HAL
open science

Méthodologies de valorisation de sédiments mises en oeuvre dans des ouvrages géotechniques en Chine

Xiao Wang

To cite this version:

Xiao Wang. Méthodologies de valorisation de sédiments mises en oeuvre dans des ouvrages géotechniques en Chine. Génie civil. Normandie Université, 2019. Français. NNT : 2019NORMC259 . tel-02520015v2

HAL Id: tel-02520015

https://theses.hal.science/tel-02520015v2

Submitted on 27 Mar 2020

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

Méthodologies de valorisation de sédiments mises en oeuvre dans ouvrages géotechniques en Chine

Présentée et soutenue par
Xiao WANG

Thèse soutenue publiquement le 17/12/2019
devant le jury composé de

M. FRANÇOIS BUYLE BODIN	Professeur émérite, Université Lille 1 Sciences Et Technolog	Rapporteur du jury
M. MARTIN SANCHEZ ANGULO	Maître de conférences, Université de Nantes	Rapporteur du jury
M. ANDRY RICO RAZAKAMANANTSOA	Chargé de recherche, IFSTTAR	Membre du jury
M. WEIPING YU	Professeur des universités, Southeast University Schoom Energy & Env	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

Normandie Université

THÉSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité Génie Civil

Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie

Méthodologies de valorisation de sédiments mises en œuvre dans des ouvrages géotechniques en Chine

Présentée et soutenue par
Xiao WANG

Thèse soutenue publiquement le 17 décembre 2019 devant le jury composé de		
M. François BUYLE-BODIN	Professeur émérite, Université de Lille	Rapporteur
M. Daniel LEVACHER	Professeur émérite, Université de Normandie Caen	Directeur de thèse
M. Andry R. RAZAKAMANANTSOA	Chargé de recherches Dr, IFSTTAR Nantes	Examinateur
M. Martin SANCHEZ ANGULO	Maître de conférences, HDR, Université de Nantes	Rapporteur
M. Weiping YU	Professeur, Université de Nanjing, Chine	Examinateur

Thèse dirigée par Daniel LEVACHER
Laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière M2C UMR 6143 CNRS
Et laboratoire de l'entreprise Jiang Su Kun Ze Technologie, Nanjing, Chine

UNIVERSITÉ CAEN NORMANDIE

ED PSIME

Méthodologies de valorisation de sédiments mises en œuvre dans des ouvrages géotechniques en Chine

Résumé

L'objectif de ce travail concerne la valorisation matière de sédiments marins, par une approche des méthodologies mises en œuvre en Chine. Les procédés de stabilisation et solidification des sédiments retenus sont à base de liants hydrauliques et d'activateurs et destinés à différents travaux de construction.

Le premier chapitre introduit les notions de sédiments en Chine (distribution) et de leur gestion dans les zones côtières (valorisation).

Le second chapitre est tout d'abord une étude bibliographique sur les pratiques menées actuellement sur la valorisation des sédiments à l'aide de liants hydrauliques. Dans cette partie, nous abordons principalement les techniques et leurs principes ainsi que les essais menés en laboratoire. Ceci tient compte du développement et des tendances actuels de la construction sur le littoral de la Chine, et aussi de la gestion actuelle des sédiments (du point de vue réglementaire), objet du première chapitre introductif.

Puis ce second chapitre est consacré à la méthodologie de caractérisation générale des matériaux mis en oeuvre: sédiments et composants. Comment aborde-t-on les caractéristiques physiques et chimiques, la composition minéralogique et la notion d'impact environnemental des sédiments de dragage à traiter et des liants utilisés?

Le troisième chapitre présente la technique de solidification/stabilisation d'eveloppé dans cinq projets pour différents ouvrages géotechniques. Pour chaque cas d'étude, les essais de laboratoire et les essais réalisés en chantier sont décrits. Puis l'analyse des résultats d'essais afin de comparer l'efficacité des différents traitements appliqués est menée précisément sur les effets des matériaux mis en œuvre au sein des ouvrages envisagés.

Le quatrième chapitre conclusif porte sur l'évaluation de l'impact environnemental de la solidification des sédiments et sur l'analyse complète de l'application des sédiments marins traités dans les travaux de la construction, en particulier des avantages sociaux et économiques. Une perspective de travaux à poursuivre, et des besoins en recherche appliquée constituent le dernier chapitre.

Mots clés: valorisation, liant hydraulique, agent, solidification, stabilisation, sédiment marin, gestion.

Abstract

The objective of this work concerns the resource utilization of the marine sediment set, by an approach of the methodologies implemented in China. The processes for stabilizing and solidifying the selected sediments are based on hydraulic binders and activators for various construction work.

The first chapter introduces the concepts of sediments in China (distribution) and their management in coastal areas (resource utilization).

Also, the second chapter is a bibliographical study of current practices on sediment recovery using hydraulic binders. In this section, we mainly discuss the techniques and their principles as well as laboratory tests. This takes into account the current development and trends in construction on China's coastline, as well as current sediment management (from a regulatory perspective), the subject of the first introductory chapter.

The second chapter is devoted to the methodology of general characterization of the materials used: sediments and components. How are the physical and chemical characteristics, mineral composition and environmental impact of the dredging sediments to be treated and the binders used.

The third chapter presents the technique of solidification/stabilization through five projects for different geotechnical works. For each case of study, laboratory tests and on-site tests are described. Then the analysis of the results of tests in order to compare the effectiveness of the different treatments applied is carried out precisely on the effects of the materials implemented within the proposed works.

The fourth concluding chapter focuses on assessing the environmental impact of sediment solidification and on the comprehensive analysis of the application of treated marine sediments in construction work in particular benefits social and economic growth. A perspective of work to be pursued, and needs for applied research are the final chapter.

Keywords: resource utilization, hydraulic binder, agent, solidification, stabilization, marine sediment, management.

Sommaire

I. Introduction générale 11

1.1 Formation et état actuel des sédiments en Chine 11

1.1.1 Formation et distribution des sédiments 11

1.1.2 Impact du dragage sur l'environnement et le développement social 13

1.1.3 Tendances et besoins en construction côtière 15

1.2 Objectifs de recherche 17

II. Bref état de l'art 20

2.1 Teneur en eau d'un sédiment marin 20

2.1.1 Classification selon la teneur en eau 20

2.1.2 Méthode de calcul de la teneur en eau 20

2.2 Propriétés chimiques des sédiments marins 21

2.2.1 Caractéristiques structurelles 21

2.2.2 Rhéologie 22

2.2.3 Couche indurée 22

2.3 Méthodes traditionnelles d'utilisation des sédiments 23

2.4 Technologie de solidification des sédiments 24

2.4.1 Principe de solidification 24

2.4.2 Principe de réaction des ajouts 26

2.4.3 Sol ou sédiment solidifié 36

2.5 Méthode expérimentale pour l'étude d'un sédiment solidifié en laboratoire 37

2.5.1 Méthode de fabrication des éprouvettes de sédiment solidifié 37

2.5.2 Méthode de maturation des éprouvettes 40

2.5.3 Procédure pour l'essai de résistance à la compression non confinée 42

2.5.4 Procédure pour l'essai de cisaillement direct non drainé 42

2.5.5 Procédure pour l'essai relatif la détermination du module de compression ou consolidomètre 45

2.5.6 Procédure pour l'essai relatif à la détermination de la perméabilité 49

III. Applications de la technique de solidification aux sols mous et/ou sédiments 52

3.1 Etude de la construction d'une plateforme ferroviaire-Site de Ningde (Chine) 52

3.1.1 Contexte de la recherche 52

3.1.2 Le projet de Ningde 53

3.1.3 Essais de laboratoire relatifs au projet 60

3.1.4 Etude de la stabilité et organisation au niveau de la construction 69

3.1.5 Test de réception sur site 74

3.1.6 Résumé 74

3.2 Etude de la construction de voies routières-Site de Lianyungang (Chine) 76

3.2.1 Contexte de la recherche 76

3.2.2 Le projet de Lianyungang 80

3.2.3 Essais de laboratoire relatifs au projet 85

3.2.4 Organisation de la construction 94

3.2.5 Test de réception sur site 98

3.2.6 Résumé 100

3.3 Etude de la construction d'une digue-Site de Xiapu (Chine) 102

3.3.1 Contexte de la recherche 102

3.3.2 Le projet de Xiapu 105

3.3.3 Essais de laboratoire relatif au projet 109

3.3.4 Organisation de la construction 117

3.3.5 Test de réception sur site 125

3.3.6 Résumé 127

3.4 Etude de la construction d'un remblai-Site deYushan (Chine) 129

3.4.1 Contexte de la recherche 129

3.4.2 Le projet de Yushan 131

3.4.3 Essais en laboratoire 134

3.4.4 Organisation et suivi des travaux 141

3.4.5 Test de réception sur site 145

3.4.6 Résumé 146

3.5 Etude de la protection de fondations sur pieux éoliens en mer-Site de Binhai (Chine) 149

3.5.1 Contexte de la recherche 149

3.5.2 Le projet de Binhai 152

3.5.3 Essais en laboratoire 158

3.5.4 Organisation et suivi de la construction 175

3.5.5 Test de réception sur site 179

3.5.6 Résumé 187

IV. Conclusion générale 189

V. Perspectives de recherche et besoins futurs 192

References bibliographiques 194

I. Introduction générale

1.1 Formation et état actuel des sédiments en Chine

1.1.1 Formation et distribution des sédiments

Un sédiment (boue au vase) est une argile molle saturée marine qui se dépose dans un environnement aquatique lent et formée biochimiquement. Une couche même faible de sédiments marins est largement répandue dans les zones côtières chinoises[1]. Parmi ces sédiments, les argiles molles de Tianjin, Jiangsu, Zhejiang, Guangdong et ailleurs sont caractéristiques et ont une représentation régionale[2]. De Tianjin-Lianyungang-Shanghai-Hangzhou-Ningbo-Wenzhou-Fuzhou-Xiamen à Zhanjiang, la teneur en eau de ces argiles molles augmente progressivement comme leur compressibilité; la résistance diminue progressivement, et en termes de résistance mécanique et de caractéristiques de déformation, ceci est cohérent avec les caractéristiques des argiles molles en Chine, qui sont élevées au nord et deviennent faibles au sud,[3]. L'étude des argiles molles marines dans ces zones revêt une grande importance pour la construction dans les zones côtières en Chine[4].

Sur le territoire de la province du Jiangsu[5], les trois villes de Lianyungang, Yancheng et Nantong sont principalement composées de plaines côtières et de plaines deltaïques, qui présentent des avantages uniques en termes de ressources de sédiments et d'environnement et dont le potentiel de développement est énorme. Dans les couches de sol peu profondes des zones côtières de la Chine, on trouve des argiles grises (vases) et des sols limoneux atteignant plusieurs dizaines de mètres. Il s'agit de la zone côtière sédimentaire (sédiments) de Yancheng, qui représente 70% de la plage côtière du Jiangsu et 14,3%[6] de plage côtière nationale. Elle est principalement distribuée dans les villes de Sheyang, Dafeng et de Dongtai[7], sur une superficie totale de 4570 km^2. Les plages de Yancheng se développent à un rythme de 15 à 20 km par an, couvrant la zone tempérée chaude et la zone subtropicale septentrionale avec d'excellentes

conditions hydrothermales. La rive de la ville de Nantong fait 227 km, la côte est de 206 km et la zone côtière couvre 13.240 km^2[8], dont la zone au-dessus de la zone de marée s'élève à près de 200 km^2 et la zone intertidale est de 1800 km^2 (y compris près de 670 km^2 de javeaux d'altitude supérieure à zéro mètre). La zone de marée ou mer peu profonde avec moins de 15 mètres de profondeur est de 2670 km^2. Il y a Yonglongsha et Xinglongsha, deux îles situées à l'embouchure du fleuve Yangtsé, couvrant une superficie de 3031 km^2.

Figure 1.1-1. Répartition des argiles molles dans les zones côtières de la Chine

La plupart des sols meubles ou mous d'origine marine des zones côtières chinoises sont des sédiments depuis le Pléistocène supérieur du Quaternaire. Affectée par de multiples immersions et retraits de la mer, une couche de sol meuble limoneux et de vase (sédiment) dominée par le tassement de la phase côtière, s'est formée[9]. Affectée par des facteurs tels que les courants de marée, la partie supérieure forme souvent la "couche dure" d'une épaisseur de 1 à 2 mètres, et le sol limoneux à lentille mélangé avec du silt fin ou un sol limoneux stratifié mélangé avec du silt est placé dans la partie inférieure. Parfois, il y a une fine couche de tourbe dans certaines couches. La couche de sol meuble (argiles molles) présente une large gamme de variations d'épaisseur, une teneur en eau w% naturelle élevée, une porosité interstitielle élevée, une compressibilité élevée, une faible perméabilité, une résistance faible, avec de la thixotropie etc[10]. De

plus, sa chimie sédimentaire, sa structure de sol et sa rhéologie sont également des caractéristiques spécifiques.

1.1.2 Impact du dragage sur l'environnement et le développement social

Avec le développement considérable des projets de dragage en Chine, une grande quantité de sédiments est éliminée chaque année selon les projets de navigation côtière en Chine. La méthode de traitement usuelle consiste à rejeter ces boues sédimentaires dans les eaux profondes. En mettant l'accent sur l'environnement marin, de plus en plus de sédiments sont dragués dans les bassins portuaires et des méthodes d'élimination plus respectueuses de l'environnement sont l'objet de nombreuses recherches.

En prenant pour exemple la province du Jiangsu, le volume de dragage de la première phase de la voie navigable pourvant accueillir des bateaux de capacité de 300.000 tonnes à Lianyungang a atteint 136 millions de mètres cubes[11]. La méthode de traitement habituelle consiste à transporter la boue de dragage vers une zone de décharge marine dédiée et à la déposer en mer. Cette méthode était principalement utilisée pour les ports côtiers en Chine, comme pour la construction des ports de Huanghua, de Lianyungang, de Shenzhen et du nouveau port de Tianjin. La plupart de ces ports ont aménagé des zones de décharge de sédiments près de la côte afin de les rejeter à la mer. Cette méthode non seulement provoque un gaspillage de ressources, mais détruit surtout l'environnement écologique marin.

Les travaux d'entretien des ports et des voies navigables[12] généreront également une grande quantité de boues de dragage. Le volume de sédiments de dragage produit dans la région du delta de la rivière des Perles en Chine atteint 80 millions de mètres cubes par an, et pour les régions de la mer de Chine orientale et de Beihai, la même quantité de sédiments de dragage est produite. Afin de maintenir une capacité normale de décharge des crues et d'assurer la fluidité des voies de navigation intérieures, le nombre de travaux de dragage dans les rivières intérieures est également très

impressionnant[13]. Dans le même temps, afin de garantir la qualité de l'eau et la capacité de stockage des lacs en crue, les travaux de dragage se multiplient. Dans ces projets de dragage, une grande quantité de sédiments de dragage est produite, qui se caractérise par une teneur en eau élevée, une teneur en particules d'argile importante et une résistance très faible. Ces sédiments de dragage sont peu consistants et la circulation de tout véhicule s'avère difficile; les personnes et les engins de chantier ne peuvent pas être supportés en surface. En raison de la perturbation due au dragage, sa résistance est très faible, la valeur de la résistance en pointe obtenue au pénétration statique est inférieure à 200 kN/m^2 et la résistance à la compression non confinée est d'environ 50 kPa. Par conséquent, pour utiliser les sédiments de dragage comme matériau de remplissage, il est nécessaire d'améliorer les caractéristiques en vue de diminuer la teneur élevée en eau et d'augmenter la résistance (compression, capacité portante...).

Les sédiments de dragage étant difficiles à utiliser directement, les méthodes d'élimination conduisent généralement soit à une mise en dépôt à terre ou à un rejet en mer. Ces dernières années, au fur et à mesure que le nombre de projets marins a augmenté, de plus en plus de sédiments ont été rejetées ou déposés. La forte augmentation des rejets de sédiments a non seulement généré un coût de transport important, mais a également nécessité de précieuses surfaces terrestres (occupation des sols) et finalement causé de graves dommages à l'environnement. Dans le même temps, si ces sédiments contiennent des métaux lourds et d'autres polluants, ceci entraîne une pollution secondaire pour l'environnement et les masses d'eau.

Figure 1.1-2. Boues de dragage en sortie de drague pour une mise en dépôt

1.1.3 Tendances et besoins en construction côtière

Depuis l'ouverture de grande travaux côtiers, l'économie de la Chine s'est développée rapidement, en particulier dans les zones côtières orientales qui ont toujours connu la croissance économique la plus active et l'industrialisation et l'urbanisation les plus rapides de Chine. Cependant, avec la croissance démographique et le développement économique rapide, les terrains de construction non agricoles se sont étendus et la quantité de terres cultivées a fortement chuté. La contradiction entre la dégradation de l'environnement, la pénurie de ressources et la demande croissante de besoins de la population, est devenue de plus en plus aiguë. Le linéaire côtier Chinois est important mais environ un quart de la côte continentale est une côte où se dépose de nombreux sédiments, un endroit idéal pour créer des zones d'extension en vue de futures constructions côtières. Par conséquent, l'utilisation de ressources de vasières ou zones sédimentaires pour maintenir un développement global et durable de la société et de l'économie, sera un choix important pour le développement des villes côtières.

Dans les projets de développement et de construction maritimes, le traitement des sols littoraux a toujours été un problème pour la construction de routes[14] pour assurer les transports et la construction d'ouvrages en général. L'acquisition de grandes surfaces et le besoin de matériaux de construction (sols, granulats...) sont les clés de l'ingénierie de la construction. Les constructions utilisent de nombreux matériaux qui consomment une grande quantité de ressources naturelles et de ce fait, l'environnement naturel est sérieusement endommagé. Ces dernières années, en raison des restrictions et du contrôle de la protection de l'environnement sur l'exploitation des matériaux de types sables et sols traditionnels, de nombreuses constructions de grande envergure ont connu la pénurie et l'attente de matériaux pour leur construction et le prix des matériaux a également augmenté. Il existe donc un besoin urgent de nouveaux matériaux alternatifs et/ou écologiques pour remplacer ou suppléer les sables et les graviers traditionnels sur le marché. Si une grande quantité de sédiments ou de boues résiduaires peut être absorbée lors de la construction d'un projet, les quantités de sable et de graviers peuvent

être considérablement réduites, et ainsi l'exploitation naturelle peut être diminuée et l'environnement mieux protégé. En raison de leur teneur en eau élevée, de leur compressibilité élevée, de leur faible capacité portante et de leur faible stabilité[15], l'application en ingénierie d'une grande quantité de sédiments et de boues de dragage est restreinte.

De plus, la méthode classique de traitement des sédiments et/ou boues prend beaucoup de temps ce qui entraîne une longue période de construction, qui ne peut répondre aux exigences d'un développement rapide de constructions côtières de qualité et bon marché.

Dans ce contexte, la recherche de nouvelles technologies de solidification et stabilisation des sédiments marines est «urgente». Le nouveau matériau est issu du traitement des sédiments afin de les solidifier et les convertir en divers matériaux pour des fondations d'ouvrages. Ils sont aussi appelés sols solidifiés ou stabilises[16]. Ils conviennent à la construction de routes, de chantiers de construction et la remise en état des sols. Ils peuvent remplacer les matériaux naturels traditionnels comme les enrochements issus de roches, les granulats (sables, graviers...) de sorte qu'une grande quantité de sédiments marins dragués peut être réutilisée. Ceci permet également de recycler une grande quantité de déchets, ce qui non seulement résout le problème de la consommation excessive de ressources naturelles due à l'exploitation des roches, il résout également le problème des impacts négatifs graves sur l'environnement écologique environnant.

La réduction des transports de volumes de granulats à grande échelle a beaucoup contribué à la conservation de l'énergie et à la réduction des émissions. Ceci résout également le problème du traitement des déchets industriels, permettant le double avantage de l'économie circulaire et de la protection de l'environnement créant une nouvelle ère de réutilisation des sédiments.

1.2 Objectifs de recherche

À l'heure actuelle, le développement côtier des provinces du Jiangsu et du Zhejiang est devenu une stratégie nationale. Ces régions sont vastes et comprennent principalement des vasières et des zones à fort taux de sédiments. Dans la construction d'un ouvrage côtier, une des techniques traditionnelles utilisées nécessitait un remplissage avec des enrochements. Ceci imposait d'extraire massivement des blocs de roches de montagne en l'absence de carrières et les dommages causés pour ces besoins en ressources naturelles en montagne, se sont avérés très graves. Dans le même temps, lors de la construction d'un port en eau profonde, une sédimentation centralisée ou un rejet en mer au large est adoptée pour l'élimination et le traitement des sédiments. La grande quantité de sédiments accumulée ne se limite pas seulement au sédiment lui-même, mais provoque également la diffusion ou l'écoulement de métaux lourds et de matières organiques dans le sédiment, provoquant une pollution secondaire. Et le rejet en mer de sédiments causera également des dommages concentrés au milieu marin. Ces méthodes d'élimination ou de traitement vont non seulement entraver le processus de développement côtier, mais vont également détruire l'environnement écologique dans une certaine mesure.

Par conséquent, il est particulièrement important de résoudre le problème de l'élimination des sédiments dans tout développement côtier et de trouver un matériau à base de sédiments qui puisse remplacer granulats et enrochements. La modification des caractéristiques du sédiment qui ne convient pas aux applications d'ingénierie côtière est d'en faire un matériau de "fondation" pouvant être largement utilisé en ingénierie[17]. C'est-à-dire développer un nouveau type de technologie de solidification des sédiments, créer un nouveau type de matériaux de fondation, tout en intégrant le traitement des déchets, la protection de l'environnement et l'économie circulaire.

Le sol solidifié et/ou stabilisé avec la technologie de solidification des sédiments peut remplacer les granulats et les enrochements dans le processus traditionnel, de sorte qu'une grande quantité de sédiments marins issus de dragage peut être utilisée.

Ainsi, non seulement le fond marin sera dragué à la côte requise, l'eau de mer sera épurée, et le problème du rejet ou du stockage des sédiments sera résolu et une grande quantité de déchets aura été recyclée. Par ailleurs, cette méthode de solidification résout le problème des dommages causés aux ressources naturelles et à l'environnement relatif à l'extraction minière massive des montagnes pour l'obtention des granulats et enrochements.

Aussi, un sol solidifié et/ou stabilisé issu du traitement d'un sédiment avec un agent de durcissement, doit nécessairement respecter les exigences demandées pour la construction de divers types de fondations sur sols meubles[18]. Une fois solidifié ou stabilisé, ce matériau peut être largement utilisé dans la construction de projets sur sols meubles comme dans les projets de terrassement, dans les travaux de renforcement de remblai, dans les routes, dans les voies de transports et les ports. Pour un projet de remblai, il existe de nombreux remblais à édifier en zones basses (proche du niveau de la mer) dans la construction de villes et de ports comme la nouvelle construction d'un terminal, le développement des zones côtières et de projets municipaux dans des villes côtières.

Dans un projet de construction et de renforcement de digue, les sédiments peuvent constituer un bon matériau de base après traitement; les sédiments solidifiés peuvent constituer aussi un bon matériau de base pour des travaux de remblai et de remblayage de routes.

Les principaux axes de recherche et de développement de la technologie de solidification des sédiments dans ce mémoire sont les suivants, voir figure 1.2-1.

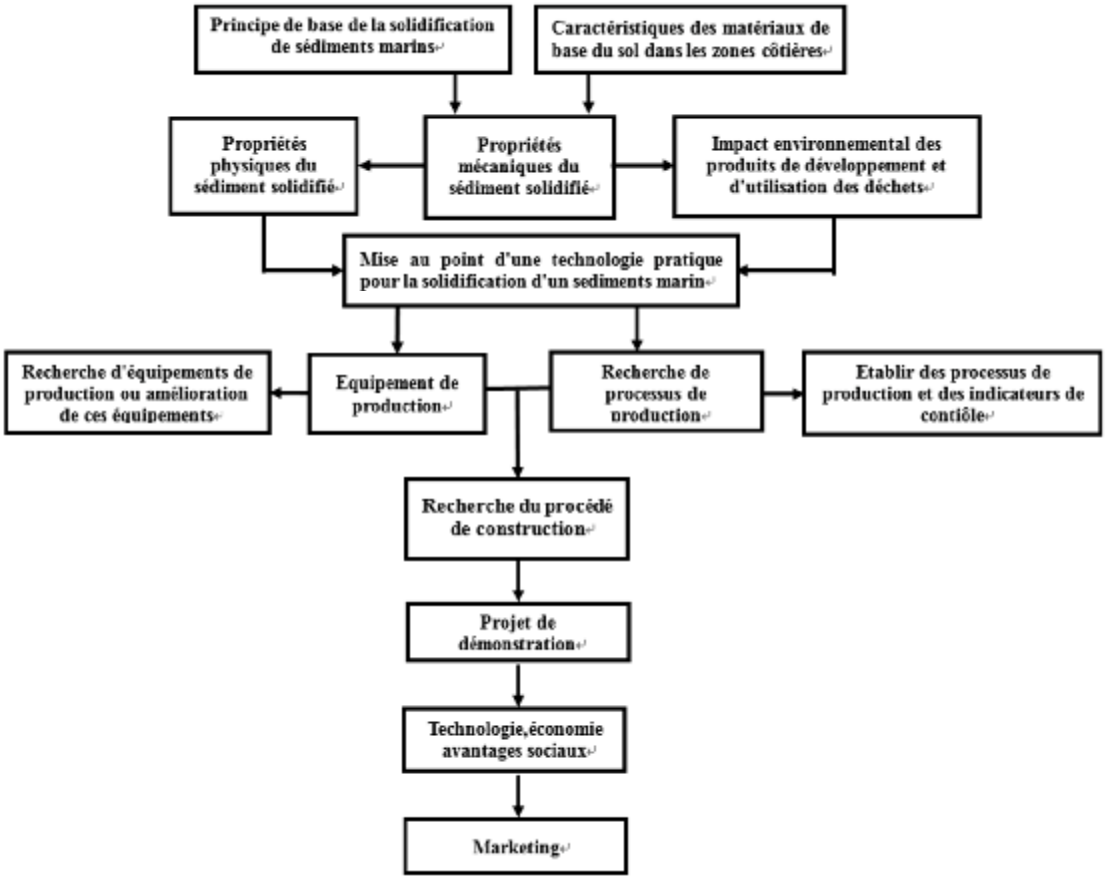

Figure 1.2-1. Principaux axes de développement de la technologie de solidification des sédiments

II. Bref état de l'art

2.1 Teneur en eau d'un sédiment marin

2.1.1 Classification selon la teneur en eau

La teneur en eau du sol représente la quantité d'eau dans le sol et se définit comme étant le rapport entre la masse de l'eau et la masse du minéral solide dans le sol. Le sédiment marin est un sol souvent argileux déposé dans un environnement statique ou à courant lent et formé de manière biochimique. Sa teneur en eau naturelle est supérieure à la limite de liquidité, et sa porosité naturelle est supérieure ou égale à 1,5[19, 20]. Dans le mémoire et selon l'application traitée, le sédiment marin est divisé en un sédiment marin à teneur en eau moyenne ou faible ($\omega \leq 80\%$) et un sédiment marin à haute teneur en eau ($\omega > 80\%$). Quelle que soit leur teneur en eau, ils ont été solidifiés et appliqués dans différents domaines, voir chapitre III.

2.1.2 Méthode de calcul de la teneur en eau

La teneur en eau des sédiments marins est déterminée par la méthode de séchage dans une étuve. Il faut prélever entre 15 ~ 30 g de sédiment représentatif, le placer dans une coupelle, peser la masse totale de la boîte et le sol humide, avec une précision de 0,01 g, placer la boîte dans l'étuve à 105 ~ 110 °C (température constante), laisser à l'étuve pour un temps de séchage d'au moins 8 h, retirer la coupelle de l'étuve, laisser refroidir à la température ambiante et peser la masse totale de la coupelle et du sol sec avec une précision de 0,01 g.

La teneur en eau de l'éprouvette est calculée comme suit et la valeur est précise à 0,1%:

$$\omega=\left(\frac{m_2-m_1}{m_1}\right)\times 100\% \qquad [1]$$

Dans la formule, les notations sont les suivantes:

m_1: masse du sédiment sec (g); m_2: masse du sédiment humide (g).

2.2 Propriétés chimiques des sédiments marins

Les propriétés chimiques des sédiments ont une influence directe sur la détermination d'indicateurs physiques et géotechniques tels que la limite de liquidité, la perméabilité, la résistance au cisaillement ou en compression, etc. La kaolinite, la montmorillonite et l'illite sont les trois minéraux argileux les plus courants rencontrés dans les sols fins; la plupart des sédiments contiennent une variété de minéraux argileux à l'exception de certaines argiles marines qui ne contiennent qu'un seul minéral argileux.

La composition des minéraux argileux qui déterminent la nature des sols meubles (ou mous) marins est appelée ensemble minéral principal. En raison des différentes limites de liquidité notamment de la kaolinite et de la montmorillonite, les caractéristiques des sols meubles marins avec des minéraux principaux différents seront très variables. Parmi les argiles marines du monde entier, la montmorillonite est majoritaire, tandis que dans les sols mous marins autour de la Chine, c'est l'illite ou des minéraux mélangés illite-montmorillonite qui prédominent et qui sont les principaux composants minéraux argileux[21]. Cela a également entraîné le fait que les sols mous marins de Chine sont très différents de ceux d'autres régions du pays.

2.2.1 Caractéristiques structurelles

Les processus physiques et chimiques qui forment la résistance structurelle sont très complexes et étroitement liés aux lois de dépôt ou sédimentation du sol lui-même[22]. En tant que propriété intrinsèque du sol, les caractéristiques structurelles affectent implicitement de nombreuses propriétés d'ingénierie du sol par la variation de sa résistance. L'argile molle marine est généralement déposée dans un environnement statique ou à faible courant, elle est principalement composée de colloïdes d'argile extrêmement fins, accompagnés de micro-organismes, et constitue un sol structurel typique.

La structure du sol comprend la structure et la cimentation[23] qui reflètent la disposition des particules constitutives et la force d'interaction entre les particules.

2.2.2 Rhéologie

Dans le processus de consolidation, lorsque la pression d'eau interstitielle en excès est dissipée et tend vers zéro, la déformation de consolidation principale est terminée, mais la déformation totale ne s'arrête pas[24]. En raison de la rhéologie du squelette du sol, la déformation continue de s'étendre et la déformation par fluage du squelette du sol avec une viscosité sous contrainte provoque une déformation de consolidation secondaire. La déformation de consolidation secondaire de l'argile molle marine est une manifestation importante de ses propriétés rhéologiques. En raison de leur composition physique particulière et de leurs caractéristiques structurelles, les sols meubles ou mous marins présentent une réponse particulière sous l'action de charges externes, et ces sols meubles peuvent produire de grandes déformations sous charge. De plus, sous l'hypothèse de charge constante, la déformation peut également augmenter avec le temps, ceci correspond au fluage d'un sol meuble.

2.2.3 Couche indurée

Les sédiments marins limoneux ou sols limoneux ont longtemps été exposés à un environnement climatique plus oxydant et à des précipitations atmosphériques plus riches dans l'environnement continental. De nombreux dépôts d'oxyde de fer se sont formés par hydrolyse et oxydation et la couleur du sol vire au brun jaune. A mesure que le drainage se produit, la teneur en eau diminue comme la porosité, la résistance du sol augmente également. C'est la formation d'une couche indurée qui largement recouvre une couche de sol mou marin. Un sol mou marin recouvert d'une couche dure est donc une caractéristique typique de la structure d'une couche de sol mou dans les zones côtières chinoises.

2.3 Méthodes traditionnelles d'utilisation des sédiments

Les méthodes traditionnelles d'utilisation des sédiments le plus souvent concernent: le dragage et remplissage de zones marines (remblais sous marins et émergents), la déshydratation physique, les méthodes de traitement de solidification[25].

La méthode de dépôt en remblai: cette méthode consiste d'abord à construire un batardeau dans la zone où le remplissage est nécessaire, puis à le remplir de sédiments et à utiliser ces sédiments comme sol de fondation après un abaissement de la teneur en eau.

L'avantage est qu'il peut être effectué à grande échelle, l'inconvénient est qu'une grande partie des coûts de traitement appliqué aux sédiments sont nécessaires et que le cycle de traitement est long. Même après traitement, la résistance est encore loin des exigences de l'ingénierie des fondations.

La méthode de déshydratation physique est une méthode de consolidation par drainage. C'est la combinaison d'un système de drainage et d'un système de dépressurisation. Les méthodes couramment utilisées sont le pré chargement d'un dépôt, la mise sous vide et la combinaison d'un pré-chargement avec mise sous vide. Cependant, les défauts de la méthode sont liés aux processus compliqués et aux longues périodes de construction nécessaires. La méthode la plus couramment utilisée dans les pays étrangers est la méthode de déshydratation mécanique, qui n'est pas soumise aux conditions climatiques, mais l'investissement ponctuel est plus élevé. Il ne convient pas aux pays en développement disposant de faibles ressources financières et un traitement secondaire est nécessaire pour répondre aux exigences techniques.

Méthode de traitement de solidification : il s'agit de lier les sédiments de dragage à l'aide d'un ajout solidifiant. L'eau et les minéraux argileux contenus dans les sédiments subissent une série de réactions physico-chimiques avec l'ajout afin d'améliorer les propriétés mécaniques des sédiments[26-28]. Cette méthode de traitement peut s'appliquer à une grande quantité de sédiments de dragage, et peut résoudre le manque de sols disponibles avec des caractéristiques géotechniques suffisantes dans certaines zones.

Elle présente les avantages de grande capacité de traitement, d'un temps de traitement court et de coûts rentables.

La méthode de traitement de solidification parait être la méthode appropriée pour réutiliser les sédiments déposés en zones côtières et les sédiments de dragage au stade actuel.

2.4 Technologie de solidification des sédiments

La technologie de solidification des sédiments fait référence à un type d'agent de durcissement qui est préparé en mélangeant plusieurs matériaux inorganiques et organiques, et qui est ajouté et mélangé en une quantité appropriée.

Après une série de réactions d'hydrolyse et d'hydratation, les sédiments présentent en général les caractéristiques suivantes: excellente résistance structurelle, bonnes performances en capacité portante, faible coefficient de perméabilité, forte stabilité de l'eau, etc. C'est une technologie émergente pour le recyclage des sédiments qui répond aux indicateurs de performance d'ingénierie requis. Actuellement, de nombreux ajouts pour la solidification des sédiments ont été utilisés comme les laitiers[29, 30], les cendres volantes de centrales thermiques à charbon[31, 32], les mélanges chaux et ciment[33], les poussières de four à ciment[34-36], les laitiers d'incinération d'ordures ménagères[37], les additifs non conventionnels[38, 39], la lignine[40], les agents actifs alcalins[41-43], la chaux[44], etc.

2.4.1 Principe de solidification

L'agent de durcissement est principalement constitué d'oxyde de calcium actif, d'oxyde de silicium, d'oxyde d'aluminium, de silicate minéral contenant de l'aluminium ou potassium, etc. Il permet de cimenter et d'encapsuler les fines particules des sédiments pour les lier et les agglomérer[45]. En outre, l'activateur exerce un certain effet stimulant sur la substance active dans le sédiment, ce qui peut permettre l'activité des

particules de sédiments elles-mêmes et former en outre une stratégie efficace entre l'agent de durcissement et les particules de sédiment.

Dans certains cas, la réaction d'hydratation produira également une petite quantité d'ettringite. La formation d'une quantité appropriée d'ettringite peut efficacement combler une partie des pores, réduire la déformation, réduire ou arrêter le phénomène de ressuage du sol, réduire la perméabilité et augmenter la résistance à long terme.

Les particules de l'ajout et les particules de sédiments sont liées les unes avec autres pour former une structure compacte[46]. En outre, le matériau solidifié lui-même présente une résistance et une dureté élevées. Après que les produits d'hydratation se chevauchent, la partie non hydratée des particules du matériau solidifié peut également jouer le rôle de remplissage comme micro-agrégat entre les produits d'hydratation et un rôle de support au squelette.

L'activateur stimule en outre l'agent actif afin de mieux promouvoir l'effet de gélification du composé, une partie de l'ingrédient actif peut être conservée et la résistance est augmentée de manière stable sur une longue période. Enfin, une structure interne des sédiments solidifiés en nid d'abeille avec une meilleure résistance est formée.

Le matériau solidifié est principalement composé d'un composant hydraulique et présente une bonne stabilité à l'eau et au gel. Après compactage physique, il peut présenter une bonne résistance générale, une forte stabilité de l'eau et une imperméabilité, et peut être utilisé comme un excellent matériau géotechnique de fondation.

Les oxydes actifs tels que CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3, etc. Qui sont riches en divers déchets industriels actifs (tels que les poudres minérales, les scories d'acier, etc.) peuvent former du silicate de calcium hydraté, de l'aluminate de calcium, de l'acide ferrique et d'autres gels sous l'effet de l'hydratation du ciment et de l'ajout de $Ca(OH)_2$ ou d'autres substances fortement alcalines. Il joue un rôle dans la cimentation avec la solidification du sédiment et une partie des déchets industriels non impliqués dans la réaction est capable de former un "squelette" précoce du matériau de fondation en raison de sa bonne composition en particules et de leur propre dureté.

Les résidus solides industriels[47, 48], les chaux, etc. contenus dans les agents de durcissement de la série des déchets solides industriels peuvent non seulement fournir un environnement alcalin et OH^- suffisant, mais aussi fournir la résistance à la compression initiale au début de la solidification des sédiments. Simultanément, l'activateur salin dans l'agent de durcissement de la série des déchets solides industriels[48] peut fournir une grande quantité de cations métalliques à haute valence au cours du processus d'hydrolyse et peut subir une réaction d'échange d'ions avec les cations à faible valence dans le sédiment pour renforcer davantage la résistance[49-52].

L'activateur fournit également suffisamment d'ions sulfates pour participer à la réaction du silicate de calcium hydraté et de l'aluminate de calcium formés par solidification pour former davantage d'ettringite, ce qui soutient d'une part, l'agrégat du sédiment solidifié des et d'autre part, en raison de la propagation volumique liée à la formation d'ettringite, il est plus apte à remplir et solidifier les pores du sédiment.

2.4.2 Principe de réaction des ajouts

2.4.2.1 Principe de la réaction de solidification d'une poudre minérale issue de laitiers

La poudre minérale issue de laitiers, est une poudre active extrêmement même fine obtenue par trempe à l'eau de laitier de haut-fourneau et traitée par séchage et broyage[53]. C'est un excellent matériau auxiliaire gélifiant aux propriétés hydrauliques potentielles dont les principaux composants sont l'oxyde de calcium, le dioxyde de silicium, l'oxyde de magnésium, l'oxyde d'aluminium et l'oxyde ferrique. Pendant la réaction de solidification, la réaction d'hydratation peut se produire en présence d'eau ou d'un alcali et peut participer à la réaction d'hydratation secondaire. Une grande quantité de cristaux de CH est absorbée pendant la réaction et les grains de CH dans la zone de transition interfaciale deviennent plus petits. En raison de la forte réaction d'absorption de CH, la vitesse de réaction d'hydratation de C_3S et C_2S est accélérée. La force de liaison interfaciale entre le matériau gélifiant et les particules de sédiments et

la structure des pores dans le système, sont améliorées, la compacité globale du sédiment ou sol solidifié est améliorée, augmentant ainsi la résistance du sol ou sédiment solidifié. En d'autres termes, lors de la solidification des sédiments, la résistance initiale du matériau solidifié mélangé à la poudre minérale n'est fondamentalement pas affectée, au stade ultérieur, la résistance du sédiment (ou sol) augmente rapidement en raison de la participation continue de la poudre minérale à la réaction d'hydratation secondaire. Plus la quantité de poudre minérale incorporée est importante, plus la résistance augmente rapidement au stade ultérieur. Cependant, afin de garantir la croissance rapide de la résistance initiale du sédiment ou sol solidifié, il existe une quantité optimale de poudre minérale à utiliser.

Les réactions d'hydratation et d'hydratation secondaire qui se produisent souvent dans les sédiments ou boues solidifiés lors de la solidification sont les suivantes:

- Dans de l'eau ou une solution d'hydroxyde de sodium

$$C_5S_3A+12H_2O\rightarrow\frac{1}{3}C_4AH_{13}+\frac{7}{3}C\text{-}S\text{-}H+\frac{2}{3}C_2ASH_8 \qquad [2]$$

- Dans une solution d'hydroxyde de calcium

$$C_5S_3A+2CaO+16H_2O\rightarrow C_4AH_{13}+3C\text{-}S\text{-}H \qquad [3]$$

- En présence de sulfate de calcium

$$C_5S_3A+2CaSO_4+\frac{76}{3}H_2O\rightarrow 3C\text{-}S\text{-}H+\frac{2}{3}C_3A\cdot 3CaSO_4\cdot 32H_2O+\frac{2}{3}Al(OH)_3 \qquad [4]$$

Il ressort de la formule réactionnelle ci-dessus que la présence de poudre minérale dans la réaction de durcissement peut générer davantage de matériaux gélifiants C-S-H et de composés hydrauliques et renforcer la résistance du sol ou sédiment.

De plus, la réactivité de la poudre minérale est étroitement liée à la finesse du broyage, c'est-à-dire à la surface spécifique de la poudre de minerai. L'indice d'activité[54] de réaction d'une poudre minérale avec une surface specifique de 8000 cm^2/g est supérieur à celui d'une poudre de 6000 cm^2/g de surface specifique, et l'indice d'activité de réaction d'une poudre minérale avec une surface de 6000 cm^2/g est supérieur à celui d'une poudre minérale ayant une surface specifique de 4000 cm^2/g, quel que soit l'âge. Au cours du processus de solidification, le type de poudre minérale

peut être raisonnablement choisi en fonction des besoins. La figure 2.4-1 ci-après montre la relation entre la surface spécifique et l'activité des fines de minerai finement broyées.

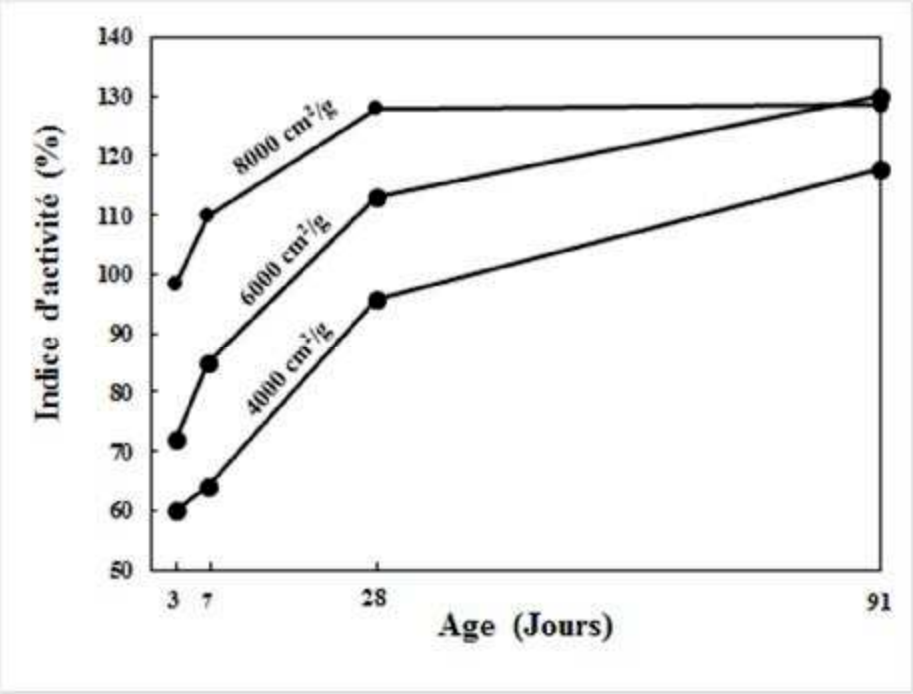

Figure 2.4-1. Relation entre la surface spécifique et l'activité de la poudre minérale d'après

Définition de l'indice d'activité (BSEN 15167-1:2006) Rapport (en pourcentage) entre la résistance à la compression du ciment standard mélangé à 50% et la résistance du mortier mélangé à 50% de laitier de haut fourneau granulé et la résistance du mortier équivalent mélangé à 100% de ciment standard au même âge[55].

2.4.2.2 Principe de la réaction de durcissement du ciment

Le clinker de ciment Portland à usage général, dont les composants principaux sont le silicate tricalcique, le silicate dicalcique, l'aluminate tricalcique et l'aluminoferrite tétracalcique présente les caractéristiques d'une résistance initiale légèrement plus faible[56].

La réaction de durcissement du ciment[57] comprend quatre types de réaction principaux: une réaction d'hydrolyse d'hydratation, une réaction des cendres volantes, une réaction d'échange d'ions et une réaction de carbonatation. D'après l'analyse de la composition d'un sédiment traité, la réaction de solidification au ciment correspond au

deuxième type principal de réaction de durcissement. La réaction d'hydrolyse d'hydratation et la réaction des cendres volantes sont les principales réactions de la solidification du ciment.

Une fois que le ciment et les sédiments ont été mélangés, le minéral du ciment et l'eau dans les sédiments subissent une forte réaction d'hydrolyse et d'hydratation[58], tandis que l'hydroxyde de calcium se décompose en solution et forme d'autres produits hydratés.

Le processus de réaction de leurs composants respectifs est le suivant:

- L'hydratation du silicate tricalcique ($3CaO•SiO_2$)[59] donne du silicate de calcium hydraté et de l'hydroxyde de calcium, facteurs déterminants pour l'amélioration de la résistance du sédiment ou sol:

$$2(3CaO\cdot SiO_2)+6H_2O\rightarrow 3CaO\cdot 2SiO_2\cdot 3H_2O+3Ca(OH)_2 \quad [5]$$

- Le silicate dicalcique ($2CaO•SiO_2$)[60, 61] constitue principalement la résistance à long terme du sol ou sédiment solidifié:

$$2(2CaO\cdot SiO_2)+4H_2O\rightarrow 3CaO\cdot 2SiO_2\cdot 3H_2O+Ca(OH)_2 \quad [6]$$

- La réaction d'hydratation de l'aluminate tricalcique ($3CaO•Al_2O_3$)[62, 63] produit de l'aluminate hydraté au calcium a le taux d'hydratation le plus rapide et favorise la solidification précoce:

$$3CaO\cdot Al_2O_3+6H_2O\rightarrow 3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O \quad [7]$$

- La réaction d'hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique ($4CaO•Al_2O_3•Fe_2O_3$)[64, 65], produit de l'aluminate de calcium hydraté et de la ferrite de calcium hydraté, peut favoriser la résistance initiale du sol ou sédiment solidifié:

$$4CaO\cdot Al_2O_3\cdot Fe_2O_3+2Ca(OH)_2+10H_2O\rightarrow 3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O+3CaO\cdot Fe_2O_3\cdot 6H_2O \quad [8]$$

- Le sulfate de calcium ($CaSO_4$) et l'aluminate tricalcique réagissent avec l'eau pour former des bacilles de ciment qui fixent une grande quantité d'eau libre sous forme d'eau cristalline:

$$3CaSO_4+3CaO\cdot Al_2O_3+3H_2O\rightarrow 3CaO\cdot Al_2O_3+3CaSO_4\cdot 32H_2O \quad [9]$$

Lorsque divers hydrates de ciment sont formés, certains continuent à durcir pour former un squelette dur de ciment, tandis que d'autres interagissent avec le sol ou le sédiment. La forme d'action est résumée par la suite.

a. Réaction d'échange d'ions

L'échange d'ions et l'agglomération affectent la coexistence de $Ca(OH)_2$ et de Ca^{2+} et OH^- dans le colloïde d'hydratation du ciment. Les minéraux constituant l'argile sont des cristaux en forme de plaque ou en forme d'aiguille synthétisés en utilisant du SiO_2 comme squelette. Habituellement, la surface aura des ions Na^+ et K^+. Le Ca^{2+} précipité échange avec le Na^+ et le K^+ du sol ou sédiment pour une adsorption équivalente. En conséquence, une grande quantité de particules de sol ou sédiment forment des agrégats de sédiment solidifié. Du fait que le produit d'hydratation du ciment, $Ca(OH)_2$, a une forte activité d'adsorption, ces agrégats de sol ou sédiment plus en plus gros sont ensuite combinés pour former une chaîne de sol ou sédiment cimenté qui ferme les pores entre les agrégats de sol ou sédiment et forme un lien stable.

b. Réaction de durcissement du ciment

Durant la réaction d'hydratation du ciment, une grande quantité de Ca^{2+} est précipitée dans la solution. Lorsque la quantité de Ca^{2+} dépasse le besoin d'échange d'ions discuté ci-avant, une réaction chimique se produit entre SiO_2 et Al_2O_3 qui constitue le minéral argileux dans un environnement alcalin pour générer une réaction chimique, produit des minéraux cristallins stables insolubles dans l'eau, l'hydrate de chaux acide aluminium de série $CaO•Al_2O_3•H_2O$ et l'hydrate de chaux acide silicique de série $CaO•SiO_2•H_2O$[66].

$$XCa(OH)_2+SiO_2+(n\text{-}X)H_2O \rightarrow XCaO\cdot SiO_2\cdot nH_2O \quad [10]$$

$$YCa(OH)_2+Al_2O_3+(m\text{-}Y)H_2O \rightarrow YCaO\cdot Al_2O_3\cdot mH_2O \quad [11]$$

c. Réaction de carbonatation

Le $Ca(OH)_2$ libre dans l'hydrate de ciment subit une carbonatation avec du CO_2 dans l'eau, absorbant en permanence le HCO_3^- dans l'eau et le CO_2 dans l'air pour former du $CaCO_3$ qui est insoluble dans l'eau. Cette réaction peut augmenter la résistance du sol ou sédiment, mais sa croissance est plus lente et son étendue plus petite. Le rôle du

ciment $Ca(OH)_2+CO_2 \rightarrow CaCO_3+H_2O$ dans un sol ou sédiment solidifié est l'action squelettique du ciment et l'action physico-chimique de $Ca(OH)_2$. Ce dernier fait en sorte que les particules d'argile et les micro agrégats forment une structure agglomérée stable, tandis que le ciment recouvre et unit les agglomérats en un entier solide[33, 67].

