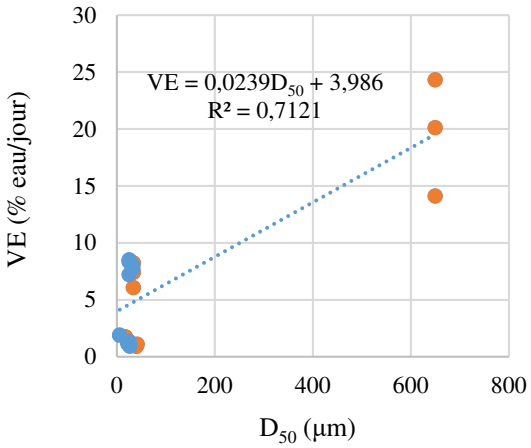



***Figure A.3.3-19.*** *VE = f(D50).*

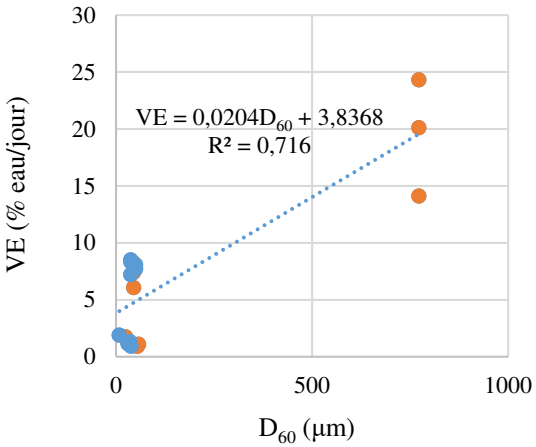



***Figure A.3.3-20.*** *VE = f(D60).*

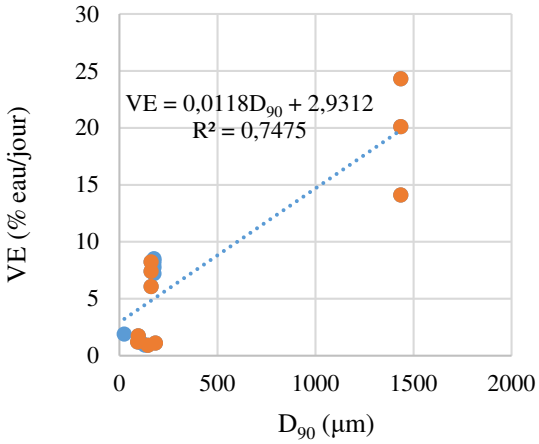



***Figure A.3.3-21.*** *VE = f(D90).*

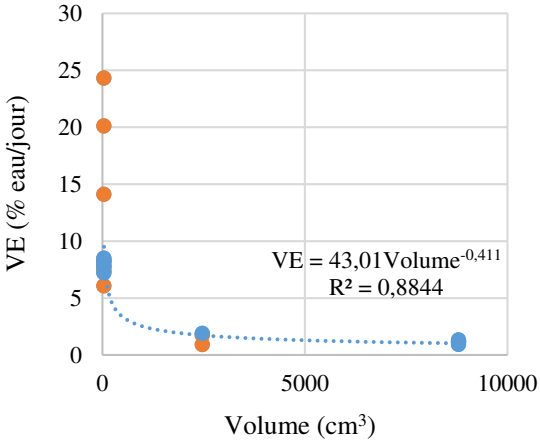



***Figure A.3.3-22.*** *VE = f(Volume).*

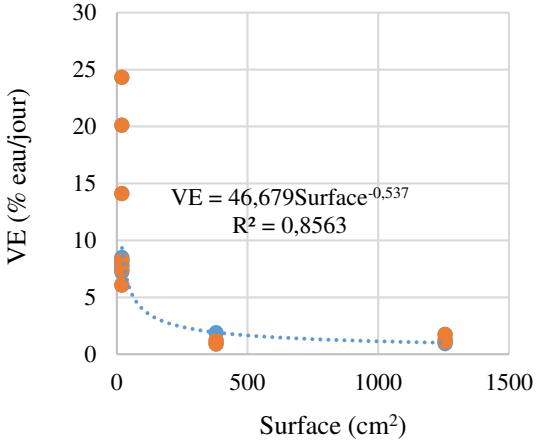



***Figure A.3.3-23.*** *VE = f(Surface).*

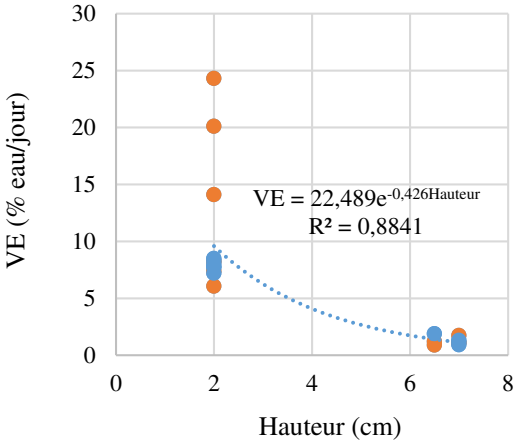



***Figure A.3.3-24.*** *VE = f(Hauteur).*

## *RÉSUMÉ DE LA THÈSE*

Les opérations de dragage génèrent d'importants volumes de sédiments à teneur en eau élevée qui sont difficilement transportables. Toute opération de valorisation ou stockage des sédiments implique de réduire la teneur en eau. Le séchage naturel et la déshydratation mécanisée des sédiments répondent à cette attente. Le séchage naturel des sédiments est la technique de déshydratation la plus économique et la meilleure du point de vue environnemental. Le temps de séchage peut être réduit par des moyens techniques adaptés (retournement, scarification) mis en action par l'application de critères d'aptitude au séchage naturel. Pour ce faire, le processus de séchage naturel a été reproduit à l'échelle du laboratoire à l'aide d'essais d'Égouttage et de Séchage et d'essais de Séchage et de Retrait couplés à des essais scissométriques. Ils ont porté sur neuf sédiments : sept sédiments de barrage, deux sédiments marins et une kaolinite. Une relation $S_u=f(I_P)$ a été établie. Cette relation permet d'obtenir la cohésion non drainée $S_u$ à partir d'une mesure de teneur en eau. Elle permet aussi de définir ou cerner le moment le plus propice au retournement des sédiments à l'aide d'engins spécifiques sur site. Une autre méthode mécanique pour réduire le temps de séchage est suggérée. Il s'agit de pratiquer une scarification des sédiments à l'aide d'outils mobiles, voire robotisés, comme un rouleau scarificateur ou d'une rangée d'outils transportés par un treillis mobile adapté. En ce qui concerne la déshydratation mécanisée des sédiments, une nouvelle méthode de déshydratation en continu a été proposée à partir d'une presse à boues KDS®. Pour des raisons de conception et d'application, la presse à boues KDS® n'a jamais été utilisée pour déshydrater des sédiments. Un plan expérimental a été développé. Il est démontré que la presse KDS® est capable de déshydrater un sédiment fin sableux sans une maintenance démesurée. Des adaptations de la presse KDS® à la déshydratation de sédiments et des améliorations sont finalement proposées.