2.4.2.3 Principe de la réaction de solidification des cendres volantes

Les cendres volantes sont des cendres fines récupérées dans les gaz de combustion après la combustion du charbon, principalement à partir de centrales au charbon et de chaudières de chauffage central[68, 69]. La composition principale en oxydes est la suivante: SiO_2, Al_2O_3, FeO, Fe_2O_3, CaO, TiO_2, etc. L'activité des cendres volantes provient principalement de l'hydratation du SiO_2 actif (SiO_2 vitreux) et de l'Al_2O_3 actif (Al_2O_3 vitreux) dans certaines conditions alcalines.

Au fur et à mesure que l'hydratation progresse, la réaction d'hydratation se déroule à l'intérieur des granulés, générant davantage d'hydrates et comblant en permanence les vides. Le composant principal du produit d'hydratation, le silicate de calcium hydraté, se présente sous la forme de barres, de réseaux et de types mélangés, ce qui améliore la cimentation entre les particules et augmente la résistance. En même temps, les particules de cendres volantes sont comblées dans l'espace entre les particules de sol ou sédiment en ciment et de nouvelles substances sont formées par hydratation, ce qui bloque le réseau capillaire et rend le sol ou sédiment plus compact.

a. Réaction des cendres volantes

Le produit d'hydratation du système de gélification des scories $Ca(OH)_2$ peut réagir secondairement avec SiO_2 et Al_2O_3 dans les cendres volantes pour former du silicate de calcium hydraté et l'aluminate de calcium hydraté[46]:

$$mCa(OH)_2+SiO_2+(n-m)H_2O \rightarrow mCaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O \qquad [12]$$

$$mCa(OH)_2+Al_2O_3+(n-m)H_2O \rightarrow mCaO \cdot Al_2O_3 \cdot nH_2O \qquad [13]$$

Le silicate de calcium hydraté et l'aluminate de calcium hydraté résultants sont tous deux des composés hydrauliques, qui forment des cristaux entrelacés à la surface des cendres volantes, augmentant ainsi la résistance du sol ou des sédiment solidifié.

Comme les cendres volantes contiennent une certaine quantité de CaO, de MgO et d'autres composants, elles entraînent une certaine propagation du volume du sol solidifié des sédiments au cours du processus d'hydratation des cendres volantes. Par conséquent, il existe une quantité optimale d'addition de cendres volantes.

b. Effet morphologique

Les cendres volantes présentent les caractéristiques suivantes: surface lisse, structure dense, faible surface spécifique interne, faible densité et faible capacité d'absorption de l'eau. Elles ont un effet morphologique sur les sols ou sédiments solidifiés, principalement sous les deux aspects suivants:

- Premièrement, grâce à l'effet de microbilles des cendres volantes, les propriétés rhéologiques du sol ou sédiment solidifié peuvent être modifiées, le coefficient de viscosité dynamique devient plus petit et le sol ou sédiment plus facile à compacter.
- Deuxièmement, la densité des cendres volantes est inférieure à celle du ciment et la structure est dense. Même si l'effet des cendres volantes n'est pas pris en compte, la porosité du sol ou sédiment solidifié peut être réduite.

c. Effet de remplissage en micro-agrégats

Les particules de cendres volantes étant petites, elles ont un effet de remplissage en micro-agrégat dans le sol ou sédiment solidifié et les deux aspects suivants sont à considérer.

- Premièrement, il faut disperser les particules telles que le ciment afin qu'elles ne collent pas les unes aux autres, facilitant ainsi l'hydratation.
- Deuxièmement, il faut affiner la taille des pores du sol ou sédiment à solidifier. L'effet de remplissage des cendres volantes réduit non seulement la porosité, plus important encore, l'ouverture est réduite, ce qui entraîne une réduction significative de la proportion d'ouvertures nuisibles.

2.4.2.4 Principe de la réaction de durcissement de la chaux et du gypse

Après l'ajout de la chaux[70] dans les sédiments, une série de réactions chimiques et physico-chimiques se produit dans la chaux et le sédiment, comprenant notamment une réaction d'échange ionique, une réaction de cristallisation de $Ca(OH)_2$, une réaction

de carbonatation et une réaction des cendres volantes. Une fois ajoutée au sédiment, la chaux est dissociée en ions Ca^{2+} et OH^- avec la participation de l'eau. Ca^{2+} peut échanger des ions avec des ions Na^+ et K^+, de sorte que la couche d'adsorption colloïdale soit amincie[71-73], le colloïde d'argile floculé et la capacité de rétention du sol ou sédiment améliorée, de sorte que le sol ou sédiment obtienne la stabilité initiale de l'eau. La réaction de cristallisation de $Ca(OH)_2$ est que la chaux absorbe de l'eau pour former un réseau cristallin aqueux, c'est-à-dire que les cristaux formés se combinent avec les particules de sol ou sédiment pour former un eutectique qui cimente le sol en un tout et améliore la stabilité du sol ou sédiment en chaux.

$$Ca(OH)_2+nH_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \cdot nH_2O \quad [14]$$

La réaction de carbonatation de $Ca(OH)_2$ est que $Ca(OH)_2$ réagit chimiquement avec le CO_2 dans l'air pour former du $CaCO_3$.

$$Ca(OH)_2+CO_2 \rightarrow CaCO_3+H_2O \quad [15]$$

Le $CaCO_3$ a une résistance et une stabilité à l'eau élevées, et son effet de cimentation renforce le sol ou sédiment à solidifier. La réaction des cendres volantes est la dissociation du silicium actif et des minéraux d'aluminium dans le sol ou sédiment sous l'excitation alcaline de la chaux. Il réagit avec $Ca(OH)_2$ avec la participation de l'eau pour former un ciment aqueux tel que le silicate de calcium et l'aluminate de calcium. Ces ciments changent progressivement de l'état de gel à l'état de cristal, de sorte que la rigidité du sol ou sédiment augmente continuellement et que la résistance et la stabilité de l'eau s'améliorent aussi continuellement.

$$xCa(OH)_2+SiO_2+nH_2O \rightarrow xCaO \cdot SiO_2 \cdot (x+n)H_2O \quad [16]$$

$$yCa(OH)_2+Al_2O_3+mH_2O \rightarrow yCaO \cdot Al_2O_3 \cdot (y+m)H_2O \quad [17]$$

En milieu alcalin, l'ajout de gypse peut efficacement stimuler l'activité potentielle de la micro poudre de laitier et retarder la réaction de solidification du ciment, ce qui favorise la croissance de la résistance du sol ou sédiment solidifié à un stade ultérieur[74,75]. Ceci maintient la plasticité du sol ou du sédiment solidifié et rend difficile la fissuration. Il peut réagir avec l'aluminate de calcium dans le ciment pour

former de l'ettringite, renforcer la résistance du sol ou sédiment solidifié et en réduire le retrait.

2.4.2.5 Activateur

En tant que composant fonctionnellement régulateur de l'agent de solidification des sédiments, l'activateur présente l'avantage d'augmenter considérablement la réactivité des adjuvants minéraux dans l'agent de durcissement et d'accélérer la vitesse de réaction d'hydratation du ciment en cas de dosage extrêmement faible[76, 77]. Selon le principe de son excitation active, il est divisé en type précoce, en type à pH ajusté et en type composite[78]. Selon sa nature, il est divisé en type organique, inorganique et composite. D'après le principe de la réaction de durcissement du matériau durci mentionné ci-dessus, la génération de substances gélatineuses et de produits hydrauliques est une raison importante de l'augmentation de la résistance et, afin de favoriser efficacement la réaction de divers matériaux entrant dans le mélange, il est nécessaire d'ajouter un activateur approprié.

La poudre minérale issue des laitiers et les cendres volantes sont des matériaux à base de ciment typiques pouvant être excités par un activateur pour s'hydrater puis augmenter la résistance. La poudre minérale contient une grande quantité d'oxyde de calcium, de dioxyde de silicium et d'oxyde d'aluminium. Le cristal est principalement composé de deux parties, l'une est une phase vitreuse instable, l'autre est une phase cristalline stable, la phase vitreuse a une certaine activité et la phase cristalline n'a aucune activité. La principale source active de la poudre minérale est donc le corps vitreux du laitier. Il y a deux phases dans la phase vitreuse, à savoir la phase de silicium et la phase de calcium: la phase de silicium est une phase discontinue, l'intérieur est relativement stable tandis que la phase de calcium est instable. Plus la phase de calcium est importante, plus elle est active, mais cette activité est potentielle, ce qui indique que l'interaction entre les molécules minérales est plus forte que celle des molécules d'eau. L'eau ne suffit pas à stimuler l'activité de la poudre de minerai, elle doit donc être activée. La solution alcaline contient une grande quantité d'ions hydroxydes qui vont désintégrer la phase calcique dans la poudre de minerai et libérer la phase de silicium,

laquelle réagit avec les ions hydroxyde pour former un gel de C-S-H et d'autres produits d'hydratation secondaires, lorsque l'activateur contient des ions sulfate, l'ettringite se forme, renforçant encore la résistance du système.

Le composant principal des cendres volantes contient une grande quantité de dioxyde de silicium et d'oxyde d'aluminium, qui ne possède pas ses propres caractéristiques d'hydratation et de durcissement[69]. Il a une carence naturelle en calcium et doit produire du silicate de calcium hydraté et d'aluminate de calcium hydraté sous l'action de l'hydroxyde de calcium produit par une réaction d'hydratation.

Par conséquent, la réaction des cendres volantes se produit très lentement, en s'appuyant simplement sur l'hydratation du ciment pour répondre à ses besoins, il est difficile de stimuler une activité précoce, un activateur efficace est nécessaire pour faciliter la réaction rapide des cendres volantes. L'essence de l'activateur pour stimuler l'activité des cendres volantes consiste à renforcer l'effet corrosif sur le corps vitreux lors de la réaction d'hydratation et à améliorer la capacité de réaction positive de l'hydratation. A l'heure actuelle, les méthodes d'excitation active des cendres volantes et des poudres minérales en Chine comme à l'etranger comprennent principalement le broyage physique, l'excitation des alcalis, l'excitation du sel, etc.

En plus des adjuvants minéraux, un activateur est ajouté pour stimuler l'activité. Lors du processus d'hydratation du ciment, une petite quantité d'activateur précoce est également nécessaire, ce qui non seulement accélère la vitesse d'hydratation du ciment, mais favorise également la réaction des adjuvants minéraux.

Selon le principe d'excitation de l'activateur donné ci-avant et un grand nombre de conclusions issues de la recherche afin de garantir pleinement la réaction de durcissement de plusieurs types de matériaux tels que le ciment, les poudres minérales et les cendres volantes, dans ce mémoire, plusieurs types d'activateurs comme le silicate de sodium, le sulfate de sodium et le formiate de calcium ont été sélectionnés. Et tout aussi les variétés spécifiques d'activateurs dans différents agents de solidification l'ont été en fonction de l'applicabilité de différentes teneurs en eau des sédiments marins.

Différents activateurs ont donc été choisis pour les sédiments marins selon différentes teneurs en eau.

2.4.3 Sol ou sédiment solidifié

L'incorporation de l'ajout solidifiant agit comme un moyen de liaison cohérente entre les particules du sol ou sédiment et en améliore les propriétés mécaniques par une action physique et chimique. Sur site, le sol solidifié devient une couche de base semi-rigide et la structure de la couche ainsi formée présente une performance stable[79] et une bonne stabilité de l'eau, une fissuration difficile, de bonnes propriétés mécaniques, une bonne stabilité au gel-dégel[80] et un faible coefficient de perméabilité. Ce sol ou sédiment solidifié est un nouveau matériau de génie civil de haute qualité. La résistance mécanique du sol ou sédiment solidifié est principalement due aux trois effets décrits par la suite.

2.4.3.1 Réaction chimique

Le liant hydraulique dans l'agent de durcissement réagit chimiquement avec l'eau pour former un produit d'hydratation gélifié, en forme d'aiguille ou de feuilletage, tel que du silicate de calcium hydraté, de l'aluminate de calcium hydraté, du sulfoaluminate de calcium hydraté ou de l'hydroxyde de calcium. Le produit d'hydratation gélifié est cimenté et lié à de fines particules dans le sédiment, et le produit d'hydratation cristallin d'hydroxyde de calcium réagit avec le minéral argileux actif dans le sol ou sédiment pour former un cristal en forme de feuille, fibreux ou en forme d'aiguille. Ces produits d'hydratation sont entrelacés pour améliorer la connexion entre les ions du sol et former une structure de réseau stable dans le sol ou sédiment, ce qui rend la structure du sol ou sédiment solidifié plus stable.

2.4.3.2 Echange d'ions

En raison de l'adsorption sélective et de l'ionisation par hydrolyse des particules du sol ou sédiment, la surface de l'argile présente une charge négative: lors de l'interaction avec la solution aqueuse, les cations à faible valence tels que le Na^+ et le

K^+ adsorbés à la surface peuvent échanger les cations produits par une réaction d'hydratation et une ionisation de l'agent de durcissement.

L'échange de cations fait passer les ions adsorbés à la surface des particules de sol ou sédiment de monovalents à divalents ou à valence élevée, la couche électron-électron diffusée est comprimée, l'épaisseur est réduite, l'épaisseur du film d'eau adsorbé à la surface des particules de sol ou sédiment est réduit et les particules de sol ou sédiment deviennent plus proches les unes des autres. Les particules sont plus facilement comprimées.

2.4.3.3 Effet de remplissage

Une fois que l'agent de durcissement a été ajouté à aux sédiments, la réaction d'hydratation provoque la propagation de la solidification et produit un compactage à l'intérieur de la structure du sol. En particulier, la formation d'une substance expansible en volume peut compenser le séchage en volume et le retrait du matériau solidifié résultant de la consommation d'eau par le ciment du sol ou sédiment pendant le processus de réaction, réduire la porosité du sol ou sédiment solidifié et améliorer la résistance et la durabilité du matériau solidifié. Le sol ou sédiment solidifié devient un excellent matériau de fondation qui peut être utilisé dans de nombreux domaines techniques en lieu et place de sols usuels et granulats comme dans la construction de fondations sur des vasières ou sites en mer, la construction de routes, de postes à quai et de terrains portuaires, les barrages et ouvrages de protection côtière.

2.5 Méthode expérimentale pour l'étude d'un sédiment solidifié en laboratoire

2.5.1 Méthode de fabrication des éprouvettes de sédiment solidifié

2.5.1.1 Matériel de base pour le moulage d'éprouvettes

L'équipement nécessaire au moulage en laboratoire pour la solidification des sédiments comprend les matériaux et/ou matériels suivants: cuvettes en plastique ou en

aluminium, raclette, vaseline, moule de diamètre et hauteur égales à 50 mm destiné à l'essai de compression, boîte de polymérisation standard, cellule annulaire de cisaillement (diamètre 61,8 mm et hauteur 20 mm), marteau en caoutchouc, plaque de verre épaisse, balance électronique de précision de 0,01 g.

Figure 2.5-1. Petits matériels pour les opérations de moulage en laboratoire

2.5.1.2 Mesure de la densité ou masse volumique du sédiment

Tout d'abord avant tout mélange, il faut appliquer une petite quantité de vaseline sur la paroi interne du moule pour l'essai de compression simple et de la cellule annulaire pour l'essai de cisaillement direct, à utiliser.

La détermination de la masse volumique du sédiment est nécessaire. La cellule annulaire est placée à plat sur la plaque de verre et leur masse totale est mesurée soit m_1 (g). Puis on remplit la cellule annulaire avec le sédiment et on arase l'excès de sédiment. On pèse la masse totale de la cellule remplie soit m_2 (g). Le calcul de la masse volumique du sédiment ρ (g/cm^3) est donné par la formule suivante:

$$\rho=\frac{m_2-m_1}{60} \qquad [18]$$

S'il est nécessaire d'ajuster la teneur en eau du sédiment d'origine, la masse volumique après ajustement de la teneur en eau doit être mesurée à nouveau selon cette méthode.

2.5.1.3 Mélange homogène

Tout d'abord, une certaine quantité de sédiments est mise dans un récipient pour effectuer le mélange, puis l'agent de durcissement pesé avec précision est versé dans le

sédiment. Le pétrissage et le mélange du sédiment et de l'agent de durcissement en poudre sont répétés par agitation manuelle jusqu'à ce que la poudre de l'agent de durcissement soit complètement integrée au sédiment. L'appréciation est principalement faite à partir d'une inspection visuelle et le durcisseur ne peut alors être observé à l'œil nu dans le sédiment.

(a) **(b)** **(c)**

Figure 2.5-2. a. Le sédiment. b. Mélange de l'agent de durcissement. c. Homogéuéisation du mélange

2.5.1.4 Moulage des éprouvettes de compression

On superpose 3 à 5 couches du mélange de sédiments de manière homogène dans le moule recouvert de vaseline. Une fois la couche compactée à l'aide du marteau et d'un piston, la surface supérieure est rendue rugueuse à l'aide d'une lame scarificatrice, puis la couche suivante est ajoutée puis compactée jusqu'au remplissage du moule. On utilise une lame pour racler l'excès de sédiment en cours de solidification et on lisse les extrémités du moule pour maintenir les surfaces supérieure et inférieure planes et bien remplies. Puis le mélange commence à durcir.

Figure 2.5-3. Moule rempli

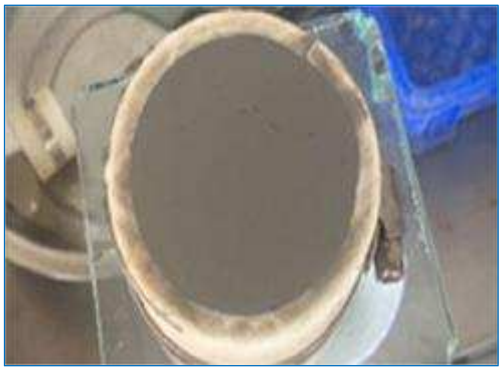

Figure 2.5-4. Eprouvette terminée

2.5.1.5. Moulage des éprouvettes de cisaillement

En fait les éprouvettes de cisaillement sont prélevées à l'aide de la cellule annulaire biseautée par poinçonnement d'un bloc de sédiment solidifié dans une boîte dite de durcissement de forme plus ou moins cubique dont les dimensions pour supérieures à 2,5 cm. Le remplissage de la boite de durcissement se fait selon la même procédure que les éprouvettes de compression. Le durcissement se fait pendant environ 3 jours et en fonction de la résistance du sédiment solidifié. La cellule annulaire revêtue de vaseline est doucement entraînée par poinçonnement dans la couche de sédiment, resté ou non, dans la boîte de durcissement tout en minimisant les perturbations du sol environnant. Après avoir arasé les 2 faces de l'éprouvette, elle est conservée en salle à 20 °C en atmosphère humide (95%). Les éprouvettes sont mises en place pour l'essai de cisaillement direct non drainé à la date préconisée de l'essai.

2.5.2 Méthode de maturation des éprouvettes

La méthode de maturation standard fait référence au processus d'augmentation de la résistance dans un environnement standard de température et d'humidité défini. Par ailleurs il existe une méthode de maturation rapide qui consiste améliorer l'efficacité du processus de solidification et à adopter une méthode qui augmente la température et raccourcit le temps. Dans nos travaux, le schéma de maturation standard est adopté pour toutes les éprouvettes tester.

2.5.2.1 Conditions de maturation

Il a été utilisé une étuve et une chambre de maturation. La température de l'étuve est de 20 °C ± 2 °C, avec une humidité relative supérieure à 95%. La température de la chambre est de 20 °C ± 2 °C.

Une fois l'éprouvette retirée du moule d'essai, les dimensions sont mesurées et les éprouvettes sont pesées. Puis les éprouvettes doivent être emballées dans un sac en plastique. Une fois que l'éprouvette est mise dans un sac en plastique, l'air contenu à

l'intérieur du sac est chassé et le sac est fermé. Les éprouvettes emballées sont placées en salle de maturation.

Rappelons que la température de l'étuve est de 20 °C ± 2 °C et pour une humidité de 95%. Les éprouvettes dans leur sac sont placées sur des grilles support en fer ou en bois ayant un écartement d'au moins 10 à 20 mm. La surface de l'éprouvette doit être maintenue avec un film d'eau et éviter le lavage direct à l'eau.

Les éprouvettes quel que soit l'essai de résistance, compression non confinée ou cisaillement rectiligne, sont durcies jusqu'à l'âge de l'essai.

Au dernier jour de la période de maturation, les éprouvettes sont ôtées des sacs en plastique, on effectue une observation visuelle de chaque éprouvette pour détecter toute fissuration ou fracturation ou anomalie. On procède à la mesure de la hauteur et on évalue la masse. L'éprouvette est ensuite immergée dans l'eau à 20 °C ± 2 °C, la surface de l'eau doit être d'environ 2,5 cm plus haute que l'éprouvette selon la norme JTG E 51-2009[81].

S'il y a un défaut observé pendant la période de maturation, l'éprouvette est éliminée du lot ou de la série d'essais.

Pour l'éprouvette conservée durant 7 jours, pendant la période de maturation, la perte de qualité de l'éprouvette d'essai pendant la période de maturation doit répondre aux exigences suivantes selon la norme JTG E 51-2009[81]. Une petite éprouvette ne dépasse pas 1 g; les écarts moyens sur la masse ne peuvent pas excéder 1g pour les petites éprouvettes (hauteur＜10 cm), 4 g pour les éprouvettes moyennes (hauteur＜20 cm) et 10 g pour les grandes éprouvettes (hauteur＞20 cm). Les éprouvettes dont la perte de masse dépasse ces exigences doivent être éliminées.

Pour des périodes de conservation supérieures comme 90 jours et 180 jours de période de maturation, la perte de masse de l'éprouvette doit répondre aux exigences suivantes toujours selon la norme JTG E 51-2009[81]. Les écarts moyens sur la masse ne peuvent pas dépasser 1 g pour les petites éprouvettes, 10 g pour les éprouvettes moyennes, et 20 g pour les grandes éprouvettes. Les éprouvettes dont la perte de masse dépasse ces exigences doivent être éliminées.

2.5.3 Procédure pour l'essai de résistance à la compression non confinée

L'éprouvette immergée dans l'eau pendant un jour et une nuit est sortie de l'eau, la surface extérieure étant essuyée.

Puis l'éprouvette d'essai est placée sur le bâti de l'appareil de compression automatisée. Au cours de l'essai de compression, le taux de déformation de l'éprouvette est constant et maintenu à 1 mm/min. Ou note essentiellement la pression maximale (P) à laquelle l'éprouvette est cassée.

La résistance à la compression se calcule comme suit:

$$P=\frac{F}{A} \qquad [19]$$

avec les notations suivantes:

P: la résistance à la compression (MPa) de l'éprouvette à «j» jours (j, fin de la période de maturation).

F: la charge de rupture (N) de l'éprouvette.

A: la section de l'éprouvette (mm^2).

Le nombre d'éprouvette à tester est de 3 ou 4 au minimum.

2.5.4 Procédure pour l'essai de cisaillement direct non drainé

2.5.4.1 L'appareil de cisaillement direct

La figure 2.5-5 donne le schéma de l'appareil de cisaillement direct avec les dispositifs de mesures des déformations. Il comprend une boîte de cisaillement, un équipement de pression verticale, un mécanisme de transmission de cisaillement, un dynamomètre et un système de mesure de déplacement.

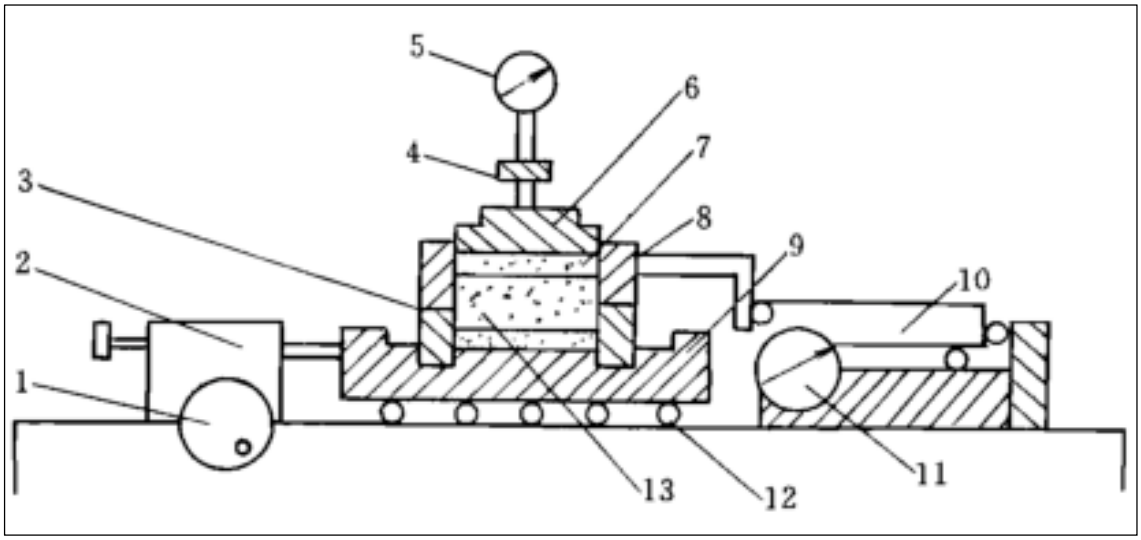

Figure 2.5-5. Bâti de cisaillement direct et contrôles des déformations
1 - Mécanisme de transmission de cisaillement. 2 – Poussoir. 3 Boîte inférieure. 4 - Etrier de compression verticale. 5 - Comparateur de déplacement vertical. 6 –Piston. 7 - Pierre poreuse perméable à l'eau. 8 - Boîte supérieure. 9 - Réservoir à eau. 10 – Dynamomètre. ll -Comparateur pour mesure du déplacement horizontal. 12 - Chemin de roulement à billes. 13 - Eprouvette à tester.

La cellule biseautée annulaire a pour diamètre intérieur 61,8 mm et sa hauteur est de 20 mm. Les mesures du déplacement vertical et horizontal se font à l'aide d'un comparateur à cadran avec une étendue maximale de 10 mm et chaque graduation vaut 0,01 mm ou d'un capteur avec une précision de 0,2%.

2.5.4.2 Procédure de l'essai

La préparation de l'essai se fait à la suite de la fabrication et de la maturation des éprouvettes.

Chaque groupe d'éprouvettes ne doit pas être inférieur à 4 selon la norme GB/T 50123-1999[82].

Tout d'abord, il faut aligner les boîtes supérieure et inférieure, les lier par des vis de fixation, insérer une pierre poreuse et un filtre plastique dans la boîte inférieure. Placer alors la cellule annulaire avec l'éprouvette sur la boîte de cisaillement, mettre de nouveau le filtre plastique et la pierre poreuse sur l' éprouvette et l'introduire soigneusement dans la boîte de cisaillement.

Par précaution l'humidité des pierres poreuses et du filtre plastique est proche de l'humidité de l'éprouvette.

Une fois l'éprouvette disposée dans la boîte, on déplace le dispositif de transmission de sorte que la bille d'acier située à l'extrémité avant de la boîte supérieure touche juste le dynamomètre. On dispose l'étrier de chargement sur l'éprouvette par l'intermédiaire du piston. On installe le dispositif de mesure de déplacement horizontal et on le règle à la position zéro ou l'on enregistre la mesure initiale.

On applique la pression verticale en fonction du matériau étudie, du projet et de la résistance du sol ou sédiment solidifié. La pression verticale appliquée à l'éprouvette se fait par palier pour éviter tout phénomène d'extrusion de l'éprouvette de sol ou sédiment. Après application de la pression, le reservoir est rempli d'eau pour assurer les conditions de saturation.

Une fois la pression verticale appliquée, on enlève les vis de fixation puis immédiatement une vitesse de cisaillement de 0,8 mm/min est appliquée. Chaque déplacement est mesuré ainsi que l'effort enregistré par le dynamomètre, et ceci jusqu'au cisaillement de l'éprouvette. S'il y a un pic d'effort, on continue l'essai jusqu'à ce que le déplacement en cisaillement atteigne 4 mm. Lorsque le dynamomètre n'indique pas de valeur de pic pendant le processus de cisaillement, l'essai est poursuivi jusqu'à ce que le déplacement soit de 6 mm. Selon ces conditions d'arrêt l'essai de cisaillement est terminé. On procède alors au démontage des capteurs de mesure (comparateur, dynamomètre) et on recupére l'éprouvette pour mesurer sa teneur en eau. La phase de cisaillement dure dans les 3 à 5 minutes.

La contrainte de cisaillement est calculée comme suit:

$$\tau = \frac{C \cdot \mathrm{R}}{A_0} \times 10 \qquad [20]$$

avec les notations suivantes:

τ: contrainte de cisaillement (kPa) à laquelle l'éprouvette est cisailleé.

R: le relevé du dynamomètre (0.01 mm).

C: coefficient du dynamomètre (N/0.01 mm).

A_0: section cisaillée de l'éprouvette (cm^2).

Pour le traitement des mesures, on trace la contrainte de cisaillement en ordonnée et le déplacement horizontal en abscisse et en obtient la relation entre la contrainte de cisaillement et le déplacement de cisaillement. Le pic de la contrainte de cisaillement sur la courbe correspond à la résistance ultime au cisaillement. Lorsqu'il n'y a pas de pic apparent, la contrainte de cisaillement correspondant à un déplacement de 4 mm est la résistance ultime au cisaillement.

De même, avec la résistance au cisaillement en ordonnée et la pression verticale appliquée sur l'échantillon en abscisse, la relation entre la résistance au cisaillement et la pression verticale est tracée avec plusieurs essais de cisaillement, la contrainte verticale variant. L'inclinaison de la droite obtenue est l'angle de frottement et l'interception de la droite en ordonnée est la cohésion.

2.5.5 Procédure pour l'essai relatif la détermination du module de compression ou consolidomètre

2.5.5.1 L'appareillage

Le consolidomètre est composé d'une cellule annulaire, d'une cellule de retenue, de 2 pierres poreuses, d'un réservoir d'eau et d'un piston comme indiqué dans la figure 2.5-6.

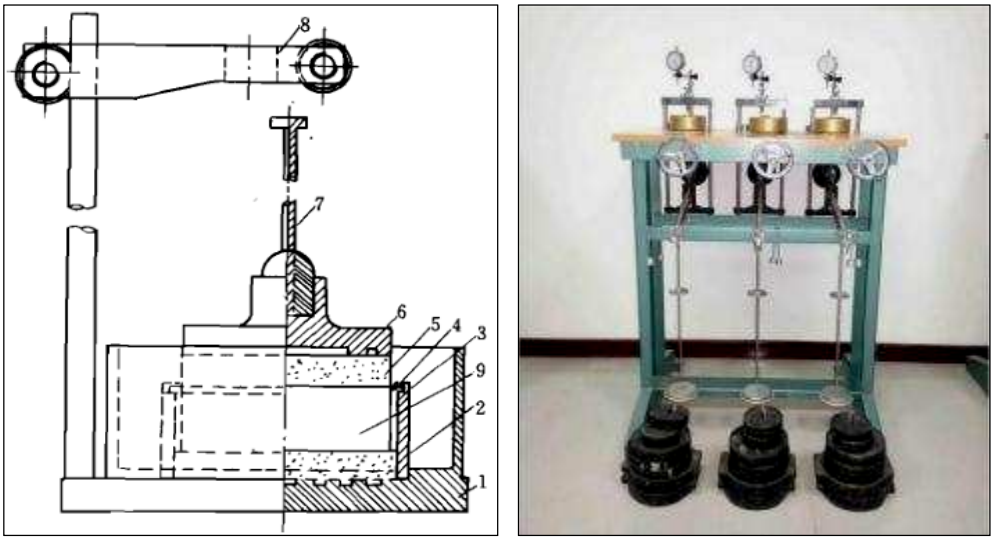

Figure 2.5-6. Schéma de l'appareil de consolidation

1 - Réservoir d'eau. 2 – Cellule de retenue. 3 - Cellule annulaire. 4 – Bague de guidage. 5 - Pierre poreuse. 6 – Piston. 7 - Tige de guidage de déplacement. 8 -Support de capteur ou comparateur de déplacement. 9 – Eprouvette.

L'équipement dédié à la pressurisation, doit permettre de pouvoir appliquer une pression spécifiée à tous les niveaux en un instant, sans impact.

La mesure de la déformation de l'échantillon se fait à l'aide d'un comparateur à cadran d'étendue égale à10 mm dont la valeur de division minimale est de 0,01 mm ou d'un capteur de déplacement avec une précision de 0,2% de la pleine échelle.

2.5.5.2 Procédure d'essai

Tout d'abord il faut placer la cellule de retenue, une pierre poreuse et un papier-filtre fin dans le réservoir d'eau du consolidomètre, puis mettre en place la cellule annulaire avec l'éprouvette dans la cellule de retenue, mettre la bague de guidage, le papier filtre fin, la pierre poreuse et le piston sur l'éprouvette. Alors le réservoir du consolidomètre est centré de manière à ce que le piston supérieur coïncide avec le centre du cadre de compression. Au final, il faut installer le moyen de mesure du déplacement utilisé.

Notons que l'humidité du papier filtre et de la pierre poreuse doit être proche de l'humidité de l'éprouvette.

Pour démarrer l'essai, il faut appliquer une pré-pression de 1 kPa pour amener l'éprouvette en contact avec toutes les parties supérieures et inférieures de l'appareil et régler le comparateur à zéro ou enregistrer la lecture initiale du capteur.

Les pressions à appliquer et appropriées doivent être dans l'étendue de ces valeurs: 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa, 1600 kPa et 3200 kPa. L'amplitude de la pression du premier chargement doit être déterminée selon la consistance et/ou résistance du sol ou sédiment. Il a été convenu d'utiliser les valeurs suivantes: 12,5 kPa, 25 kPa ou 50 kPa. La pression de l'étape finale de chargement doit être supérieure à la contrainte relative au poids du sol ou sédiment, plus la pression supplémentaire apportée par l'ouvrage. Lors de la mesure du facteur de compression, la pression maximale n'est pas inférieure à 400 kPa.

Lorsqu'il est nécessaire de déterminer la pression de pré-consolidation du sol ou sédiment non perturbé, le taux de chargement de l'éprouvette doit être inférieur à 1, alors une valeur de 0,5 ou 0,25 peut être utilisée. La pression appliquée doit faire apparaître un segment de droite dans la partie inférieure de la courbe e-logp mesurée. Pour les sols surconsolidés, il convient de procéder à un déchargement et un rechargement afin d'évaluer leurs caractéristiques de recompression.

Pour une éprouvette saturée, après l'application de la pression du premier chargement, mettre immédiatement de l'eau dans le réservoir pour immerger l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est non saturée et soumise à un test de consolidation, un bandage en coton humide est utilisé pour entourer le piston.

Une fois l'essai terminé, il faut vider l'eau du réservoir, démonter les différentes parties de l'appareil et l'éprouvette est prélevée pour en déterminer sa teneur en eau.

L'indice des vides initial de l'éprouvette est calculé par la relation suivante:

$$e_0 = \frac{(1+w_0)G_s\rho_w}{\rho_0} - 1 \qquad [21]$$

avec les notations suivantes:

e_0: indice des vides initial de l'éprouvette.

w_0: teneur en eau initiale (%).

ρ_0: masse volumique initiale (g/cm^3).

G_s: masse volumique des particules de sol.

ρ_w: masse volumique de l'eau à 4 °C (g/cm^3).

L'indice des vides de l'éprouvette après consolidation et stabilisé sous diverses pressions est déterminé par la relation suivante:

$$e_i = e_0 - \frac{1+e_0}{h_0}\Delta h_i \qquad [22]$$

avec les notations suivantes:

e_i: indice des vides de l'éprouvette après consolidation et stabilisé sous la pression.

h_0: hauteur initiale (mm).

Δh_i: déformation après consolidation d'un échantillon sous une certaine pression (mm).

L'indice de compressibilité dans une certaine plage de pression est déterminé et calculé comme suit:

$$a_v = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i} \qquad [23]$$

avec les notations suivantes:

a_v: coefficient de compressibilité (MPa^{-1}).

p_i: pression appliquée (MPa).

Le module de compression pour une étendue de pression donnée se déduit de la relation suivante:

$$E_s = \frac{1+e_0}{a_v} \qquad [24]$$

Il est noté par Es et exprimé en MPa.

2.5.6 Procédure pour l'essai relatif à la détermination de la perméabilité

2.5.6.1 Conditions d'essai du perméamétre à niveau d'eau variable

L'eau pure utilisée dans cet essai doit être dégazée par aspiration ou par ébullition avant l'essai. La température de l'eau pendant l'essai doit être supérieure à la température de la salle d'essai de 3 à 4 °C.

Dans cet essai, la température de l'eau est de 20 °C, c'est la température standard et le coefficient de perméabilité à la température standard est déterminé par la relation suivante:

$$k_{20}=k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \qquad [25]$$

avec les notations suivantes:

k_{20}: coefficient de perméabilité (cm/s) de l'éprouvette à la température standard.

k_T: coefficient de perméabilité (cm/s) à T °C.

η_T: coefficient de viscosité dynamique de l'eau (kPa.s) à T °C.

η_{20}: coefficient de viscosité dynamique (kPa.s) de l'eau à 20 °C.

Pour la détermination du coefficient de perméabilité, la valeur moyenne de 3 à 4 données dans la plage de différence autorisée doit être considérée comme étant le coefficient de perméabilité de l'éprouvette de l'essai de perméabilité. La différence autorisée n'est pas supérieure à 2×10^{-n}.

Lors de l'essai de perméabilité sous différents indices des vides, il convient de représenter l'indice des vides en ordonnée et le logarithme du coefficient de perméabilité en abscisse et de tracer la courbe.

2.5.6.2 L'appareillage

Il comprend une cellule principale composée d'une cellule annulaire, d'une pierre poreuse, d'un collier, d'un couvercle supérieur et d'un couvercle inférieur. Le diamètre intérieur de la cellule annulaire est de 61,8 mm et sa hauteur est de 40 mm. Le coefficient de perméabilité de la pierre poreuse doit être supérieur à 10^{-3} cm/s.

Le dispositif à niveau d'eau variable se compose de la cellule principale (échantillon), d'un tuyau à niveau d'eau variable, d'un réservoir d'alimentation en eau, d'un tuyau d'entrée d'eau, voir Figure 2.5-7. Le diamètre intérieur du tuyau à niveau d'eau variable doit être uniforme, le diamètre du tuyau ne doit pas dépasser 1 cm et la paroi extérieure du tuyau doit avoir une graduation avec une division minimale de 1,0 mm et une longueur d'environ 2 m.

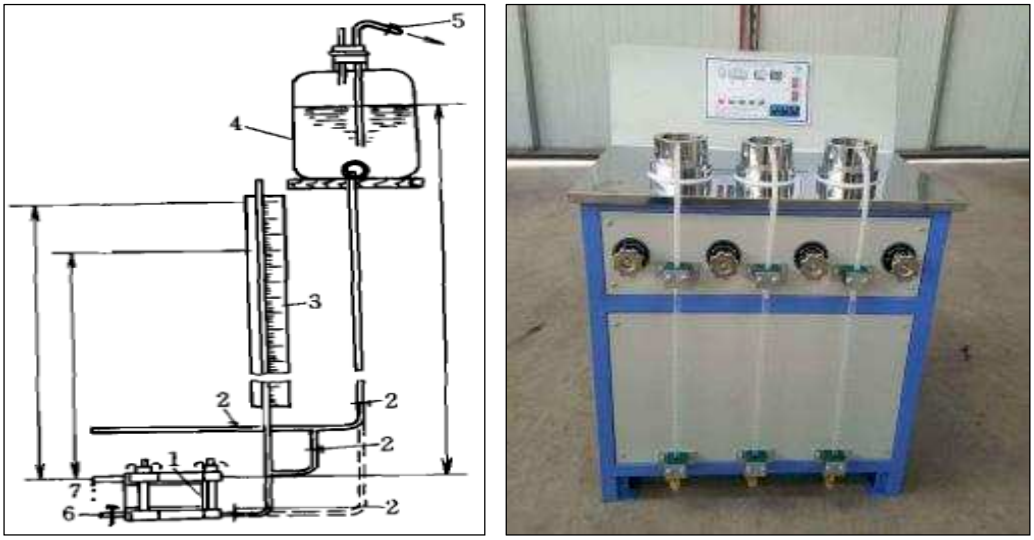

Figure 2.5-7. Dispositif à niveau d'eau variable

1 - cellule principale avec l'éprouvette. 2 - collier du tuyau d'entrée d'eau. 3 - tuyau à niveau d'eau variable. 4 - réservoir d'alimentation en eau. 5 - tuyau d'alimentation en eau. 6 - tuyau d'évacuation d'eau. 7 - tuyau de sortie d'eau.

2.5.7.3 Procédure d'essai

On procède à l'installation de la cellule annulaire contenant l'éprouvette dans la cellule principale et à la fermeture de manière à minimiser l'entrée d'air ou d'eau. Pour les éprouvettes qui ne sont pas facilement perméables à l'eau, il faut effectuer une saturation par succion tandis que pour les éprouvettes saturées et plus perméables à l'eau, elles sont directement saturées avec l'eau par le tuyau d'eau en entrée du dispositif.

Une fois l'éprouvette saturée, il faut raccorder l'entrée d'eau de la cellule principale au tuyau d'alimentation en eau, le remplir avec de l'eau pure à partir du resevoir d'alimentation en eau et faire passer l'eau dans la cellule principale, ouvrir la vanne d'échappement et évacuer l'air du fond de la cellule jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de bulles

d'air dans l'eau. Ensuite, il faut fermer le robinet de vidange et le collier de tuyau d'admission en eau.

Il reste à injecter de l'eau pure dans le tuyau principal à niveau d'eau variable. L'eau s'élève à une hauteur prédéterminée et la hauteur d'eau est déterminée en fonction de la compacité de la structure de l'éprouvette. En règle générale, elle ne doit pas dépasser 2 m. Une fois le niveau d'eau stabilisé, il faut fermer l'entrée en eau, le tuyau d'admission est ouvert, l'eau passe à travers l'éprouvette et lorsque l'eau en sortie déborde, on peut commencer à mesurer la hauteur initiale en eau et l'heure de début de l'essai dans le tuyau à niveau d'eau variable. Puis on mesure dans le temps la variation du niveau d'eau et on note l'heure à un intervalle de temps prédéterminé. Puis on mesure la température de l'eau à la sortie.

Par la suite on change la hauteur du niveau d'eau dans le tuyau à niveau d'eau variable, on attend que le niveau d'eau se stabilise, puis on mesure à nouveau en fonction du temps. On peut répétez l'essai 5 à 6 fois. Une fois l'essai terminé, on vérifie que le coefficient de perméabilité mesuré pour différentes hauteurs d'eau initiales se situe dans la plage de différence autorisée.

Le coefficient de perméabilité est calculé par la formule suivante:

$$k_T=2.3\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\log\frac{H_1}{H_2} \qquad [26]$$

avec les notations suivantes:

a: section (cm^2) du tuyau à niveau d'eau variable;

2.3: facteur de transformation du ln en log;

L: longeur de l'écoulement, c'est-à-dire la hauteur de l'éprouvette (cm).

A: section de l'éprouvette (cm^2).

t_1, t_2: heures de début et de fin de lecture du niveau d'eau respectivement pour H1 et H2.

H_1,H_2: hauteurs d'eau de départ (t_1) et d'arrivée (t_2).

III. Applications de la technique de solidification aux sols mous et/ou sédiments

3.1 Etude de la construction d'une plateforme ferroviaire-Site de Ningde (Chine)

3.1.1 Contexte de la recherche

La Chine accorde de plus en plus d'attention à la stratégie de développement durable. Les matériaux de remplissage servant de fondations dans la construction et l'aménagement de sites en Chine sont de plus en plus difficilement accessibles. En effet la gestion de carrières est très surveillée et leur exploitation restreinte en raison du non-renouvellement des roches. Désormais, il y a un manque d'approvisionnement et le prix élevé des granulats rendent non seulement la construction d'infrastructures coûteuse, mais aussi les slogans «aucune pierre à récolter» ou (pénurie de granulats) et «attendre que la pierre soit construite» ou (attente de mise à disposition de granulats) limitent sérieusement la vitesse de construction des infrastructures dans diverses régions. Par conséquent, il existe une forte demande pour de nouveaux matériaux de fondation pouvant remplacer et compléter les matériaux granulaires (sables, graviers, cailloux) issus de carrières. L'utilisation de la technologie de solidification des sols ou sédiments pour préparer les matériaux de fondation suscite de plus en plus d'attention. En outre, les méthodes de traitement traditionnelles, telles que le clapage en mer[83, 84] et la mise en décharge, entraînent inévitablement une grave pollution de l'environnement et l'occupation des terres cultivées ainsi que d'autres problèmes environnementaux et sociaux[85-87], ce qui permer d'envisager et de développer l'utilisation des ressources issues du dragage des océans. Ceci est devenu une préoccupation de tous les pays du monde[88].

La solidification de sédiments marins notamment des silts à teneur en eau faible et moyenne en eau pour la construction de sites, peut non seulement résoudre le problème de la non renouvelabilité de la ressource et de la pollution environnementale des granulats traditionnels, mais également résoudre le problème du degré de compactage des sols graveleuse difficile à maîtriser et celui du tassement différentiel dans la dernière phrase pendant la construction. De plus, la technologie de solidification de silts est déjà utilisée pour résoudre le problème du recyclage des ressources en silts (déchets). Les boues résiduaires sont transformées en matériaux de synthèse. Cette technologie de solidification présente les avantages suivants: faible coût, efficacité élevée et faible pollution. Actuellement, l'application de solidification de silts sur le site de Ningde a été progressivement encouragée, et ce projet désormais occupe une position de leader dans la construction du site de Ningde dédié à une plate-forme de chemin de fer.

De par sa longue expérience de la construction de l'entreprise JSKZ Technologie a proposé une technique de solidification innovante dans la construction du site (appel d'offres QNFJZQ-5) pour accueillir le projet de gare de la voie ferrée Zhangzhou-Ningde (section de la voie ferrée du Fujian), ci-après dénommé “projet de Ningde”. Il s'agissait de fournir des méthodes de conception et des procédures d'essais fiables pour l'application à grande échelle de la technologie de solidification de silts mous.

3.1.2 Le projet de Ningde

3.1.2.1 Présentation du projet et de Ningde

Le projet de Ningde consiste à traiter des sédiments limoneux de surface sur une superficie de 0,5 km^2, voir figure 3.1-1. Deux zones sont à distinguer à savoir:

- Une zone où des pieux sont battus (zone 1). Le traitement de solidification de la couche superficielle est de 0,8 m. Elle supporte les engins de battage et doit donc répondre aux exigences de capacité portante d'engins spécifiques de battage, voir figure 3.5-2.

- Une zone de remplissage dont la base est excavée et remplacée par un sédiment silteux solidifié, mais l'épaisseur du remplissage varie de 2,0 à 3,0 m (zone 2). conformément à la figuire3.1-3.

Pour ces 2 zones, les sédiments limoneux sont d'abord excavés, traités pour être solidifiés et remis en place, voir schéma à la figure 3.1-1.

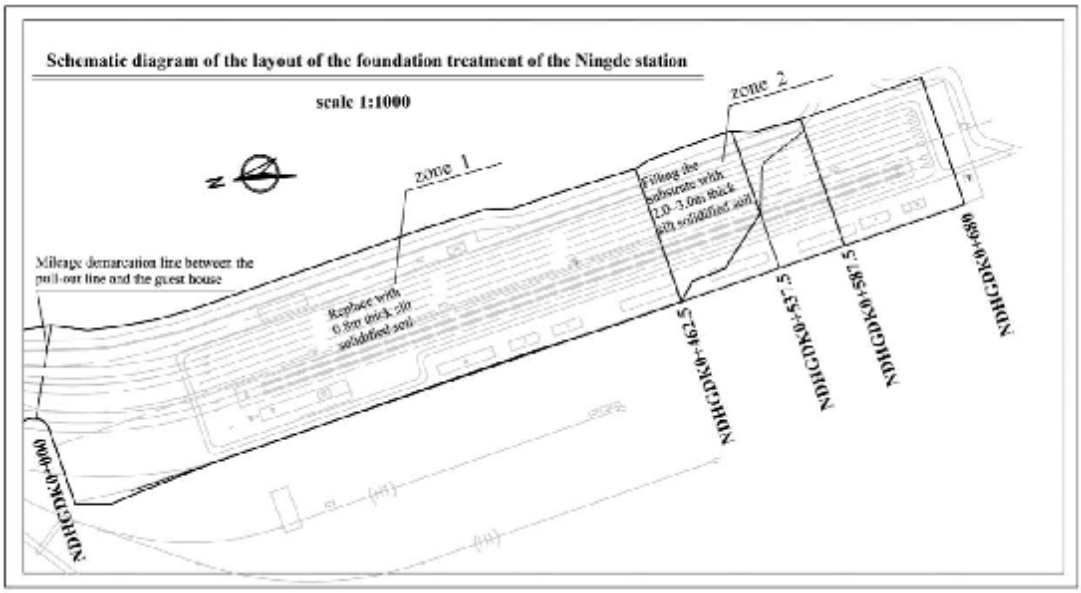

Figure 3.1-1. Schéma du projet de Ningde

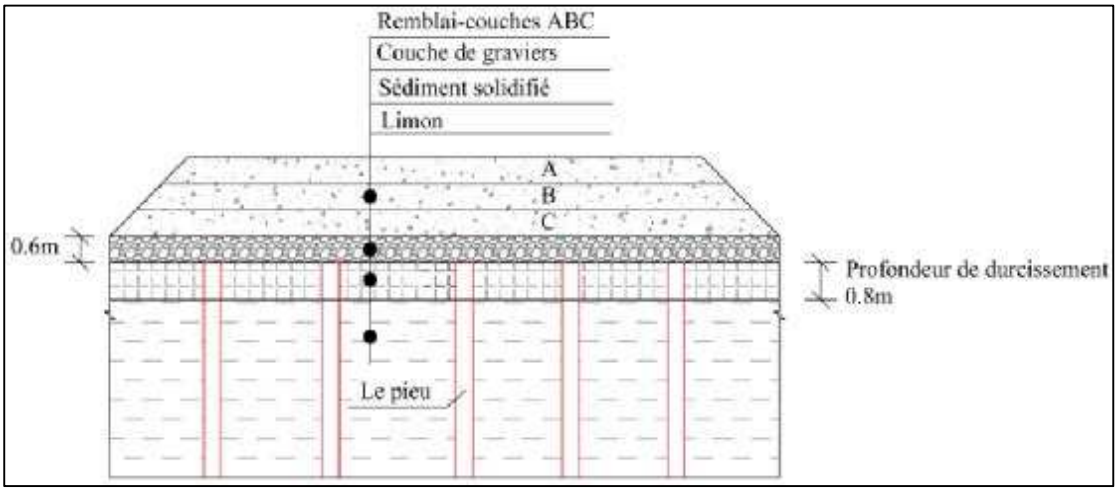

Figure 3.1-2. Plan de coupe de la zone 1

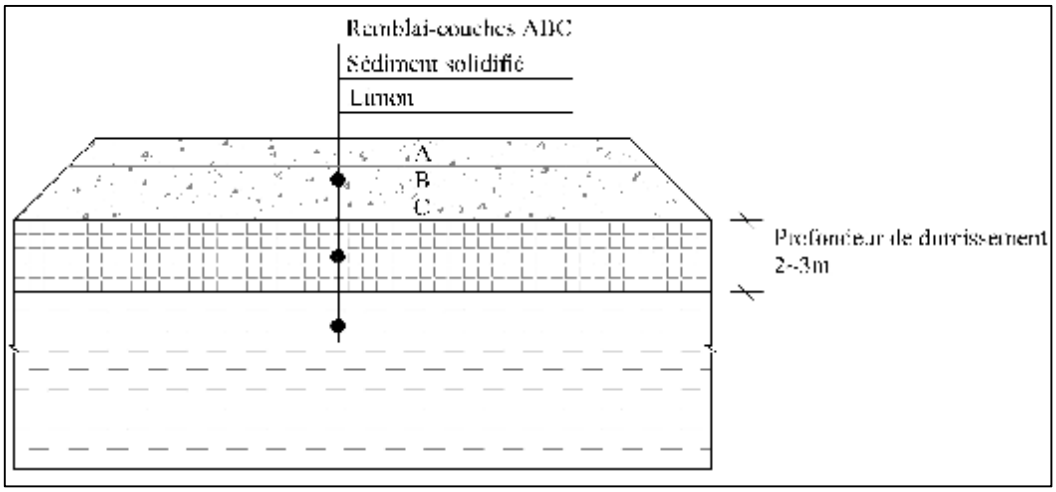

Figure 3.1-3. Plan de coupe de la zone 2

3.1.2.2 Caractéristiques géologiques

a. Topographie et relief du site

Les reliefs sédimentaires côtiers sont relativement plats, avec deux parties géomorphiques traversant la ligne ferroviaire. Le côté sud est une unité de relief bas et accidenté avec une grande différence d'altitude, et l'élévation du sol est de 4,00 à 24,00 m. À l'heure actuelle, la ligne de la gare de Ningde à Wenfu a été ouverte à la circulation, avec des activités humaines plus fréquentes et des moyens de transport pratiques.

b. Lithologie et structure de la formation

Une description des couches principales en fonction de l'épaisseur est donnée par la suite. A cette description est associée la nature et l'état du sol.

1. Remplissage artificiel, jaune grisâtre, humide, épaisseur de cette couche de 0,5m à 1,2 m;

2. Argile limoneuse, grise, plastique souple, σ_0 = 140 kPa, épaisseur de cette couche de 1,9 m à 2,3 m;

3. Silt, gris foncé, plastique fluide, σ_0 = 50 kPa, l'épaisseur moyenne de cette couche est de 7 m;

4. Argile limoneuse, grise, plastique souple, σ_0 = 120 kPa, l'épaisseur moyenne de cette couche est de 1,6 m;

5. Gravier moyen, gris clair, jaune clair, saturé, en vrac, σ_0 = 110 kPa, l'épaisseur moyenne de cette couche est de 1,8 m;

6. Sable grossier, gris clair, jaune grisâtre clair, saturé, lâche, σ_0 = 190 kPa, l'épaisseur moyenne de cette couche est de 1,5 m;

7. Argile limoneuse, jaune grisâtre, plastique, σ_0 = 160 kPa, l'épaisseur moyenne de cette couche est de 2,7 m;

8. Argile limoneuse, jaune grisâtre, plastique à dure, σ_0 = 180 kPa, l'épaisseur moyenne de cette couche est de 1,8 m;

9. Sol à base de graviers, hétéroclite, légèrement dense, σ_0 = 400 kPa, l'épaisseur moyenne de cette couche est de 3 m;

10. Argile limoneuse, jaune grisâtre, plastique, σ_0 = 150 kPa, l'épaisseur moyenne de cette couche est de 3,2 m;

Il y a une couche épaisse de granite complètement altéré sur le site de la gare de Ningde, altération due aux intempéries locales (climat). Cette couche est en général surmontée d'épaisses couches de sédiments ou argiles limoneuses molles.

c. Conditions hydrologiques

Le type d'eau souterraine se trouve principalement dans la couche supérieure d'eau stagnante présente dans la couche de remplissage de plaine, le volume d'eau est petit, principalement complété par les précipitations atmosphériques. L'eau est faiblement confinée dans le sable alluvial du Quaternaire. Cette couche a une bonne richesse en eau et une bonne perméabilité.

Deuxièmement, l'eau interstitielle qui se trouve dans la couche d'altération résiduelle ou dans la couche d'altération du substrat rocheux manque de richesse en eau. La source supplémentaire d'eaux souterraines est principalement l'infiltration latérale et l'alimentation verticale des eaux de surface. Dans les zones montagneuses, les eaux interstitielles sont profondément enfouies, principalement par apport complémentaire en eau de pluie, et les eaux souterraines sont principalement sorties par la turbulence souterraine.

Selon les éprouvettes d'eau prélevées lors de forages mobiles de la gare de Ningde de Wenfu Railway, les eaux souterraines et les eaux de surface ont un environnement chimique érodable par les chlorures avec un niveau L2; le niveau d'action des eaux souterraines et des eaux de surface dans un environnement chimiquement érosif est égal à H1, le niveau d'action des eaux souterraines et des eaux de surface dans un environnement endommagé par la cristallisation du sel est égal à Y2 et la qualité environnementale à la carbonatation est T2. Ces niveaux sont définis selon la norme chinoise relative aux spécifications de conception de la durabilité de la structure en béton ferroviaire[89].

3.1.2.3 Exigences au niveau de la construction du site.

Elles comprennent à la fois des exigences de conception et des spécifications de référence.

a. Exigences au niveau de la conception

Conformément au projet (section 3121)，il y a excavation des sédiments de surface en place et échange de ces sédiments limoneux en sédiments solidifiés. Ce remplissage est prévu pour une épaisseur de 0,8 en (zone 1), voir la figure 3.1-2 ou de 2 à 3 m (zone 2), voir la figure 3.1-3.

Pour le sédiment solidifié，les indicateurs géotechniques retenus ou exigés sont les suivants：

- Poids volumique $\gamma \geq 17{,}0$ kN/m^3，
- Cohésion $C \geq 100$ kPa，
- Angle de frottement $\varphi \geq 25$ °，
- Module de déformation $E_s \geq 6.0$ MPa.

Ces indicateurs géotechniques sont obtenus en laboratoire sur éprouvettes de laboratoire (étude des mélanges) et sur éprouvettes prélevées sur site (chantiers) alors que sur site, on parle d'indicateurs d'ingénierie qui sont les suivants：

- Résistance en pointe (essai de pénétration): $\sigma_0 \geq 200$ kPa,
- Raideur (essai à la plaque) $K_{30} \geq 100$ MPa/m.

Le coefficient de fondation K_{30} est la mesure de compressibilité en surface de l'essai à la plaque. Cet essai à la plaque est effectué à l'aide d'une plaque rigide d'un diamètre de 30 cm et d'une épaisseur de 25 mm. $K_{30} = \sigma_s / 1.25 \times 10^{-3}$, unité MPa/m, calcul défini par la norme TB 10102-2010 selon le code pour les essais géotechniques en génie ferroviaire[90].

b. Exigences au niveau du processus de solidification

Le sédiment limoneux solidifié est généralement brassé par une excavatrice et on peut également effectuer un labour multiple à l'aide d'une fraise rotative. Le sédiment solidifié nécessite des ingrédients (composants) précis et un mélange uniforme (homogénéité). Une fois le sédiment solidifié brassé, il n'y a plus de grumeaux ou morceaux issus de l'agent de durcissement. La couleur est uniforme et le matériau solidifié d'apparence homogène.

Du point de vue technique lorsque lorsque le sédiment solidifié est brassé, l'excavateur continue à écraser le mélange de manière répétée pour que l'agent de durcissement et les sédiments soient entièrement en contact, afin de maximiser l'activité de l'agent de durcissement obtenir de bons résultats.

Lorsqu'on utilise l'excavateur seul pour brasser, afin d'assurer l'efficacité du mélange, la quantité de mélange doit être de l'ordre de 5 m^3 à 10 m^3 et le temps de mélange doit être contrôlé pendant 15 à 30 minutes. Si un autre moyen mécanique est utilisé, le temps de mélange peut être réduit de manière appropriée. Lorsque les travaux s'effectuent dans des zones humides ou pendant la saison des pluies, des mesures doivent être prises pour empêcher que les sédiments solidifiés qui ont été brassés soient détrempés ou imbibés d'eau. On procède alors à un régalage sur les monticules de sédiments solidifiés de manière à éviter que l'eau pénètre dans ces monticules.

Si la teneur en eau du sédiment solidifié après le mélange est élevée, on le stocke pour réduire la teneur en eau pour répondre aux exigences du contrôle ressuage; et la mise en remplissage du sol solidifié peut être achevée en 72 heures.

Le sédiment solidifié est testé en laboratoire. Les essais concernent la résistance à la compression non confinée, la mesure de la densité sèche, la résistance au cisaillement

non drainé, le module de compressibilité, etc. La fréquence des essais est d'un prélèvement pour 1000 m^2 et les éprouvettes sont prélevées dans les parties centrale et inférieure de la couche de remplissage sur chantier.

L'épaisseur de la couche de remplissage de sédiment solidifié est généralement de 40 cm à 50 cm et la teneur en eau est contrôlée dans une plage appropriée. Le sédiment solidifié qui a atteint la teneur en eau acceptable doit être broyé dans les 24 heures.

La construction de chaque couche de remplissage de sédiment solidifié suit le principe suivant de compactage. Tout d'abord on compacte sur le pourtour puis au milieu avec des engins légers puis lourds. Ils circulent d'abord lentement et rapidement par la suite. En général, on applique une pression statique, puis des vibrations faibles. L'application de la pression statique pour la dernière couche, se fait à une vitesse de roulement ne devant pas dépasser 4 km/h. Les engins de compactage choisis, sont généralement des rouleaux de compactage routiers légers de 8 à 10 tonnes.

L'intervalle de temps entre 2 couches (couches supérieure et inférieure) de sédiment solidifié est en principe supérieur à 24 heures. Si la teneur en eau de la couche inférieure est plus faible que la teneur en eau acceptable (valeur de contrôle de la teneur en eau de la couche inférieure à la valeur moyenne), on met en place directement la couche supérieure. Si la teneur en eau de la couche inférieure est supérieure à la teneur en eau qualifiée (valeur de contrôle de la teneur en eau de la couche supérieure à la la valeur moyenne), on attend 24 heures, ou effectue un contrôle de niveau et si elle devient inférieure à la valeur requise on continue à mettre en la place la couche supérieure.

Une fois la construction terminée, le sédiment solidifié doit être recouvert de nattes de paille, de films ou de géotextiles. Dans le cas des nattes de paille, elles doivent être aspergées d'eau ou maintenues humides. Il ne doit pas y avoir d'accumulation d'eau à la surface du sédiment solidifié pendant la période de durcissement. Dans le cas de films utilisés pour la protection de la couche de remplissage, celle-ci doit être encore humide avant la mise en place de ces films.

L'âge de durcissement de la couche de remplissage devrait être supérieur à 14 jours. Si la couche solidifiée est correctement protégée, la résistance du sol va augmenter rapidement et plus en moins réduire le temps de protection. Pendant toute la période de durcissement, la résistance du sédiment solidifié augmente constamment, mais avant la valeur de résistance requise, il convient d'interdire la circulation de tous les types de véhicules, en particulier les poids lourds.

Les liste des spécifications et autres documents de référence pour ce projet est la suivante:

- "Code de conception des fondations ferroviaires" (TB 10001-2005);
- "Critères d'acceptation de la qualité de la construction de voie ferrée" (TB 10414-2003);
- "Procédures d'essais géotechniques d'ingénierie ferroviaire" (TB 10102-2004);
- "Réglementation technique de la sécurité pour la construction de l'ingénierie de fondation de chemin de fer" (TB 10302-2009);
- "Guide technique pour la construction de l'ingénierie des sols d'assises ferroviaires mixtes pour passagers et marchandises" (TZ 202-2008);
- "Adjuvant de solidification du sol" (CJ/T 486-2015);
- "Spécifications techniques pour le traitement des sols de fondation de décharge" (GB/T 51064-2015);
- Nouveaux dessins liés au projet de plate-forme du projet de chemin de fer Xinzhou-Ningde (section Fujian);
- Dessins liés à l'ingénierie de la plateforme du projet de chemin de fer Zhangzhou-Ningde récemment construit (section Fujian).

3.1.3 Essais de laboratoire relatifs au projet

Afin de bien comprendre les indicateurs géotechniques et techniques clés dans les exigences de conception du projet, des essais de laboratoire doivent être organisés pour fournir des paramètres instructifs pour la construction du site. La solidification des

sédiments dans ce projet se concentre sur les exigences de résistance à la compression non confiné et les valeurs de cohésion.

3.1.3.1 Instructions de mise mise en place d'essais

Afin de tester les performances du sédiment solidifié de ce projet, plusieurs points de contrôle ont été définis (voir le tableau 3.1-1 et la figure 3.1-4 pour plus de détails), à parmi lesquels on retrouve les points H1 à H4 qui ont été définis pour l'inspection technique extérieure (essais de chantier) et les points H5 à H8 utilisés comme points de contrôle pour les essais géotechniques en laboratoire et après la construction du site.

Tableau 3.1-1. Liste des points de contrôle de test et d'essai

Référence	Orientation	Remarques
H1	Nord	Point d'inspection technique sur site
H2	Sud	Point d'inspection technique sur site
H3	Nord	Point d'inspection technique sur site
H4	Sud	Point d'inspection technique sur site
H5	Nord	Points de comparaison d'indicateurs géotechniques-laboratoire et site
H6	Sud	Points de comparaison d'indicateurs géotechniques-laboratoire et site
H7	Nord	Points de comparaison d'indicateurs géotechniques-laboratoire et site
H8	Sud	Points de comparaison d'indicateurs géotechniques-aboratoire et site

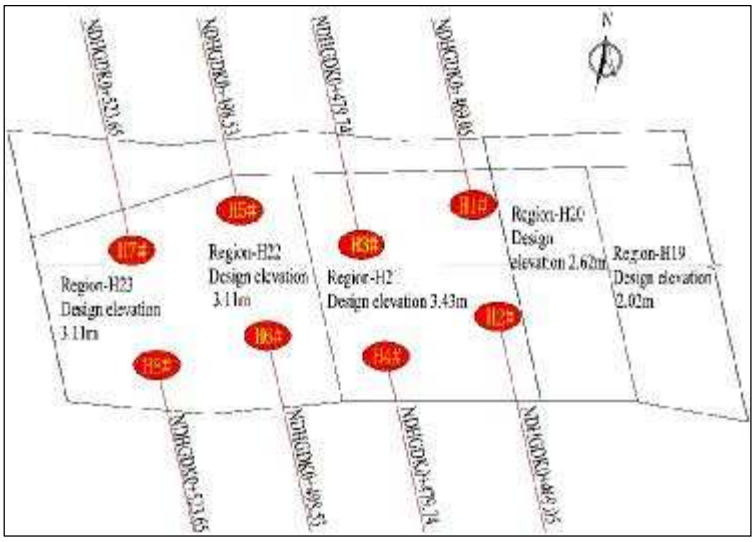

Figure 3.1-4. Position des points de contrôle et d'essais sur site

3.1.3.2 Éprouvettes de sol et matières premières utilisées pour la solidification de sédiments

a. Eprouvettes de sol

Dans cette étude et ce projet de Ningde, les éprouvettes de sol ont été prélevées sur site aux emplacements notés de H5 à H8. Le sédiment limoneux était boueux, plastique relativement fluide de nature relativement uniforme. Quelques données sont fournies au tableau 3.1-2.

Tableau 3.1-2. Propriétés physiques et mécaniques des principales couches de sédiment

	Granulométrie (%)				Teneur en eau (%)
	Teneur en graviers 5 ~ 2 mm	Teneur en sable 2 ~ 0.075 mm	Teneur en limon 0.075 ~ 0.005 mm	Teneur en argile < 0.005 mm	
Sédiment	0	0	48.9	51.1	56.2
	Limite de liquidité (%)	Limite de plasticité (%)	Indice de plasticité IP	Indice de liquidité IL	Teneur en matière organique (%)
Sédiment	46.6	27.4	19.2	1.50	0.5

b. Agents de durcissement

Les agents de durcissement utilisés dans cette étude incluent divers types de solidifiants à savoir:

(1) Ciment: ciment courant commercial.

(2) Chaux: chaux vive commerciale.

(3) Agent de durcissement composé 1: agent commercial produit par la société Jiangsu Kunze Technology Co., Ltd. Il est référencé ADC1.

(4) Agent de durcissement composé 2: agent commercial produit par la société de production Jiangsu Kunze Technology Co., Ltd. Il est noté ADC2.

(5) Agent de durcissement composé 3: agent commercial produit par la société de production Jiangsu Kunze Technology Co., Ltd. Il est noté ADC3.

c. Additifs d'activation

Les agents de durcissement composés 1, 2, 3 de la Société Jiangsu Kunze contiennent un ou deux additifs d'activation tels que le silicate de sodium et le sulfate de sodium.

3.1.3.3 Effet du type d'agent de durcissement et du dosage sur l'effet de solidification des sédiments dans le projet de Ningde

Les propriétés mécaniques du sédiment solidifié comprennent la résistance à la compression, la résistance au cisaillement. La résistance à la compression étant l'indice le plus fondamental et le plus représentatif des matériaux de sédiments solidifiés, il s'agit non seulement d'une donnée de base principale de la conception technique, mais également d'une relation étroite avec d'autres propriétés du sédiment solidifié. Les principaux facteurs qui affectent les propriétés mécaniques d'un sédiment solidifié sont les propriétés du sédiment, le type d'agent de durcissement du sédiment, le dosage de l'agent de durcissement du sédiment, l'âge, la compacité et la teneur en eau et les conditions de durcissement. Dans le cas de propriétés de sédiment constantes, le type et le dosage de durcisseur de sédiment sont les principaux facteurs affectant les propriétés mécaniques du sédiment solidifié. En ajustant les différents types et dosages d'agents de durcissement, on détermine l'effet de durcissement optimal et le coût d'ingénierie minimum.

Le ciment, la chaux vive et les agents de durcissement de formulation spécifique ont été utilisés pour traiter les sédiments du projet Ningde. Le tableau 3.1-3 rassemble la résistance en compression et la cohésion obtenues pour le sédiment solidifié avec différents types d'agents de durcissement à différents dosages.

Les données du tableau 3.1-3 montrent que le ciment et la chaux, lorsque le dosage atteint 100 kg/m^3, la résistance à la compression non confinée des éprouvettes n'est toujours pas conforme aux exigences de conception. Et de même la cohésion est bien loin aussi des exigences de conception. Les agents de durcissement composés ADC1 à 3 surmontent les défauts d'un liant unique comme le ciment traditionnel. Pour ces agents, différents types de mélanges de micro-poudres modifiés avec une surface spécifique

élevée et une haute activité sont introduits, et en ajoutant une quantité appropriée d'activateur, on obtient un effet de durcissement sur le sédiment solidifié à teneur en eau de moyenne à faible, significatif. Selon les données du tableau 3.1-3, lorsque le dosage de l'agent de durcissement composé ADC1 atteint 100 kg/m^3, il peut répondre aux exigences de conception et lorsque le dosage des agents durcisseurs composés ADC2 et ADC3 atteint 90 kg/m^3, il peut répondre aussi aux exigences de conception. Compte tenu des facteurs de performance et de coût, il faut retenir les agents de durcissement composé ADC1 à 3.

Finalement pour les travaux sur site il a été choisi l'agent de durcissement ADC2.

Tableau 3.1-3. Résistance en compression et cohésion du sédiment solidifié avec différents types d'agents de durcissement

Agent de durcissement référence	Dosage (kg/m^3)	Résistance en compression non confinée (kPa)		Cohésion C (kPa)	
		7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
Ciment	80	89	150	16	32
	90	102	159	18	38
	100	118	172	20	44
Chaux	80	92	151	17	34
	90	100	164	22	43
	100	124	195	24	46
ADC1	80	122	254	40	82
	90	167	353	51	90
	100	219	405	72	102
ADC2	80	154	302	43	87
	90	205	396	75	103
	100	253	431	78	105
ADC3	80	182	361	54	96
	90	224	406	76	106
	100	279	453	80	108

3.1.3.4 Propriétés mécaniques à long terme du sédiment solidifié dans le projet de Ningde

La détermination des propriétés mécaniques à long terme en laboratoire a été mené en fonction du type et du dosage de l'ajout du durcissement ADC2. Les résultats des essais avec l'ADC2 sont indiqués dans le tableau 3.1-4. Les propriétés mécaniques du sédiment solidifié évoluent avec l'âge comme le montre les figures 3.1-5 à 3.1-8.

Tableau 3.1-4. Propriétés mécaniques à long terme du sédiment solidifié avec l'ajout ADC2

Âge (Jours)	Résistance en compression non confinée q_u (kPa)	Cohésion C (kPa)	Angle de frottement φ (°)	Module de compressibilité E_s (MPa)
3	153	46	7.1	4.35
7	205	75	19.5	5.4
14	294	91	23.5	6.75
28	396	103	26.2	7.48
56	429	106	28.6	8.2
90	450	108	29.9	9.3
128	462	109	30.5	9.9

Les données des essais relatifs à l'agent ADC2 montrent que les propriétés mécaniques du sédiment solidifié par l'agent de durcissement ADC2 répondent aux exigences de conception, tant pour la résistance à la compression, la cohésion, l'angle de frottement et le module de compressibilité. Ces paramètres augmentent avec le temps. Cette augmentation est principalement due à la réaction d'hydratation de l'agent de durcissement qui continue à se produire avec le vieillissement du sédiment solidifié après l'addition de l'agent de durcissement. Bien que le degré de réaction soit bien inférieur au temps précédent, la substance gélifiante à l'intérieur du sédiment solidifié continue d'augmenter. Les particules de sol augmentent constamment et elles sont continuellement agglomérées et cimentées, donc tous les indicateurs sont en croissance.

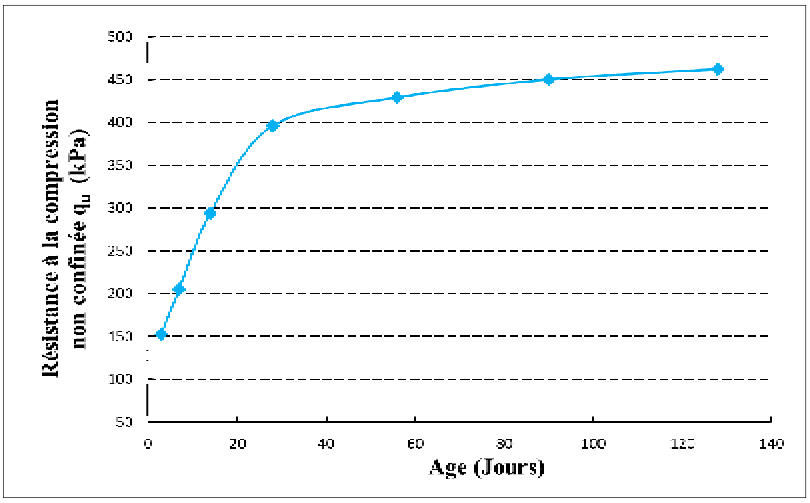

Figure 3.1-5. Evolution de la résistance à la compression non confinée avec l'âge - Agent ADC2

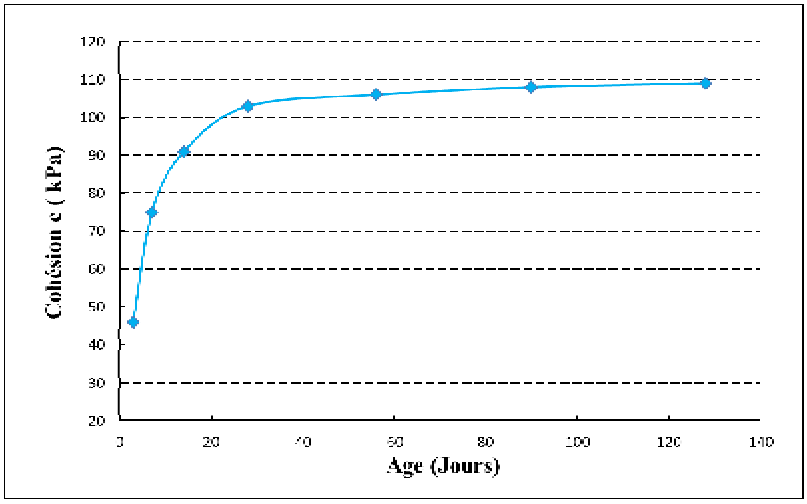

Figure 3.1-6. Evolution de la cohésion avec l'âge - Agent ADC2

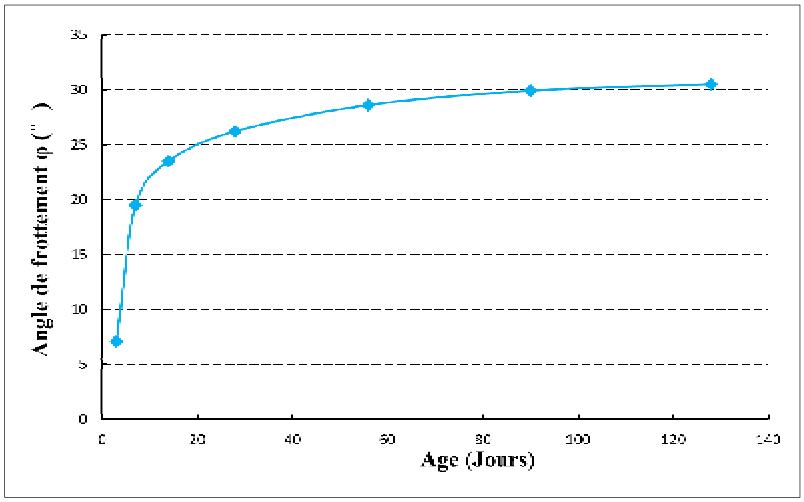

Figure 3.1-7. Evolution de l'angle de frottement avec l'âge - Agent ADC2

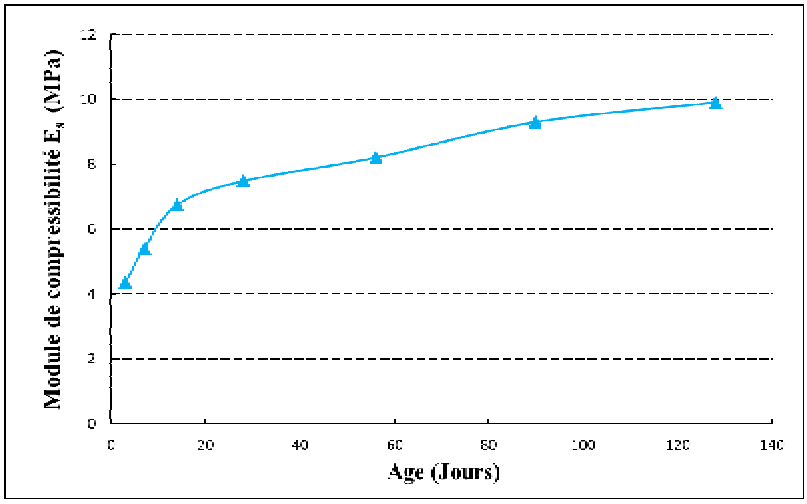

Figure 3.1-8. Evolution du module de compressibilité avec l'âge - Agent ADC2

3.1.3.5 Durabilité du sédiment solidifié dans le projet de Ningde

La durabilité est la capacité d'un matériau à résister aux dommages à long terme causés par son environnement et celui de la nature, c'est-à-dire sa capacité à résister dans le temps. Selon les caractéristiques du projet, les modifications des propriétés physiques et mécaniques du sédiment solidifié en présence de fortes variations hydriques sont étudiées dans le cadre de l'essai de séchage-mouillage du cycle, ce qui fournit une base théorique pour évaluer la durabilité en milieu sec et humide d'un sédiment solidifié. En outre, le problème de la durabilité des matériaux à base de sédiment solidifié dans des conditions d'alternance sèche et humide (conditions climatiques) est considéré, ce qui constitue une garantie pour l'application à long terme du sédiment solidifié.

L'essai de mouillage/séchage est basé sur la norme "Méthode d'essai pour le mouillage et le séchage des déchets solides" ASTM D 4843-2009, en commençant après un temps de durcissement des éprouvettes de sédiment de 28 jours. L'essai comprend 10 cycles secs et humides pendant 20 jours. Un cycle sec et humide comprend un passage de l'éprouvette dans un four à 60 °C pendant 24 heures, puis sortie à la température ambiante pendant 1 heure et complètement immergée dans de l'eau distillée à 20 °C pendant 23 heure. Une fois que l'éprouvette ait été soumise à 0, 2, 4, 6, 8 et 10 cycles secs et humides, la résistance à la compression non confinée et la masse de l'éprouvette ont été mesurées et le taux de perte de masse relative (S) avec la

variation en résistance (P) de l'éprouvette pendant tout le cycle ont été suivis. La figure 3.1-9 montre le taux de perte de masse relative et le taux de conservation en résistance du sédiment solidifié soumis au cycle sec-humide après 28 jours de durcissement.

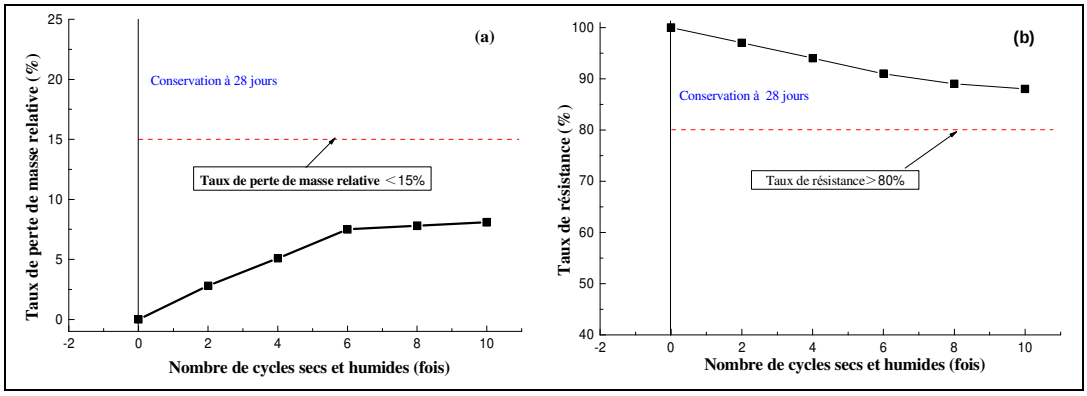

Figure 3.1-9. Variation de la résistance et de la masse d'un sédiment solidifié après 10 cycles de mouillage/séchage

Selon la norme ASTM D4843-2009 retenue, si le taux de perte de masse relative S > 15% ou si le taux de perte de résistance P > 20% de l'éprouvette, il est considéré que la durabilité en milieu sec et humide de l'éprouvette ne peut pas répondre aux exigences standard. Une fois que le sédiment solidifié a été soumis à cet essai en cycles sec-humide entre 20 et 60 ° C, le taux de perte de masse du sédiment solidifié S est inférieure à 15% et la baisse de résistance P est inférieure au standard de 20%, ce qui répond aux exigences de durabilité.

Pendant un cycle sec-humide, l'éprouvette de sédiment solidifié subit un retrait à sec et un gonflement en humidité, ce qui entraîne une modification du volume du sédiment solidifié. Une fois que la contrainte générée par la déformation (gonflement ou retrait) dépasse la résistance structurelle du sédiment solidifié, c'est-à-dire que la concentration de contraintes se produit dans les endroits faibles où les particules de sol sont connectées les unes aux autres, des microfissures se forment. Au fur et à mesure que le nombre de cycles secs et humides augmente, le retrait et la déformation de gonflement de l'éprouvette se développent, entraînant la propagation continue des microfissures. Ceci aggrave les dommages causés à la structure du sédiment solidifié et montre de manière macroscopique que la résistance est progressivement atténuée. En

utilisant l'agent de durcissement ADC2, la substance contenue dans l'agent de durcissement réagit en continu pour former une substance gélifiante, ce qui renforce la résistance structurelle du sédiment. Le changement de contrainte causé par le cycle sec et humide se situe dans une plage contrôlable, de sort que le sédiment solidifié respecte l'exigence de la durabilité.

Les données de l'essai relatif à la figure 3.1-9, montrent que l'agent de durcissement ADC2 utilisé pour traiter les sédiments du projet Ningde est apte à les solidifier et que tous les indices répondent aux exigences de conception. Les performances et la durabilité à long terme sont excellentes.

3.1.4 Etude de la stabilité et organisation au niveau de la construction

3.1.4.1 Contrôle de la stabilité du site

La profondeur de traitement du sédiment solidifié de 2 m d'épaisseur est considéré vis-à-vis d'un calcul de la stabilité selon deux conditions de travail. Le premier cas considéré est que le facteur de sécurité est de 1,938 (voir figure 3.1-10) sans tenir compte des charges dues au train et rails et répondant aux exigences de 1,25 spécifiées à la section 3.1.5 des “spécifications de conception de fondations de chemins de fer spéciaux”, selon la norme TB 10035-2006. Le second cas concerne les charges dues au train et rails, conformément au code de “conception des fondations ferroviaires”, selon la norme TB 10001-2005, converties en charge de 60,2 kPa sur une longueur de 3,7 m et prend en compte l'augmentation de la résistance provoquée par la consolidation du sédiment après calcul. Le facteur de sécurité est de 1,263 (voir figure 3.1-11) et répond aux exigences de l'article 1.2 de la section 3.1.5 des “spécifications de conception de fondations de chemins de fer” selon la norme TB 10035-2006. Le logiciel de calcul utilisé est Slide V6.0. Puisque 2 m d'épaisseur répondent aux exigences, 3 m d'épaisseur est également possible, voir le tableau 3.1-5 pour les paramètres de contrôle de stabilité de la solidification des sédiments.

Tableau 3.1-5. Liste des paramètres de vérification de la stabilité des sédiments solidifiés

Condition de travail	Couche de sol	Cohésion C (kPa)	Angle de frottement φ (°)	Charge	Facteur de sécurité	Specifications
Pas de prise en compte des charges dues au train et voies ferrées	Sédiment solidifié	60	20	Non	1.938	"Spécifications de conception de fondations des chemins de fer spéciaux" (TB 10035-2006), "Spécifications de conception de fondations des chemins de fer" (TB 1001-2005)
	Limon	7.8	4.2			
	Remplissage A, B, C	20	25			
Prise en compte des charges dues au train et voies ferrées	Sédiment solidifié	60	20	Charge de 60.2 kPa sur 3.7 m	1.263	
	Limon	10.2	4.2			
	Remplissage A, B, C	20	25			

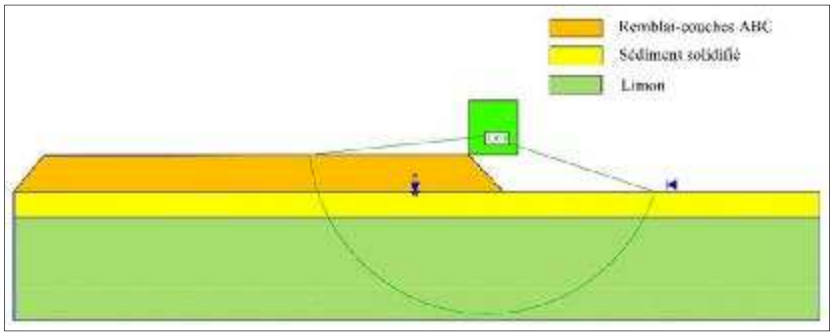

Figure 3.1-10. Condition de travail indépendamment du train et de la charge de la voie ferrée

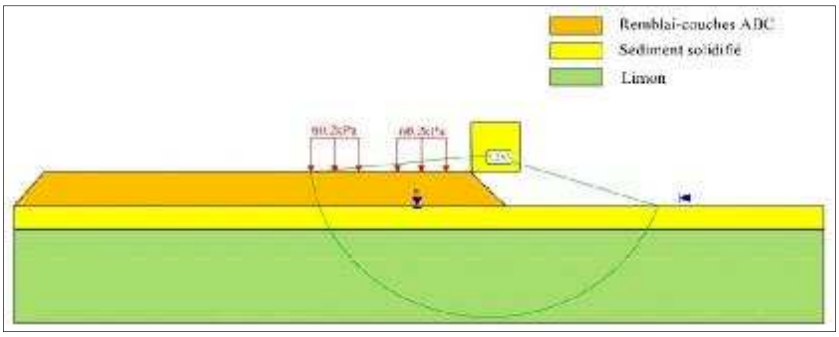

Figure 3.1-11. Condition de travail avec prise en compte des charges dues au train et à la voie ferrée

A, B, C: Il s'agit des couches constituant le remblai, ce sont des sols mélangés avec des graviérs. Couche A, une teneur en sols fins <15%; Couche B, une teneur en sols fins <15% et une teneur en particules inférieure à 5mm > 35%; Couche C, une teneur en sols fins entre 15% à 30%.

3.1.4.2 Processus de construction

Ce projet d'amélioration des sols par solidification de sédiment est techniquement réalisable et de qualité contrôlable. Le processus de construction et de suivi peut se résumer ainsi : Localisation et définition du site → Mise à nu du site → Excavation et travaux de terrassement → Malaxage et Solidification → Remblayage et compactage → Maintenance et suivi.

Le processus de construction est illustré en détails à la figure 3.1-12.

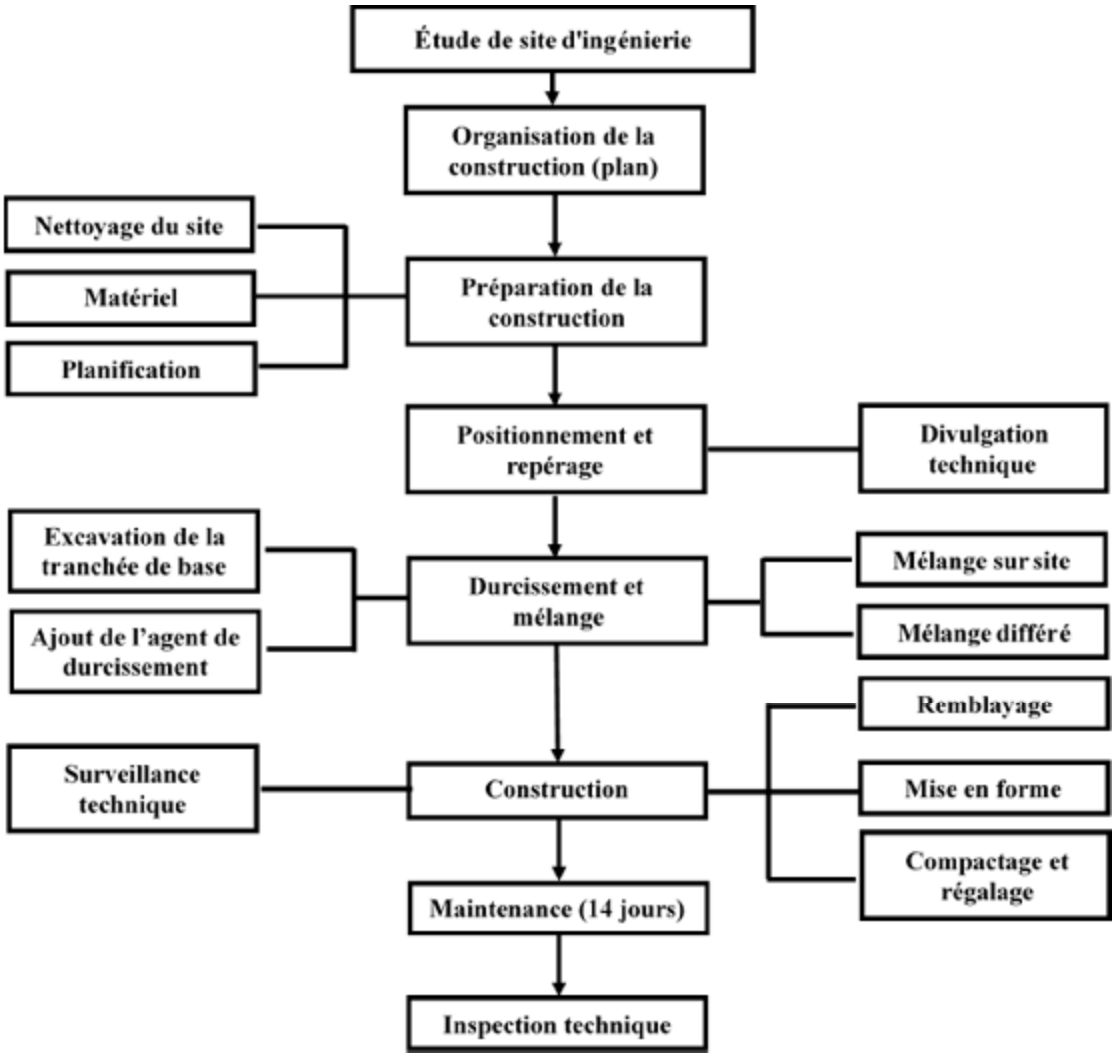

Figure 3.1-12. Organigramme du processus de construction du site

3.1.4.3 Paramètres de construction

En fonction de l'expérience acquise sur le chantier de solidification, les paramètres de construction avec solidification sur site dans le cas de projet similaire d'ingénierie de fondations de gare ferroviaire peuvent être les suivants, selon le tableau 3.1-6.

Tableau 3.1-6. Paramètres de construction liés à un chantier de solidification de sédiments

Dosage d'agent de durcissement (ADC2) (kg/m^3)	Épaisseur de la couche élémentaire (cm)	Compactage nombre de passages (fois)	Temps de mélange (min)	Type d'exécution (jours)
90	50	4	15	28

3.1.4.4 Contrôle de la qualité

Afin de garantir la qualité de la construction, il convient de réaliser des travaux d'inspection et de contrôle de la qualité, qui se divisent principalement en contrôle de qualité et en contrôle de réception du processus de construction. Les éléments des essais spécifiques sont présentés dans le tableau 3.1-7.

Tableau 3.1-7. Éléments d'inspection de qualité

Contrôle	Éléments d'inspection	Fréquence d'inspection	Méthode d'inspection	Partie d'inspection
Processus de construction	Uniformité du mélange	En temps réel	Observation visuelle	Parties de la construction sur site
	Cohésion et angle de frottement	1 inspection par 2000 m^3 de construction	Prélèvement d'éprouvettes de sédiment solidifié mélangé sur place, Modélisation, Maintenance en condition standard	
Test acceptation	Module de compressibilité Cohésion et angle de frottement	3 points	Carottage sur site	Bureau de contrôle externe

Durant le processus de construction, des travaux d'inspection et de contrôle de la qualité sont effectués par le constructeur. Les résultats attendus sont présentés au tableau 3.1-8.

Tableau 3.1-8. Statistiques sur les résultats des essais de qualité du sédiment solidifié pendant la construction du site du projet de Ningde

Numéro de série	Cohésion C (kPa)	Angle de frottement φ (°)	Conclusion
1	103.1	26.2	Qualifié
2	102.2	25.9	
3	109.8	27.5	
4	108.4	27.2	
5	103.2	26.1	
6	104.1	26.2	
7	102.6	25.5	
8	108.1	27.1	
9	108.6	27.6	
10	107.1	27.3	
11	105.4	26.1	
12	106.2	26.9	
13	101.9	25.4	
14	111.3	28.6	
15	104.2	25.9	
16	105.1	26.0	
17	107.1	26.3	
18	108.2	26.1	
19	106.2	25.9	
20	107.1	26.3	
Exigences de conception	≥ 100	≥ 25	

3.1.5 Test de réception sur site

Après la construction du projet et à la date de 28 jours, il été a confié au Centre d'Essais de l'Institut d'Investigation en génie géologique de Jiangsu de prélever du sédiment solidifié et d'en tester les propriétés (voir le tableau 3.1-9).

Chaque indicateur de performance répond aux exigences de conception.