***Mots-clés :*** Sédiments, Kaolin, Séchage naturel, Déshydratation mécanisée, Processus de séchage, Critères d'aptitude, Drainage, Évaporation, Presse à boues KDS®, Floculation, Teneur en eau, Cohésion non drainée.

## *PhD ABSTRACT*

Dredging operations produce large amounts of sediments with high water content, that are difficult to handle. Storage management and future reuses need to reduce the water content of sediments. Natural and mechanical dewatering of sediments meet this need. The most economic and eco-friendly method of dewatering is natural dewatering. Dewatering period can be reduced with suitable technical means such as adapted plough or scarifier for sediments, operating under defined dewatering criteria. The natural dewatering process was investigated and reproduced at the laboratory scale by performing Natural dewatering test and Shrinkage test coupled with shear measurements (vane shear testing). Nine sediments have been considered: seven dam sediments, two marine sediments and a kaolinite clay. A relationship $S_u = f(I_P)$ has been established. It allows to deduce the undrained shear strength $S_u$ from only a measurement of water content. It allows to state on the right moment to put in operation the specific tools for ploughing and returning over or scarifying sediments stored. These tools can move in the sediments (adapted plough) or roll on the sediments (scarifiying roller) or roll on banks of sediment storage basin. Another way to dewater high water content sediments concerns a mechanical device. Thus a new method of continuous dewatering has been investigated using a prototype machine patented and referenced as KDS® sludge press. This type of press was not adapted for dewater sediments. Full of dewatering tests have been undertaken and performed with this prototype concerning some of sediments (see natural dewatering testing) and sandy clayey mixtures. It has been shown that KDS® press is able to dehydrate sediments including fine sandy sediments without excessive maintenance. Some adaptations and improvements of KDS® press to dewatering sediments are finally suggested.

***Keywords:*** Sediments, Kaolin, Natural dewatering, Mechanical dewatering, Dewatering process, Dewatering ability criteria, Drainage, Evaporation, KDS® press, Flocculation, Water content, Undrained shear strength.