Tableau 3.1-9. Résultats des essais géotechniques à 28 jours de la zone de remplissage du projet de Ningde

Numéro de série	Module de compressibilité E_S (MPa)	Essai de cisaillement non drainé	
		Cohésion C (kPa)	Angle de frottement φ (°)
1	29.19	141.7	25.6
2	31.85	168.9	28.8
3	25.77	146.9	27.6
Exigences de conception	≥ 6.0	≥ 100	≥ 25

Avant la construction

Après la construction

Figure 3.1-13. Comparaison avant et après construction du projet de Ningde

3.1.6 Résumé

À l'heure actuelle, la plupart des chercheurs étudient principalement l'effet d'un seul agent de durcissement sur un matériau inorganique pour la solidification des sédiments fins, et la plupart d'entre eux n'utilisent que des essais de laboratoire. Dans cette section l'agent durcisseur composé a été appliqué au projet de Ningde non

seulement par le biais de recherches en laboratoire, mais également de manière innovante pour la construction d'un site de fondation ferroviaire. Grâce à l'étude systématique du type d'agent et du dosage en agent de durcissement, de la performance à long terme du sédiment solidifié, de la durabilité du sédiment solidifié, de la conception du projet, du processus de construction, les exigences relatives à l'utilisation de la technologie de solidification pour des sédiments pouvant servir de sols de fondation pour des chemins de fer sont clarifiées. Les principales conclusions sont les suivantes:

(1) Maîtriser les technologies clés pour la préparation de sols solidifiés pour des sédiments de teneur en eau moyenne à faible. En modifiant la formule de l'agent de durcissement, on obtient un agent de durcissement composé ADC2 qui peut répondre aux exigences de conception, qui améliore la résistance du sédiment solidifié et permet l'utilisation de sédiments et de sous-produits industriels (composants partiels dans l'agent de durcissement). La résistance à la compression non confinée du sédiment solidifié préparé à l'âge de 28 jours est ≥ 200 kPa, la cohésion est ≥ 100 kPa, l'angle de frottement est ≥ 25°, le module de compressibilité est ≥ 6,0 MPa et les propriétés mécaniques du sédiment solidifié augmentent avec l'âge.

(2) La durabilité du sédiment solidifié est acceptable. Le sédiment durci préparé à l'aide du durcisseur composé ADC2 présente un taux de perte de masse relative relativement faible et un taux de rétention de résistance élevé après les cycles et répond aux exigences de durabilité.

(3) Concevoir un processus de construction utilisant la technologie de traitement de sol pour une solidification de sédiments dans la construction d'un sol de fondation ferroviaire. Le processus de construction de normalisation et les points de contrôle de la qualité ont été mis en avant, ce qui a permis une construction rapide et pratique et a fourni un support technique pour la construction de structures de sols solidifiés de qualité et à efficacité élevée.

(4) Le sédiment solidifié préparé par la technologie proposée est qualifié par inspection et acceptation sur site, et l'application sur le terrain est bonne.

3.2 Etude de la construction de voies routières-Site de Lianyungang (Chine)

3.2.1 Contexte de la recherche

Avec le développement de l'économie et de la société chinoise, la construction de routes s'accélère et le recours à des méthodes traditionnelles pour construire les sous-couches routières nécessite de nombreuses ressources naturelles. Loin de répondre aux besoins croissants en construction routière. Si la quantité de matériaux granulaires (sable et gravier) ne peut pas être contrôlée, cela causera inévitablement de graves dommages à l'environnement écologique[91].

À l'heure actuelle, la Chine a clairement reconnu la nécessité de protéger l'environnement et de préserver les ressources. Construire une société respectueuse de l'environnement et des ressources est un besoin urgent pour le développement économique durable de la Chine[92]. Si, au cours du processus de construction d'une route, il est possible d'éviter l'utilisation de matériaux tels que la roche au sens traditionnel du terme, et d'utiliser plutôt un "sol renouvelable" c'est à dire, un matériau d'ingénierie inépuisable, omniprésent, économique, ceci jouera certainement un rôle positif dans la protection de l'environnement naturel.

Si un sol ou un sédiment solidifié présente les avantages de matériaux locaux, des processus de construction simple et des coûts d'ingénierie peu élevés, il offre de larges perspectives d'application à tous les niveaux de la construction routière comme les différentes sous-couches de route et de voieries diverses, les remblais de chemins de fer, les plateformes industrielles pour des fondations des bâtiments. Les avantages sociaux sont aussi très importants[93].

Dans les années 1970, en raison des besoins techniques, des travaux de recherche sur les agents de durcissement de sol ont commencé. Les premiers travaux de recherche ont concerné, les liants inorganiques tels que le ciment ou la chaux qui ont été très utilisés. Les études ont porté sur l'analyse du mécanisme de renforcement des sols, et

ont permis d'accumuler une certaine expérience. Au milieu des années 1980, les matériaux utilisés pour renforcer les sols sont passés des matériaux inorganiques aux matériaux organiques, puis à des nouveaux matériaux composés combinant des matériaux inorganiques et matériaux organiques. Et de ce fait, l'intérêt s'est focalisé sur l'étude des agents de durcissement de sol en poudre et aux agents de durcissement de sol liquide[94].

Dans de nombreux pays, les agents de durcissement des sols sont devenus un produit de base très utilisé dans des sociétés spécialisées, tels que les agents de durcissement de sol Qishou (CCSS) et Roadbond développés en Australie, les agents de durcissement de sol issus d'Afrique du Sud, le concentré de B-100 et l'agent de durcissement de sol en polymère renforcé TS-100 produits par Belsay (USA), l'enzyme de polymérisation de Parme, le Lubang EN-1 et d'autres agents de polymérisation de sols produit par International Bio-Enzyme Company (USA), l'agent de durcissement de la série ATST produit par la société UKC au Japon, etc.[95].

Au début des années 90, forte de l'expérience acquise à l'étranger, la Chine a commencé à mettre au point et à rechercher des agents de durcissement de sol en fonction des conditions locales. À l'heure actuelle, la plupart des agents de durcissement dans le pays sont à l'état pulvérulent. En règle générale, le mécanisme de durcissement des matériaux inorganiques tels que le ciment est utilisé comme base de recherche et certains matériaux polymères spéciaux sont ajoutés aux matériaux de la matrice, tels que des agents de résistance initiale, des activateurs, des agents de rétention d'eau, etc., ce qui permet d'améliorer les propriétés géomécaniques du sol.

Dans le domaine de la construction à long terme, les gens ont progressivement pris conscience qu'il existait des lacunes évidentes dans les matériaux de liaison inorganiques traditionnels tels que la chaux, le ciment et les cendres volantes, qui ne pouvaient pas répondre aux besoins de la construction et du développement durable.

Les insuffisances dans la performance de la chaux sont que la résistance du sol durant la phase de durcissement avec la chaux prend souvent beaucoup de temps et la résistance finale n'est pas élevée.

Les insuffisances dans la performance du ciment peuvent aussi enumérées. Avec l'augmentation du dosage de ciment, la résistance du sol solidifié est améliorée, mais le retrait dû au séchage et les variations de la température du sol solidifié par ciment sont fortement augmentés ce qui risque de provoquer une fissuration de la surface notamment en construction routière. La présence de fissures fera diminuer la résistance à la compression, la résistance au gel, l'imperméabilité de la couche de base et la résistance à l'érosion, la durabilité et la résistance à l'usure de la couche de surface, ainsi que l'effet de renforcement du ciment surtout pour les sols fins à indice de plasticité élevé[96].

Les insuffisances dans la performance des cendres volantes et de la chaux existent aussi. Bien que les deux produits soient largement utilisés pour renforcer les sols mis en sous-couche routière en Chine, le problème de la faible résistance initiale n'a pas été résolu efficacement, ce qui a affecté les progrès et la qualité de la construction dans les applications routières[97].

Par rapport aux liants utilisés pour le renforcement par solidification des sols, les agents de durcissement des sols présentent les avantages suivants: résistance relative élevée, bonne stabilité de l'eau, vitesse de durcissement rapide, forte résistance au gel-dégel, faible retrait et durabilité assurée. Ils peuvent être utilisés pour le renforcement des couches de base et de surface des routes départementales, pour la stabilisation de la base et du sous-sol des voies rapides et des routes surélevées, ainsi que pour le renforcement de sols de fondation[98]. Comparé à la technologie de renforcement avec les liants traditionnels, on utilise directement le sol sur site pour la construction, ce qui permet de réduire considérablement les coûts en ciment, en granulats et de transport, même si les matériaux en béton traditionnels permettent généralement de réduire les travaux d'ingénierie d'environ 30%[99]. Les avantages économiques sont très importants. Et les méthodes pour exploiter les carrières et fabriquer les granulats, comme exploiter les sables en rivières ont gravement endommagé l'environnement naturel. Réaliser une route par solidification de sols ou sédiments est une manière de transformer des déchets en ressource, ce qui permet également d'économiser l'exploitation de matières

premières tels que les sables et les graviers, tout en rendant les avantages environnementaux très importants.

À l'heure actuelle, les recherches en Chine sur les sols ou sédiments solidifiés sont principalement focalisées sur la solidification de sols simples à teneur en eau faible à moyenne. Avec l'intensification du développement côtier, un grand nombre de vasières limoneuses sont utilisées comme bases de production industrielle de granulats à grande échelle. Et s'est posée la question: Comment construire des routes urbaines de haute qualité sur des vasières ou sédiments à forte teneur en eau? C'est un problème difficile à résoudre concernant l'amélioration et l'application de la technologie des sols et sédiments solidifiés.

Basée sur les besoins de construction de la base industrielle pétrochimique du nouveau district de Xuwei à Lianyungang, en Chine, des travaux de recherche ont été menés sur la technologie d'application des sols ou sédiments. Les sédiments concernés sont des limons à haute teneur en eau[100] pour une application relative à la construction de routes. La base industrielle pétrochimique de Lianyungang est l'une des sept principales bases industrielles pétrochimiques prévues par l'État. Elle reposera sur l'intégration d'unités de raffinage et de production d'éthylène et de poly-aromatiques. Il est prévu d'atteindre une capacité de 40 millions tonnes/an de raffinage, de 3 millions de tonnes/an d'éthylène et de 4 millions tonnes/an de paraxylène en deux phases de construction. Avant 2020, un projet complet de raffinage et d'intégration chimique sera achevé et, enfin, une base à grande échelle de raffinage et d'intégration chimique composée de plusieurs chaînes de production sera construite. Conformément aux normes pour la construction d'une base industrielle pétrochimique de classe mondiale et à l'idée d'intégration, à grande échelle, de parcs environnementaux hauts de gamme et propres, le comité de gestion du nouveau district de Xuwei a accéléré la viabilisation du site avec la construction d'installations de base et de grands projets industriels de la base industrielle pétrochimique. Cette viabilisation intègre différents services dédiés à l'assistance publique, au transport logistique, à la sécurité, à la protection de l'environnement et aux services de gestion dans la base de l'industrie pétrochimique.

Cette industrie pétrochimique sera connectée à une base industrielle liée à l'énergie et aux matières premières, qui stimulera le développement d'industries connexes le long des zones côtières du Jiangsu et du nouveau pont continental Asie-Europe.

Les besoins en granulats couramment utilisés dans le traitement des sols pour des fondations et nécessaires dans ces projets n'ont pas pu être satisfaits compte tenu de la mise en place de la politique de protection de l'environnement devenu plus stricte dans le pays, et de la rapidité de construction demandée par le nouveau district de Xuwei à Lianyungang (Chine). Pour ce projet, la solidification des sols ou sédiments en place a donc été envisagée. Mais les sédiments limoneux présentent les caractéristiques suivantes: teneur en eau élevée, composition complexe, résistance médiocre et forte compressibilité. Pour assurer un sol de fondation de qualité, il est nécessaire de résoudre le problème de la capacité portante de sédiments solidifiés en place et d'améliorer sa stabilité de l'eau. Dans cette étude, le principal travail de recherche consiste donc à améliorer le module de déformation des sols solidifiés comme assurer la stabilité du matériau solidifié à l'eau suivant des périodes sèches et humides. Il faut aussi en maitriser la technologie de préparation des sédiments solidifiés pour la construction de routes et mener des recherches sur la technologie à mettre en œuvre pour la construction de celles-ci.

3.2.2 Le projet de Lianyungang

3.2.2.1 Présentation du projet

Le projet étudié est celui de la route de l'usine ou unité de solvant électrolytique et d'ingénierie de support de Jiangsu Sipai Nouvelle énergie Technology Co., Ltd, ci-après dénommé le projet de Lianyungang.

Le lieu du projet se situe dans le nouveau district de Xuwei, dans la province du Jiangsu dans la ville de Lianyungang.

Cette usine est une unité de production de solvant électrolytique pour batterie au lithium et d'éléments de support. La structure envisagée comprend principalement: les

routes de l'usine, les différents bâtiments de l'usine, les réservoirs de produits et zones de pompage.

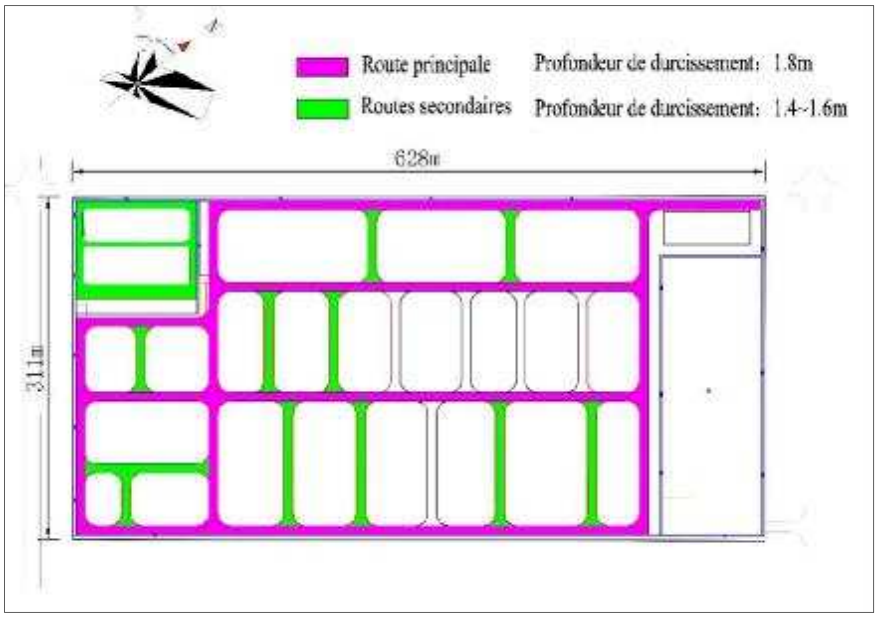

Figure 3.2-1 Schéma d'implantation des routes du projet de Lianyungang

3.2.2.2 Géologie du site

La route de Sipai est large de 8 mètres pour une longueur de 4500 mètres. A partir de différents carottages/forages, voir figure 3.2-2 et des essais in situ, la coupe géotechnique peut être proposée et divisée en 10 sous-couches depuis la surface du sol. Chaque sous-couche est décrite comme suit:

- Couche (1): Sol avec de remplissage ou de remblai, il s'agit principalement d'un sol argileux, légèrement humide, hétérogène, avec une petite quantité locale de coquilles, de structure meuble;
- Couche (2): C'est une couche argileuse de couleur brun jaune, plastique et homogène;
- Couche (3): Limons fins de couleur grise, plastiques, cette couche est relativement homogène avec des passes de sable limoneux;
- Couche (4): Argile limoneuse avec des graviers de couleur brun jaune, cette argile plastique, est irrégulière contenant 15% de de limons répartis en couche minces;
- Couche (5): Graviers fin sableux, ce sont des particules jaunâtres, denses, saturées, relativement uniformes, de forme subcirculaires. La composition minérale

principale est constituée de quartz, de feldspath et de mica partiellement pris en sandwich avec une fine couche d'argile limoneuse, d'une épaisseur unique de 10 à 20 cm;

- Couche (6): Argile jaune brun, plastique, cette couche de sol est relativement uniforme, parfois calcaire;
- Couche (7): Argile limoneuse, de couleur gris-noir, plastique, homogène;
- Couche (8): Argile limoneuse, brun-jaune, taupe à couleur gris noir, plastique, couche irrégulière, partiellement en sandwich on retrouve une mince couche de limon;
- Couche (9): Argile limoneuse, gris-noir, plastique, hétérogène avec des passes de limon. Cette couche est épaisse de 5 à 10 cm;
- Couche (10): Sable fin, particules jaunâtres, denses, saturées, relativement uniformes, de qualité médiocre, particules de forme subcirculaire. La composition minérale principale est constituée de quartz, de feldspath et de mica.

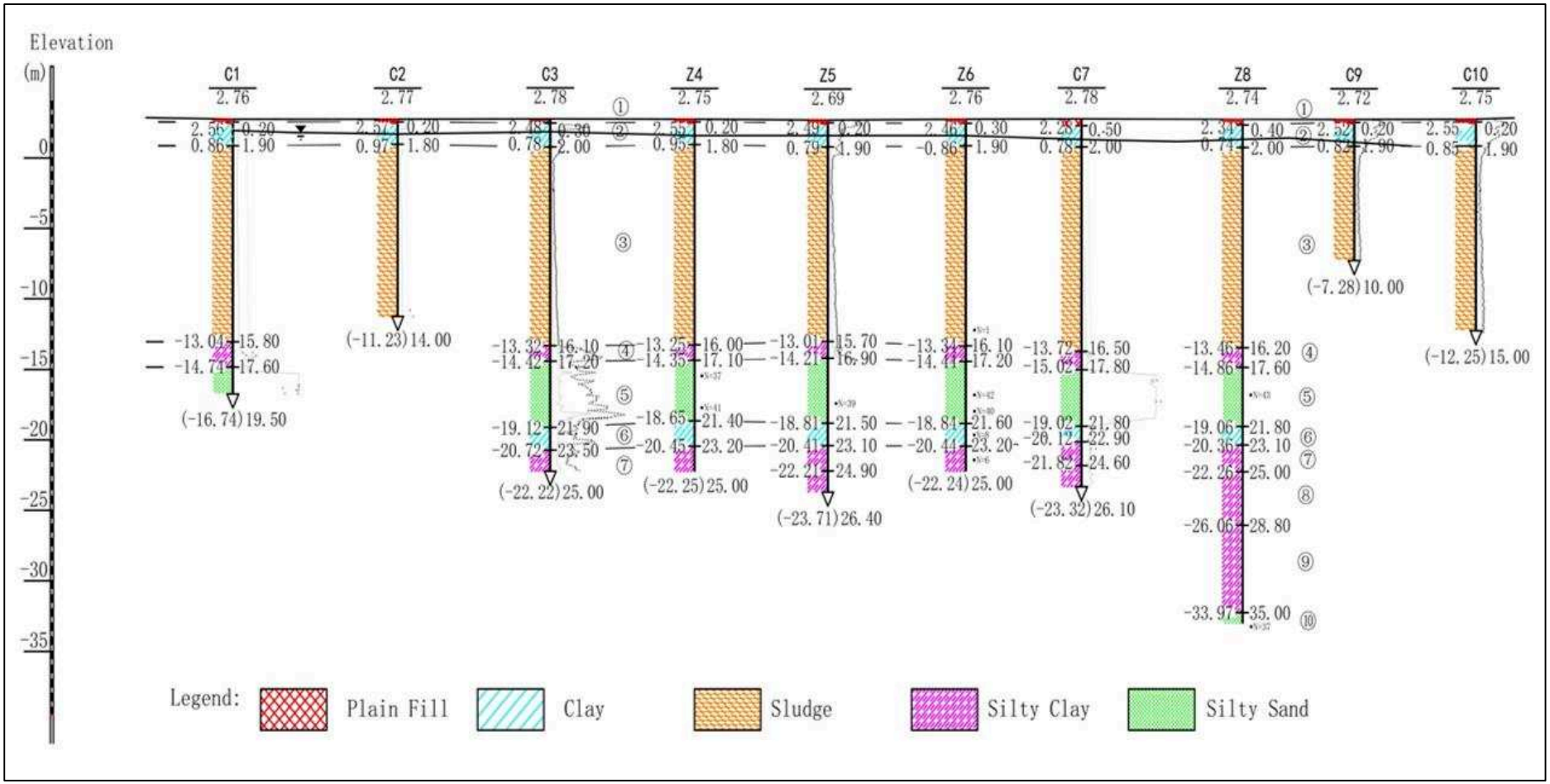

Figure 3.2-2. Géologie du site-coupe géotechnique

3.2.2.3 Situation hydrologique

Le site du projet se situe dans le district de Xuwei, dans la ville de Lianyungang. Dans cette région le climat est humide et les quatre saisons sont distinctes. La température la plus élevée en juillet et en août est de 26,8 °C, la température moyenne annuelle est de 13,7 °C, la température la plus élevée pouvant atteindre 40 °C, la température maximale supérieure à 35 °C est de 8,7 jours par an, la plus froide en janvier avec une température moyenne mensuelle de -0,2 °C, la température la plus basse est de -18,1 °C. Le nombre de jours inférieurs à -10 °C est en deça de 6 jours par an en moyenne.

Les précipitations annuelles sont de 939,6 mm, et les précipitations en hiver et en été sont inégales. De juin à août, elles représentent 63% du total des précipitations annuelles. Il y a 94,4 jours de précipitations dans toute l'année. Ces précipitations atteignent leur maximum en juillet, pour une période de 15 jours; les minima sont en janvier sur seulement 4 jours. L'évaporation annuelle est de 1250 mm. En hiver, il y a le 7,2 jours d'accumulation de neige et l'épaisseur maximale de neige est de 28 cm.

Les eaux de surface autour du site se trouvent principalement dans les étangs à poissons et à crevettes. Généralement, les niveaux d'eau sont plus élevés en été et en automne, plus bas en hiver et au printemps. Le changement des niveaux d'eau a peu d'impact sur le site.

3.2.2.4 Exigences au niveau de la construction de la voie routière

Les valeurs recommandées pour la capacité portante de chaque zone sont indiquées en fonction des indicateurs de conception existants et de l'expérience technique des entreprises environnantes, et les exigences de conception spécifiques sont finalement déterminées conformément aux dessins de conception, comme indiqué dans les tableaux 3.2-1 et 3.2-2.

Tableau 3.2-1. Indicateurs d'acceptation de la route pour les sédiments solidifiés du projet

Type de route	Indice d'acceptation principal		Remarques
	Indicateur	Valeur de l'indicateur	
Route principale	Valeur de déflexion (0.01 mm)	≤ 200	Véhicule ou engins de chantier de 150 t
	Capacité portante de la fondation (kPa)	≥ 200	
Route secondaire	Valeur de déflexion (0.01 mm)	≤ 220	
	Capacité portante de la fondation (kPa)	≥ 150	

Tableau 3.2-2. Exigences de performance du sédiment solidifié routier du projet

Type de route	Exigences de performance	
	Indicateur	Valeur de l'indicateur
Route principale	Résistance à la compression non confinée q_u (kPa)	≥ 200
	Module de compressibilité E_s (MPa)	≥ 7.0
	Cohésion C (kPa)	≥ 40
	Angle de frottement φ (°)	≥ 18
Route secondaire	Résistance à la compression non confinée q_u (kPa)	≥ 150
	Module de compressibilité E_s (MPa)	≥ 6.0
	Cohésion C (kPa)	≥ 30
	Angle de frottement φ (°)	≥ 15

3.2.3 Essais de laboratoire relatifs au projet

3.2.3.1 Eprouvettes de sol et matières premières utilisées pour la solidification des sédiments

a. Eprouvettes de sol

Dans cette étude, les éprouvettes de sol ont été prélevées sur le site du projet Lianyungang et la profondeur de carottage était de 0,7 à 1,2 m. Ce sont des limons de

couleur taupe, plastiques fluides, relativement homogènes. Des couches minces locales de sable limoneux sont possibles. Ils sont très odorants (odeur de poisson). Les propriétés physiques des éprouvettes de sol sont présentées dans le tableau 3.2-3.

Tableau 3.2-3. Propriétés physiques du sol provenant du site

Classification des éprouvettes de sol	Teneur en eau ω (%)	Densité des grains G_s	Poids volumique apparent γ (kN/m^3)	Poids volumique sec γ_d (kN/m^3)	Indice des vides naturel e_o
Limon	59.8	2.76	16.5	10.24	1.65
Classification des éprouvettes de sol	Degré de saturation S_r (%)	Limite de liquidité W_L (%)	Limite de plasticité W_P (%)	Indice de plasticité I_P	Indice de liquidté I_L
Limon	99.8	52.4	29.8	22.6	1.40

b. Agent de durcissement

L'agent de durcissement utilisé dans cette étude comprend les éléments suivants:

- Un liant hydraulique: de la chaux (C); produit commercial chinois;

- Un agent de durcissement composé (ADC4); produit commercial de la société Jiangsu Kunze Technology Co., Ltd.;

- Un agent de durcissement composé (ADC5); produit commercial de la société Jiangsu Kunze Technology Co., Ltd.;

- Des additifs d'activation: les additifs d'activation utilisés sont du silicate de sodium (Na_2SiO_3, qualité industrielle) et du sulfate de sodium (Na_2SO_4, qualité industrielle).

3.2.3.2 Etude expérimentale sur l'effet du type d'agent de durcissement sur la performance des sédiments solidifiés dans le projet de Lianyungang

Cette étude permet de tester les différents types d'agents de durcissement (au nombre de 3) et leur dosage de mélange sur l'effet de la résistance à la compression non confinée du sédiment solidifié, de la cohésion, de l'angle de frottement et du module de compressibilité. Les résultats des essais sont présentés dans le tableau 3.2-4.

Les données du tableau 3.2-4 montrent que la chaux a un effet médiocre sur le sédiment limoneux du site. Même si le dosage en chaux est augmenté, la résistance du

sédiment solidifié n'est pas sensiblement améliorée. Les agents de durcissement composés ADC4 et ADC5 ont un meilleur effet de durcissement sur le sédiment, donc plus efficaces que la chaux. Parmi eux, l'agent de durcissement composé ADC4 a le meilleur effet de durcissement sur le sédiment solidifié. Sa résistance à la compression non confinée, sa cohésion, son angle de frottement et son module de compressibilité augmentent au fur et à mesure que le dosage augmente. Cependant, selon les exigences du projet routier de Lianyungang, la résistance à la compression non confinée du sédiment solidifié à 28 jours est inférieure à 300 kPa. Il est évident que l'agent de durcissement composé n'a pas encore satisfait aux exigences d'utilisation et dans l'optique d'assurer le coût de construction, une augmentation du dosage n'est pas sans conséquence, c'est pourquoi, sur la base de l'agent de durcissement composé ADC4, on peut adopter d'autres solutions pour que le sédiment soit suffisamment performant pour répondre aux exigences de la construction.

Tableau 3.2-4. Propriétés mécaniques obtenues avec différents agents de durcissement à l'âge de 28 jours

Agent de durcissement	Dosage de l'agent de durcissement (%)	Résistance à la compression non confinée (kPa)	Cohésion C (kPa)	Angle de frottement φ (°)	Module de compressibilité E_s (MPa)
Chaux	4	31	11	7	1.0
	6	39	11	7	1.1
	8	52	12	7	1.3
ADC4	4	132	18	11	3.7
	6	210	24	14	4.5
	8	242	31	16	5.1
ADC5	4	87	15	9	1.4
	6	109	16	9	1.6
	8	142	18	12	1.7

3.2.3.3 Etude expérimentale sur les performances de l'activateur pour améliorer la solidification des sédiments

Afin d'améliorer l'effet de durcissement de l'agent de durcissement ADC4 sur le sédiment solidifié, l'étude s'est focalisée sur l'effet du durcissement avec un ajout de silicate de sodium comme activateur (Na_2SiO_3)[101] et du sulfate de sodium (Na_2SO_4). Deux activateurs ont été utilisés pour augmenter la résistance à la compression et le module de compressibilité du sédiment solidifié[102]. Pour ces essais, le dosage en agent de durcissement composé ADC4 était de 6% et le dosage d'activateur ajouté est basé sur le pourcentage en masse de l'agent de durcissement. Les résultats des essais spécifiques sont présentés dans le tableau 3.2-5 et la figure 3.2-3.

Tableau 3.2-5. Résistance en compression et module de compressibilité du sédiment solidifié après l'incorporation de différents activateurs à 28 jours

Dosage d'agent de durcissement (%)	Activateur	Dosage d'activateur (%)	Résistance à la compression non confinée (kPa)	Cohésion C (kPa)	Angle de frottement φ (°)	Module de compressibilité E_s (MPa)
ADC4 (6%)	Na_2SiO_3	0	210	24	14	4.5
		0.5	211	24	14	4.5
		0.7	216	24	14	4.5
		1.0	226	25	15	4.5
		1.3	241	26	16	4.6
		1.5	251	27	17	4.8
	Na_2SO_4	0.5	261	31	18	5.4
		0.7	289	36	21	7.1
		1.0	322	45	24	8.7
		1.3	333	46	25	9.2
		1.5	341	46	25	9.3

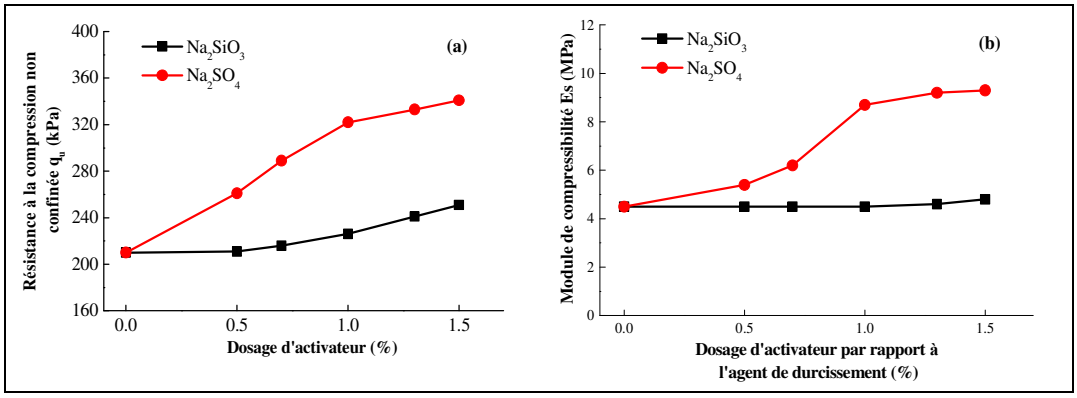

Figure 3.2-3. Evolution de la résistance à la compression non confinée (a) et du module de compressibilité (b) d'un sédiment après l'incorporation de différents activateurs

La comparaison des données du tableau 3.2-5 et la figure 3.2-3 montrent que l'ajout de Na_2SiO_3 n'augmente pas de manière significative la résistance et le module de compressibilité du sédiment solidifié. Même si le dosage en Na_2SiO_3 est augmenté, une résistance suffisante ne peut pas être obtenue. L'ajout de Na_2SO_4 a considérablement amélioré les performances géotechniques du sédiment solidifié et l'effet de l'activateur a augmenté avec son dosage. Lorsque le dosage en Na_2SO_4 était d'environ 1% de la masse de l'agent de durcissement composé ADC4, l'activation est plus significative. Continuer à augmenter la quantité d'activateur montre que l'effet d'amélioration de la résistance en compression et du module de compressibilité du sédiment solidifié est atténué. Par conséquent, compte tenu de l'effet d'amélioration de la résistance et de l'économie, le dosage approprié de l'activateur Na_2SO_4 est de 1% de la masse de l'agent de durcissement. Dans la pratique, l'activateur et l'agent de durcissement composé sont généralement mélangés. Ce nouvel agent de durcissement composé ADC4 avec l'activateur Na_2SO_4 formé par agitation a été breveté et enregistré sous le numéro ADC4-1.

La figure 3.2-4 montre que lorsque le dosage de l'activateur Na_2SO_4 est égale à 1% de l'agent de durcissement, dans le cas de différents dosages d'agents de durcissement, la résistance en compression et le module de compressibilité du sédiment solidifié des ont évolué avec l'âge.

Les données montrent que la loi de variation avec de la résistance en compression et du module de compressibilité du sédiment solidifié après un ajout de l'activateur Na_2SO_4 sont fondamentalement les mêmes, et que l'augmentation de la résistance en compression et du module de compressibilité avant l'âge de 28 jours sont très rapides. La vitesse de réaction du sédiment et de l'agent de durcissement après l'âge de 60 jours est ralentie, la résistance en compression et le module de compressibilité du sédiment solidifié ont tendance à être stables, et leurs valeurs sont constantes. Les données de la figure 3.2-4 permettent également d'obtenir les informations suivantes pour répondre aux exigences du projet routier de Lianyungang en ce qui concerne les propriétés du sédiment solidifié. Le dosage d'agent de durcissement ADC4-1 dans le sédiment solidifié de la route secondaire est de 4% (équivalent à 1 m^3 de sédiment mélangé avec 70 kg d'agent de durcissement). Le dosage de durcisseur ADC4-1 dans le sédiment solidifié de la route principale est compris entre 5% et 6% (équivalent à 1 m^3 de sédiment mélangé avec 90 à 105 kg d'agent de durcissement). Selon l'expérience acquise lors d'une précédente construction, l'homogénéité du mélange du sédiment solidifié en laboratoire est évidemment meilleure que celle du mélange réalisé pendant la construction: avec le même dosage, la résistance du sédiment solidifié sur site est égale à 70% ~ 80% de celle obtenue sur le sédiment solidifié mélangé au laboratoire. Par conséquent, la résistance du sédiment solidifié déterminée par le laboratoire est supérieure d'environ 30% aux exigences de conception, ce qui peut encore satisfaire aux exigences de conception après réduction de la résistance du sédiment solidifié sur site.

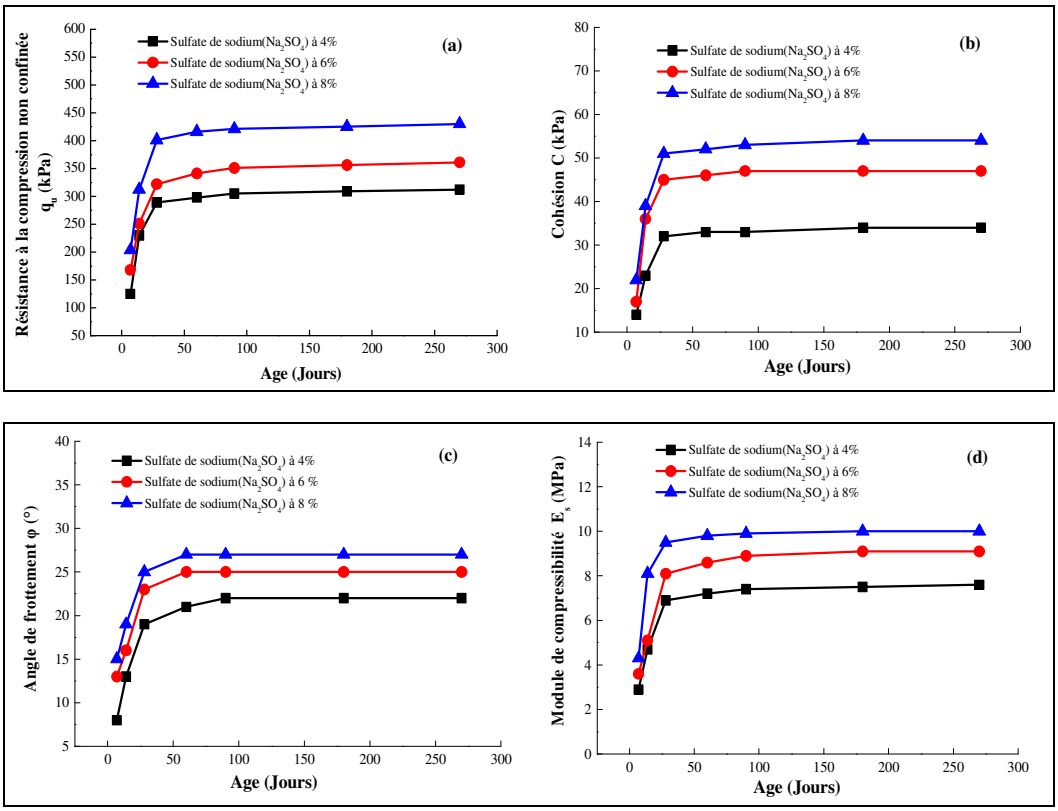

Figure 3.2-4 Variation de la résistance compression et du module de compressibilité d'un sédiment solidifié avec l'âge

3.2.3.4 Étude expérimentale de la stabilité à des cycles de mouillage et de séchage du sédiment solidifié

Le sédiment solidifié se trouvant en surface de la chaussée est soumis à une alternance de conditions sèches et humides, en raison de la faible résistance nominale du sédiment solidifié pour une route secondaire, il est plus susceptible de voir diminuer sa résistance après avoir une alternance de cycle d'état sec et humide. Par conséquent, cette section concerne la stabilité du sédiment solidifié pour une route secondaire dans des conditions sèches et humides. Les résultats des tests spécifiques sont présentés dans les tableaux 3.2-6 à 3.2-9.

Un cycle de séchage-mouillage dure 48h (24h de séchage suivi de 24h en immersion totale, un cycle de séchage-mouillage est noté 2 fois.

Tableau 3.2-6. Résistance à la compression non confinée d'un sédiment solidifié après alternance d'états humide et sec

Elément d'inspection	Nombre d'alternance d'états humide et sec (fois)					
	0	10	40	80	120	160
Résistance à la compression confinée q_u (kPa)	289	288	281	276	266	252
Taux de perte de résistance (%)	0	0.3	2.8	4.5	8.0	12.6

Tableau 3.2-7. Cohésion d'un sédiment solidifié après alternance d'états humide et sec

Elément d'inspection	Nombre d'alternance d'états humide et sec (fois)					
	0	10	40	80	120	160
Cohésion C (kPa)	32	32	31	30	29	28
Taux de perte de cohésion C (%)	0	0	3.2	6.3	9.4	12.5

Tableau 3.2-8. Angle de frottement d'un sédiment solidifié après alternance d'états humide et sec

Elément d'inspection	Nombre d'alternance d'états humide et sec (fois)					
	0	10	40	80	120	160
Angle de frottement φ (°)	19	19	19	18	17	17
Taux de perte d'angle de frottement φ (%)	0	0	0	5.3	10.5	10.5

Tableau 3.2-9. Module de compressibilité d'un sédiment solidifié après alternance d'états humide et sec

Elément d'inspection	Nombre d'alternance d'états humide et sec (fois)					
	0	10	40	80	120	160
Module de compressibilité E_s (MPa)	6.9	6.8	6.7	6.6	6.4	6.2
Taux de perte du module de compressibilités (%)	0	1.4	2.8	4.2	6.9	9.7

L'analyse des données des tableaux 3.2-6, 3.2-7, 3.2-8 et 3.2-9 montre que l'alternance d'états humide et sec a un effet défavorable sur la résistance et le module de compressibilité du sédiment solidifié, avec une tendance à la baisse avec

l'augmentation du nombre de périodes d'alternance sèche et humide, et le degré de réduction à la fin de la période tend à crôitre.

L'amplitude de la résistance et du module de compressibilité du sédiment solidifié de la route secondaire a diminué après alternance d'états humide et sec, mais le taux de perte de la résistance et du module de compressibilité du sédiment solidifié après 160 cycles d'états sec et humide est inférieur à 20% ce qui correspond aux exigences techniques, c'est-à-dire que la stabilité alternée sec-humide du sédiment solidifié de la route secondaire répond aux exigences techniques.

3.2.3.5 Étude du compactage du sédiment solidifié sur le site

En laboratoire, on a constaté que la teneur en eau du sédiment solidifié obtenue avec l'agent de durcissement composé était supérieure à 45% et qu'il restait une grande quantité d'eau à l'intérieur du sédiment solidifié. L'eau à l'intérieur du sédiment solidifié coexiste avec les particules d'argiles et les produits d'hydratation de l'agent de durcissement d'une manière faiblement combinée. La teneur en eau est bien supérieure à la teneur en eau optimale du sol et, en tant que matériau routier, ses caractéristiques de compactage doivent être testées et vérifiées. Cette section prend le nombre de coups appliqué a chaque compactage en laboratoire comme facteur déterminant pour étudier les effets du compactage sur la résistance en compression et le module de compressibilité du sédiment solidifié de la route secondaire, dont les résultats sont présentés dans le tableau 3.2-10 et la figure 3.2-5.

Tableau 3.2-10. Résistance en compression et module de compressibilité du sédiment solidifié pour une route secondaire en fonction du nombre de coups de compactage

Elément d'inspection	Nombre de compactage (fois)			
	5	10	15	20
Résistance à la compression non confinée q_u (kPa)	289	296	299	301
Cohésion C (kPa)	32	33	33	34
Angle de frottement φ (°)	19	19	20	20
Module de compressibilité E_s (MPa)	6.9	7.0	7.2	7.2

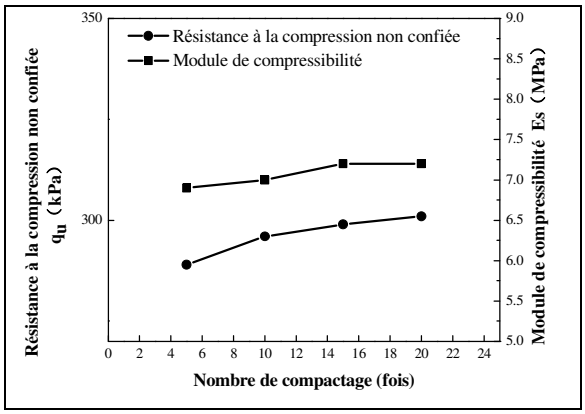

Figure 3.2-5. Variation de la résistance en compression et du module de compressibilité d'un sédiment solidifié d'une route secondaire avec le nombre de coups de compactage

Le tableau 3.2-10 et la figure 3.2-5 montrent que, lorsque le nombre de coups ou indirectement le temps de compactage augmente, la résistance en compression et le module de compressibilité du sol solidifié augmentent légèrement. Les résultats de l'essai de compactage avec 20 coups et du compactage avec 5 coups sont relativement faibles, ce qui indique, en tant que résistance structurelle du sol, pour le sédiment solidifié elle ne repose pas sur une augmentation de la résistance au compactage du sédiment pour améliorer sa résistance, elle repose principalement sur les produits de gélification et de cristallisation formés par une série de réactions d'hydratation, de cendres volantes et d'échange d'ions entre l'agent de durcissement et les particules du sol. Le renforcement du squelette et l'action de cohésion (adhérence) favorise la formation de la résistance structurelle du sédiment solidifié. Selon les résultats des essais susmentionnés, il est connu que le sédiment solidifié ne nécessite pas de nombre compactage comme compacter les sols nature et que seule la stratification et le simple laminage peuvent garantir les bonnes propriétés mécaniques du sol de la couche fondation.

3.2.4 Organisation de la construction

3.2.4.1 Schéma des routes conçues avec les sédiment solidifiés

Les schémas de conception de la plate-forme de sédiment solidifié de la route principale et de la route secondaire sont illustrés aux figures 3.2-6 et 3.2-7.

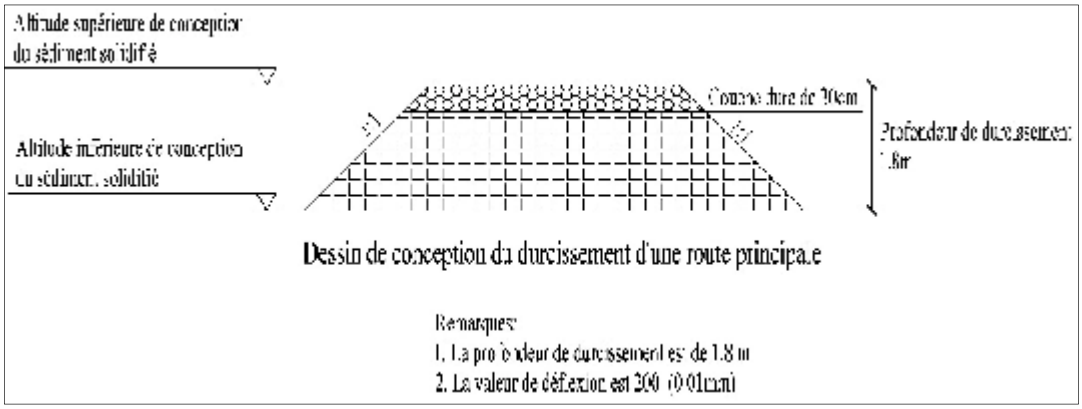

Figure 3.2-6. Conception d'une plate-forme de sédiment solidifié pour une route principale

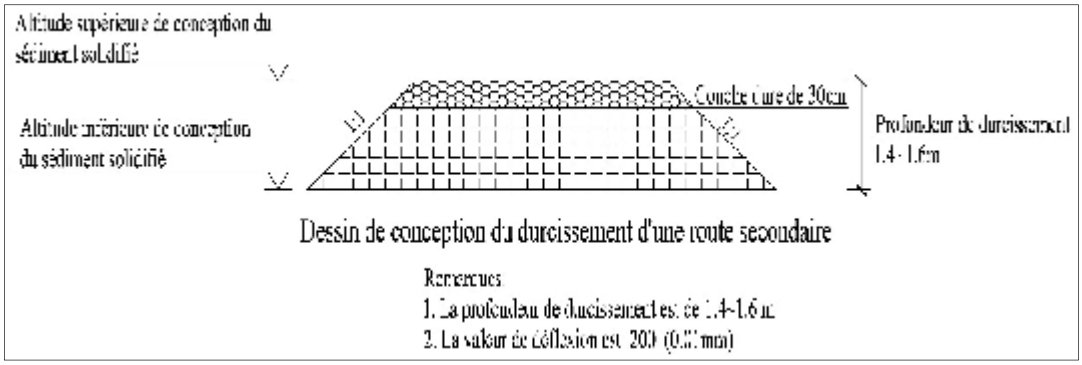

Figure 3.2-7. Conception d'une plate-forme de sédiment solidifié pour une route secondaire

Dans les 2 cas de route, on distingue:

Route principale: La gamme de profondeur d'aplication de chargement est large, profondeur de traitement proposée n'est pas inférieure à 1,8 m.

Route secondaire: La gamme de profondeur de chargement est petite, profondeur de traitement proposée est de1,4 à 1,6m.

La couche protectrice temporaire sur la partie supérieure est mise en place en tant que couche alternative, stable à l'eau après la construction de la couche structurelle supérieure correspondant à la dernière couche mise en place, et l'asphalte ou le béton peuvent être directement posé sur la partie supérieure.

L'altitude actuelle du site est d'environ 2,2 à 2,5 m, l'altitude finale prévue est d'environ 4,0 à 4,5 m. L'altitude du remblai dans le site est d'environ 3,8 m, donc son épaisseur est d'environ de 1,3 à 1,6 m. Combiné avec les données géologiques des projets environnants, et après calcul, le tassement théorique après construction sur le sédiment solidifié est ≤ 15cm.

3.2.4.2 Processus de construction

La méthode de solidification est légèrement différente en fonction de la situation réelle de l'étude de site et des différents schémas de conception et de traitement de la structure du sédiment.Cependant, l'idée générale de construction d'une couche avec un sédiment solidifié devrait être définie conformément au plan de construction. Le processus spécifique de construction est illustré à la figure 3.2-8.

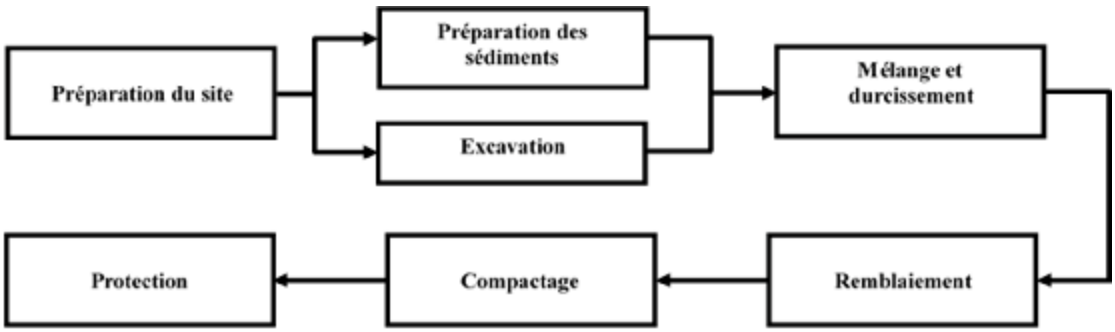

Figure 3.2-8. Organigramme du processus de construction d'une couche de renforcement de sédiment solidifié

Une fois le mélange de sédiment effectué sur site, on procède après avoir effectué l'excavation, au remblayage de la première couche de conception et ainsi de suite jusqu'à la dernière couche finale.

3.2.4.3 Contrôle de la qualité

Pendant le processus de construction de la route avec la mise en œuvre des sédiments solidifiés, il est effectué simultanément des travaux d'inspection de la qualité de la construction, dont le contenu est présenté au tableau 3.2-11. Les résultats des inspections de qualité la partie construite sont présentés dans les tableaux 3.2-12 et 3.2-13.

Les résultats de l'autotest montrent que la qualité de la construction de la route en sédiments solidifiés peut être contrôlée et que les résultats de l'inspection répondent aux exigences de conception.

L'autotest a montré que les résultats de résistance à la compression non confinée et du module de compressibilité et sur l'estimation de la résistance à la compression par pénétration dynamique du sédiment solidifié de la route du projet de Lianyungang répondaient aux exigences de conception.

Tableau 3.2-11. Éléments d'inspection et fréquence d'inspection pour la construction d'une couche de sédiment solidifié dans le cas du projet de Lianyungang

Contrôle	Éléments d'inspection	Fréquence d'inspection	Méthode d'inspection	Partie d'inspection
Processus de construction	Résistance à la compression non confinée à 28 jours sur site	1 inspection par 1000 m^3 de construction	Prélèvement d'éprouvettes de sédiment solidifié à l'âge de l'essai	Entreprise réalisant la construction
	Module de compressibilité à 28 jours sur site	1 inspection par 3000 m^3 de construction		
	Pénétration dynamique	1 point par 100 mètres	Inspection sur place de la route en construction après 28 jours	
Inspection d'acceptation	Déflexion	1 point par 100 mètres	Inspection sur place	Bureau de contrôle

Tableau 3.2-12. Résultats de l'autotest sur la résistance en compression non confinée et du module de compressibilité à 28 jours

Type de route	Date d'inspection	Résistance à la compression non confinée à 28 jours q_u (kPa)	Module de compressibilité à 28 jours E_s (MPa)	Conclusion
Route principale	2019.05.02	255	8.7	Qualifié
	2019.05.08	241	8.1	
	2019.05.16	247	8.2	
	2019.05.25	259	8.3	
	2019.06.12	251	8.1	
	Exigences de conception	≥ 200	≥ 7.0	
Route secondaire	2019.05.06	182	6.3	Qualifié
	2019.05.20	199	6.5	
	2019.05.29	189	6.2	
	2019.06.04	191	6.6	
	2019.06.16	179	6.2	
	Exigences de conception	≥ 150	≥ 6.0	

Tableau 3.2-13. Résultats de l'autotest de essai de pénération dynamique

Type de route	Point de mesure	Résistance à la compression non confinée à différentes profondeurs de sédiment solidifié par pénération dynamique q_u (kPa)						Conclusion
		0.3 m	0.6 m	0.9 m	1.2 m	1.5 m	1.8 m	
Route principale	1	225	216	221	236	209	212	Qualifié
	2	246	208	235	222	217	207	
	3	233	216	231	212	208	215	
	4	227	241	218	217	235	206	
	5	230	235	241	231	224	218	
Exigences de conception		≥ 200						
Route secondaire	6	179	168	172	178	166	\	Qualifié
	7	182	175	170	181	171	\	
	8	167	163	166	161	159	\	
	9	191	182	174	172	177	\	
	10	177	174	181	169	167	\	
Exigences de conception		≥ 150						

3.2.5 Test de réception sur site

Une fois la construction routière du projet de Lianyungang achevée et au-delà de 28 jours, le site d'inspection et de réception des travaux sera exécuté et tous les travaux d'inspection seront terminés par une partie d'inspection tierce (bureau de contrôle). La partie d'inspection tierce pour ce projet a été confiée à Xianzhi Lianyungang Construction Engineering Testing Co., Ltd., qui possède les qualifications requises correspondantes. Les résultats d'inspection relatif aux éprouvettes sur site sont présentés dans le tableau 3.2-14. Les résultats montrent que les valeurs de déflexion de la route principale et de la route secondaire ont atteint les exigences de conception et

que la qualité de la construction de la route à base de sédiments solidifiés est satisfaisante.

Tableau 3.2-14. Résultats d'inspection sur site de la mesure de déflexion

Type de route	Point de mesure	Valeur de déflexion (0.01 mm)			
		Voies de gauche	Conclusion	Voies de droite	Conclusion
Route principale	1	110	Qualifié	102	Qualifié
	2	76		118	
	3	84		170	
	4	130		110	
	5	166		138	
	6	116		78	
	7	74		170	
	8	92		112	
	9	96		82	
	10	68		170	
Route secondaire	1	174	Qualifié	118	Qualifié
	2	66		182	
	3	112		218	
	4	208		184	
	5	84		138	
	6	58		50	
	7	124		56	
	8	86		206	
	9	58		88	
	10	138		210	
Exigences de conception	Valeur de déflexion pour la route principale ≤ 200 (0.01 mm) Valeur de déflexion pour la route secondaire ≤ 220 (0.01 mm)				

Avant la construction Après la construction

Figure 3.2-9. Photo sur la route du projet de Lianyungang

3.2.6 Résumé

Afin de réaliser l'amélioration d'un sol (sédiment limoneux) par solidification pour une fondation de route, il est nécessaire d'apporter une solution pour que le sédiment solidifié acquière une capacité de déformation verticale suffisante et que la stabilité de la structure soumise à des cycles secs et humides soit aussi satisfaisante.

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet portaient sur l'effet de durcissement de types d'agents de durcissement composés ADC et l'utilisation d'activateurs sur des sédiments limoneux. Il a fallu aussi maitriser la technologie clé de la préparation et de la construction pour les sédiments solidifiés pour des routes. L'objectif était d'améliorer la résistance, le module de compressibilité et la stabilité à des cycles secs et humides de sédiments solidifiés. Il a fallu aussi une application en ingénierie routière satisfaisant toutes exigences de la construction. Les conclusions spécifiques à ces travaux sont les suivantes:

Développer et assurer une bonne maîtrise des technologies clés pour la préparation de sédiments solidifiés, destinés à être utilisés pour des routes. Au moyen d'une série d'essais, un agent de durcissement composé ADC4 et un activateur Na_2SO_4 ont été sélectionnés pour obtenir un nouvel agent de durcissement composé ADC4-1 pour les

routes. Pour ce nouvel agent, l'activateur représentait 1% de la masse totale de l'agent de durcissement.

L'influence de l'agent de durcissement composé sur la résistance, la compressibilité et la stabilité à l'eau à des cycles alternés secs et humides du sédiment solidifié a été étudiée ainsi que la méthode de préparation du sédiment solidifié pour deux types de route: principale et secondaire. La résistance et le module de compressibilité du sédiment solidifié avec l'agent de durcissement composé ADC4-1 peuvent être évidemment améliorées. Après 160 cycles secs et humides appliqués aux sédiments solidifiés, la valeur de diminution du module de compressibilité est inférieure à 20%. La stabilité à l'eau à des cycles alternés secs et humides est bonne. Afin de répondre à diverses exigences de performance, le dosage de l'agent de durcissement ADC4-1 dans le sédiment solidifié pour une route secondaire du projet de Lianyungang est de 4% (équivalent à 1m^3 de sédiment mélangé avec un agent de durcissement de 70 kg) et, pour l'agent de durcissement ADC4-1 pour le sédiment solidifié pour la route principale, le dosage est de 5% à 6% (équivalent à 1m^3 de sédiment mélangé avec un agent de durcissement de 90 à 105 kg).

Une mise au point d'une technologie de construction de routes avec des sédiments solidifiés est proposée. L'effet du degré de compactage sur les performances du sol solidifié a été étudié. Il a été précisé que la technologie de construction pour la plate-forme du sédiment solidifié était le compactage par couche. De même des engins de construction courants comme l'excavateur avaient été choisis, et que le processus de construction était normalisé et les points de contrôle de la qualité du sédiment solidifié avait été proposés.

Le sédiment solidifié pour construire des routes, préparé avec cette technologie est qualifié pour l'inspection et l'acceptation sur site, voir figure 3.2-9.

3.3 Etude de la construction d'une digue-Site de Xiapu (Chine)

3.3.1 Contexte de la recherche

La côte continentale chinoise mesure 18.400 kilomètres de long et le littoral des îles plus de 14.000 kilomètres. Avec un littoral de plus de 32.000 kilomètres, c'est l'un des plus longs littoraux du monde. Pour les principales digues la durée de vie a été portée à 50 ans vis-à-vis des typhons et les capacités techniques de défense des zones côtières touchées par les typhons ont été considérablement améliorées. L'industrie de la construction de digues en Chine s'est récemment développée très rapidement et, selon les données de l'Association Chinoise de Conservation de l'Eau, les investissements dans les projets de digues ont atteint plus de 30 milliards de yuans par an après 2015. En 2017, la Commission nationale pour le développement et la réforme de la République populaire de Chine et le ministère des Ressources en eau ont conjointement préparé et publié le « Plan national de construction de digues », qui définissait les idées directrices, les objectifs généraux et les projets clés pour la construction de digues actuelles et futures et stipulair que la province du Zhejiang, la province du Jiangsu, la province du Fujian et la province du Shandong étaient des zones de construction clés. Selon les exigences de la politique, diverses régions ont également introduit successivement une série de plans de construction de digues.

La longueur du littoral et les ressources côtières en eau profonde de la province du Zhejiang occupent la première place dans le pays, et les principaux ports sont situés dans la zone centrale de la ceinture économique en forme de « T » de la Gold Coast et de la voie navigable dorée du fleuve Yangtsé en Chine. Le "Plan directeur de remise en état de la plage de Zhejiang (2005 - 2020)" indiquait que la superficie prévue pour les extensions de terrain en mer dans la province était d'environ 1747,5 km^2 et que 117 projets de construction de digues de protection et de fermeture pour construire des plate-formes sur la mer sont concernés d'ici 2020, pour une superficie totale de 1280,6 km^2. Entre 2016 et 2020, l'étendue prévue pour l'emprise des terrains gagnés sur la mer est

de 213,6 km^2, la longueur de la digue est de 129,57 km et l'investissement total est d'environ 8.445 milliards de yuans.

Le province du Fujian propose que d'ici 2020, le province prévoit un total de 551,3 km^2 de création de terrain et achève un investissement de 6584 milliards de yuans.

Parallèlement à l'avancement des travaux de mise en valeur des zones côtières avec des extensions en mer, un grand nombre de projets de construction et ou de réparation de digues en mer ont été mis en oeuvre l'un après l'autre. La difficulté technique importante dans ces projets de construction est que la plupart des structures doivent être construites sur des fondations souples. Parmi elles, les noyaux de digues qui sont une partie importante de la digue, et la qualité de la construction du noyau sur un sol meuble est directement liée à l'utilisation ultérieure de l'ensemble de la digue. Selon le matériau du noyau de la digue, les formes courantes et les avantages et les inconvénients des digues traditionnelles sont indiqués dans le tableau 3.3-1 ci-après.

Dans le cas de digues traditionnelles, les noyaux sont souvent construits avec comme protection des enrochements ou des sacs de sable. Toutefois, sous l'impulsion stricte de la politique de protection de l'environnement de la Chine, les ressources en roches sont devenues rares et les réserves en roches existantes ne peuvent pas répondre aux besoins des projets de digues. Trouver un plus large éventail de matériaux géotechniques en tant que matériaux de noyau de digues est devenu un moyen de remédier aux contraintes liée aux ressources naturelles (enrochements). En raison de ses grands volumes disponibles et renouvelables et de ses performances, un sédiment solidifié peut être utilisé comme un nouveau matériau pour un noyau de digue de protection ou de barrage. Les avantages du sédiment solidifié peuvent être énumérés ou se présenter comme suit:

La resource en matières premières est importante et l'application de la technologie de solidification de sédiments permet d'utiliser ces ressources;

Le sédiment solidifié peut être fluide quand il vient d'être mélangé, et adapté au pompage et au remplissage de sacs en géotextile, avec un degré élevé d'automatisation pour la construction et un degré de remplissage élevé;

Le sédiment solidifi a un faible coefficient de perméabilité et la performance d'étanchéité à l'air, est bonne;

Le sédiment solidifié présente selon les dosages une résistance élevée et une forte stabilité à l'eau après le durcissement[103], et la digue peut voir augementer sa durée de vie.

Tableau 3.3-1. Formes courantes de digues traditionnelles et leurs avantages et inconvénients

Forme de la digue	Matériau du noyau de la digue	Avantage	Inconvénient
Digues en enrochements	Enrochement	Longue histoire d'utilisation, accès facile aux matières premières	Mauvaise étanchéité à l'air, vitesse de construction lente, coût élevé et utilisation importante de roches
Digues en sacs de sable	Sacs de sable	La vitesse de construction est rapide, la stabilité générale de la digue est bonne.	Facilement endommageable et à se déplacer sous l'action de grosses vagues, effondrement rapide après la formation de dommages, le degré de remplissage difficile à contrôler
Digues mixtes en enrochement et sacs de sable	Sacs de sable, et enrochement	Meilleure résistance aux vagues et diminution du poids	Complexité de la construction
Digues en béton semi-circulaires	Enrochements et béton	Légèreté de la structure, la force de réaction au sol est faible et uniforme, la résistance au vent et aux vagues est élevée, Utilisation d'enrochements mininale (économie de matériaux naturels)	Construction complexe, exigences techniques élevées et coût élevé

Le processus de préparation du sédiment solidifié et le processus de construction sont simples, la difficulté et le coût de construction sont faibles, et l'économie réalisée est bonne.

Pour que le sédiment solidifié soit un bon matériau géotechnique et convienne comme matériau de noyau de digue, la technologie de préparation et d'application du

sédiment solidifié a été étudiée sous deux aspects: la satisfaction des performances de construction et d'application. L'application de cette technologie au projet de construction du brise-lames du port de pêche secondaire de l'île de Zhujiang, ville de Shajiang, comté de Xiapu, province du Fujian, (Chine) a été réalisée.

3.3.2 Le projet de Xiapu

3.3.2.1 Présentation du projet

Le projet de construction concerne un brise-lames du second port de pêche de l'île de Zhujiang dans la ville de Shajiang, ci-après dénommé le projet de la digue de Xiapu.

Le lieu du projet est situé sur l'île Zhujiang dans la ville de Shajiang appartenant, ou comté de Xiapu dans la province du Fujian.

Ce projet consiste à construire un nouveau type de port de pêche protégé de deuxième classe, en tenant compte de sa production. Avec une capacité de déchargement annuelle de 20.000 tonnes, la superficie en eau protégée dans le bassin du port est de 30.200 m^2 et la superficie des plateformes portuaires prévue est de 13.400 m^2. Le chantier nouvellement construit faisait état de 3.380 m^2, le reste de la supercifie ayant été construit par les villageois.

La structure hydraulique principale est un brise-lames d'environ 2 km. Le brise-lames est haut de 5,5 m, sa largeur maximale est de 7,9 m, la largeur de la chaussée est de 7,0 m et la longueur de cette mise en œuvre est de 200 m. Cette longeur de 200 m constitue le projet.

3.3.2.2 Géologie du site

Les données géologiques d'ingénierie du port de pêche de Zhujiang dans la ville de Shajiang ont été fournies par la société Quanzhou Quancheng Survey Co., Ltd en mars 2013. Une série de 6 forages ont été exécutés sur l'axe du brise-lames (voir figure 3.3-1). Les forages révèlent que sur environ 12 m se trouve une couche de limon en surface, puis de 12 m à 20 m, il y a une couche d'argile limoneuse, et de 20 m à 25 m

on a une couche d'argile résiduelle. La partie sous-jacente est formée d'une couche de granite complètement altérée ou fortement altérée. Les couches de sols sont généralement continues et la distribution en épaisseur de chaque couche est relativement uniforme. Les propriétés physiques et mécaniques des couches de sédiment principales sont présentées dans le tableau 3.3-2.

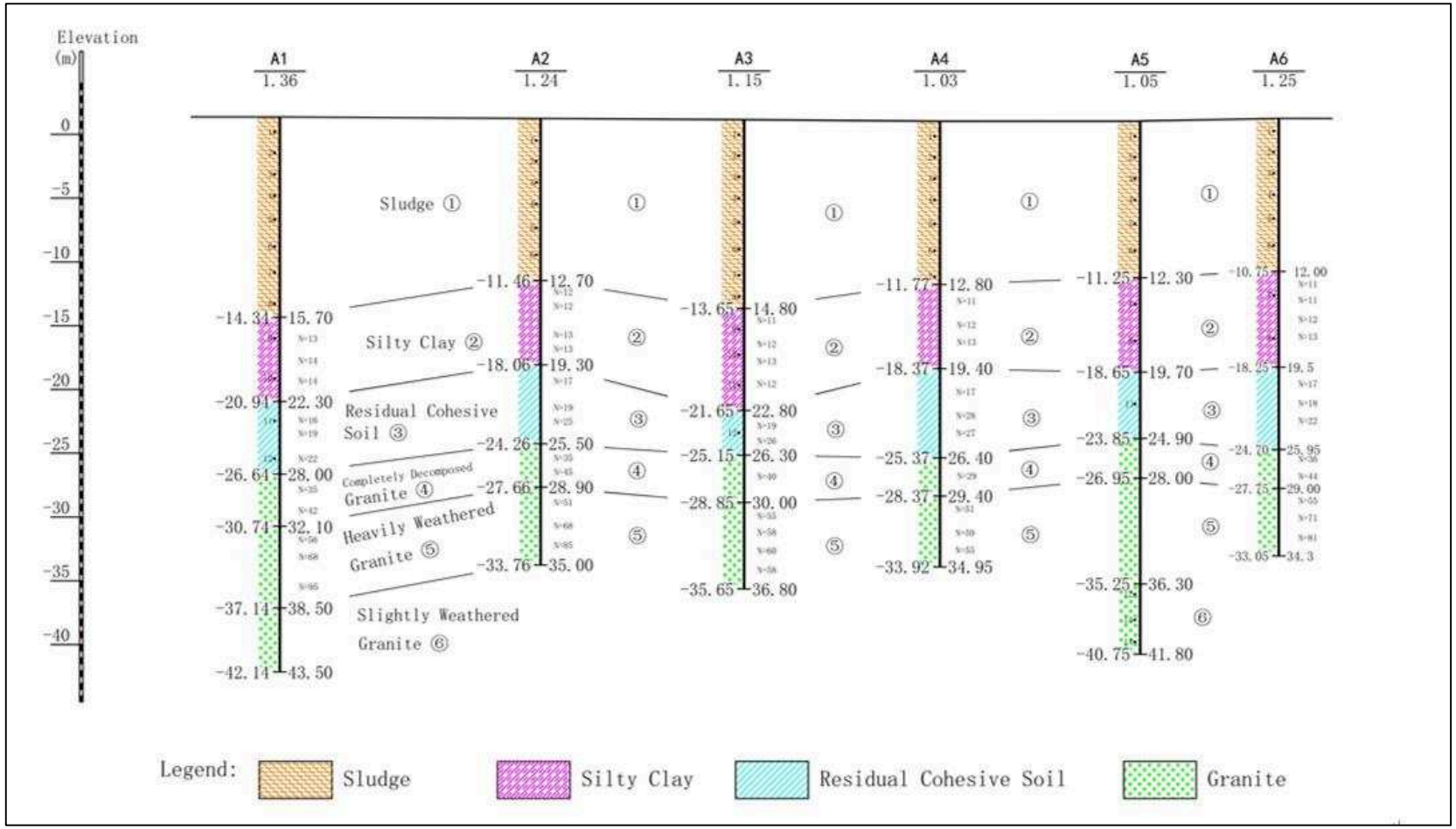

Figure 3.3-1. Coupe géologique d'ingénierie du projet de digue de Xiapu

Tableau 3.3-2. Propriétés physiques et mécaniques des principales couches de sol

Couche de sol	Teneur en eau (%)	Masse volumique humide (g/cm^3)	Indice des vides naturel	Limite de liquidité (%)	Limite de plasticité (%)
Silt	59.23	1.60	1.64	53.39	31.06
Argile limoneuse	21.69	1.95	0.68	31.09	18.14
Argile résiduelle	24.43	1.87	0.78	32.17	20.77
Couche de sol	Indice de liquidité IL	Indice de plasticité IP	Module de compressibilité (MPa)	Cohésion C (kPa)	Angle de frottement φ (°)
Silt	1.25	22.33	1.80	10.53	7.20
Argile limoneuse	0.27	12.95	5.61	27.87	21.25
Argile résiduelle	0.32	11.40	5.18	18.68	18.81

3.3.2.3 Situation hydrologique

Après avoir consulté les données hydrologiques locales, les eaux de l'île Zhujiang se situent au sud du comté de Xiapu. La profondeur de l'eau est supérieure à 10 mètres et la plus profonde à 43 mètres. Le fond est constitué d'un dépôt de sédiment limoneux. La température annuelle moyenne de l'eau est de 19,9 °C, la salinité moyenne annuelle de 29 ‰ et la transparence de 0,5 m à 1 m. L'amplitude de marée de 4 mètres à 6 mètres.

L'île de Zhujiang est située à 0,9 km du continent. L'île est rectangulaire mais de forme irrégulière, avec une longueur de 0,58 km d'est en ouest, 0,18 km de large du nord au sud et une superficie d'environ 0,106 kilomètre carré. Les côtes rocheuses et sableuses ont un linéaire de 1,36 km et une plage de 40 km^2. La température moyenne annuelle est de 18,3 °C, la température moyenne en janvier est de 8,7 °C, la température moyenne en juillet est de 28,1 °C, les précipitations annuelles sont de 1.390 mm, il y a un brouillard annuel d'environ 20 jours et la période de juillet-septembre est la saison des typhons. Il y a 3.425 personnes qui habitent au nord de l'île, vivent de la pêche, des

transports, du varech, des algues, de la crevette, de la dorade et d'autres industries liées à l'élevage.

3.3.2.4 Exigences au niveau de la construction du brise-lames

Le projet de construction de la digue est basé sur la technologie de solidification des sédiments. Premièrement, le sédiment solidifié est utilisé pour traiter la fondation de la digue, ensuite le noyau est assurée des sacs en géotextile remplis de sédiment solidifié. Chaque sac de sédiment solidifié est superposé pour former le noyau de la digue.

Les exigences de performance pour le sédiment solidifié des digues sont présentées dans le tableau 3.3-3 ci-après.

Tableau 3.3-3. Exigences de performance pour le sédiment solidifié des digues

Performance du sédiment solidifié à l'état frais	Affaissement (mm)	Initiale	110 mm ≤ Affaissement ≤ 150 mm
		1 h	
	Temps de prise (min)	Consistance initiale	≥ 180
		Consistance finale	≤ 600
Propriétés du sédiment solidifié	Résistance à la compression non confinée de 28 jours (kPa)	\	≥ 120
	Paramètres de cisaillement 28 jours	Cohésion C (kPa)	≥ 20
		Angle de frottement φ (°)	≥ 15
	Coefficient de perméabilité (cm/s)	Coefficient de perméabilité verticale K_v	$< 1.0 \times 10^{-5}$

3.3.3 Essais de laboratoire relatif au projet

3.3.3.1 Éprouvettes de sol et matières premières utilisées pour la solidification des sédiments

a. Eprouvette de sol

L'éprouvette de sol utilisée dans cette étude est un sédiment limoneux du site du projet Xiapu, c'est un limon, gris-noir de consistance plastique à fluide et relativement

homogène. La profondeur des échantillons prélevés se situe de 5 à10 m. Les propriétés physiques des échantillons de sol sont récapitulées dans le Tableau 3.3-2.

b. Agent

Le type d'agent de durcissement composé est référencé sous le nom H01, il est fourni par la société Jiangsu Kunze Technology Co., Ltd.

3.3.3.2 Étude des facteurs influant sur la fluidité du sédiment solidifié à l'état frais

Le sédiment solidifié est composé de sédiment, d'eau et d'un agent de durcissement. D'après l'analyse de la composition du matériau, il est connu que les facteurs qui influent sur la fluidité de celui-ci sont le dosage d'agent de durcissement, la qualité du sédiment et la teneur en eau. Combinés au sédiment solidifié lors de construction du projet, ces facteurs ayant une incidence sur la fluidité doivent également inclure la durée de stockage du sédiment solidifié, la température ambiante et la méthode de stockage (agitation stationnaire ou en circulation continue).

a. Effet de l'agent de durcissement, de la qualité du sol et de la teneur en eau sur la fluidité du mélange

Les effets de l'agent durcissement, de la qualité du sol et de la teneur en eau sur la fluidité du mélange ont été étudiés par essai croisé. Les propriétés physiques des échantillons de sol sont dans le Tableau 3.3-4, les facteurs et niveaux étant présentés au tableau 3.3-5. Les résultats de l′essai croisé sont fournis dans le tableau 3.3-6.

Tableau 3.3-4. Propriétés physiques et mécaniques des sédiments

	Granulométrie (%)				Teneur en eau (%)
	Teneur en gravier 5 ~ 2 mm	Teneur en sable 2 ~ 0.075 mm	Teneur en limon 0.075 ~ 0.005 mm	Teneur en argile < 0.005 mm	
Argile (I)	0	1.0	45.7	53.3	49.3
Argile limoneuse (II)	0	0	27.9	72.1	59.2
Limon (III)	0	5.0	73.1	21.9	51.2
	Limite de liquidité (%)	Limite de plasticité (%)	Indice de plasticité IP	Indice de liquidité IL	Teneur en matière organique (%)
Argile (I)	53.1	31.8	21.3	0.82	1.7
Argile limoneuse (II)	53.39	31.06	22.33	1.26	2.1
Limon (III)	45.8	37.9	7.9	1.68	3.4

Tableau 3.3-5. Facteurs influant sur le dosage, l'agent de durcissement, les différents types du sédiment et la teneur en eau

Facteur / Niveau	Dosage de e'agent de durcissement (kg/m^3)	Type de sédiment	Teneur en eau (%)
1	80	Argile (I)	100
2	100	Argile limoneuse (II)	120
3	120	Limon (III)	140

Tableau 3.3-6. Résultats d'essais de l'effet des facteurs orthogonaux sur la fluidité du mélange de sédiment solidifié avec la quantité d'agent de solidification, la teneur eau et la nature du sol

Dosage de l'agent (kg/m^3)	80			100			120			80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120
Type du sol	I	П	Ш	I	П	Ш	I	П	Ш	I			П			Ш			I	П	Ш	П	Ш	I	Ш	I	П
Teneur en eau (%)	100	120	140	120	140	100	140	100	120	100	120	140	120	140	100	140	100	120	100			120			140		
Affaissement (mm)	80	125	150	90	135	120	130	95	140	80	90	130	125	90	140	150	120	140	80	120	95	125	90	140	150	135	130
Affaissement total	355			345			365			300			355			410			295			355			415		
Affaissement moyen	118.33			115.00			121.67			100.00			118.33			136.67			98.33			118.33			138.33		
Variation	6.67									36.67									40.00								

La méthode d'analyse est l'une des méthodes couramment utilisées dans la conception: les facteurs d'influence principaux et secondaires du test peuvent être obtenus par simple calcul: plus la différence est grande, plus le changement de niveau du facteur a une influence importante sur le test. Plus le facteur est petit, ce facteur est moins important. Les résultats du test ci-dessus peuvent être utilisés pour analyser les effets primaires et secondaires du dosage de l'agent de silidification, du type du sol et de la teneur en eau sur l'expansion initiale du sédiment solidifié.

Les données du tableau 3.3-6 montrent que l'essai croisé permettent d'étudier les effets de divers facteurs sur l'affaissement initial du mélange. Selon l'analyse, l'importance des facteurs affectant l'affaissement initial du mélange, dans l'ordre est la teneur en eau du mélange, le type de sol et le dosage de l'agent de durcissement. Parmi eux, la teneur en eau et la nature du sol affecteront considérablement le degré d'affaissement du mélange, tandis que l'effet du dosage en agent de durcissement est faible. Le mélange utilisé dans ce projet est principalement constituée d'argile limoneuse, de sorte que l'influence du sédiment sur la fluidité du mélange n'est pas durcissement prise en compte, mais plutôt l'influence de la teneur en eau sur l'affaissement du sédiment solidifié. La figure 3.3-2 montre les valeurs de l'affaissement du mélange à l'état frais du temps zéro ou à la fin du mélange (temps initial) et après une heure pour différentes teneurs en eau.

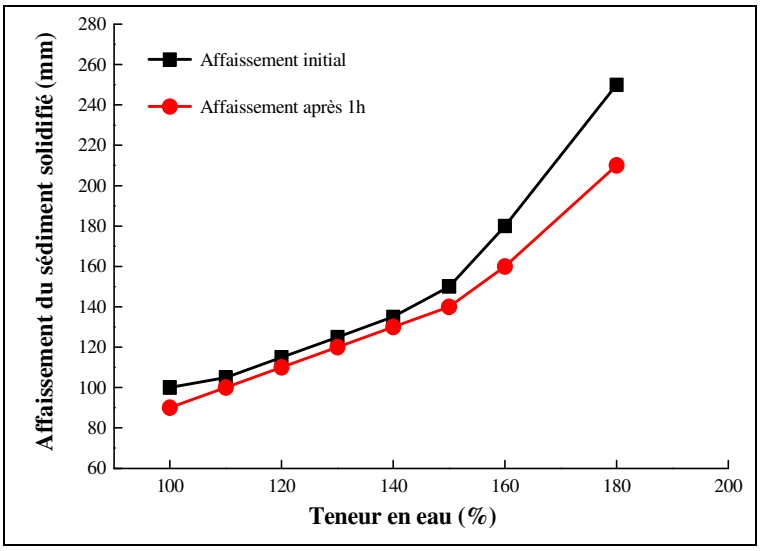

Figure 3.3-2. Effet de la teneur en eau sur l'affaissement du sédiment solidifié

Le graphique montre qu'avec l'augmentation de la teneur en eau, la consistance du sédiment solidifié à l'état frais varie dans le temps et à 1 heure. Selon la forme de la courbe, lorsque la teneur en eau est inférieure à 150%, l'affaissement du sédiment solidifié varie lentement avec la teneur en eau. Au delà de 150%, le changement devient important, il est relativement linaire, et l'affaissement augmente fortement. Afin de garantir que la fluidité du sédiment solidifié réponde aux exigences de base de la construction (affaissement de initial et apès 1h du sédiment solidifié ≥ 110 mm et ≤ 150

mm), la teneur en eau du mélange du sédiment solidifié à l'état frais doit être comprise entre 120% et 150%.

b. Durée de stockage, température ambiante et méthode de stockage

Cette étude prend également en compte les effets des méthodes de stockage du mélange (pas d'agitation ou agitation continue), de la température ambiante et de la durée de stockage sur le degré d'affaissement du mélange de sédiment solidifié. La teneur en eau du sédiment solidifié est de 150% et le dosage en agent de durcissement est de 100 kg/m^3. Les résultats de l'étude sont présentés à la figure 3.3-3.

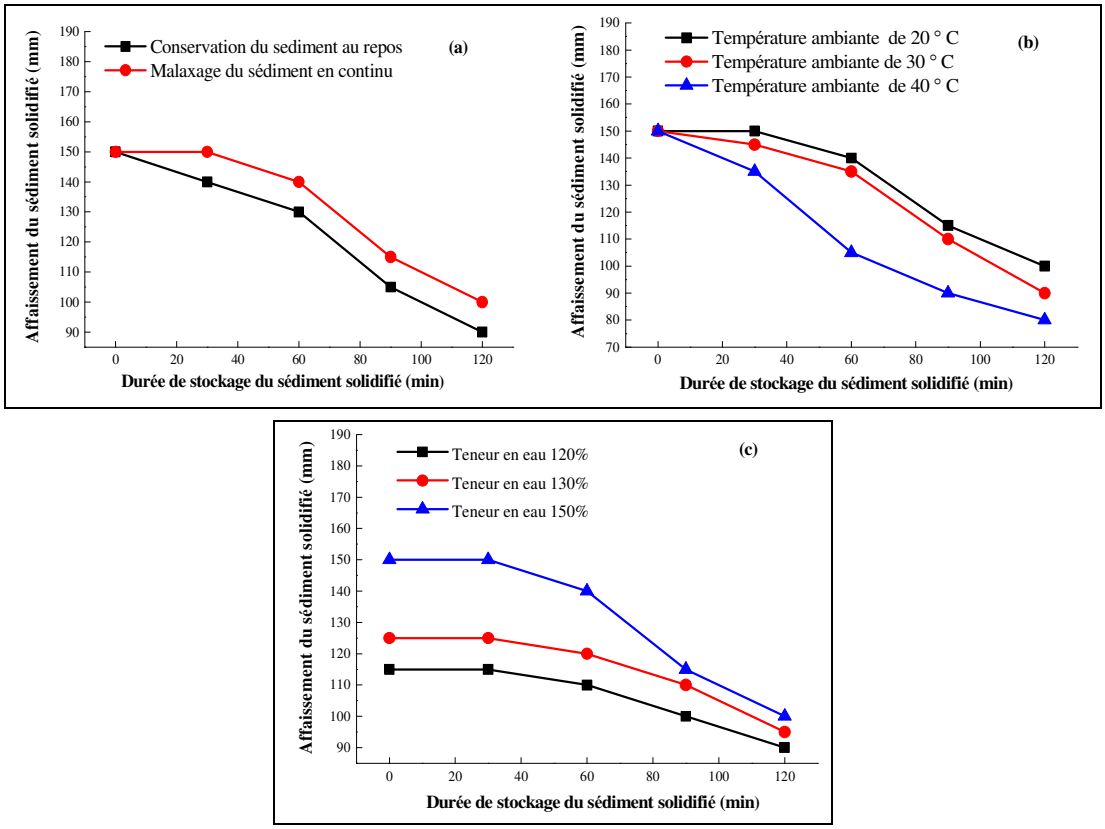

Figure 3.3-3. Effet de la méthode de stockage (a), de la température ambiante (b) et de la durée de avec la durée stockage (c) sur l'affaissement du sédiment solidifié à l'état frais

La figure 3.3-3a montre que si le sédiment solidifié contenant 150% de teneur en eau est stocké de manière agitée, sa perte d'affaissement est faible avec le temps. Lorsqu'il est stocké de manière statique, sa perte d'affaissement est plus rapide. Ce phénomène revêt une grande importance pour guider la mise en oeuvre du sédiment solidifié. Le mélange préparé pendant la construction doit être constamment agité pendant le processus de pompage.

La figure 3.3-3b montre que lorsque la température ambiante est supérieure à 30 °C, l'affaissement du mélange du sédiment solidifié diminue avec l'allongement de la durée de stockage.

La figure 3.3-3c montre le mélange de sédiment solidifié à moins de 30 °C en température avec un mode de stockage du sédiment sous agitation continue, le paramètre variant est la teneur en eau du mélange. Au fur et à mesure que la durée de stockage augmente, l'affaissement du mélange du sédiment solidifié est progressivement réduit et la diminution du degré l'affaissement du mélange au cours de la première heure est faible. Cependant, après 1 heure, le sédiment solidifié perd rapidement de la fluidité et le taux d'affaissement se réduit. Pour garantir l'application technique, le mélange de sédiment peut être pompable pendant environ une heure et demie sans mesure de contrôle spéciales.

Des recherches approfondies sur les facteurs influençant l'affaissement de sédiments solidifiés ont permis de déterminer que, pour que la fluidité du sédiment solidifié du projet Xiapu soit conforme aux exigences de la construction, la température de l'environnement de construction ne devrait pas dépasser 30 °C et le sédiment préparé devrait être stocké avec une agitation continue. La teneur en eau du sédiment est d'environ 120% à 150% et le temps de mise en place du sédiment est de 1,5 heure.

3.3.3.3 Détermination du rapport de mélange de sédiment solidifié pour la construction du projet de digue de Xiapu

Afin d'obtenir un sédiment solidifié pour le mettre en talus de digue avec des performances satisfaisantes après construction et durcissement, une étude expérimentale sur la détermination du rapport du mélange sédiment/agent de durcissement a été réalisée. Le résultat d'essai voir figure 3.3-3.

En comparant les données du tableau 3.3-7, afin de rendre les indicateurs du sédiment solidifié de la digue conformes aux exigences de conception, la teneur en eau du sédiment solidifié est contrôlée entre 130% et 140%, et le dosage d'agent de durcissement ne doit pas être inférieur à 100 kg/m^3. Les performances du sédiment solidifié durci et à l'état frais répondent aux exigences de conception.

Tableau 3.3-7. Détermination du rapport de mélange du sédiment solidifié des digues

Numéro	Teneur en eau (%)	Dosage d'agent de durcissement (kg/m^3)	Affaissement (mm)		Temps de prise (min)		Propriétés du sédiment solidifié à 28 jours			
			Initiale	1 h	Prise initiale	Prise finale	Résistance à la compression non confinée (kPa)	Cohésion C (kPa)	Angle de frottement φ (°)	Coefficient de perméabilité (cm/s)
1	120	80	125	125	210	500	179	29.4	23.2	5.7×10^{-6}
2		100	115	110	175	475	206	31.6	25.2	5.8×10^{-6}
3		120	110	105	160	440	312	40.3	27.1	6.0×10^{-6}
4	130	80	130	130	245	555	139	25.3	22.5	6.1×10^{-6}
5		100	125	120	225	540	193	29.2	25.1	6.4×10^{-6}
6		120	120	115	215	490	242	32.4	26.2	6.2×10^{-6}
7	140	80	150	140	260	590	123	24.0	22.4	6.8×10^{-6}
8		100	140	140	240	550	169	28.7	24.7	7.2×10^{-6}
9		120	130	125	230	500	201	30.2	25.6	7.9×10^{-6}
10	150	80	160	155	300	630	109	18.2	19.1	8.8×10^{-6}
11		100	150	140	280	600	131	19.1	20.2	9.2×10^{-6}
12		120	145	145	250	540	162	21.2	20.5	2.1×10^{-5}

3.3.4 Organisation de la construction

3.3.4.1 Schéma de digues conçues avec des sediments solidifiés

a. Plan original avec des sacs de graviers remplis pour le corps de la digue.

Dans le schéma initial de la digue, on retrouvait un tapis de drainage en plastique pour le traitement en profondeur et assise de la digue. Puis un sable grossier utilisé comme couche de protection était placé au-dessus et une fois stabilisé, les graviers ensachés constituant le corps de la digue. La couche structurelle est construite jusqu'à la face supérieure et des deux côtes, des protections en enrochement étaient utilisées et mises en oeuvre sur les deux côtés de la pente. Et jusqu'en pied de digue, des blocs en béton et de roches étaient disposés.

La figure 3.3-4 est celle de la coupe du brise-lames d'origine. Selon le tableau 3.3-8, le programme initial coûtait environ 5.597 millions de yuans. Ce prix a été établi pour une longueur totale de 200 m de digue, selon la coupe donnée de la digue (figure 3.3-4), et sa longueur (figure 3.3-5).

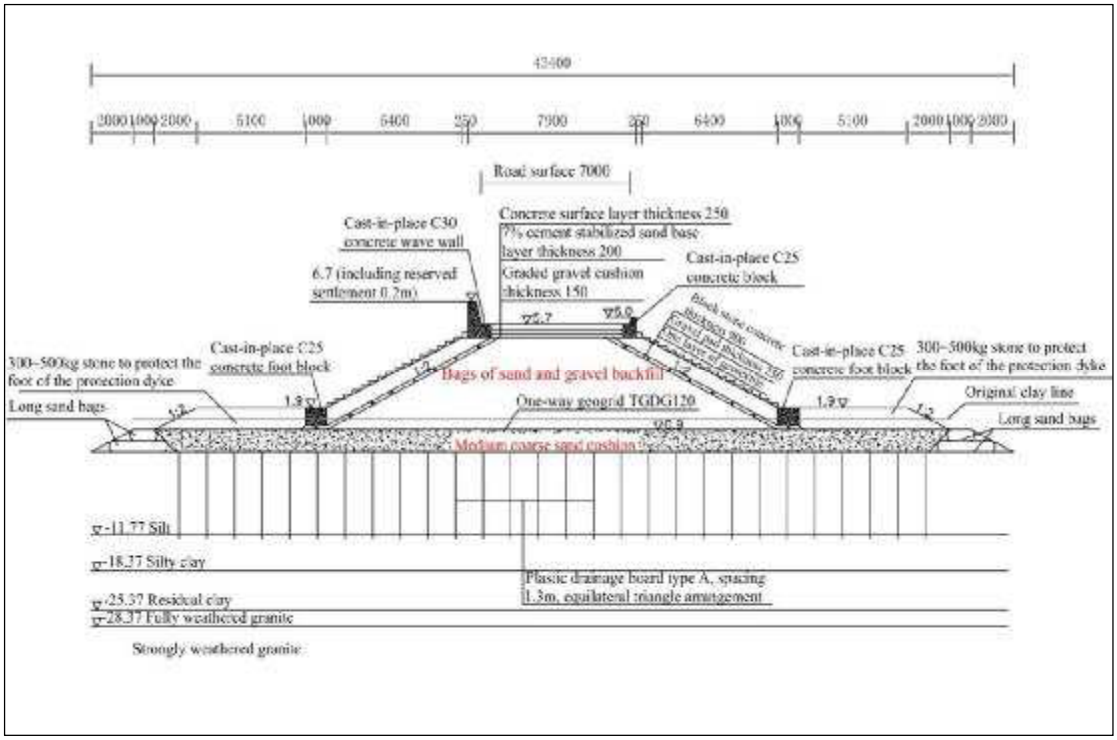

Figure 3.3-4. Vue en coupe de la digue du brise-lames selon le plan original

Tableau 3.3-8. Devis estimatif des travaux et coûts directs par unité de section selon le plan original avec des sacs remplis de graviers

Travaux	Contenu	Quantité de travail	Prix unitaire	Prix (Yuan)
Traitement de la fondation	Panneau de drainage en plastique	430 m	1.8 yuan/m	774
	Coussin de graviers grossiers à moyens	34.78 m^3	124.1 yuan/m^3	4316.20
	Géogrille à sens unique	36.55 m^2	26.94 yuan/m^2	984.66
	Sac de sable long	5.03 m^3	197.32 yuan/m^3	992.52
Remplissage de la digue	Graviers ensachés	90.3 m^3	98.49 yuan/m^3	8893.65
Structure de la chaussée	Coussin de gravier classé	0.69 m^3	66.65 yuan/m^3	45.99
	Base de gravier stabilisée au ciment à 7%	4.61 m^2	35.65 yuan/m^2	164.35
	Chaussée en béton	1.15 m^3	490.27 yuan/m^3	563.81
	Mur anti-vagues C30 coulé en place	1.15 m^3	580.27 yuan/m^3	667.31
	Traitement de l'acier du mur anti-vagues C30	0.0565 t	3756.09 yuan/t	212.22
	Dessus en béton C25 coulé en place	0.56 m^3	562 yuan/m^3	314.72
	Traitement de l'acier de dessus en béton C25	0.0248 m^3	3756.09 yuan/t	93.15
Protection de la pente et de la base	Géotextile	16.37 m^2	24.58 yuan/m^2	402.37
	Coussin de graviers	5.16 m^3	52.88 yuan/m^3	272.86
	Protection en blocs de béton	15.77 m^3	384.33 yuan/m^3	6060.88
	Bloc de pied coulé sur place C25	1.41 m^3	715.72 yuan/m^3	1009.17
	Enrochement de pied 300 à 500 kg	11.52 m^3	166.87 yuan/m^3	1922.34
	Escalier terrestre en béton	0.3213 m^3	755.73 yuan/m^3	242.82
	Anneau d'amarrage	0.00861 t	6028.06 t	51.9
Total:				27984.92

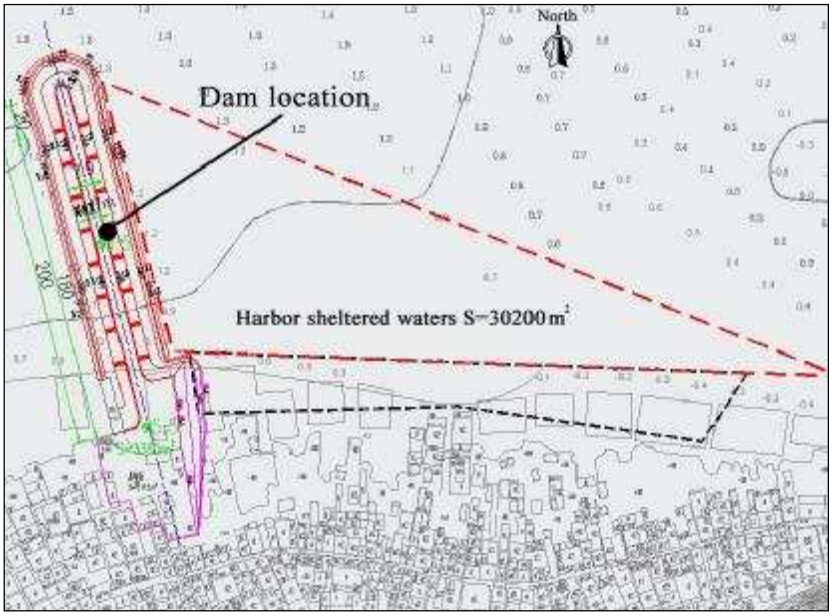

Figure 3.3-5. Plan d'étapes de construction de la digue (brise-lames) plan original avec le corps constitué de sacs remplis
(Ce projet de digue à une longueur de 200 m)

b. Schéma de la digue en sédiments solidifiés

Selon le cahier des charges du projet et des conditions géologiques, de la sécurité structurelle, de la réduction des coûts, du gaspillage de ressources et du raccourcissement de la période de construction, il a été suggéré de proposer une variante qui consiste à réaliser le corps de la digue en sédiments solidifiés. Sa conception structurelle est totalement differente, le corps de la digue est constitué de sédiments solidifiés. La conception de la digue est décrite par la suite.

Le traitement de la fondation consiste en un traitement par solidification de la couche de surface en place. Une épaisseur de 2 m en dessous de la surface des sédiments en place (fond marin), les sédiments sont solidifiés par un agent de durcissement dosé à 80 kg/m^3, formant ainsi une couche de renforcement en sédiment solidifié sur une largeur de renforcement de 30 m. En pied, sur une largeur de 5 m, la profondeur de durcissement a été augmentée à 2,5 m pour jouer le rôle de protection contre la contre-pression, voir figure 3.3-6.

Le remplissage de la digue se fait à l'aide de sacs remplis de sédiments solidifiés.

Le corps principal de la digue est rempli de sédiments solidifiés avec un dosage en agent de durcissement de 80 kg/m^3. La boue du mélange est directement préparée, pompée, puis solidifiée selon une technologie développée par la société JiangSu KunZe Technologie. La superposition de sacs de remplissage en couches constitue le corps principal, voir figure 3.3-6.

La structure de la chaussée se trouve en paritie haute de la digue, elle ne diffère pas de celle du plan original.

La protection des pentes et en pied de la digue est sensiblement assurée de la même manière que celle prévue initialement.

Le taux de pente anti-vagues est inchangé, celle des vagues arrière a été modifiée à 1: 1,5. En pied de digue, un sac a été disposé et rempli de sédiments solidifiés dont le dosage en agent de durcissement est de 70 kg/m^3 (voir figure 3.3-6). Les revêtements en béton, les blocs de béton, l'escalier et autres structures restent inchangés pour cette structure de digue en sédiments solidifiés, l'évaluation des coûts est donnée au tableau 3.3-9.

Selon le tableau 3.3-9, le coût du projet avec la variante en sédiments solidifiés s'élevè à environ 4.326 millions de yuans. Ce prix a été établi pour une longueur totale de 200m de digue, selon la coupe donnée de la digue (figure 3.3-6), et pour sa longueur définie à la figure 3.3-5.

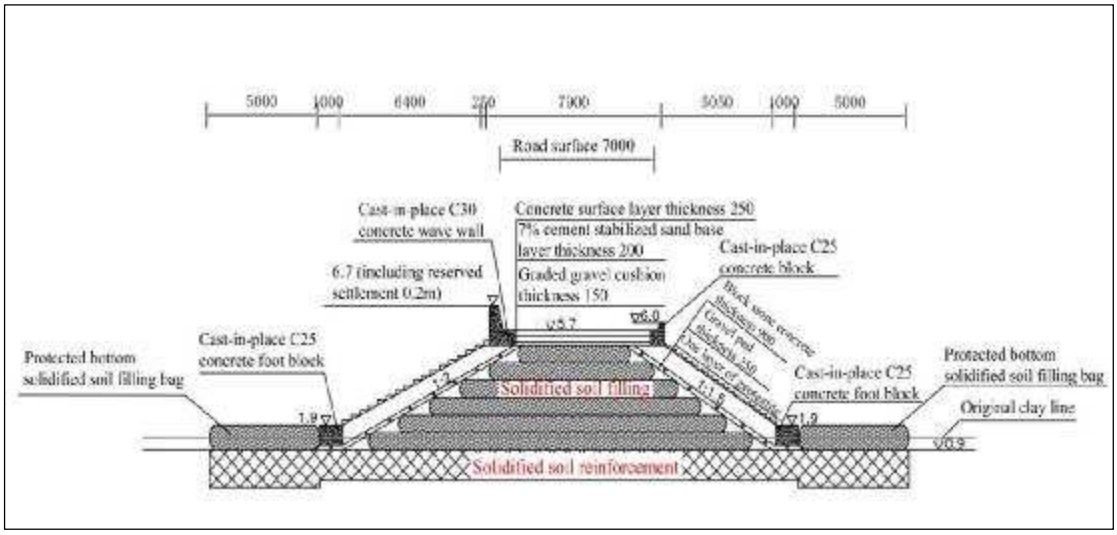

Figure. 3.3-6. Vue en coupe de la digue modifiée avec le corps constitué de sacs de sédiments solidifiés

Tableau 3.3-9. Devis estimatif des travaux et coûts directs par unité de section selon le plan modifié avec des sacs remplis de sédiments solidifiés

Travaux	Contenu	Quantité de travail	Prix unitaire	Prix (Yuan)
Traitement à la fondation	Sédiment solidifié	50 m^2	100 yuan/m^3	5000
Remplissage de la digue	Sédiment solidifié	60 m^3	120 yuan/m^3	7200
Structure de la chaussée	Coussin de gravier classé	0.69 m^3	66.65 yuan/m^3	45.99
	Base de gravier stabilisée au ciment à 7%	4.61 m^2	35.65 yuan/m^2	164.35
	Chaussée en béton	1.15 m^3	490.27 yuan/m^3	563.81
	Mur anti-vague C30 coulé en place	1.15 m^3	580.27 yuan/m^3	667.31
	Traitement de l'acier du mur anti-vague C30	0.0565 t	3756.09 yuan/t	212.22
	Dessus en béton C25 coulé en place	0.56 m^3	562 yuan/m^3	314.72
	Traitement de l'acier de dessus en béton C25	0.0248 m^3	3756.09 yuan/t	93.15
Protection de la pente et de base	Géotextile	16.37 m^2	24.58 yuan/m^2	402.37
	Coussin de graviers	4.9 m^3	52.88 yuan/m^3	259.11
	Revêtements en béton	10.93 m^3	384.33 yuan/m^3	4200.73
	Bloc de pied C25 coulé sur place	1.41 m^3	715.72 yuan/m^3	1009.17
	Escalier terrestre en béton	0.3213 m^3	755.73 yuan/m^3	242.82
	Anneau d'amarrage	0.00861 t	6028.06 t	51.9
	Sacs de sediment solidifié	10 m^3	120 yuan/m^3	1200
Total:				21627.65

c. Construction de la digue en sédiments solidifiés

Le côté Est de la digue proposé sur le site est un vaste plateau, qui est un lieu de reproduction pour les pêcheurs locaux, il est exposé à marée basse et il y a environ 3 m à marée haute. Le côté Ouest de la digue est face à la mer et aux vagues, du côté Est se trouve les vagues arrière. Lorsque les marées montent et descendent, l'eau de mer s'écoul selon les directions du sud-ouest au nord-est.

Figure 3.3-7. Carte satellite de la zone du projet de la digue de Xiapu

Compte tenu de cela, la séquence de construction devrait être envisagée d'ouest en est et du sud au nord afin de maximiser l'utilisation du temps d'exposition de la plage.

Le corps de la digue en sédiment solidifié est mis en place conformément au plan de construction et l'opération est réalisée par étapes.

La couche de renforcement avec du sédiment solidifié se fait à partir d'un navire intégré spécial qui possède son propre dispositif d'excavation et sa tête de mélange pour l'agitation et la solidification in situ.

Le sédiment de remplissage est mis un oeuvre à haute teneur en eau avec la technologie de construction mise au point de manière indépendante par la société JiangSu KunZe Technologie. La construction comprend principalement la phase de préparation de la construction, la pose des conduites de transport, la préparation des matériels et la préparation des boues à base de sédiments solidifiés, le transfert du

matériel de pompage spécial, l'addition et l'agitation de l'agent de durcissement, la solidification du sédiment solidifié et la protection de l'ouvrage.

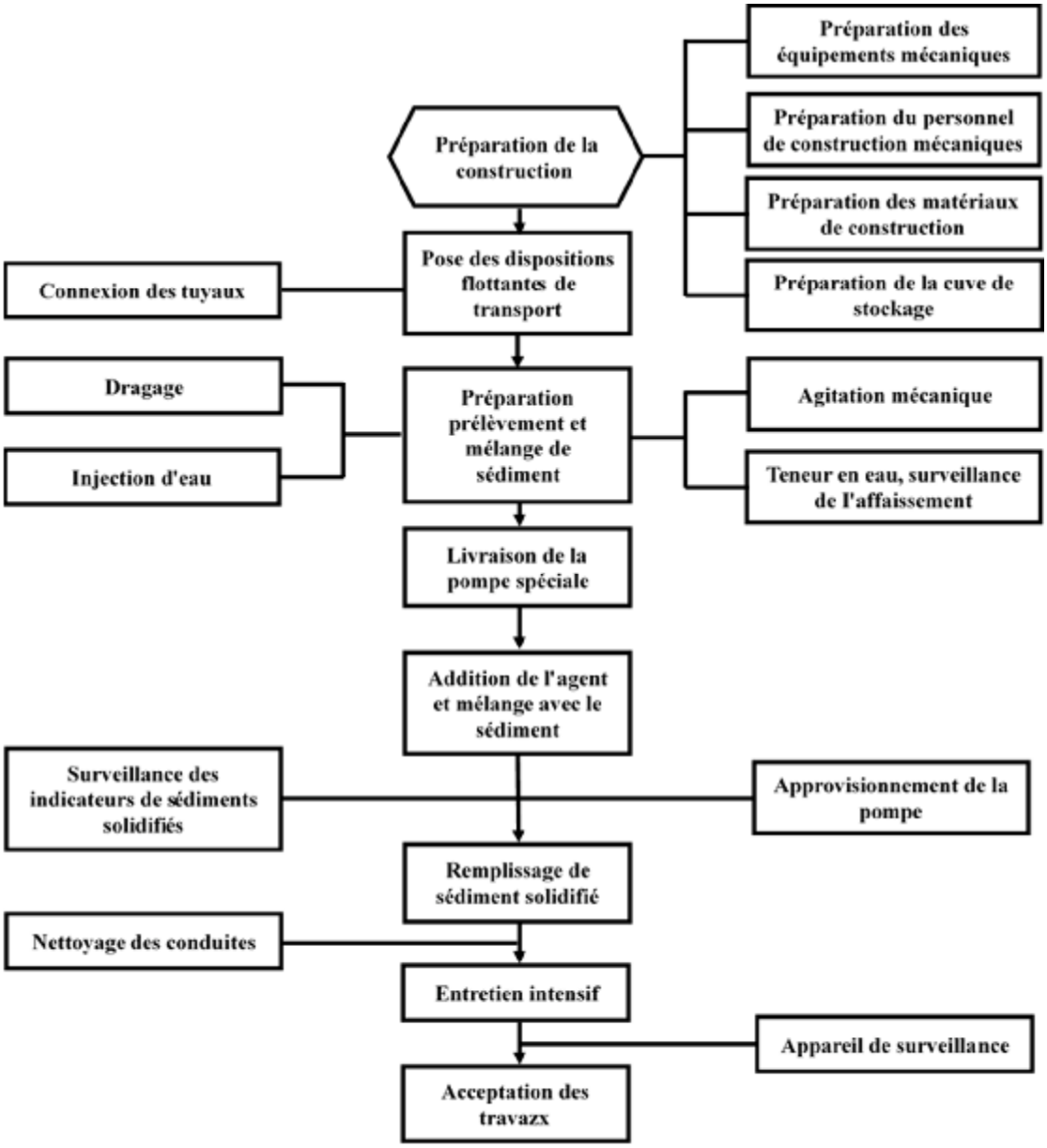

Figure 3.3-8. Organigramme du processus de construction de la digue constituée de sédiments solidifiés

d. Contrôle de la qualité

Pendant le processus de construction avec le sédiment solidifié de la digue, il est effectué simultanément les travaux d'inspection de la qualité de la construction dont le contenu des essais est présenté au tableau 3.3-10.

Les résultats de l'auto-test ont montré que l'affaissement du sédiment solidifié de la digue peut être contrôlé et que la fluidité répond aux exigences de la construction.

Tableau 3.3-10. Essais de contrôle et fréquence d'inspection pour la construction en sédiment solidifié du noyau de la digue de Xiapu

Contrôle	Éléments d'inspection	Fréquence d'inspection	Méthode d'inspection	Partie d'inspection
Processus de construction	Affaissement	1 inspection par 500 m^3 de construction	Inspection d'éprouvettes de sédiment solidifié	Entreprise réalisant la construction
Inspection d'acceptation	Résistance à la compression non confinée à 28 jours		Carottage sur site, essais en laboratoire	Bureau de contrôle
	Cohésion, angle de frottement à 28 jours			
	Coefficient de perméabilité verticale à 28 jours			

Tableau 3.3-11. Résultats de l'autotest de l'affaissement lors du processus de construction, du sédiment solidifié pour le noyau de la digue de Xiapu

Numéro	Affaissement (mm)		Conclusion
	Initial	1 h	
1	145	125	Qualifié
2	135	120	
3	140	120	
4	130	115	
5	150	130	
6	150	125	
7	135	120	
8	145	125	
9	140	125	
10	135	120	
11	140	120	
Exigences de conception	110 mm≤ Affaissement ≤ 150 mm		

a) Prélevement de sédiment solidifié

b) Sédiment solidifié l'intérieur de géotextile

c) Remplissage de la digue

Figure 3.3-9. Après les travaux de constuuction de la digue (a. b. c.)

3.3.5 Test de réception sur site

Après l'achèvement du projet de la digue de Xiapu, la normalisation a été effectuée et, après la période de 28 jours, les essais d'acceptation géotechnique pour le sédiment solidifié du remblai de la digue ont été effectués et tous les travaux de contrôle ont été confiés à une tierce partie.

Une programme d'essais de contrôle sur les performances géotechniques développées par le sédiment solidifié a été mis en place.

Le sédiment solidifié dans le cadre du projet de digue de Xiapu a fait l'objet d'essais de contrôle, le corps de la digue a été divisé en 6 couches de bas en haut pour construire le noyau,voir figure 3.3-6.

Le sédiment solidifié de chaque couche a été soumis à un échantillonnage de carottages destinés aux essais d'acceptation du site. Ces carottes ont été envoyées en laboratoire géotechnique pour tester la résistance à la compression non confinée, la cohésion C, l'angle de frottement φ et le coefficient de perméabilité verticale des echantillons prélevés.

Les résultats des essais relatif aux échantillonnages sur site sont indiqués dans le tableau 3.3-12. Les données des essais figurant dans le tableau 3.3-12 montrent que les résultats obtenus à partir des carottes du site que, la cohésion, l'angle de frottement, le coefficient de perméabilité verticale et la résistance à la compression non confinée de chaque couche de sédiment solidifié satisfont aux exigences de conception et que la qualité de la construction du noyau en sédiments solidifiés répond aux exigences d'acceptation.

Tableau 3.3-12. Résultats des essais d'échantillonnage à partir de carottage dans le sédiment solidifié du projet de la digue de Xiapu

Numéro de la couche de la digue	Essai de cisaillement		Coefficient de perméabilité verticale (cm/s)	Résistance à la compression non confinée (kPa)
	Cohésion C (kPa)	Angle de frottement φ (°)		
Couche n: 1	24.2	21.5	2.25×10^{-6}	120
Couche n: 2	26.7	23.6	2.09×10^{-6}	130
Couche n: 3	29.2	24.7	1.90×10^{-6}	160
Couche n: 4	30.1	28.1	1.86×10^{-6}	180
Couche n: 5	34.8	29.7	1.75×10^{-6}	200
Couche n: 6	36.5	30.1	1.70×10^{-6}	200
Exigences de conception	≥ 20	≥ 20	$< 1.0 \times 10^{-5}$	≥ 120

3.3.6 Résumé

Afin de réaliser une application de sédiments solidifiés en tant que matériau de corps de remblai dans la construction de digues, cette section a permis d'étudier les effets de l'agent de durcissement, la nature du sol, la teneur en eau, le mode de stockage de la boue issue de mélange à l'état frais, le temps de stockage et la température ambiante sur la fluidité du sédiment solidifié, et le rapport des composants dans le mélange de sédiment solidifié pour qu'il soit pompable.

Le schéma technique de la construction et la technologie associée à la construction ont été systématiquement étudiés, et les conclusions suivantes peuvent être énoncées comme suit:

Il a été démontré comment maîtriser l'influence de l'agent de durcissement, de la qualité du sol, de la teneur en eau, du mode de stockage du sédiments, de la durée de stockage et de la température ambiante sur la fluidité du sédiment solidifié. La variation de dosage de l'agent de durcissement a peu d'effet sur la fluidité de la boue de sédiment solidifié. La fluidité du sédiment préparée avec de l'argile, de l'argile limoneuse et du sable limoneux augmente successivement. La teneur en eau a une influence plus évidente sur la fluidité de la boue et plus la teneur en eau croît plus la fluidité de la boue augmente. La boue doit aussi être stockée selon un processus bien défini. Lorsque la durée de stockage est prolongée, l'affaissement de la boue est réduite, la fluidité est détériorée. Ainsi la durée de stockage du sédiments n'est généralement pas supérieure à 2 heures, la température ambiante ne dépasse pas 30 °C et la fluidité du sédiments solidifiée est peu affectée par la température. Lorsque la température ambiante est supérieure à 30 °C, le sédiments solidifiée perd rapidement de la fluidité.

La mise en oeuvre de tels mélanges en vue d'améliorer les performances d'un sédiment nécessite la maîtrise des technologies clés pour le pompage du sédiment solidifié à l'état fluide dans le corps de digue. Pour les argiles limoneuses, il est plus approprié de contrôler la teneur en eau du sol solidifié entre 130% et 140%. Pour ces sédiments, un agent de durcissement spécial est choisi pour les sols à forte teneur en

eau. Le dosage ne doit pas être inférieur à 100 kg/m^3. La fluidité, la cohésion, l'angle de frottementet le coefficient de perméabilité des sédiments solidifiés ainsi préparés répondent aux exigences de conception.

Les travaux ont aussi fait l'objet de la mise en place d'un procédé de construction par pompage et de remplissage avec un sédiment solidifié pour réaliser un noyau de digue. La construction de la digue (noyau) a été réalisé par pompage et remplissage de sédiments solidifiés tout en garantissant que le degré de remplissage soit supérieur à 70%, que le niveau d'affaissement de sédiment solidifié soit de 130 mm et qu'il peut être maintenu pendant 2 heures. Le processus de construction a été normalisé et les points de contrôle de la qualité de la digue en sédiment solidifié ont été proposés.

Le mélange de sédiment solidifié à l'état fluide pour le pompage dans le noyau de la digue préparé par cette technologie a été qualifié et les essais de terrain durant la construction, et d'acceptation sur site, ont été corrects et satisfaisants.

3.4 Etude de la construction d'un remblai-Site deYushan (Chine)

3.4.1 Contexte de la recherche

Avec l'augmentation rapide de la population mondiale, l'espace consacré aux activités humaines se développe. Les villes du monde entier, et en particulier les villes portuaires, disposent de moins en moins de ressources foncières. Depuis le siècle dernier, de vastes projets d'amenagement avec extension de terrain en mer ont été menés dans le monde entier. Les Pays-Bas sont l'un des pays les plus reconnus au monde pour l'extension de terres pour en milieu marin. Les Pays-Bas sont également le premier pays au monde à avoir récupéré des terres. Depuis 1200, les Néerlandais ont conquis 6925 kilomètres carrés de terres provenant de la mer, ce qui représente 20,4% de leur superficie terrestre actuelle. Du 13e au 15e siècle, la mer est amputée de à 350 kilomètres ~ 425 kilomètres carrés chaque siècle. Les Pays-Bas sont un royaume de moulins à vent de renommée mondiale, et les premiers moulins à vent hollandais étaient principalement utilisés pour le pompage pour la gestion et la récupération de terres sur la mer.

Le Japon est l'un des pays au monde où les travaux d'extension en mer ont été les plus nombreux. Après la guerre, les terrains nouvellement construits et gagnés sur la mer occupent plus de 1600 kilomètres carrés, soit 10 zones urbaines ou 20 îles de la taille de Hong Kong. Les nouveaux terrains acquis sont principalement destinés à trois grands domaines ceux de l'industrie, des transports et du logement. Selon des documents historiques, dans la seule préfecture d'Okayama, 90% de la baie de Kojima étaient immergés à la fin du XVIe siècle et des dizaines de milliers d'hectares de terres fertiles étaient obtenues.

Depuis le milieu des années 1960 jusqu'aux années 1970, la Chine a entamé un essor de la récupération de terres à grande échelle. La récupération des terrains à ce stade est également dominée par les activités bancaires côtières. Les utilisations

agricoles ont tendance à être intégrées et les effets environnementaux de la récupération des terres se manifestent principalement par la disparition de grands fonds côtiers.

Avec la croissance rapide et soutenue de l'économie chinoise, en particulier dans le contexte de la deuxième vague d'industrialisation et de pénurie de terres, la Chine entame une nouvelle série de travaux de récupération de terres à grande échelle, à l'heure actuelle, notamment la région de Tianjin Binhai est en train de réaliser le plus grand projet de récupération de terres en Chine.

En ce qui concerne les motivations, elles comportent trois aspects principaux. Le premier aspect concerne l'économie marine et l'effet de la mer côtière qui jouent un rôle important dans l'attraction économique régionale. En effet une récupération de terres permet de construire une zone industrielle, une zone résidentielle et une zone de tourisme de loisirs afin de réaliser «l'effet économique du bord de mer». Pour le deuxième aspect, en raison du resserrement de la politique de l'État en matière de terres, la mise en valeur des terres permet de créer de nouvelles terres, compensant ainsi l'occupation des terres cultivées et l'équilibre entre l'occupation et les compensations des terres. Concernant le troisième aspect, les gouvernements locaux peuvent augmenter ainsi la superficie de leurs terres en mettant en œuvre la récupération et en augmentant ainsi les recettes fiscales locales grâce à la cession de terres.

S'appuyant sur l'expérience de la précédente application technique de la construction d'une digue, on applique la technique de solidification de sédiment à un site de dragage dans la construction d'un projet d'excavation de chenaux fluviaux et de remblayage de digues. Ce projet sera appelé par la suite, projet de Yushan. Ce projet apermis l'étude d'une nouvelle idée technique pour le remplissage direct de sédiment solidifié à haute teneur en eau dans le domaine de la récupération des terres, mais aussi il a permis l'analyse également de manière systématique des problèmes techniques d'excavation et de remodelage de sédiments solidifiés.

3.4.2 Le projet de Yushan

3.4.2.1 Présentation du projet

Le projet concerne la construction d'une digue de fermeture entre 2 îles et un canal (figure 3.4-1). Ce projet est dénommé projet deYushan. A partir de sédiments de dragage marins stockés près du site de construction et après traitement de ceux-ci, le projet consiste à remplir une plate-forme en arrière de la digue existante (figure 3.4-1). Puis on excave cette plate-forme pour la mise au place du canal (en bleu sur la figure 3.4-1).

Il se situe dans le comté de Xiaoshan dans la ville de Zhoushan, en province du Zhejiang, en Chine.

La construction de la base pétrochimique verte de Zhoushan est l'un des projets de supervision du Conseil d'État, le premier des trois projets dans la province du Zhejiang et le projet dans la nouvelle région des îles de Zhoushan. En avril 2017, les digues de l'ouest et du nord de Daxiao Yushan dans le comté de Daishan à Zhoushan ont été fermées, puis on a procédé au remplissage à l'intérieur de l'enclôture des digues. Avant la finition de la surface ainsi gagnée, un système de réseaux d'eau avait d'abord été mis en place pour s'adapter à la configuration de la fermeture afin de lutter contre les inondations, assurer le drainage et le déversement des eaux de ruissellement dans la région. La hauteur de repère prévue pour le cours de la rivière proposé est d'environ -2,6 m. Le plan de traitement initial consistait tout d'abord à combler l'élévation prévue, puis à effectuer un traitement d'amélioration des sédiments pour assurer en surface la construction d'une fondation souple après la sédimentation et le drainage des sédiments, et enfin à procéder à des fouilles et à la construction de digues.

Le projet est situé dans un plateau de sol limoneux, qui présente une forte teneur en eau, une faible capacité portante et une forte fluidité. La masse volumique se situe généralement autour de 1,60 g/cm^3 et la teneur en eau naturelle est généralement comprise entre 75% et 100%. Le limon présente une compressibilité élevée, le temps de traitement d'amélioration de la base des limons fluides est long et la difficulté affecte

directement la progression de la finition de la surface. Afin de résoudre ce problème, une nouvelle idée de traitement est proposée. En tirant partie de l'expérience des solidifications de limons précédentes une nouvelle idée de traitement est proposée. Le limon est directement amélioré pendant le processus de dragage et les indices de performances mécaniques du sédiment solidifié sont améliorés. Du chenal fluvial mis en oeuvre on a excavé le sédiment solidifié pour réaliser le remblai ce qui assure non seulement l'excavation du chenal fluvial, mais également le bon déroulement du projet, en veillant au progrès rapide, à l'excellente qualité et au coût raisonnable.

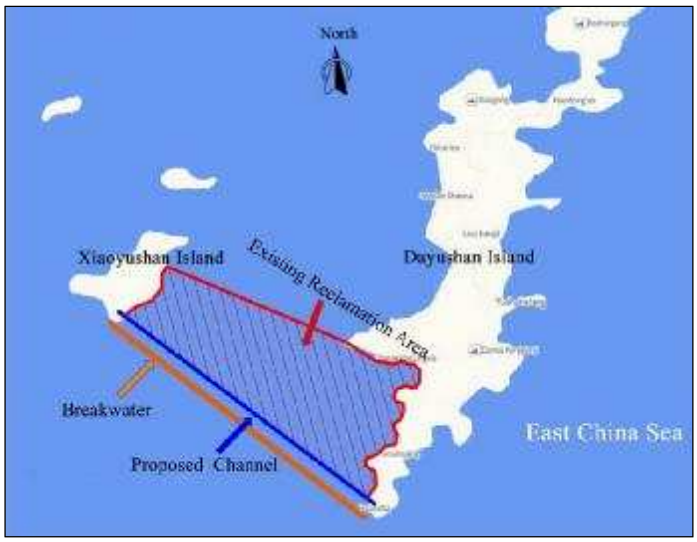

Figure 3.4-1. Vue d'ensemble de la zone du projet deYushan

3.4.2.2 Géologie du site

Le remplissage de sédiment solidifié dans ce projet est de 150.000 m^3. Selon le rapport d'enquête sur l'ingénierie au premier stade du traitement de la zone terrestre et de fondations de la phase I du projet de Daxiao Yushan, les sols de cette zone d'étude sont divisés en 8 grandes couches et en sous-couches; les couches principales concernent les 5 premières couches. Les 5 couches dites principales se caractérisent de la manière suivante:

•Couche 1: De couleur jaune grisâtre à jaune brunâtre, elle se trouve en surface . Il s'agit d'un sol saturé, plastique à plastique dur. Il est principalement composé de sol cohésif, contenant une petite quantité de racines de plantes et une petite quantité de taches d'oxyde de fer. L'épaisseur de la couche est généralement de 0,6 m à 1,7 m. Le

nombre de coups obtenu avec le pénétration dynamique standard est généralement de 6 à 7.

•Couche 2: C'est une couche de limon jaune grisâtre à gris saturée, plastique à fluide. Cette couche de sol est sous-jacente avec une petite quantité de limon en couche mince ou agglomérée, et parfois avec des fragments de coquilles. La couche est localement distribuée dans le site proposé, d'une épaisseur généralement mince, allant de 0,5 m à 1,5 m. Le nombre coups pour le pénétration dynamique standard mesuré est généralement < 1.

•Couche 3: C'est une argile limoneuse grise, saturée, plastique à fluide. Le sol est relativement homogène, lisse avec une petite quantité de silt en couche mince ou agglomérée. Des fragments de coquilles ont été observés. Cette argile a une compressibilité élevée, de mauvaises propriétés mécaniques. Cette couche est distribuée sur le site proposé. L' épaisseur est généralement comprise entre 14,0 m et 25,0 m. L'essai de pénétration dynamique a fourni un nombre de coups inférieur à < 1 ~ 4.

•Couche 4: De couleur gris à gris vert on trouve un sable limoneux. Saturé, légèrement dense à moyennement dense, il constitue cette couche. Le nombre de coups à l'essai de pénétration dynamique standard mesuré va généralement de 9 à 33, avec une moyenne de 17.

• Couche 5: Cette couche est formée d'une argile limoneuse grise, saturée, plastique.Le sol est relativement homogène, avec une petite quantité de graviers limoneux. L'épaisseur de la couche est généralement comprise entre 4,0 m et 10,0 m et l'épaisseur locale est mince, entre 1,0 m et 3,3 m environ. Le nombre de coups à l'essai de pénétration standard mesuré va généralement de 2 à 7, avec une moyenne de 4.

3.4.2.3 Conditions de construction du projet de Yushan

Pour créer la zone de récupération des terres envisagée, le limon est un excellent matériau géotechnique imperméable avec un coefficient de perméabilité généralement inférieur à 10^{-5} cm/s, ce qui permet d'envisager que le coefficient de perméabilité du sédiment solidifié soit inférieur à 10^{-5} cm/s. Afin de satisfaire les exigences au niveau

du coefficient de perméabilité du sédiment solidifié, la résistance à la compression non confinée du sédiment solidifié doit être supérieure à 150 kPa et la résistance à la compression non confinée du sol reconstitué après remplissage doit toujours être supérieure à 150 kPa.

3.4.3 Essais en laboratoire

3.4.3.1 Éprouvettes de sol et matières premières de l'agent de durcissement

L'éprouvette de sol utilisé dans cette étude est celle d'une argile limoneuse issue du site où le projet Yushan est prévu. Il s'agit d'une argile limoneuse, gris noir, plastique à fluide, relativement homogène. La granulométrie du sédiment est donnée, dans le Tableau 3.4-1.

Tableau 3.4-1. Propriétés physiques du sédiment moyen du projet de Yushan

Granulométrie (%)				Teneur en eau (%)
Teneur en gravier 5 ~ 2 mm	Teneur en sable 2 ~ 0.075 mm	Teneur en limon 0.075 ~ 0.005 mm	Teneur en argile < 0.005 mm	
0	0	31.2	68.8	57.41
Limite de liquidité (%)	Limite de plasticité (%)	Indice de plasticité IP	Indice de liquidité IL	Teneur en matière organique (%)
50.39	32.06	18.33	1.38	2.1

Les agents de durcissement utilisés dans cette étude comprenment les agents suivants:

Un ciment commercial noté C.

Une chaux vive commerciale noté CX.

Un agent de durcissement composé 6, noté ADC6 fourni par la société Jiangsu Kunze Technology Co., Ltd.

Pour cet agent de durcissement ADC6, on utilise un activateur. L'agent de durcissement composé ADC6 contient du formiate de calcium comme activateur, de

qualité industrielle et adapté à la solidification des argiles limoneuses à haute teneur en eau.

3.4.3.2 Étude de fluidité du sédiment solidifié dans le projet de Yushan

Le sédiment solidifié est directement utilisé pour remplir la digue du canal. Pour répondre aux besoins de pompage, le sédiment solidifié doit respecter une certaine fluidité. S'appuyant sur l'expérience de recherches antérieures, les performances d'écoulement d'un sédiment solidifié ont une grande influence sur l'effet de pompage. Les indicateurs permettant d'évaluer les performances d'écoulement varient différemment, notamment en ce qui concerne l'affaissement et la viscosité. Diverses méthodes d'évaluation ont leurs propres avantages et inconvénients. Compte tenu de la praticabilité de l'opération sur site, l'affaissement est utilisé pour évaluer les propriétés de la fluidité du sédiment solidifié, puis pour évaluer la pompabilité du sédiment solidifié. Afin d'obtenir l'influence de la teneur en eau sur la fluidité de l'argile limoneuse, cinq types d'éprouvettes à teneur en eau différente, ont été préparés sur le site et l'affaissement correspondant à la teneur en eau différente a été déterminé, voir les résultats spécifiques à la figure 3.4-2.

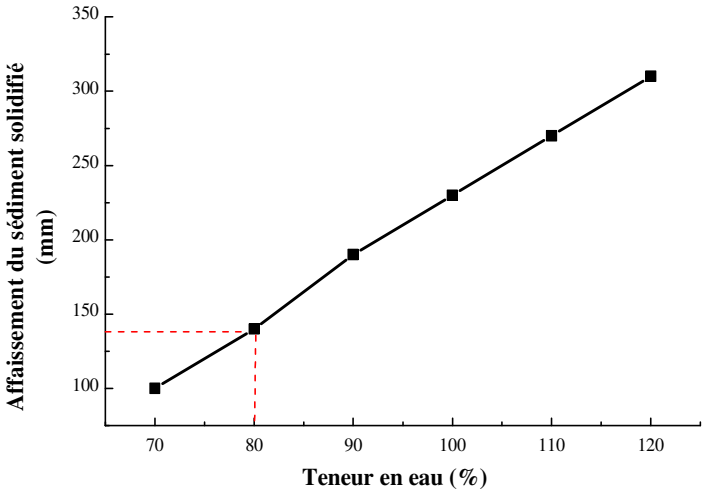

Figure 3.4-2: Fluidité de la boue (sans solidifiant) selon différentes teneurs en eau du sédiment naturel

Comme on peut le voir sur la figure 3.4-2 ci-avant, l'affaissement des sédiments naturels a tendance à augmenter de manière linéaire avec le changement de teneur en

eau. D'après la construction actuelle, il est connu que le minimum d'affaissement pour le pompage de sédiment solidifié est de 140 mm, de sorte que la teneur en eau des sédiments doit être supérieure à 80%. Une fois les sédiments mélangés avec l'agent de durcissement, la viscosité du sédiment solidifié augmentera rapidement et le sédiment solidifié préparé avec les sédiments naturels avec une teneur en eau de 80% est encore loin de répondre à la demande pour assurer le pompage et affecte le pompage du sédiment solidifié. Par conséquent, une étude a été menée sur l'effet du sédiment avec des teneurs en eau différentes et du dosage en agent de durcissement sur l'affaissement du sédiment solidifié afin de répondre à la demande de pompage. La figure 3.4-3 suivante montre l'évolution de l'affaissement du sédiment solidifié en fonction de teneurs en eau différentes et un dosage en agent de durcissement différent.

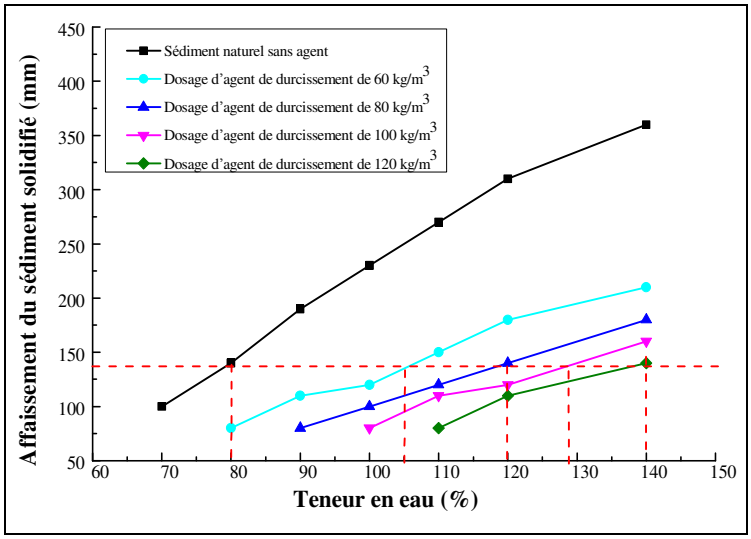

Figure 3.4-3. Fluidité de la boue (mélange sédiment et agent) selon différentes teneurs en eau et différents dosages en agent de durcissement

Comme le montre la figure 3.4-3 ci-avant, la teneur minimale en eau correspondant à la boue pouvant être pompée avant l'ajout de l'agent de durcissement est d'environ 80%. Au fur et à mesure que l'agent de durcissement est ajouté, la teneur minimale en eau du mélange commence à augmenter et plus la quantité d'agent de durcissement est élevée, plus la teneur minimale correspondante est élevée. Afin de répondre aux exigences du minimum d'affaissement de 140 mm pour le pompage du sédiment solidifié, si le dosage de l'agent durcissement est de 60 kg/m^3, la teneur en eau

doit être ajustée à au moins 105%, si le dosage est de 80 kg/m^3, la teneur en eau doit être ajustée à au moins 120%, si le dosage est de 100 kg/m^3, la teneur doit être ajustée à au moins 128% et si le dosage de 120 kg/m^3 est utilisé, la teneur en eau doit être ajustée à au moins 140%. Toutefois, étant donné que la teneur en eau est trop élevée, la difficulté au niveau du durcissement augmentera, raison pour laquelle, compte tenu des considérations globales de performance de fluidité et de coût, la teneur en eau du mélange de sédiments et de l'agent utilisé du projet de Yushan a été ajustée à environ de 100% à 120% pendant la construction.

3.4.3.3 Effet du dosage et du type d'agent de durcissement sur le durcissement des sédiments après pompage dans le projet de Yushan

A partir des résultats de l'étude menée sur les performances de fluidité, le projet de Yushan a utilisé des sédiments à forte teneur en eau pour assurer le remplissage, mais les sédiments traités par des liants (agents de durcissement) traditionnels tels que la chaux, les cendres volantes, le ciment, doivent avoir une faible teneur en eau. En effet, lorsque les sédiments ont une teneur en eau élevée, le matériau solidifié ne peut plus avoir un bon effet de durcissement, et le sédiment solidifié obtenu comme matériau présente une mauvaise stabilité à l'eau et une faible imperméabilité. Pour que les sédiments à forte teneur en eau aient d'excellentes performances de fluidité et un bon effet de durcissement, ils doivent être traités en utilisant un agent de durcissement composé spécial, l'agent ADC6 pour un durcissement efficace des sédiments à haute teneur en eau.

Le tableau 3.4-2 présente les résultats des essais de comparaison relatif à l'effet de durcissement du sédiment solidifié avec des liants traditionnels et solidifié par un agent de durcissement de type ADC6. Ces liants et agents ont été mélangés à des sédiments à haute teneur en eau pour le projet de Yushan.

Tableau 3.4-2. Effet de solidification de sédiments à haute teneur en eau pour projet de Yushan

Teneur en eau du sédiment (%)	Type d'agent de durcissement	Dosage de l'agent de durcissement (kg/m^3)	Résistance à la compression non confinée (kPa)		Coefficient de perméabilité (cm/s)
			7 jours	28 jours	
100	C	90	49	75	2.06×10^{-4}
		100	52	84	1.75×10^{-4}
	CX	90	41	69	2.26×10^{-4}
		100	46	73	1.89×10^{-4}
	ADC6	90	106	167	2.17×10^{-6}
		100	134	192	1.53×10^{-6}
120	C	90	34	63	5.41×10^{-4}
		100	40	68	3.24×10^{-4}
	CX	90	30	50	6.57×10^{-4}
		100	33	47	4.11×10^{-4}
	ADC6	90	93	151	2.71×10^{-6}
		100	115	179	1.89×10^{-6}

Les résultats des essais du tableau 3.4-2 montrent que, dans le cas où la fluidité est satisfaisante, pour des sédiments à forte teneur en eau, l'agent de durcissement composé ADC6 est excellent pour assurer le durcissement des sédiments à haute teneur en eau du projet de Yushan. Les résultats répondent aussi aux exigences des matériaux requises. Et le coefficient de perméabilité peut également répondre aux exigences d'utilisation d'un sédiment solidifié comme matériau immergé. Le dosage de l'agent de durcissement a une grande influence sur les propriétés de fluidité des sédiments à forte teneur en eau et sur la résistance à la compression non confinée. La teneur élevée en eau et le faible dosage en agent de durcissement ont de meilleures performances de fluidité, mais la résistance à la compression non confinée du sédiment solidifié est réduite, le retrait en volume est important et les propriétés géotechniques du sol solidifié sont affectées. La faible teneur en eau et le dosage élevé en agent de durcissement sont utiles pour

améliorer les propriétés du sédiment solidifié, mais peuvent affecter les performances de la construction du sédiment solidifié. Par conséquent, lors du pompage et du remplissage des sédiments à forte teneur en eau, il convient de choisir raisonnablement le taux d'humidité du sédiment (mélange) et le dosage en agent de durcissement. Dans le projet de Yushan, au cours de la construction proprement dite, la teneur en eau du sédiment est comprise entre 100% et 120% et le dosage de l'agent de durcissement est choisi entre 90 kg/m^3 et 100 kg/m^3.

3.4.3.4 Analyse de l'effet du remoulage de sédiment solidifié sur la résistance à la compression non confinée

Dans le projet de Yushan, afin de tirer le meilleur parti des ressources de l'excavation des sédiments solidifiés après le dragage du sédiment, le sédiment solidifié de l'excavation issu du canal est utilisé de nouveau comme matériau de base et le sédiment solidifié sera broyé et mélangé avant le début du projet. Afin de bien comprendre l'effet du remoulage sur la résistance du sédiment solidifié avant le début du projet, en particulier un essai dit de remoulage du sédiment solidifié après durcissement est effectué. Le test dit de remoulage est le suivant: le sédiment solidifié issu du sédiment naturel est broyé mis en trois couches dans le moule d'essai. Chaque couche est compactée à la main et le nombre de coups pour le compactage est de l'ordre de 7 fois. Une fois le compactage terminé, les surfaces supérieure et inférieure sont lissées et l'éprouvette est testée pour ses propriétés mécaniques. Les résultats de l'essai après remoulage sont présentés dans le tableau 3.4-3 ci-après.

Les données des essais, voir tableau 3.4-3, montrent que, lorsque le sédiment solidifié est remoulé, mélangé et traité de niveau, la résistance du sédiment solidifié après remoulage est réduite lorsqu'aucun agent de durcissement n'est ajouté. Il est seulement nécessaire d'ajouter un plus faible dosage en agent de durcissement pour le remoulage, et la résistance du sédiment solidifié après remoulage est augmentée pour être proche de la résistance du deuxième matériau obtenu avant ce deuxième durcissement. En effet, le processus de formation du sédiment solidifié consiste en une série de réactions physiques et chimiques entre l'agent de durcissement et les

composants actifs du sédiment. La réaction chimique est une réaction irréversible. Après le concassage et le remoulage, certaines des substances gélifiantes du sédiment solidifié sont brisées et la réaction chimique initiale est également faible, de sorte que la résistance sera réduite dans une certaine mesure.

Tableau 3.4-3. Résultats des tests de remoulage de sédiments solidifiés dans le projet de Yushan

Teneur en eau du sédiment (%)	Type d'agent de durcissement	Dosage de l'agent de durcissement (kg/m^3)	Résistance à la compression non confinée (kPa)	Dosage de l'agent de durcissement pour le remoulage du sédiment solidifié à 28 jours (kg/m^3)	Résistance de remoulage du sédiment solidifié à 28 jours (kPa)
100	ADC6	90	167	0	133
				10	151
				20	162
		100	192	0	154
				10	169
				20	183
120		90	151	0	121
				10	137
				20	150
		100	179	0	143
				10	159
				20	172

Cependant, en raison de la réaction du sédiment d'origine à travers l'agent de durcissement, la nature du sédiment broyé a été fondamentalement modifiée. Il reste un grand nombre de produits d'hydratation dans les particules de sédiment solidifié après le broyage et les particules de sédiment continuent à s'agglomrer, de sorte que le sédiment solidifié remoulé a toujours une bonne résistance, et la formation de produits

gélifiés est relancée en ajoutant un peu d'agent de durcissement, et la résistance du sédiment solidifié peut être restaurée dans même état avant le remoulage. Par conséquent, il s'agit d'une solution très pratique pour économiser du temps pour la construction, réduire les coûts et optimiser l'utilisation des ressources en consolidant l'excavation de la couche de sédiments et l'équilibre des terres dans le projet de Yushan.

3.4.4 Organisation et suivi des travaux

3.4.4.1 Etapes de construction et phases de durcissement

Afin de comprendre plus en détails le processus global de construction avec la solidification des sédiments et à leur mise en place, les étapes de la construction sont données par la suite et illustrées aux figures 3.4-4 à 3.4-7.

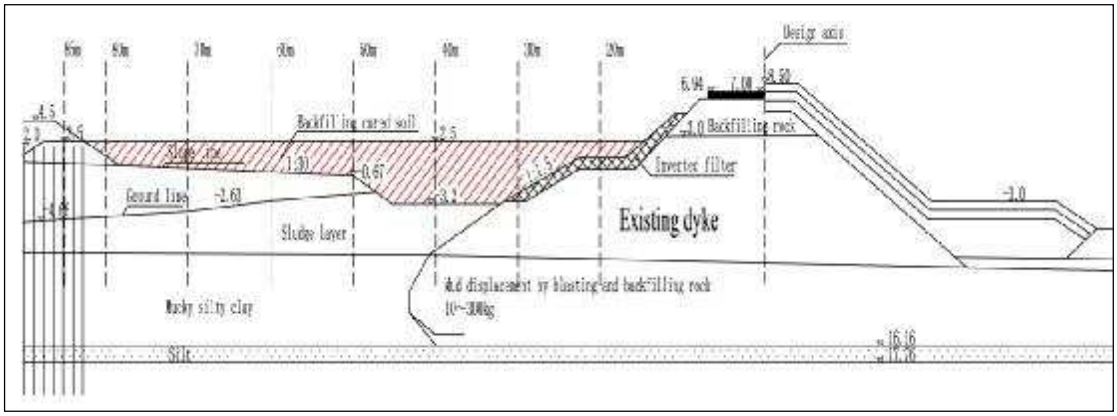

Figure 3.4-4. Étape 1: remplissage avec le sédiment solidifié. Création de la plate-forme (en rouge)

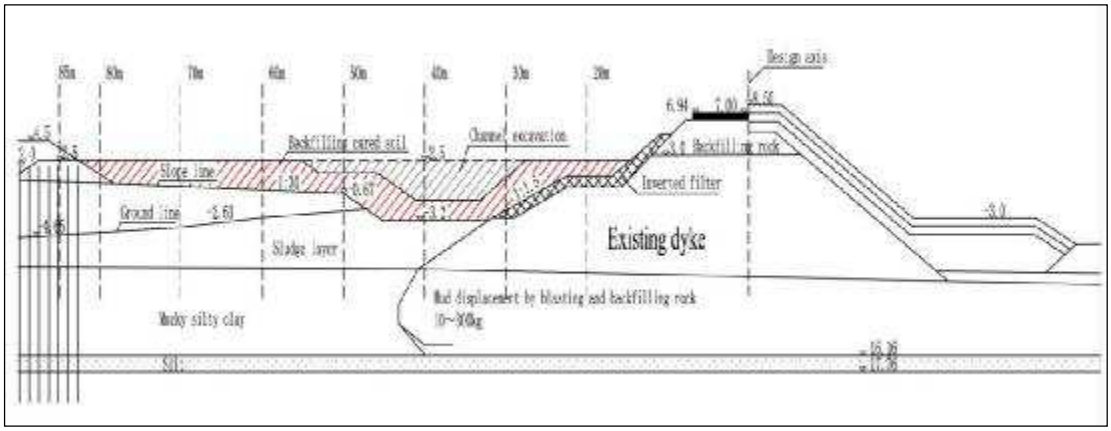

Figure 3.4-5. Étape 2: excavation du canal sur la plate-forme

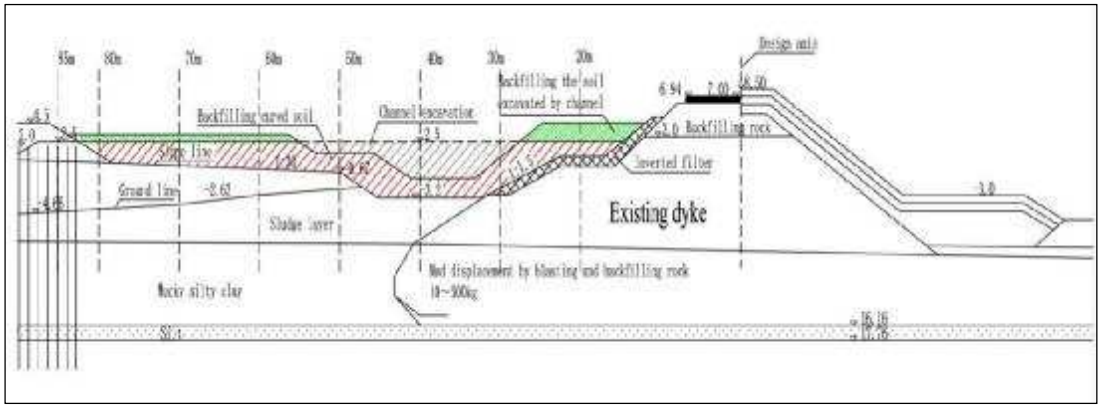

Figure 3.4-6. Étape 3: mise en place d'une terrasse routière près du canal avec du sédiment solidifié “remoulé ”. Equilibre des terres de part et d'autre du canal

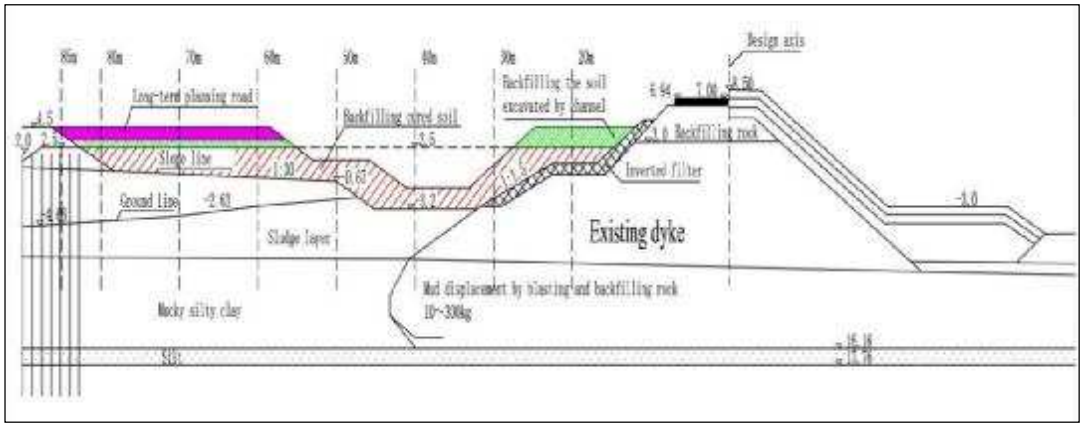

Figure 3.4-7. Étape 4: mise en place de la plate-forme définitive (projet à venir)

Les principales étapes de la construction voir figures 3.4-4 à 3.4-7 montrent que la méthode de solidification intègre l'excavation, le remplissage et le traitement de la plate-forme en surface (fondation souple), que le processus de construction est réduit et que la construction reste simple et facile à mettre en oeuvre.

Selon les caractéristiques de résistance du sédiment solidifié, le même sédiment solidifié après le remplissage, peut être directement excavé après 14 jours à 28 jours de mise en place, selon les conditions météorologiques locales et les précipitations, ce qui permet de gagner beaucoup de temps.

Le remplissage et le traitement pour obtenir une capacité portante suffisante en plate-forme sont intégrés.

Les caractéristiques spécifiques de compacité et de perméabilité assurent la sécurité et la stabilité de la digue de Nandi existante, mais a un aussi effet d'étanchéité.

En raison de l'amélioration du sédiment, l'indice CBR (essai CBR), le coefficient de perméabilité, la résistance à la compression non confinée, la résistance au cisaillement et d'autres indices géotechniques peuvent répondre aux exigences de conception d'un sol de fondation. Le sédiment solidifié peut être directement utilisé pour le remblayage des deux côtés du canal.

3.4.4.2 Processus de construction

Tout d'abord on assure le remplissage (sable et sédiment solidifié), puis on exécute la forme du canal par excavation. Le traitement secondaire du sédiment solidifié (remoulé) est effectué pour réaliser les travaux de terrassement (terrasse routière et plate-forme d'équilibre des terres et constructions futures). Ces actions nécéssitent certains matériels et équipements, voir figures 3.4-8 à 3.4-11.

Figure 3.4-8. Équipement de dragage

Figure 3.4-9. Chaland pour le transport stockage et mélange des sédiments de dragage

Figure 3.4-10. Mélange du sédiment en barge

Figure 3.4-11. Mise en place du sédiment solidifié

3.4.4.3 Contrôle de la qualité

Le processus de construction lors du remplissage général (sédiment solidifié) et du remplissage de sédiment solidifié “remoulé” incluent les travaux de contrôle et de qualité de la construction. Le contenu de ces essais de contrôle est présenté dans le tableau 3.4-4.

Tableau 3.4-4. Éléments et fréquence d'inspection de la construction du projet de Yushan

Contrôle	Éléments d'inspection	Fréquence d'inspection	Méthode d'inspection	Partie d'inspection
Processus de construction	Affaissement	1 inspection par 500 m^3 de construction	Inspection d'éprouvettes de sédiments sur site	Entreprise réalisant la construction
	Résistance à la compression non confinée à 28 jours			
Inspection d'acceptation	Coefficient de perméabilité verticale à 28 jours	28 points	Carottage sur site, essais en laboratoire	Bureau de contrôle
	Coefficient de perméabilité horizontale à 28 jours			

Les résultats, voir tableau 3.4-5, de l'autotest montrent que l'on peut contrôler l'affaissement lors du processus de fabrication du sédiment solidifié, que la fluidité répond aux exigences de la construction et que la résistance à la compression non confinée à 28 jours satisfait aux exigences de la conception.

Tableau 3.4-5. Résultats de l'autotest sur l'affaissement lors du processus de fabrication et de construction pour le projet de Yushan

Numéro	Type d'agent	Affaissement (mm)	Résistance à la compression non confinée à 28 jours (kPa)	Conclusion
1	Sédiment solidifié	145	162	Qualifié
2		155	156	
3		150	172	
4		150	169	
5		160	154	
6		165	159	
7		165	165	
8		155	164	
9		150	154	
10		155	158	
11	Sédiment solidifié remoulé	\	154	Qualifié
12		\	156	
13		\	156	
14		\	161	
15		\	157	
Exigences de conception		≥ 140	≥ 150	

3.4.5 Test de réception sur site

Pour le projet de Yushan, des essais de performance géotechnique ont été réalisés notamment le coefficient de perméabilité a été ciblé et le bureau de contrôle a aussi exécuté des essais. Le tableau 3.4-6 donne les résultats des tests géotechniques menés par le bureau de contrôle, sur des éprouvettes de sédiments solidifiés à différentes profondeurs et pour le sédiment solidifié remoulé sans ajouter à nouveau d'agent de durcissement. Les données des essais figurant dans le tableau 3.4-6 montrent que les

coefficients de perméabilité du sédiment solidifié et du sédiment solidifié remoulé répondent aux exigences de conception et aux exigences d'acceptation.

Tableau 3.4-6. Résultats des essais d'échantillons issus de carottages lors du projet de Yushan

Profondeur d'échantillonnage	Cohésion C (kPa)	Angle de frottement φ (°)	Coefficient de perméabilité verticale (cm/s)	Coefficient de perméabilité horizontale	Remarques
0.20 ~ 0.50 m	34.1	20.5	/	/	Sédiment solidifié
0.70 ~ 1.00 m	/	/	2.71×10^{-6}	6.10×10^{-6}	
1.50 ~ 1.80 m	43.2	18.5	4.19×10^{-6}	1.31×10^{-5}	
Sédiment solidifié remoulé	/	/	1.58×10^{-5}	1.46×10^{-5}	Sédiment solidifié remoulé

3.4.6 Résumé

À l'heure actuelle, la plupart des méthodes de consolidation par drainage sont encore utilisées dans les projets de mise en décharge ou dépôt de sédiments. La méthode de consolidation par drainage présente les inconvénients suivants. Après le processus de dragage, un temps est nécessaire pour assurer la sédimentation, le drainage, le traitement des sédiments en place (couche) et la création par excavation de chenaux, etc., la période de construction est longue. Lorsque des préchargements sur la couche sont utilisés pour le traitement de la couche molle de sédiments, la quantité de tassement est importante et la hauteur de remplissage finale est difficile à estimer. La hauteur des sédiments déposés doit être supérieure à l'altitude de conception, ce qui entraîne une augmentation de la section des digues d'enclôture avant le dragage et ceci augmente les coûts de construction. Lorsque l'empilement des couches de sédiments est important, la charge est importante et la sécurité de la digue peut être affectée. Afin de remédier aux faiblesses de la méthode de consolidation traditionnelle par drainage, une nouvelle méthode de traitement est proposée par solidification. La méthode a été proposée et a rencontré un grand succès dans le projet de Yushan. Elle a permis de fournir de

nouvelles idées pour la construction d'infrastructures côtières dans le domaine de la mise en stockage de sédiments dans le futur. Les principales conclusions sont les suivantes selon l'étude menée.

Une nouvelle technologie de traitement de sédiments dragués et de remplissage est proposée. Grâce à la synthèse de l'expérience et à la pratique, il est prouvé que la méthode de solidification s'intègre bien au traitement par refoulement et au traitement des couches molles, pour fondation de plate-forme. Le processus de construction appliqué au projet du Yushan est peu développé, la construction est simple et facile à utiliser.

Les principales techniques permettant d'ajuster les performances de fluidité du. Sédiment solidifié par pompage sont maîtrisés. Il suffit de modifier la teneur en eau de la boue (mélange) et le dosage de l'agent de durcissement. En augmentant le dosage de l'agent de durcissement, la teneur minimale en humidité requise pour les sédiments peut être augmentée afin de respecter les propriétés d'écoulement. Plus la quantité d'agent de durcissement est importante, plus la teneur en eau minimale correspondante est élevée. En d'autres termes, plus la quantité d'agent de durcissement est élevée, plus le taux d'humidité minimum requis correspondant est élevé. Dans la construction sur site, il est nécessaire de prendre en compte la performance de la fluidité et les coûts afin de déterminer la teneur en eau appropriée pour les sédiments à traiter afin de répondre aux exigences de performance de fluidité du sédiment solidifié pompé.

La technologie clé de la solidification d'un sédiment marin à haute teneur en eau est maîtrisée. En modifiant la formule de l'agent de durcissement, on obtient un agent de durcissement composite ADC6 qui peut répondre aux diverses exigences de conception. Et en particulier, le sédiment solidifié “remoulé” obtenu à partir du sédiment solidifié a un coefficient de perméabilité bien inférieur à celui obtenu à partir de liants classiques comme le ciment ou la chaux.

L'influence du “remoulage” du sédiment solidifié sur la résistance à la compression non confinée est faible. Ceci fournit une garantie technique pour la ré-excavation d'un sédiment solidifié après le remplissage. En broyant et en remodelant le

sédiment solidifié, le remoulage fera diminuer la résistance du sédiment solidifié dans une certaine mesure, tout en conservant une résistance élevée, et la structure interne initiale du sédiment solidifié ne sera pas complètement détruite. Le sédiment remoulé répond aux exigences les plus élevées en ajoutant une petite quantité d'agent de durcissement.

Un processus complet de construction d'infrastructures dans une zone de stockage de sédiments dragués a été mis au point. Un processus général de construction d'un canal après le remblayage d'une plate-forme avec des sédiments solidifiés à haute teneur en eau a été mis en avant, ce qui a permis une construction rapide et pratique et un support technique pour une construction de haute qualité et pour une efficacité de la structure en sédiment solidifié.

La construction de l'infrastructure réalisée à l'aide de cette technologie a été qualifiée par une inspection et une acceptation sur site.

3.5 Etude de la protection de fondations sur pieux éoliens en mer-Site de Binhai (Chine)

3.5.1 Contexte de la recherche

L'énergie éolienne est devenue l'un des moyens les plus importants de produire de l'électricité à partir de sources renouvelables dans le monde entier. La zone des eaux d'isobathe à moins de 20 m des zones côtières chinoises avoisine les 160.000 km^2. Si 20% de la surface de la mer peu profonde peut être utilisée pour l'énergie éolienne, les ressources énergétiques générées par l'énergie éolienne à la surface de la mer peuvent alimenter 200.000 éoliennes de 1000 kW[104]. On peut constater que les ressources éoliennes marines de la Chine sont très riches et présentent un grand potentiel de développement.

À l'heure actuelle, l'industrie éolienne offshore de la Chine est entrée dans une phase de développement commercial à grande échelle. Du point de vue technique une fois le pieu éolien terminé et mis en service, celui-ci sera partiellement affouillé principalement autour de la fondation du pieu en raison de l'action des courants dans le fond marin. Avec le développement de l'érosion sous-jacente, le puits d'affouillement va progressivement se creuser, ce qui réduira continuellement la stabilité de l'éolienne en mer. À long terme, l'éolienne sera instable[105], causant des pertes importantes, par conséquent, il est nécessaire de prendre des mesures anti-affouillement nécessaires pour créer une zone de protection efficace sur la surface du fond marin du pieu afin de garantir la stabilité de la fondation du pieu.

À l'heure actuelle, les mesures de protection couramment utilisées sont des enrochements, des couvertures en sable, des structures en béton et algues aquatiques bioniques, mais chaque mesure de protection a ses propres inconvénients et l'effet de la protection est difficile à garantir dans des conditions de travail différentes. Les principales conséquences sont les suivantes: dommages causés au câble sous-marin, à la fondation sur pieu; mauvais ajustement de la structure de protection pour protéger

les fondations, le câble sous-marin et le fond marin; facilité à former des vides; courte période de protection; difficile de réparer la construction à un stade ultérieur, coût élevé de la protection etc.

Le tableau 3.5-1 ci-après indique les avantages et les inconvénients des mesures de protection courantes applicables aux fondations sur pieux en site marin.

Tableau 3.5-1. Comparaison des avantages et des inconvénients des mesures de protection courantes pour les fondations sur pieux en mer

Mesures de protection	Avantage	Inconvénient
Protection par enrochement	1. Le matériau rocheux a une forte résistance à la corrosion, une bonne étanchéité et capacité a la filtration pouvant former une protection permanente. 2. Il est pratique d'effectuer le remplissage et la mise en place pendant la construction.	1. Le processus de construction et l'effet de protection au niveau correspondant ont une grande influence. 2. Lorsque le remplissage est terminé, il est facile d'endommager le pied du pieu et le câble sous-marin. Une fois que le revêtement anti-corrosion de la fondation de pieu est endommagé, l'érosion de la surface est rapidement provoquée. 3. L'efficacité de projection est faible, le nombre d'enrochements est élevé. 4. Le coût des enrochements calibrés est élevé, en particulier dans le contexte actuel de pression accrue en matière de protection de l'environnement, le prix des granulats a fortement augmenté et l'offre est incontrôlable.
Protection par sacs de sable ou gabions	1. Les géotextiles et les galets ou cailloux sont peu coûteux. 2. Le sac de sable est souple et ne causera pas de dommages secondaires au câble sous-marin et à la fondation sur pieux.	1. Le géotextile est facilement endommagé, ce qui provoque l'arrachement des galets ou cailloux après et endommagement. 2. L'adhésion entre le sac de sable et la base du pieu n'est pas bonne et il est facile de produire une érosion secondaire. 3. Le fond du sac de sable peut s'affaisser après creusement, ce qui peut endommager le câble qui est alors suspendu.
Protection par rangées de blocs béton	1. Approprié à la pose à grande échelle et à l'efficacité de construction élevée. 2. Le coût des matériaux est faible.	1. Le scellement de la rangée de béton ou de l'espace un affouillement est faible et il est facile de provoquer un affouillement inférieur et l'effet protecteur général. 2. Béton est un matériau solide, facile à causer des dommages secondaires à la fondation du pieu et au câble sous-marin.

Mesures de protection	Avantage	Inconvénient
Protection par algues aquatiques bioniques	Les algues aquatiques bioniques constituent un matériau polymère résistant à la corrosion qui est fixé autour de la fondation sur pieu et peut réduire l'écoulement pour former un dépôt de sédiment, résolvant ainsi le problème de l'érosion.	1. Les algues aquatiques bioniques sont des produits brevetés importés dont les prix sont élevés. Même s'il existe des imitations en Chine, elles ne peuvent pas avoir le même effet. 2. L' algue aquatique bionique doit être fixée sur le fond marin et la construction est compliquée. 3. Les opérations de plongée, l'efficacité de la construction est faible et les risques pour la sécurité importants. 4. Les exigences géologiques des fonds marins sont élevées et l'effet protecteur n'est pas satisfaisant.

Compte tenu des nombreuses lacunes des mesures de protection traditionnelles, afin de parvenir à la protection globale de la fondation à pieu unique, des exigences plus strictes sont imposées à la nouvelle structure de protection (et aux nouveaux matériaux). La technologie de solidification de sédiments limoneux a été progressivement valorisée et étudiée depuis les années 70. Après des décennies de développement rapide, cette technologie a été très utilisée dans la construction d'ingénierie côtière en France, au Japon, aux États-Unis, aux Pays-Bas et à Singapour. L'utilisation des sédiments solidifiés pour la protection des fondations sur pieux en mer repose sur l'expérience de l'utilisation des sediments solidifiés dans les batardeaux (remplissage), de la protection contre les inondations dans le cas de plate-formes pour les chemins de fer (chemins de fer à grande vitesse), plate-formes routières et transport, de l'énergie électrique, dans les ports et d'autres projets. C'est un nouveau matériau et une nouvelle technologie développés en combinaison avec l'environnement d'ingénierie unique en mer. Il utilise des matériaux de polymérisation à base de composés inorganiques, des ressources de sédiments marins, des méthodes de polymérisations chimiques et un système de pompage par pipeline pratique pour injecter directement un sédiment solidifié à teneur en eau très élevée dans le fond marin autour de la fondation sur pieux, en s'appuyant sur une fluidité contrôlée du sédiment solidifié. Pour assuer la protection, la boue du sédiment solidifié à teneur en eau extrêmement élevée passe progressivement du stade de boue à un matériau solidifié anti-affouillement, et sa

resistance augmente progressivement avec le développement du processus de durcissement, pour finalement former une structure de protection au fond avec un sédiment solidifié sous forme de plaque entière autour du puis. Par conséquent, l'application d'un sédiment solidifié à la protection des fondations sur pieux offshore présente un intérêt important pour la recherche. Ce sujet se concentre sur les problèmes de développement de la résistance et de contrôle de la fluidité d'un sédiment solidifié lors de l'application à la protection de fondation pour des pieux éoliens. La recherche est menée dans le cadre du projet d'énergie éolienne en mer H1# 100 MW dans le district de Binhai Nord de China Power Investment Corporation.

3.5.2 Le projet de Binhai

3.5.2.1 Présentation du projet

Dans le cadre de ce projet de recherche, le projet d'énergie éolienne en mer H1# 100 MW (mégawatts) prévu le district de Binhai sur la côte nord est situé dans les eaux au large entre l'estuaire de Zhongshan et le port côtier au nord de la côte, avec une profondeur d'eau variant de 8 m à 13 m. Le parc éolien a une forme rectangulaire avec longue de 5 km parallèlement au rivage et situé à une distance moyenne d'environ 5 km perpendiculairement au rivage.

Figure 3.5-1. Schéma de localisation du projet

Un total de 25 éoliennes d'une capacité unique de 4,0 MW font partie du projet. L'unité de production électrique de ce projet est divisée en deux parties: une station de transformation de 220 kV en mer et un centre de contrôle centralisé à terre. La station de transformation offshore de 220 kV augmente la tension de 35 kV à 220 kV, une fois que le câble sous-marin de 220 kV a transmis l'énergie générée par l'éolienne au centre de contrôle centralisé à terre, elle est transférée au système de réseau de distribution.

Dans les fleuves comme en mer, de telles structures sont fondées sur des piliers ou des pieux. Ces fondations sont soumises à l'action des courants, au niveau du lit du fleuve ou du fond marin. A ce niveau la vitesse d'ecoulement et la contrainte de cisaillement s'exerçant au fond peuvent rendre le flux d'eau turbulent et désordonné après la construction de la structure et la force tangentielle d'arrachement sur le fond marin augmentera considérablement.

Des études ont montré que le débit après la mise en place de la structure cylindrique est 1,5 fois supérieur au débit généré dans les conditions sans fondation. L'érosion continue des fondations due a des courants élevés compromet gravement la sécurité et la stabilité de la structure. Par conséquent, il est important de choisir un matériau non érodable comme protection en pied de fondation. Une fois les fondations sur pieux du parc éolien terminées, des fondations sur pieux ont été partiellement emportées, ce qui compromet gravement le bon fonctionnement du parc et ce qui confirme que chaque pieu doit être immédiatement protégé de l'érosion. Si la structure de protection au fond est réalisée avec des sédiments solidifiés, elle doit avoir une forte stabilité à l'eau, et une résistance à l'écrasement suffisante, et acquérir le comportement d'une plaque entière après durcissement et une certaine déformabilité.

3.5.2.2 Géologie du site

Le site est situé sur le plateau intérieur du sud de la mer Jaune et fait partie de l'aile sud du groupe de crêtes de sable du sud de la mer Jaune. Il n'y a pas de conditions géologiques et topographiques pouvant générer des glissements de terrain ou des coulées de débris et aucun effet géologique défavorable tel que l'affaissement du karst et du sol n'a été constaté. Aucun obstacle sur le fond marin n'a été trouvé. Cependant,

l'éolienne est implantée dans les eaux du large subissant les actions des vagues et soumise à la marée.

a. Topographie

Le projet d'énergie éolienne en mer H1# 100 MW du district de Binhai sur la côte nord est situé dans les eaux au large entre l'estuaire de Zhongshan et le port côtier au nord de la côte. La topographie du fond marin change doucement, avec une profondeur d'eau allant de 8 m à 13 m. Le parc éolien a une forme rectangulaire, il est situé à une distance moyenne d'environ 5 km du rivage.

b. Géologie du site

Les sédiments utilisés pour ce projet sont des sédiments de dragage. Ils ont été prélevés en mer dans les 5 couches principales de surface.

La couche 1, est constituée d'une couche argile limoneuse, c'est un sol nouvellement déposé, gris, jaune grisâtre, plastique, contenant de la matière organique et des débris de mica. L'épaisseur de la couche varie entre 1,50 m et 5,70 m.

La couche 2 est, elle aussi constituée d'argile limoneuse, jaune grisâtre, plastique à fluide, avec des passes limoneuses. Elle est répartie sur tout le site, avec une épaisseur allant de 2,60 m à 9,50 m.

Pour la couche 3, on trouve dans cette couche, un sol limoneux, jaune grisâtre, partiellement pris en sandwich avec une petite couche d'argile. Le nombre de coups (essai de pénétration dynamique) mesuré est de 10 à 18 coups, avec une moyenne de 14,1. Cette couche est située à une profondeur de 7,2 m à 11 m.

La couche 4, consiste en une couche d'argile limoneuse, grise, plastique à souple. La couche est située à la profondeur de 9,9 à 26,4m.

La couche 5, est une argile limoneuse grise. Le nombre de coups à l'essai de pénétration dynamique mesuré est de 17 coups à 35 coups, avec une moyenne de 28,7. La couche est située à la profondeur de 20,20 m à 34,00 m.

3.5.2.3 Exigences au niveau de la construction

Elle concernnent à la fois les exigences de conception et les spécifications de réference.

a. Exigences de conception

Le sédiment solidifié répond aux exigences pour une utilisation en protection anti-affouillement, et ses principaux indicateurs géotechniques doivent répondre aux exigences rassemblées dans le tableau 3.5-2.

Tableau 3.5-2. Principaux indicateurs géotechniques du sédiment solidifié pour la protection des fondations sur pieux

	Paramètres géotechniques	Sédiment solidifié standard
1	Masse volumique ρ, (g/cm^3)	1.35 - 1.50
2	Coefficient de perméabilité K, (cm/s)	$< 1.0 \times 10^{-4}$
3	Résistance à la compression non confinée q_u, (kPa)	≥ 400
4	Vitesse d'écoulement pour l'anti-affouillement, (m/s)	4.0
5	Cohésion C, (kPa)	≥ 40
6	Angle de frottement, (°)	> 13

Un sédiment solidifié a été utilisé pour assurer la protection des fondations sur mono-pieu et de très gros diamètre pour des éoliennes en mer. Considérant principalement sa bonne performance anti-affouillement, il peut protéger la couche de sédiment des fonds marins d'origine autour du pieu de fondation, améliorant ainsi la capacité de la surface du sédiment en place pour résister à l'impact à long terme du courant, réduire la formation de fosses d'affouillement et augmenter la stabilité de la fondation. Les indices de performance de la capacité anti-affouilement du sédiment solidifié comprennent principalement la densité, le coefficient de perméabilité, la résistance à la compression et la résistance à l'érosion. En combinaison avec des calculs théoriques, des observations expérimentales et des enquêtes de données hydrologiques, la base de détermination des différents indicateurs et de leur portée est introduite.

b. Densité ou masse volumique

En tant que matériau de structure anti-affouillement, le sédiment solidifié est couramment utilisé par pompage pour un remplissage direct. Puis il s'écoule naturellement sous son propre poids pour former une structure anti-affouilement. Afin d'avoir une bonne capacité à l'anti-érosion, ces sédiments solidifiés doivent avoir la plus grande densité possible. Un grand nombre de données d'essais et de retours d'expérience de constructions déjà réalisées indiquent que la masse volumique du sédiment solidifié pour répondre aux exigences de construction doivent être comprises entre 1,35 g/cm^3 à 1,50 g/cm^3.

c. Coefficient de perméabilité

En tant que matériau de structure anti-affouillement, le sédiment solidifié est utilisé pour une immersion dans l'eau à long terme et le sédiment solidifié doit avoir une excellente stabilité à l'immersion dans l'eau. Pour assurer la stabilité dans l'eau du sédiment solidifié, il est demandé de limiter les échanges avec l'eau du milieu environnant. Les sédiments solidifiés doivent posséder aussi de bonnes performances anti-pénétration. Considérant que ces boues ou sédiments sont un excellent matériau géotechnique imperméable, le coefficient de perméabilité est généralement inférieur à 10^{-5} cm/s. À cet effet, le coefficient de perméabilité du sédiment solidifié avec les sédiments ou boues d'origine doit être $\leq 10^{-5}$ cm/s.

d. Résistance structurelle

La structure anti-affouillement à base des sédiment solidifié est soumise pendant longtemps à des vagues et/ou courants. Elle doit posséder une certaine résistance à la compression et au cisaillement. En combinant des données de calcul relatifs à la résistance mécanique et à la stabilité de la structure, ainsi qu'à des résultats d'essais d'érosion pertinents, il a été possible de déterminer des caractéristiques pour des sédiments solidifiés comme protection anti-affouillement. La résistance à la compression non confinée du sédiment solidifié est $\geq$ 400 kPa, la cohésion est $\geq$ 40 kPa et l'angle de frottement interne est > 13°.

e. Indice anti-affouillement

En combinant les conditions existants en mer (courant, marée, vagues, typhons...), dans les provinces du Zhejiang, du Jiangsu, du Shandong et du Hebei, et en se basant sur l'observation de la vitesse d'écoulement près du puits de décantation (conduite d'amenée le long de la fondation de l'éolienne) des pieux de fondation offshore existants, afin de garantir pleinement la durée de vie de la structure à base de sédiments solidifiés, le sédiment solidifié doit avoir au moins la capacité de résister à un écoulement d'eau de 4,0 m/s.

f. Spécifications de référence

Pour ce projet bon nombre de références ont été consultées et appliquées leur liste est fournie par la suite.

(1) "Code hydrologique des ports maritimes" JTS 145-2-2013;

(2) "Sspécification de mesure du système de positionnement global (GPS)" (GB / T 18314-2001);

(3) "Spécifications de mesures techniques du transport par voie d'eau" JTJ 203-2001;

(4) "Norme d'inspection de la qualité et de l'évaluation du génie du transport par voie d'eau", JTS 257-2008;

(5) "Essai de navigation au mouillage des navires de mer et règles générales" GB / T 3471-1995;

(6) "Spécifications techniques relatives aux conditions environnementales et aux charges dans les plages", SY / T 4084-2010;

(7) "Spécifications du système de gestion de la santé et de la sécurité au travail" GB / T 28001-2001;

(8) "Norme intégrée concernant les rejets d'eaux usées", GB 8978-1996;

(9) "Code pour le traitement complet et l'acceptation de la conservation des sols et de l'eau" GB / T 15773-2008;

(10) "Norme d'inspection de la qualité en matière d'ingénierie des voies navigables", JTS 257-2008;

(11) "Normes d'inspection de la qualité des mesures prises par les techniques de transport par voie d'eau", JTS 258-2008;

(12) “Code pour la conception et la construction de l'ingénierie des revêtements portuaires et des chenaux” JTJ 300-2000;

(13) "Spécifications techniques pour la sécurité de la construction, la protection de la technique de la voie navigable" JTS 205-1-2008;

3.5.3 Essais en laboratoire

3.5.3.1 Éprouvettes de sédiment et matières premières de l'agent de durcissement

Sédiments

Les sédiments utilisés dans cette étude relative au projet de Binhai ont été divisés en deux type de sédiments. Ce sont d'une part une argile et d'autre part un limon, voir le tableau 3.5-3. Ils ont été prélevés sur le site de Binhai de Chine.

Tableau 3.5-3. Propriétés physiques et mécaniques des sédiments utilisés dans le projet

Référence du sédiment	Type de sédiment	Granulométrie (%)				Teneur en eau (%)
		Teneur en gravier 5 ~ 2 mm	Teneur en sable 2 ~ 0.075 mm	Teneur en limon 0.075 ~ 0.005 mm	Teneur en argile < 0.005 mm	
S1	Argile	0	0	36.9	63.1	91.1
S2	Limon	0	1.1	66.5	32.4	53.1
Référence du sédiment	Type de sédiment	Limite de liquidité (%)	Limite de plasticité (%)	Indice de plasticité IP	Indice de liquidité IL	Teneur en matière organique (%)
S1	Argile	59.2	32.6	26.6	2.20	1.6
S2	Limon	43.6	36.8	6.8	2.40	1.4

Agents

Pour les agents de durcissement, l'étude a considéré des agents de durcissement spéciaux pour des sédiments à très forte teneur en eau, avec des liants riches calcium

issus de laitiers de hauts-fourneaux (noté L1) et des liants riches en silicium : un ciment (noté C2).

Activateurs

Des activateurs ont été ajoutés. Il s'agit d'un sulfate de sodium Na_2SO_4 (noté CA-1) et d'un carbonate de sodium Na_2CO_3 (noté CA-2) et d'un mélange des deux activateurs dosés à parts égales en 1:1 (noté CA-3).

Autres additifs

A ces liants et activateurs, ont été ajoutés du silicone modifié (denommé en anglais: sulfonated larch tannin extract) et un agent “collant”.

3.5.3.2 Recherche sur les technologies clés pour la préparation de sédiments solidifiés à haute résistance pour la protection de fondations sur pieux

La structure de protection réalisé à base de sédiments solidifiés a été utilisée comme un nouveau type de structure anti-érosion pour une fondation mono-pieu d'éolienne en mer. Le procédé de construction consiste à pomper le sédiment solidifié doué d'un bon auto-écoulement sur le fond marin depuis la surface. Une structure en forme de plaque avec une pente se forme sur le fond marin autour du pieu. Afin d'obtenir un auto-écoulement satisfaisant du sédiment solidifié, le mélange doit avoir une teneur en eau extrêmement élevée et cette teneur en eau extrêmement élevée entraînera une augmentation soudaine de la porosité du sédiment solidifié, ce qui affectera sérieusement la résistance mécanique et la résistance à l'érosion du sédiment solidifié à forte teneur en eau. Alors comment améliorer la résistance d'un sédiment solidifié à haute teneur en eau? Ceci était un frein du point de vue technique limitant aussi son application dans le domaine de la protection des fondations à grand diamètre et mono-pieu pour éolienne en mer. Fondé sur le mécanisme de base de la formation de la résistance des sédiments solidifiés et sur le principe de réaction des matériaux à base de ciment, il a été proposé des voies possible pour améliorer la résistance des sédiments solidifiés à forte teneur en eau. Ceci a permis de surmonter la limitation due aux teneurs en eau extrêmement élevée sur la formation de la résistance mécanique des sédiments

solidifiés. Une technologie clé pour la préparation de sédiments solidifiés à forte teneur en eau et à haute résistance a été développée. Elle repose sur les points suivants:

a. Utilisation d'un mélange de minéraux pour augmenter la compacité du gel C-S-H et la densité de la zone de transition de l'interface

L'un des facteurs clés influant sur la compacité du gel de C-S-H est la valeur du ratio Ca/Si dans le système gélifiant[106, 107], qui est généralement ajustée en modifiant le type et la quantité d'adjuvant minéral pour obtenir un gel de C-S-H relativement dense. La performance macroscopique est une augmentation de la résistance du matériau à base de ciment. Pour cette raison, nous avons étudié l'effet du rapport du mélange L1 et du mélange minéral riche en silicium C2 sur la résistance du sédiment solidifié à forte teneur en eau pour le sédiment noté S1, selon le tableau 3.5-3, pour un le dosage de 80 kg/m^3. Les résultats de l'étude sont présentés dans le tableau 3.5-4.

Le rapport massique de CaO et de SiO_2 actif dans l'agent de durcissement est abrégé en valeur Ca/Si. La méthode de détection de la teneur en CaO et de SiO_2 actif dans l'agent de durcissement est spécifiée selon la norme «Méthode d'analyse de la composition des cendres volantes» (GB / T 1574-2007).

Tableau 3.5-4. Effet de la proportion d'adjuvant minéral sur la résistance du Sédiment solidifié

Numéro de l'essai	L1 : C2	Valeur de Ca/Si	Résistance à la compression non confinée (kPa)		
			7 jours	28 jours	60 jours
HS-MA-1	2.0:1	1.57	111	267	288
HS-MA-2	1.6:1	1.30	124	299	319
HS-MA-3	1.5:1	1.23	133	312	339
HS-MA-4	1.4:1	1.17	131	306	336
HS-MA-5	1.3:1	1.10	122	302	325
HS-MA-6	1.2:1	0.97	102	256	281

Remarque: Il s'agit de mélanges à base de L1 et C2. Le dosage total est de 80kg/m3. Le sédiment utilisé est S1 (argile).

Les données du tableau 3.5-4 montrent que le rapport entre le mélange de laitiers et de ciment est différent, et il existe une différence significative dans la résistance à la

compression non confinée du sédiment solidifié. Lorsque le rapport entre les deux adjuvants dans l'agent de durcissement est compris entre 1,3 et 1,6, le sédiment solidifié à forte teneur en eau présente une haute résistance à la compression non confinée. En calculant la valeur globale du rapport Ca/Si de tous les composants de l'agent de durcissement, on constate que lorsque le rapport en masse du liant L1 et du liant C2 est compris entre 1,3 et 1,6, la valeur globale de Ca/Si dans l'agent de durcissement est de 1,1 à 1,3. À ce stade, la résistance du sédiment solidifié se développe mieux, principalement parce que le gel de C-S-H formé a une meilleure compacité. Le tableau 3.5-4 montre que la valeur de Ca/Si a une grande influence sur la morphologie des C-S-H dans le sédiment solidifié: lorsque la valeur de Ca/Si est comprise entre 1,1 et 1,3; il y a moins de pores visibles et le diamètre des pores est plus petit, et le gel de C-S-H apparaît plus dense.

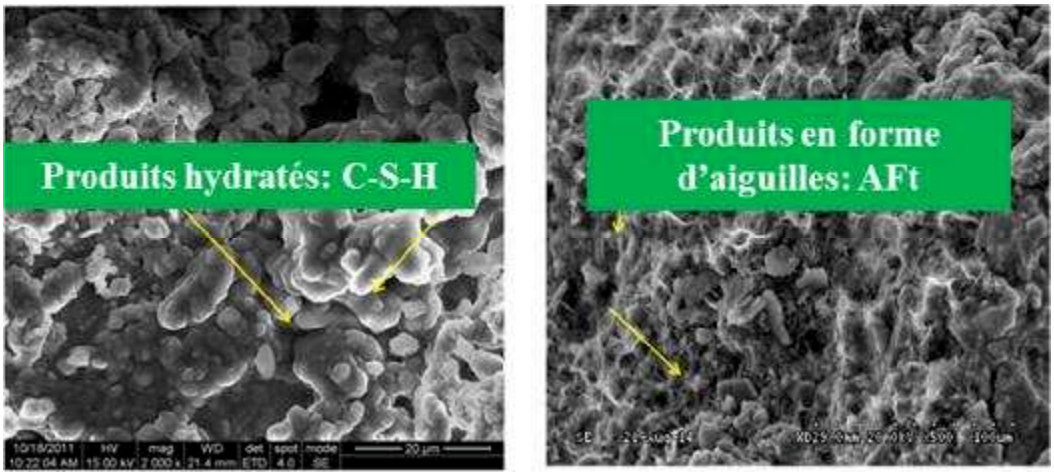

Figure 3.5-2. Images SEM d'un sédiment solidifié pour différentes proportions du mélange de L1 et C2 à 28 jours

On constate que des particules d'argile et de gel C-S-H sont agrégées et celles venant de produits en aiguilles; (Aft) sont plus denses voir la figure 3.5-2. Les nanoparticules non hydratées contenues dans le mélange de minéraux sont largement remplies dans l'espace de la zone de transition interfaciale, ce qui augmente considérablement la compacité de la zone de transition interfaciale. La possibilité de micro-fissures initiales dans la zone de transition de l'interface est réduite, de manière à améliorer la résistance mécanique de la zone de transition interfaciale, l'une des

principales raisons de la résistance à la compression non confinée du sédiment solidifié à très haute teneur en eau.

b. Augmentation du degré de réaction d'hydratation de l'agent de durcissement

L'activateur agit en tant que composant modulant de manière fonctionnelle dans l'agent de durcissement du sédiment, ce qui présente l'avantage d'augmenter considérablement la réactivité du mélange de minéraux dans l'agent de durcissement dans le cas de très faibles quantités. Selon le principe de son activation, il est divisé en type précoce, type ajusté en pH et type composite. Dans cette étude, une expérience comparative de trois types d'effet d'activation a été réalisée pour étudier les effets de trois types d'activateurs sur l'activité de l'agent de durcissement et l'amélioration de la résistance mécanique des sédiments solidifiés à forte teneur en eau. Les types d'activateurs sont étiquetés CA-1, CA-2 et CA-3, respectivement, dont CA-3 est un activateur composé. La figure 3.5-3 montre le dégagement de chaleur d'hydratation de l'agent de durcissement après l'ajout de l'activateur, et le tableau 3.5-4 rassemble les données correspondantes sur la résistance du sédiment solidifié.

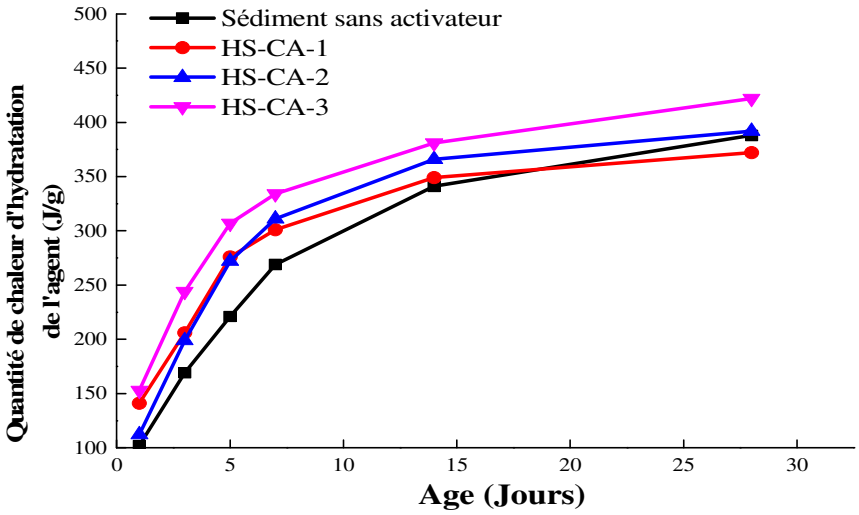

Figure 3.5-3. Chaleur d'hydratation de l'agent de durcissement avec ajout d'activateurs

Remarque: Cet essai a utilisé l'agent HS-MA-4 du tableau 3.5-4. Le dosage total est de 80 kg/m³. Le sédiment utilisé est S1(argile).

La figure 3.5-3 montre qu'il existe des différences significatives dans les lois régissant l'exothermicité de la réaction chimique de l'agent de durcissement après l'addition de différents types d'activateurs. Premièrement, l'ajout de l'activateur peut

accélérer la libération de chaleur dans l'agent de polymérisation au début de son durcissement, ce dernier produisant un certain effet de résistance précoce et, après l'ajout de l'activateur, le taux de libération de chaleur d'hydratation de l'agent de polymérisation diminuant après l'âge de 7 jours. Le taux de libération de chaleur d'hydratation de l'activateur CA-1 et de l'activateur CA-2 a été en grande partie réduit, et la résistance mécanique du sédiment solidifié à 28 jours n'a pratiquement pas changé par rapport à celle de l'agent non activé, comme le montre le tableau 3.5-5. Cependant, l'activateur composé CA-3 présente deux avantages évidents d'activation. Premièrement, il a un certain effet de résistance au jeune âge et améliore le taux de libération de chaleur d'hydratation précoce. Deuxièmement, c'est la réaction chimique qui peut continuellement stimuler la participation de divers types de matériaux à base de ciment au système, de sorte que la libération totale de chaleur du système est nettement supérieure à celui du groupe de contrôle présenté dans le tableau 3.5-5. Les composants à activité minérale plus faible dans l'agent de durcissement sont activés en grande quantité, le degré d'hydratation de l'agent de durcissement est augmenté et la quantité de matériau cimenté est augmentée, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance du sédiment solidifié.

Tableau 3.5-5 Résistance du sédiment solidifié avec différents activateurs

Réfenénce de l'essai	Agent	Type de activateur et son dosage (%)	Résistance à la compression non confinée (kPa)		Cohésion C (kPa)	
			7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
Sédiment sans activateur	HS-MA-4 (80 kg/m^3)	\	133	312	16.0	19.5
HS-CA-1		CA-1 (1%)	142	306	17.2	20.3
HS-CA-2		CA-2 (1%)	149	334	16.9	22.1
HS-CA-3		CA-3 (1%)	152	366	17.1	24.7

c. Préparation d'un sédiment solidifié hautement résistant à la teneur en eau très élevée.

Ces recherches sur le ratio Ca/Si et l'ajout d'activateurs ont permis de résoudre le problème technique de la faible résistance des sédiments solidifiés à teneur en eau extrêmement élevée. L'agent de durcissement ainsi préparé est un agent de durcissement composite spécial pour solidifiér des sédiments hautement résistants à partir d'une teneur en eau extrêmement élevée. Il a été développé indépendamment par la société de Jiangsu Kunze. Les facteurs qui affectent l'effet de durcissement de l'agent de durcissement sont le rapport Ca/Si entre le mélange de L1 et C2 qui doit etre ajusté dans la composition de l'agent de durcissement et le dosage des activateurs du composé (relatif à l'ajustement du pH du système et de l'activation). Afin de maintenir la stabilité mécanique de la structure de protection au fond, le sédiment solidifié préparé doit avoir des propriétés mécaniques suffisantes à savoir: une résistance à la compression non confinée à 28 jours supérieure ou égale à 400 kPa et une cohésion C supérieure à 40 kPa. Étant donné que sur site en construction réelle, et en comparaison des essais en laboratoire, il y a un ecart et une perte des perfomances. Par conséquent, lors de la formulation en laboratoire, il est clair que la résistance à la compression non confinée à 28 jours pour le sédiment solidifié à très haute teneur en eau, les valeurs requises doivent etre majorées: ≥ 500 kPa pour la résistance en compression et ≥ 50 kPa pour la cohésion, soit une majoration de 25%.

Cas du sédiment argileux

Afin de garantir la fluidité élevée du sédiment solidifié à la teneur en eau extrêmement élevée après mélange, le sol solidifié doit avoir une teneur en eau initiale importante et les indices géotechniques du sédiment solidifié préparé sont indiqués dans le tableau 3.5-6.

Tableau 3.5-6. Préparation d'un sédiment solidifié à teneur en eau très élevée. Cas du sédiment argileux S1

Référence de l'essai	Proportion des mélanges de L1 et C2	Activateur CA-3 (%)	Paramètre de résistance à 28 jours	
			Résistance à la compression non confinée (kPa)	Cohésion C (kPa)
HS-SF-1	1.3:1	0	489	50.1
HS-SF-2		0.5	522	51.0
HS-SF-3		1.0	531	51.6
HS-SF-4	1.4:1	0	494	49.7
HS-SF-5		0.5	506	50.4
HS-SF-6		1.0	511	51.3
HS-SF-7	1.5:1	0	428	42.1
HS-SF-8		0.5	466	44.5
HS-SF-9		1.0	476	46.6
HS-SF-10	1.6:1	0	412	41.4
HS-SF-11		0.5	455	43.3
HS-SF-12		1.0	468	44.9

Remarque: Cet essai concerne le sédiment S1. Le dosage est de 150 kg/m^3. L'activateur est référencé CA-3. La teneur en eau du sédiment solidifié est de 150%.

Le tableau 3.5-6 montre que si un sédiment argileux est utilisé pour préparer un sédiment solidifié à teneur très élevée en eau, le dosage d'activateur CA-3 ne doit pas être inférieur à 0,5% et la proportion du mélange de L1 et C2 doit entre 1,3 et 1,4.

Cas d'un sédiment limoneux

Pour le type de sédiment limoneux étudié à la différence du sédiment argileux, pour avoir une meilleure fluidité, la teneur en eau est abaissée à 100%. Les résultats des essais de préparation sont présentés dans le tableau 3.5-7.

Le tableau 3.5-7 montre que si le sédiment solidifié à forte teneur en eau est préparé en utilisant un sédiment limoneux, le dosage de l'activateur est de 0,5% et la proportion du mélange Ll et C2 est entre 1,3 et 1,6.

Tableau 3.5-7. Préparation d'un sédiment solidifié à forte teneur en eau cas du sédiment limoneux S2.

Référence de l'essai	Proportion des mélanges de L1 et C2	Activateur CA-3 (%)	Paramètre de résistance à 28 jours	
			Résistance à la compression non confinée (kPa)	Cohésion C (kPa)
HS-SF-13	1.3:1	0	502	49.4
HS-SF-14		0.5	542	53.0
HS-SF-15		1.0	551	56.2
HS-SF-16	1.4:1	0	497	49.9
HS-SF-17		0.5	526	53.2
HS-SF-18		1.0	531	54.1
HS-SF-19	1.5:1	0	484	47.6
HS-SF-20		0.5	516	52.5
HS-SF-21		1.0	525	53.1
HS-SF-22	1.6:1	0	473	46.3
HS-SF-23		0.5	515	51.1
HS-SF-24		1.0	521	52.9

Remarque: Cet essai est relatif au sédiment S2. Le dosage est de 150 kg/m^3. L'activateur est le CA-3. La teneur en eau du sédiment solidifié est de 100%.

3.5.3.3 Étude des facteurs influençant les propriétés rhéologiques du sédiment solidifié pour la protection des fondations sur pieux

Les recherches évoquées ci-avant ont permis de confirmer la formule de base de l'agent de durcissement, mais la propriété d'auto-écoulement du sédiment pendant le processus de remplissage, pour former la structure anti-affouillement doit etre vérifiée. En raison des facteurs d'effet suivants, les propriétés rhéologiques du sédiment solidifié à teneur en eau extrêmement élevée sont soumises à des exigences extrêmêment strictés. Le sédiments solidifié doit conserver une bonne fluidité avant de s'écouler pour créer la protection sur le fond marin au pied du pieu. En règle générale, la distance ou rayon

de la section de protection est supérieur à 15 m et le temps de rétention de la fluidité ne doit pas etre inférieur à 2 heures.

Afin de réduire la perte par érosion de sédiment solidifié, la boue doit avoir une certaine cohésion. Cette section étudie les facteurs d'effet intrinsèques des propriétés rhéologiques de la boue de sédiment solidifié ; elle concerne la fluidité et la cohésion des sédiments et il est proposé les mesures de contrôle correspondantes.

a. Etude sur les facteurs d'effet des propriétés rhéologiques de sédiments (boues)

Les indicateurs macroscopiques permettant de savoir si la sédiments peut pénétrer dans la zone de protection autour de pieu et si le processus d'infection rend possible l'étalement d'une grande quantité des sédiments sont l'écoulement et la viscosité de la boue de sédiments. Grâce à un essai de simulation, les exigences de base en matière de pompage et de débit pour une zone de 15 m (rayon) à réaliser sont satisfaites si l'affaissement des sédiments n'est pas inférieur à 250 mm (voir figure 3.5-4), le taux perte par d'érosion de sédiments pendant le processus de remplissage est inférieure à 3%, et si la viscosité de sédiments n'est pas inférieure à 5000 mPa s. Selon les caractéristiques de composition et de l'environnement d'application des sédiments solidifiés à forte teneur en eau, les facteurs affectant les propriétés rhéologiques des sédiments solidifiés sont la teneur en eau des sédiments, le dosage de l'agent de durcissement et la température.

Effet de la teneur en eau sur les propriétés rhéologiques de sédiments

La figure 3.5-4 montre l'effet de la teneur en eau sur l'écoulement, mesuré par l'affaissement de la boue de sédiments et la viscosité.

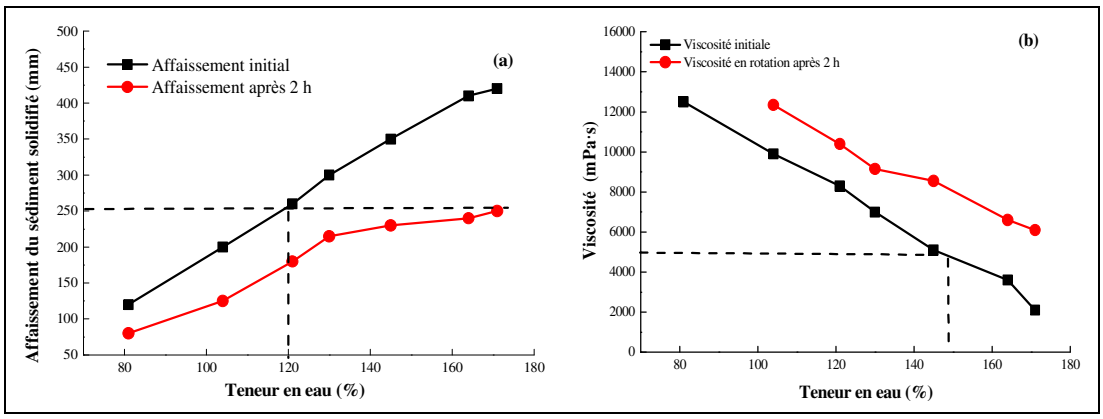

Figure 3.5-4. Effet de la teneur en eau sur l'écoulement et la viscosité d'un sédiment solidifié (a). Effet d'affaissement (b). Effet de la viscosité

Remarque: Le sédiment est S1. L'agent utilisé (L1: C2) est de rapport 1.4: 1. Le dosage est de 150 kg/m³. L'activateur est CA-3 dosé à 0.5%.

La figure 3.5-4a montre que, lorsque la teneur en eau du sédiment solidifié augmente, la fluidité du sédiment solidifié a augmenté à la fois initialement (temps 0 ou fin du mélange) et après 2 heures. L'ajustement de la teneur en eau de la boue du sédiment solidifié consiste à réguler la fluidité du sédiment solidifié, mais en situation réelle la limité ne doit pas excéder une certaine valeur supérieure à 150% (voir figure 3.5-4b), la résistance à la compression non confinée du sédiment solidifié à 28 jours devient inférieure à 500 kPa. La cohésion du sédiment argileux diminue et le taux de perte par érosion est important, de sorte que la teneur en eau du sédiment solidifié ne doit pas dépasser 150%. Dans le même temps, afin de répondre aux besoins de construction, l'affaissement au temps initial de la boue de sédiment solidifié doit être supérieur à 250 mm. Conformément à la figure 3.5-4a, la teneur minimale en eau doit être supérieure à 120%. Une analyse complète montre que la teneur en eau sert à réguler la fluidité de sédiments solidifié. La teneur en eau peut être ajustée dans la plage de 120% à 150%. Selon la tendance de variation des courbes de la figure 3.5-4, la perte de fluidité de sédiments solidifié est plus importante après 2 heures par rapport au temps initial. La viscosité augmente fortement et même si la teneur en continue à augmenter, rien ne garantit que l'affaissement après 2 heures répondra à la demande. Par conséquent, ajuster simplement la teneur en eau pour réguler la dilution des sédiments solidifiés n'est pas seulement la solution.

Effet du dosage d'agent sur les propriétés rhéologiques de la boue de sédiments solidifiés

La figure 3.5-5. montre l'effet de la quantité d'agent de durcissement sur l'affaissement de la boue de sédiment solidifié et la viscosité.

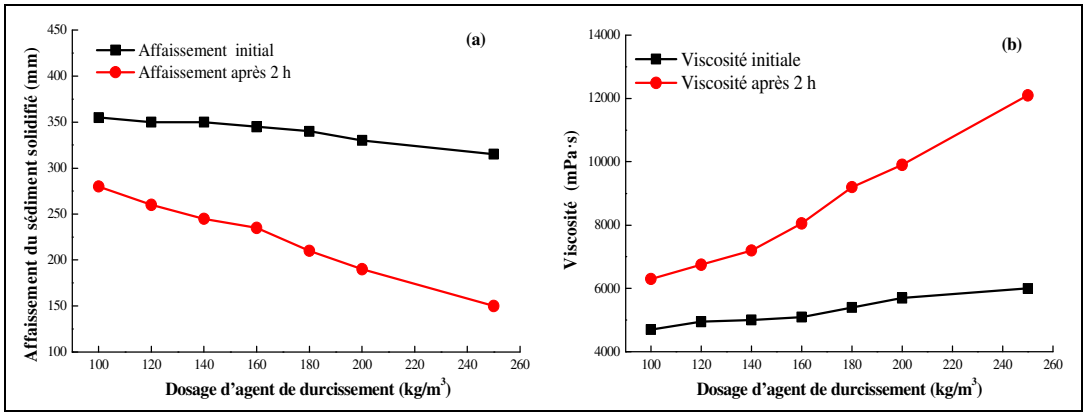

Figure 3.5-5. Influence du dosage de l'agent de durcissement sur l'affaissement et la viscosité d'un sédiment. La teneur en eau du sédiment solidifié est constante, et de 150%. (a). Effet sur l'affaissement (b). Influence sur la viscosité

Remarque: Le sédiment est S1. L'agent utilisé (L1: C2) est de 1.4: 1. Le dosage est de 150 kg/m³. L'activateur est CA-3 dosé à 0.5% .

La figure 3.5-5a montre que le dosage d'agent de durcissement n'a pas d'effet significatif sur l'affaissement à la fin du mélange du sédiment solidifié. Même si le dosage en agent augmente l'affaissement diminue très peu. Mais l'évolutoion de l'affaissement après 2 heures s'avère être plus prononcé avec le dosage d'agent de durcissement qui conduit à une forte diminution de l'affaissement du sédiment solidifié. Ceci est dû à l'hydratation de l'agent de durcissement qui consomme une partie de l'eau libre et la réaction d'hydratation rapide au début, du C_3A génère une grande quantité de AFt (Ettringite), qui forme une structure en réseau croisé. Le phénomène d'adsorption consomme une grande quantité d'eau libre, ce qui entraîne une forte augmentation de la viscosité du système, comme illustré à la figure 3.5-5b. Le dosage d'agent de durcissement sera donc l'un des principaux facteurs influençant la fluidité et la cohésion du sédiment solidifié.

Effet de la température sur les propriétés rhéologiques du sédiment solidifié

La figure 3.5-6 montre l'effet de la température sur l'affaissement et la viscosité du sédiment solidifié. La figure 3.5-6 montre l'affaissement et la viscosité observés en fonction du temps après le mélange. C'est-à-dire à partir du moment où la boue de sédiment solidifié à teneur en eau extrêmement élevée est déposée à différentes températures ambiantes. Les données montrent que lorsque la température ambiante est inférieure ou égale à 20 °C, l'affaissement et la viscosité du sédiment solidifié sont moins affectées par la température ambiante. Lorsque la température ambiante dépasse 20 °C, après la préparation du sédiment solidifié, on observe que l'affaissement diminue considérablement et la viscosité augemente. Ceci est dû au fait que lorsque la température ambiante dépasse 20 °C, le taux d'hydratation de certains composants minéraux dans l'agent de durcissement est accéléré et qu'une grande quantité de AFT (Ettringite) se forme rapidement, ce qui entraîne une diminution de l'eau libre et une augmentation de la viscosité du système solidifié à base de sédiment. La fluidité est réduite. Les conclusions de cet essai ont une grande importance pour la construction par injection d'un sédiment solidifié à très haute teneur en eau.

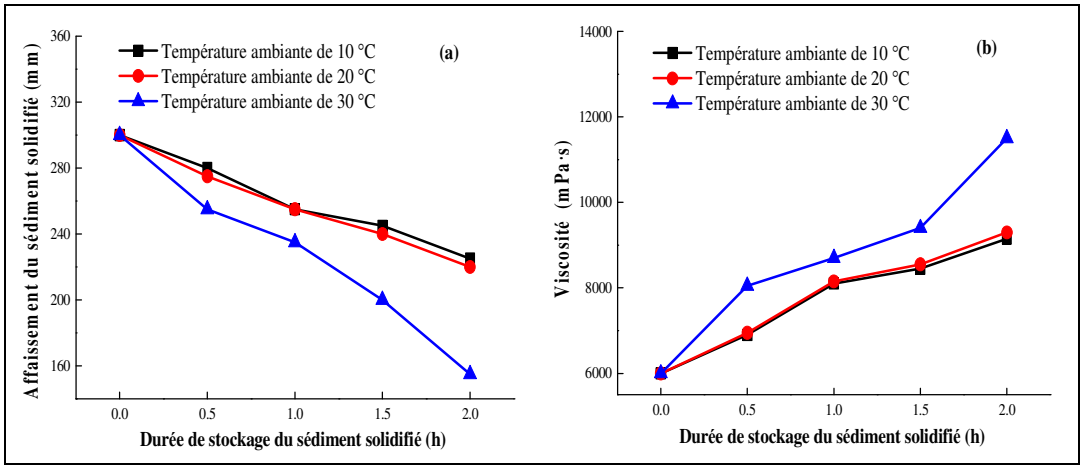

Figure 3.5-6. Effet de la température sur l'affaissement du sédiment solidifié et la viscosité. (a). Effet sur l'affaissement; (b). Effet sur la viscosité.

Remarque: Le sédiment est S1. L'agent utilisé (L1: C2) est de rapport 1.4: 1. Le dosage est de 150 kg/m^3. L'activateur est CA-3 dosé à 0.5%. La teneur en eau du sédiment est de 150% .

b. Recherche sur la technologie de contrôle de la rétention de la fluidité du sédiment solidifié

Dans la section précédente, les effets de la teneur en eau, du dosage en agent de durcissement et de la température sur la fluidité de sédiments solidifié ont été étudiés en détails. Les résultats ont montré que l'affaissement du sédiment solidifié diminue avec le temps, principalement en raison de la réaction d'hydratation rapide du C_3A dans l'agent durcissement. Le réseau cristallin adsorbe une grande quantité d'eau libre, ce qui entraîne une augmentation de la viscosité du réseau en cours de formation. Pour répondre aux exigences de construction en ce qui concerne la conservation de la fluidité du sédiment à 2 heures, des mesures telles que le ralentissement de la réaction d'hydratation du C_3A et la dispersion des particules d'argile pour libérer davantage d'eau libre doivent être prises. À cette fin, l'effet d'un polymère régulateur de la fluidité à fonction retardatrice et dispersante sur la fluidité de la boue de sédiment a été étudié. L'essai a principalement utilisé deux types d'additifs polymères régulant la fluidité: un silicone modifié et un polymère de type acide polycarboxylique. Les résultats de l'essai sont présentés à la figure 3.5-7.

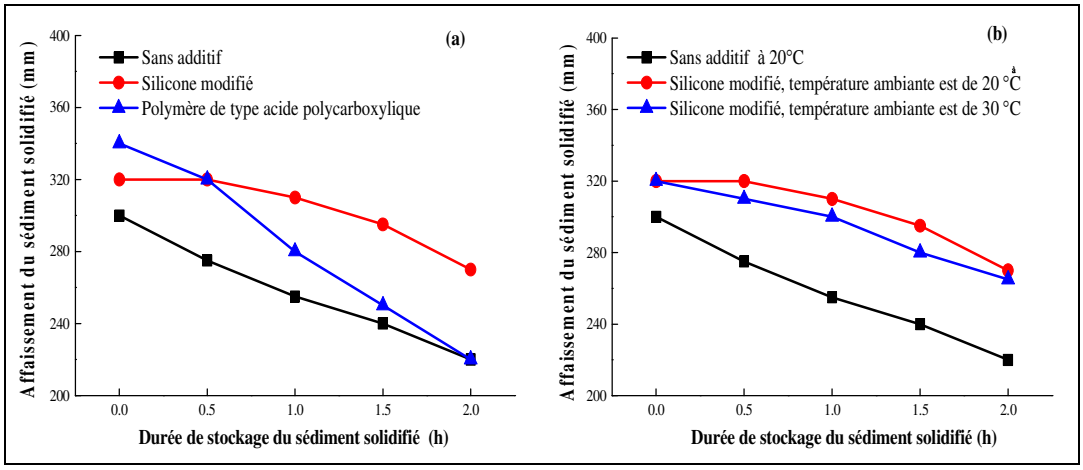

Figure 3.5-7. Effet de polymères régulateurs sur la fluidité d'un sédiment solidifié.
(a) . Effet de différents types de polymères fluides sur l'affaissement à température ambiante de 20 °C.
(b). Effet du silicone modifié sur l'affaissement à différentes températures ambiantes.
Remarque: Le sédiment est S1. L'agent utilisé (L1: C2) est de rapport 1.4: 1. Le dosage est de 150 kg/m³. L'activateur est CA-3 dosé à 0.5%. La teneur en eau du sédiment est de 150%. L'autre additif est à 0.5% selon la quandité de l'agent.

La figure 3.5-7a montre que le silicone modifié utilisé comme polymère de régulation de la fluidité peut améliorer de manière significative la fluidité du sédiment solidifié pendant 2 heures et que l'affaissement de 2 heures est supérieure à 250 mm (voir la figure 3.5-7a), de sorte que la fluidité du sédiment solidifié répond aux exigences de la construction. Cependant, bien que le polymère d'acide polycarboxylique augmente considérablement le degré de l'affaissement du sédiment solidifié au stade initial, la fluidité du sédiment solidifié diminue rapidement avec le temps. L'analyse montre que les particules d'argile dans le sédiment solidifié ont une adsorption compétitive sur le polymère d'acide polycarboxylique et qu'une grande quantité de polymère d'acide polycarboxylique est adsorbée à la surface des particules d'argile, ce qui réduit l'épaisseur du film d'eau au niveau des particules d'argile, de sorte que l'affaissement initial (fin du mélange) du sédiment solidifié est augmenté. Par conséquent, le phénomène d'augmentation de l'affaissement initial de sédiments solidifié est apparu. Le film d'eau recouvre toujours la surface des particules de l'agent de durcissement, mais la réaction d'hydratation du C_3A se produit très rapidement, de sorte que la viscosité du réseau augmente à nouveau et que l'affaissement diminue rapidement.

Le silicone modifié est facilement soluble dans l'eau et se trouve dans un état non ionique. Il est facilement capturé par les particules d'agent de durcissement plus grosses et enveloppe la surface des particules de l'agent de durcissement pour empêcher une hydratation rapide de C_3A. Cependant, à mesure que la concentration en ions métalliques tels que Ca^{2+}, Na^{+}, K^{+} dans la phase liquide augmente, la force d'adsorption à la surface de l'agent de durcissement est affaiblie et la solution est rediffusée, ce qui provoque l'hydratation des particules de l'agent de durcissement et évite l'apparition d'un retard. La figure 3.5-7b montre que même si la température ambiante est élevée à 30 °C, le silicone modifié a toujours pour effet de maintenir une bonne fluidité.

En utilisant les caractéristiques relatives à l'extrait de silicone modifié, la quantité ajoutée peut être ajustée en fonction des exigences de l'application et le temps de rétention de la fluidité peut être prolongé ou raccourci de manière appropriée. Les

travaux de cette recherche ainsi menée, a permis de réaliser le maintien et la régulation de la fluidité du sédiment solidifié, ce qui prolonge le temps pour le pompage du sédiment solidifié pendant la construction.

c. Recherche sur la technologie de contrôle de la viscosité du sédiment solidifié

L'ensemble des résultats d'essai a montré que lorsque l'affaissement des sédiments solidifiés est trop grande, si des mesures d'ajustement de la viscosité ne sont pas prises, la viscosité du sédiment solidifié diminuera rapidement en dessous de 5000 mPa·s. Il en résulte une grande perte du sédiment solidifié pendant l'injection et l'écoulement naturel du sédiment solidifié au niveau de la fondation (érosion). On doit trouver un adjuvant “collant” ne réduisant pas de manière significative la fluidité du sédiment solidifié tout en augmentant la viscosité du sédiment solidifié. Cet additif ou adjuvant peut augmenter la thixotropie du sédiment solidifié, lorsque le sédiment solidifié cesse de s'écouler, la viscosité du réseau augmente considérablement en peu de temps, ce qui incite les différents composant du sédiment solidifié à s'adsorber les uns aux autres et à augmenter la cohésion, améliorant ainsi la capacité du sédiment solidifié à jouer le rôle d'anti-perte des sédiments solidifiés.

La figure 3.5-8 montre que l'ajout d'un adjuvant “collant” n'a pas d'effet négatif significatif sur l'affaissement du sédiment solidifié. Bien que l'affaissement de la boue de sédiments solidifiés soit légèrement réduite, l'affaissement à 2 heures peut toujours être supérieure à 250 mm. Et la figure 3.5-8b montre que l'ajout d'un adjuvant “collant” augmente la viscosité du sédiment solidifié de plus de 25%. La perte de qualité par érosion du sédiment solidifié avant et après durcissement a été comparée. Les données de l'essai ont montré que le taux de perte du sédiment solidifié après le durcissement était réduit de 3% à 1%. Et avec un taux de perte d'élution de 1%, on répond à l'exigence à des courants ou des vitesses d'écoulement de 4 m/s. La maîtrise de la technologie de contrôle de la viscosité du sédiment solidifié permet d'appliquer un sédiment solidifié dans des conditions de mer variables, ce qui permet d'élargir son domaine d'application et de prolonger les temps de construction en mer.

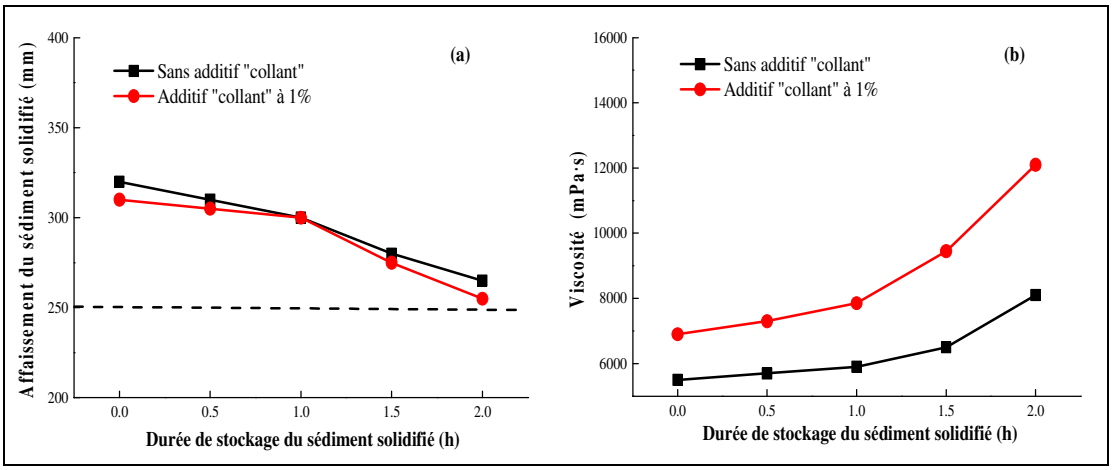

Figure 3.5-8. Effet de l'additif sur les propriétés rhéologiques du sédiment solidifié. (a). Effet sur l'affaissement. (b). Effet sur la viscosité.

Remarque: Le sédiment est S1. L'agent utilisé (L1: C2) est de rapport 1.4: 1. Le dosage est de 150 kg/m^3. L'activateur est CA-3 dosé à 0.5%. L'autre adjuvant additif collant ou agent de vicosité est dosé à 1%, selon la quandité de l'agent.

3.5.3.4 Durabilité du sédiment solidifié pour la protection des fondations sur pieux

Afin de garantir la performance à long terme sous l'eau du sédiment solidifié à haute teneur en eau, des essais de stabilité à long terme à l'immersion dans l'eau du sédiment solidifié ont réalisés. La figure 3.5-9 montre l'évolution de la résistance à la compression non confinée d'éprouvettes immergées de sédiment solidifié dans le temps. Les résistances des éprouvettes montrent une tendance à la croissance rapide aux jeunes âges qui devient constante après une immersion prolongée dans l'eau, ce qui indique que l'immersion à long terme pour le sédiment solidifié n'a pas d'incidence sur sa résistance et sa stabilité dans l'eau est bonne et convient à la protection à long terme de fondations sur pieux en milieu marin. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'au fur et à mesure que l'âge augmente, une grande quantité de produits d'hydratation a réussi à envelopper les particules de sédiment, la distance entre les particules est ainsi réduite et la substance gélifiante et le produit d'hydratation cristallin remplissent une grande quantité de pores (ou vides) entre les particules. Ainsi le sédiment solidifié forme un ensemble solide et compact. Par conséquent, les propriétés mécaniques du sédiment solidifié restent bonnes pendant tout le processus d'immersion à long terme.

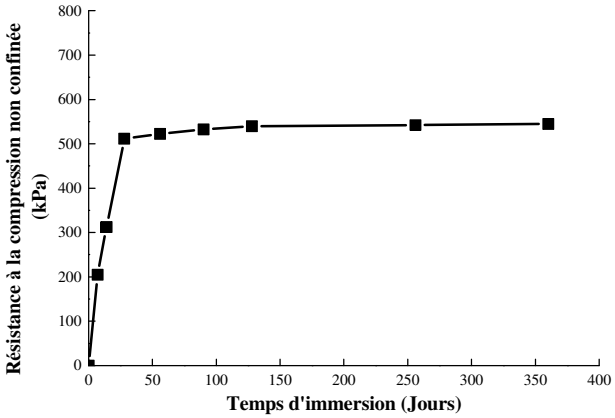

Figure 3.5-9. Résistance à la compression non confinée du sédiment solidifié après immersion prolongée dans l'eau

3.5.4 Organisation et suivi de la construction

3.5.4.1 Points de contrôle

La tendance au l'érosion est un processus complexe. Cette érosion est liée à la résistance du sol en fond marin, au diamètre des particules et à la cohésion interne, ainsi qu'aux conditions d'écoulement et types d'écoulement (turbulent), aux implantations environnantes (courants). Comme montré, le choix de sédiments solidifiés pour protéger et jouer un rôle d'anti-affouillement est possible.

Le temps de remplissage est la clé de la mise place de cette technologie. Selon les résultats des essais de protection anti-affouillement avec des sédiments solidifiés pour mono-pieux dans le parc éolien offshore du projet de Binhai, et afin de rendre le remplissage avec de la boue de sédiments solidifiés insensible aux courants, le meilleur moment est d'environ 2 heures avant et après chaque marée haute et basse.

Le façonnage de la structure de protection au fond, dépend de la vitesse d'écoulement existant sur le fond marin, de l'affaissement du sédiment solidifié, du temps de résistance anti-affouillement du sédiment durci, du volume de sédiments solidifiés à mettre en place et de la surface de protection à réaliser etc. Tous ces facteurs contrôlent et affectent directement l'effet de protection de la structure en sediments solidifiés.

Le choix du navire de positionnement doit respecter le positionnement précis du navire, le positionnement pour assurer le remplissage, le positionnement des tuyaux et le maintien de la conduite remplissage.

3.5.4.2 Conception de la protection

En fonction du degré d'érosion autour de la fondation sur pieux ou mono pieu, le sédiment solidifié est utilisé comme matériau de remplissage. Il remplit la fosse où s'est formée l'érosion et remplit en surface les environs de la fondation avec le sédiment d'origine. Il assure ainsi la stabilité après remplissage des fondations sur pieux et évite l'érosion à long terme autour les pieux.

La conception de la protection anti-affouillement pour des pieux de fondation ou mono-pieu est schématiquement donnée à la figure 3.5-10.

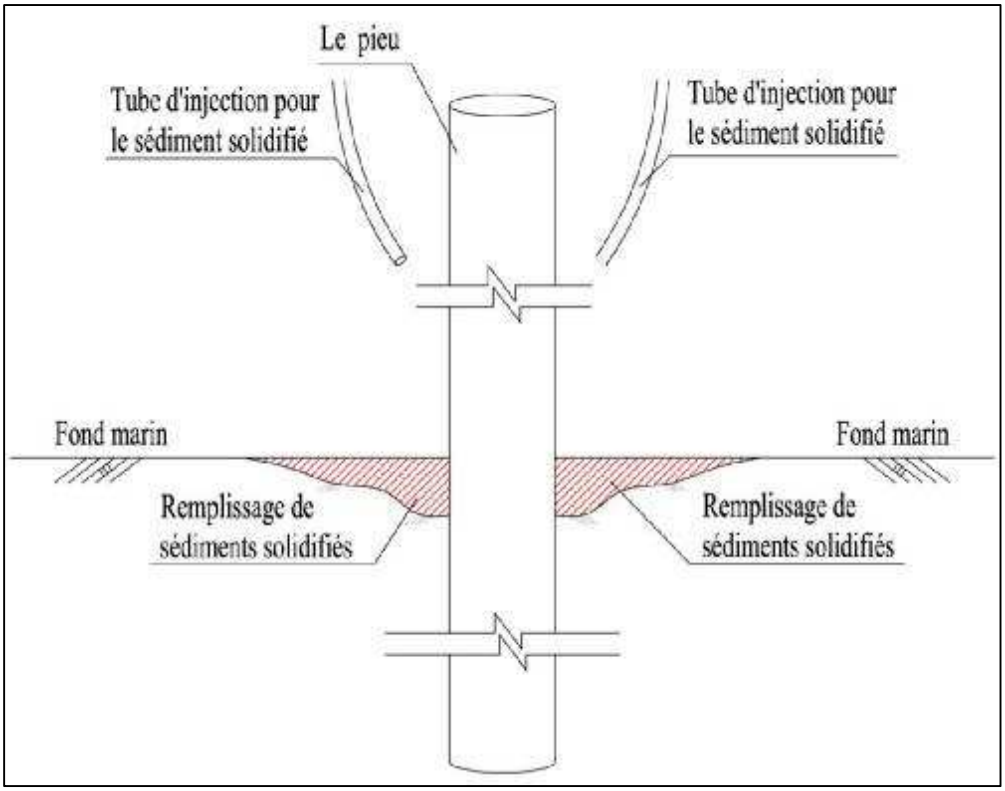

Figure 3.5-10. Schéma de remplissage de la fosse anti-affouilement

3.5.4.3 Processus de construction

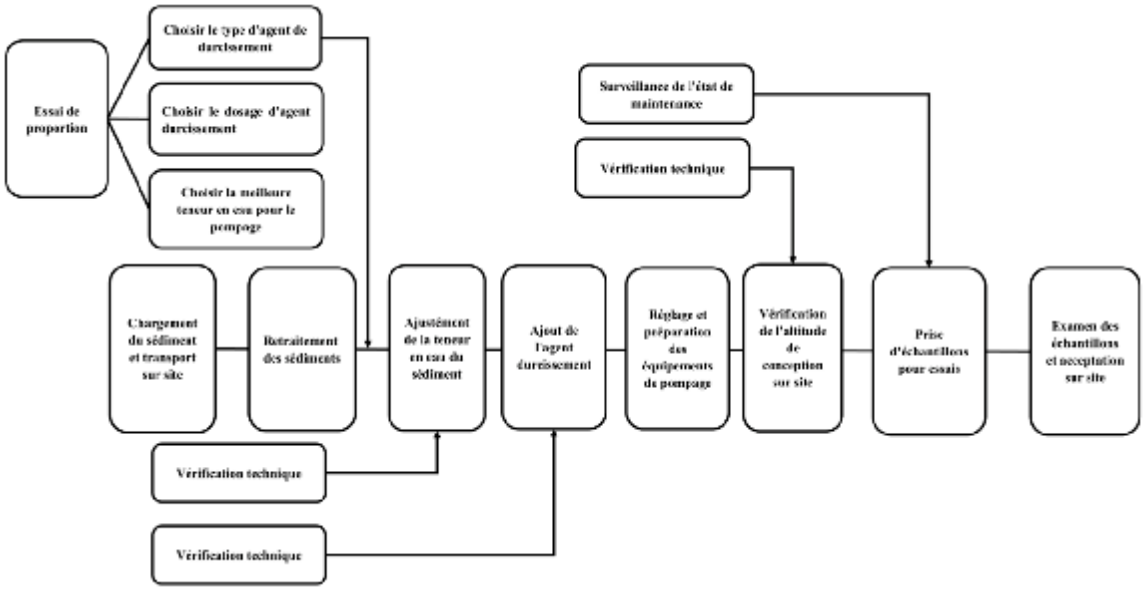

Figure 3.5-11. Processus de construction

Les points clés ou étapes pour assurer le remplissage de la fosse autour d'un pieu de fondation peuvent se décomposer ainsi:

Mise en position raisonnable du navire assurant le remplissage et maintien d'une distance de travail à plus de 4 mètres du pieu afin d'éviter que le navire touche le pieu.

Disposition de l'équipement mécanique sur le navire en activité et autres équipements connexes. Repérage et identification du câble sous-marin avant la construction pour éviter tout accrochage lors de l'ancrage.

Préparation du sédiment solidifié et surveillance de l'homogènéité du mélange: pas de flocons, ou de poudre d'agent de durcissement en surface. Une inspection visuelle doit être fondamentalement assurée.

Contrôle de l'affaissement du sédiment solidifié préparé pour le pompage.

Mise en place par remplissage dans les 2 heures du sédiment solidifié préparé.

Mise en place de la conduite d'injection du sediment solidifié au-dessus du puits de vidange, en évitant de faire reposer la conduite sur le fond marin.

Choix du meilleur moment pour assurer le remplissage avec le sédiment solidifié soit 2 heures avant et après les marées hautes et basses.

3.5.4.4 Contrôle de qualité

Dans le processus de construction de la protection anti-affouillement de la fondation sur pieux, il est inclus simultanément les travaux de contrôle et de qualité de la construction. Les essais prévus sont présentés dans le tableau 3.5-8 suivant.

Tableau 3.5-8. Essais durant la construction et leur fréquence

Contrôle	Paramètres contrôlés	Fréquence d'inspection	Méthode d'inspection	Partie d'inspection
Essais durant les travaux de construction	Affaissement	1 inspection par 500 m^3 de construction	Inspection d'éprouvettes de sédiments sur site	Constructeur
	Densité			
Essais de réception	Résistance à la compression non confinée à 28 jours	1 inspection par 2000 m^3 de construction	Prélévements sur chantier	Bureau de contrôle externe au constructeur
	Perméabilité verticale à 28 jours			
	Cohésion et angle de frottement à 28 jours			
	Résistance à l'érosion du sol durci à 28 jours			
	Protection de l'environnement du sol durci à 28 jours		Prélèvements d'échantillons sous l'eau	
	Analyse et détection des effets anti-affouillement après 28 jours		Analyse et exploration sur site	

Les résultats du tableau 3.5-9 montrent que l'affaissement du sédiment solidifié est acceptable pour la construction et la protection d'un pieu et que la fluidité peut répondre aux exigences de la construction.

Tableau 3.5-9. Résultats de l'autotest lors du processus de construction d'un anti-affouillement avec un sédiment solidifié pour des pieux d'éoliennes en mer

Numéro d'échantillon	Affaissement (mm)	Masse volumique (g/cm^3)	Conclusion
1	275	1.41	Qualifié
2	270	1.45	
3	295	1.39	
4	280	1.40	
5	285	1.40	
6	280	1.44	
7	290	1.48	
8	290	1.39	
9	295	1.41	
10	290	1.42	
11	280	1.45	
12	285	1.47	
13	270	1.45	
14	275	1.46	
15	280	1.39	
Exigences de conception	≥ 250	1.35 ～ 1.50	

3.5.5 Test de réception sur site

La technologie de solidification décrite dans cette étude a été utilisée pour traiter le problème d'anti-affouillement de fondations sur pieux avec des sédiments marins à forte teneur en eau. Une bathymètrie et des essais ont été effectués avant et après la construction. Les résultats les plus pertinents de réception sur site sont les suivants.

3.5.5.1 Relevé bathymétrique

Les résultats des relevés ci-dessus (figures 3.5-12 et 3.5-13) montrent qu'après un an de remplissage avec un sédiment solidifié, la protection périmétrique du pieu est

intacte. Il n'y a pas de fosse d'érosion dans la circonférence du pieu, ni d'érosion sur la circonférence du pieu, et le sédiment solidifié a un bon effet de protection.

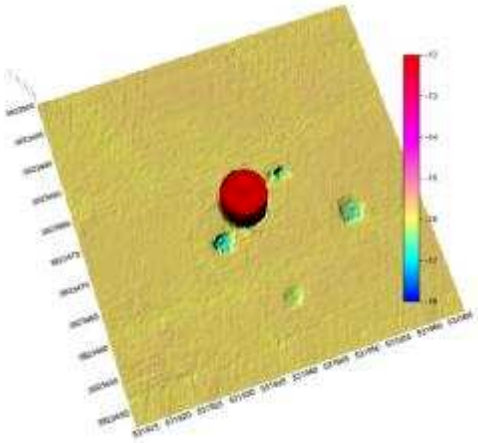

Figure 3.5-.12. Résultats de l'analyse pré-expérimentale, fin de la construction (mars 2018)

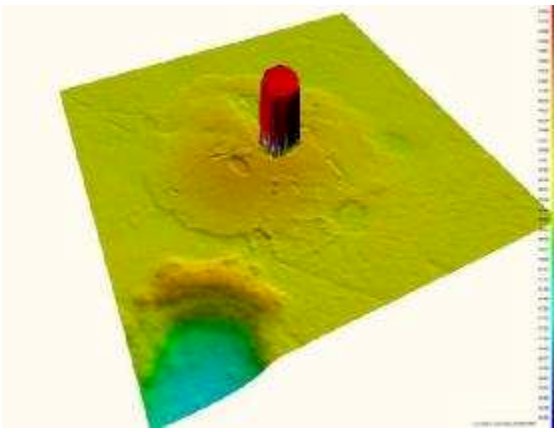

Figure 3.5-13. Résultats de l'analyse après l'expérience, un an après la construction (avril 2019)

3.5.5.2 Exploration visuelle par plongée

Lors de l'exploration sous-marine effectuée par plongée, il a été constaté qu'il y avait de nombreuses fosses non uniformes autour de la fosse d'érosion avant le projet de protection anti-affouillement. Pendant le processus de construction avec la technologie de solidification des boues de sédiment, le plongeur a observé depuis le pieu que la surface de la boue de sédiment solidifié est relativement plate, sans différence de hauteur évidente.

Lorsque cette surface est piétinée, elle subit un certain phénomène d'affaissement. Environ 25 jours après l'achèvement des travaux, le même plongeur s'est rendu compte

qu'il n'y avait pas d'écart entre le corps du pieu et le sédiment solidifié, le sédiment solidifié étant complètement durci et la surface lisse; la portée de protection s'étendant du corps du pieu à plus de dix mètres, sans hauteur significative. Le plongeur peut être supporté par le sédiment solidifié et toucher le sédiment solidifié avec ses mains. La surface est déjà très dure et le sédiment durci ne peut pas être prélevé à la main. Sept mois après la fin de la construction, le plongeur a expliqué que l'étendue de la protection repondait aux exigences de conception, qu'il n'y avait pas eu d'affouillement sur le pourtour du pieu, qu'il n'y avait pas de fissure dans le sédiment solidifié et qu'il n'y avait aucun phénomène d'affaissement ou de glissement dans la zone de protection du sédiment solidifié. La surface de sédiments formait une plaque complète anti-affouillement globale.

3.5.5.3 Essais géotechniques du sédiment solidifié sur le site de Binhai pour la protection anti-affouillement de fondations sur pieux

L'essai géotechnique a été effectué sur le sol solidifié afin de protéger les fondations sur pieux, comme indiqué dans les tableaux 3.5-10 à 3.5-12 suivants, qui indique que la résistance à la compression non limitée, le coefficient de perméabilité et la résistance au cisaillement du sol solidifié satisfont aux exigences.

Tableau 3.5-10. Résultats des essais de résistance à la compression sans confinement, (Centre expérimental de l'université Hohai).

Numéro d'échantillon	Résistance à la compression non confinée (kPa)
1#	632.3
2#	531.7
3#	533.0
4#	523.4
5#	664.7
6#	530.4
Exigences de conception	≥ 400

Tableau 3.5-11. Résultats des essais de perméabilité, (Centre expérimental de l'université de Hohai).

Numéro d'éprouvette	Coefficient de perméabilité (cm/s)
7#	4.54×10^{-6}
8#	2.28×10^{-7}
9#	2.16×10^{-6}
Exigences de conception	$< 1.0 \times 10^{-4}$

Tableau 3.5-12. Résultats d'essai de résistance au cisaillement direct, (Centre expérimental de l'université Hohai).

Numéro d'éprouvette	Cohésion C (kPa)	Angle de flottement φ (°)
10#	97.3	30.1
11#	101.8	30.9
12#	93.5	35.9
Exigences de conception	≥ 40	> 13

3.5.5.4 Essais anti-érosion du sédiment solidifié pour la protection anti-affouillement de fondations sur pieux

L'application de la technologie de solidification de boue de sédiments à la protection anti-affouillement des fondations sur pieu en mer, a notamment pour but d'avoir une bonne capacité de résistance à l'érosion. L'université de Hohai qui dispose d'un ensemble complet de canaux expérimentaux reproduisant vents et vagues, des équipements d'essai aux différents débits d'eau, a été sollicitée pour réaliser des essais de résistance anti-érosion. L'Université de Hohai a donc mené des essais intégrant les conditions proches du site en mer où s'est réalisée l'application pour des pieux de fondation d'éoliennes. D'après l'observation de la vitesse d'écoulement près du puits de décantation (conduite de remplissage) de la fondation de pieux offshore existante, il a été conclu que le sédiment solidifié garantissait pleinement la durée de vie de la structure en sédiment solidifié. La capacité à l'érosion correspond à une vitesse écoulement de 4,0 m/s. Des éprouvettes de sédiment solidifié ont été testées avec un débit important pendant une longue période et la surface de l'éprouvette a été maintenue intacte pour résister au flux d'eau de plus de 4,0 m/s. Les photographies des éprouvettes avant et après le test de l'essai d'érosion spécifique sont présentées aux figures 3.5-14

et 3.5-15. Les résultats des essais d'érosion sont présentés dans le tableau 3.5-13 ci-après.

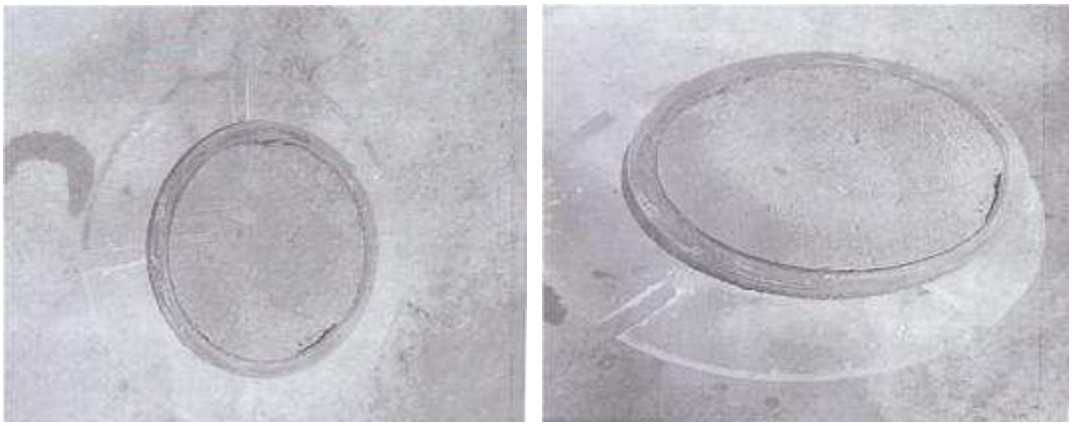

Figure 3.5-14. Essais1 photos avant l'essai d'érosion (à gauche) et photo après l'essai d'érosion (à droite)

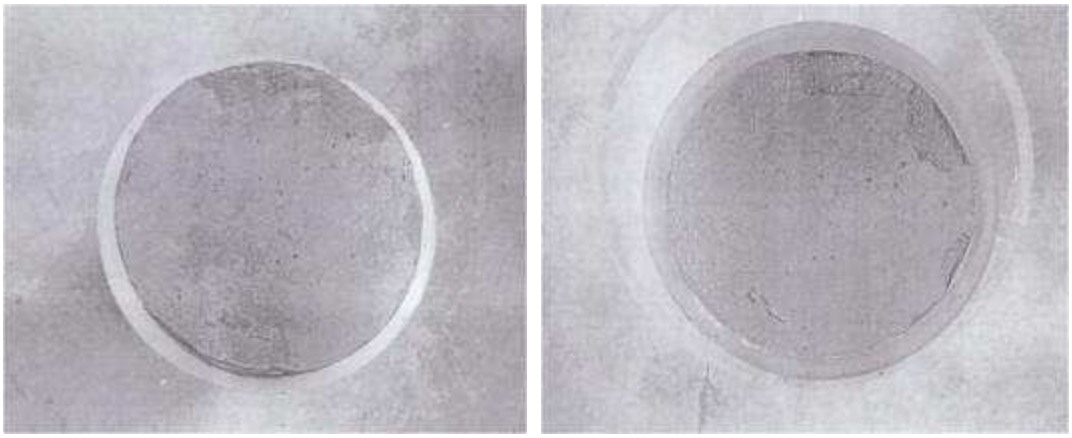

Figure 3.5-15. Essais2 photos avant l'essai d'érosion (à gauche) et photo après l'essai d'érosion (à droite)

Tableau 3.5-13. Résultats des essais d'érosion sur éprouvettes de sédiments solidifiés

Numéro d'éprouvette	Vitesse du courant (m/s)	Contrainte de cisaillement (N/m^2)	vitesse moyenne de l'écoulement (m/s)	Temps de l'érosion (h)	Observations
Éprouvette 1	0.182	32.94	4.04	26	Erosion continue pendant 26 heures. L'éprouvette n'a pas été érodée, la surface est restée intacte.
Éprouvette 1	0.183	32.98	4.09	12	Test répété: érosion continue pendant 12 heures. L'éprouvette n'a pas été érodeé, la surface est restée intacte.
Éprouvette 1	0.209	44.01	4.92	12	Test répété: érosion continue pendant 12 heures. L'éprouvette n'a pas été érodée, la surface est restée intacte.
Éprouvette 2	0.188	35.39	4.06	26	Erosion continue pendant 26 heures. L'éprouvette n'a pas été érodée, la surface est restée intacte.
Éprouvette 2	0.187	35.00	4.05	12	Test répété: érosion continue pendant 12 heures. L'éprouvette n'a pas été érodée, la surface est restée intacte.
Éprouvette 2	0.225	50.6	5.06	12	Test répété: érosion continue pendant 12 heures. L'éprouvette n'a pas été érodée, la surface est restée intacte.

3.5.5.5 Essais environnementaux

Le Centre d'essais sur l'environnement marin de Nantong de l'Administration océanique d'État de Chine a effectué des essais sur les sediments solidifiés sur le site du projet conformément aux méthodes d'analyse spécifiées dans le Code de surveillance du milieu marin (GB 17378-2007) et le Code d'enquête sur le milieu marin (GB / T

12763-2007). Cinq stations ont été échantillonnées et l'éprouvette consistait en un sédiment solidifié préparé avec des sédiments de dragage. Les résultats des essais ont confirmé que le sediment solidifié est un matériau non toxique et respectueux de l'environnement.

Tableau 3.5-14. Tableau des résultats de l'évaluation des substances dans les sédiments dragage

Contaminant	Min.	Max.	Proportion (%)		
			Sédiment de dragage	Matériaux de dragage souillés	Matières draguées polluées
Cuivre ($\times 10^{-6}$)	32.2	35.7	100	0	0
Plomb ($\times 10^{-6}$)	14.4	16.4	100	0	0
Zinc ($\times 10^{-6}$)	76.8	80.0	100	0	0
Cadmium ($\times 10^{-6}$)	0.0350	0.0774	100	0	0
Chrome ($\times 10^{-6}$)	32.8	34.4	100	0	0
Mercure ($\times 10^{-6}$)	0.0331	0.0362	100	0	0
Arsenic ($\times 10^{-6}$)	12.8	14.2	100	0	0
HAP (× 10-6)	12.0	38.7	100	0	0
C6Cl6 ($\times 10^{-9}$) (Hexachlorobenzene)	ND	ND	100	0	0
DDT ($\times 10^{-9}$) (Dichlorodiphenyltrichloroethane)	ND	ND	100	0	0
PCBs ($\times 10^{-9}$) (Polychlorinated biphenyls)	ND	ND	100	0	0
Sulfures ($\times 10^{-6}$)	2.42	15.8	100	0	0
Carbone organique (%)	0.30	1.04	100	0	0

Tableau 3.5-15. Niveau de criblage chimique des matériaux de dragage

Contaminant	Limite inférieure (A)	(Limite inférieure + limite supérieure) / 2	Limite supérieure (C)
Cuivre ($\times 10^{-6}$)	50.0	175.0	300.0
Plomb ($\times 10^{-6}$)	75.0	162.5	250.0
Zinc ($\times 10^{-6}$)	200.0	400.0	600.0
Cadmium ($\times 10^{-6}$)	0.80	2.90	5.0
Chrome ($\times 10^{-6}$)	80.0	190.0	300.0
Mercure ($\times 10^{-6}$)	0.30	0.65	1.0
Arsenic ($\times 10^{-6}$)	20.0	60.0	100.0
HAP (× 10-6)	500.0	1000.0	1500.0
C6Cl6 ($\times 10^{-9}$) (Hexachlorobenzene)	500.0	1000.0	1500.0
DDT ($\times 10^{-9}$) (Dichlorodiphenyltrichloroethane)	20.0	60.0	100.0
PCBs ($\times 10^{-9}$) (Polychlorinated biphenyls)	20.0	310.0	600.0
Sulfures ($\times 10^{-6}$)	300.0	550.0	800.0
Carbone organique (%)	2.0	3.0	4.0

Selon les normes de classification et les résultats d'analyse des échantillons de sediments dragués, comme l'indiquent les tableaux 3.5-14 et 3.5-15, les résultats des 5 échantillons recueillis pour le projet de dragage ont montré que ces 5 échantillons étaient des matériaux de dragage propres c'est-à-dire aucun échantillon de matériaux de dragage contaminé. L'évaluation complète sur les matériaux de dragage, a concerné les métaux lourds (cuivre, plomb, zinc, cadmium, chrome, mercure, arsenic), les matières organiques (carbone organique), pesticides et autres, DDT, PCB, et les teneurs en sulfures. Tous les échantillons sont conformes aux normes relatives à des matériaux de dragage propres.

3.5.6 Résumé

Il est de plus en plus évident que l'évolution des structures d'éoliennes en mer, fondées sur des groupes de pieux ou pieu unique (monopieu) de diamètre surdimensionné va croître dans le monde. Pour assurer la sécurité des pieux (groupes ou monopieux), il est nécessaire de les protéger contre l'érosion. Les mesures anti-érosion traditionnelles sont la mise en place d'enrochements et de gabions ou sacs de sable. La pratique en matière d'ingénierie prouve que les mesures classiques présentent toutes de nombreux inconvénients: gaspillage important de ressources en granulats, dommages environnementaux importants et un effet de protection médiocre. La solidification de boues de sédiments, préparées de manière innovante, offre une excellente performance anti-erosion. Par une maitrise de la fluidité, il est possible de couler en place une boue qui va se solidifier par la suite. Cette couche anti-érosion ainsi formée améliore de manière significative la protection de la fondation sur pieux. Cette nouvelle technologie, peut se résumer ainsi en cinq points :

a) Maîtrise de la technologie pour la préparation de sédiments solidifiés à haute teneur en eau. En augmentant la quantité de l'agent de durcissement et en améliorant la liaison entre les particules du sédiment solidifié, la résistance du sédiment solidifié à teneur très élevée a été améliorée, et un agent de durcissement composite spécial pour ce sédiment solidifié a été développé. Un sédiment solidifié à haute teneur en eau a été préparé en utilisant des sédiments, un agent de traitement spécial et de l'eau comme matières premières. On a aussi réutilisé des sédiments et des sous-produits industriels (composants partiels dans l'agent de traitement). Le sédiment solidifié à 28 jours a été préparé pour une résistance à la compression non confinée ≥ 500 kPa et une cohésion ≥ 50 kPa. Les propriétés mécaniques du sédiment solidifié répondent aux exigences de l'application anti-érosion.

b) Maîtrise la technologie pour le contrôle de la fluidité et la cohésion des sédiments solidifiés à teneur en eau très élevée. On a étudié les facteurs clés affectant les propriétés rhéologiques de la boue de sédiment solidifié à teneur très élevée, à savoir

la teneur en eau de la boue, la quantité d'agent de durcissement et la vitesse de réaction du C_3A dans l'agent de durcissement. Un silicone modifié est utilisé pour contrôler la vitesse de réaction du C_3A et un agent “collant” approprié pour améliorer la compacité de la boue de sédiment solidifié, la fluidité comme la cohésion de la boue. Celle-ci peuvent être ajustées et contrôlées.

Par conséquent, le degré d'affaissement après 2 heures de mélange de la boue de sédiment solidifié répond aux exigences de la structure anti-affouillement coulée en place et l'objectif technique du taux de perte par érosion est inférieur à 1%, ce qui améliore totalement l'ouvrabilité du sédiment solidifié.

c) La méthode de conception de la structure anti-érosion du sédiment solidifié a été mise au point ainsi qu'un processus de préparation et d'injection de la boue de sédiments solidifiés et d'un processus de normalisation et de contrôle de la qualité de la structure anti-érosion obtenue par solidification de sédiments à haute teneur en eau pour les fondations sur pieux et monopieux de grande dimension. Ceci a permis de réaliser une construction rapide et pratique de la structure de protection des fondations sur pieux et a fourni un support technique pour une construction de haute qualité et efficace de la structure de protection contre l'érosion avec des sédiments solidifiés.

d) L'obtention de la structure anti-érosion à base de sédiments solidifiés à haute teneur en eau pour une fondation sur pieux ou monopieux à grand diamètre d'éoliennes offshore avec une excellente performance de stabilité à l'eau à long terme, a été possible. Cette structure a pu résister à l'érosion à long terme sous un écoulement de 4 m/s, et l'effet anti-érosion est confirmé par des observations visuelles.

e) L'obtention d'un sédiment durci s'est faite avec une excellente protection de l'environnement et les résultats de l'évaluation environnementale ont montré qu'il s'agissait de sédiments propres issus de matériaux de dragage pour des opérations sous-marines.

IV. Conclusion générale

En tant que quantité énorme de déchets, les sédiment argileux et limoneux occupent non seulement une grande superficie lorsqu'ils sont stockés, mais engendrent également un certain degré de pollution environnementale. En Chine, parallèlement à l'accélération de l'urbanisation et de la politique économique de développement, il faut exploiter un grand nombre de dépôts de sediments comme dans les canaux par dragage, le problème délicat étant de savoir comment les réutiliser. Pour pallier les inconvénients d'une teneur en eau élevée, d'une résistance faible et d'une compressibilité élevée du sédiment, il faut trouver le meilleur moyen de les réutiliser à grande échelle et en ressources de granulats en le transformant en un matériau de construction polyvalent.

Le sujet de recherche de cette thèse était d'explorer diverses solutions de solidification avec nécessairement l'étude de la technologie de traitement adéquate sur les boues de sédiments, d'étudier le mécanisme de solidification des boues de sédiments, d'étudier systématiquement l'effet de solidification de la boue en fonction de la teneur en eau, de l'agent de traitement et de l'activateur sur les boues, et de mettre en avant les performances d'un sédiment solidifié. La mise au projet de chaque solution a été personnalisée car elle dépend de la problématique posée en relation avec un projet réel, en soulignant les fonctions clés. Pour cette raison, les problèmes de faible résistance d'un sédiment solidifié à haute teneur en eau, d'une grande compressibilité, d'une mauvaise stabilité à l'eau de la boue de sédiment solidifié et d'une perte rapide de fluidité et de pompabilite ont été résolus. Selon les différents domaines d'utilisation, la technologie de préparation et d'application des sédiments solidifiés avec des performances différentes est proposée. Elle est appliquée avec succès à la mise en forme de plate-formes souples, à la construction de routes, au remblayage, à l'extension de territoires en mer et à la prévention de fondations sur pieux d'éoliennes en mer (protection anti-affouillement). Les principaux résultats des travaux de recherche en liaison avec ces divers projets sont les suivants:

1. Les influences de la boue, de la teneur en eau, de l'agent de durcissement et de l'activateur sur l'effet de solidification des boues ont été systématiquement étudiés. A ces études, la technologie de préparation et d'application d'un sédiment solidifié a été associée comme pour la protection anti-affouillement des fondations sur pieux.

2. L'utilisation de la technologie de solidification de sédiments à faible coût a permis d'accélérer la vitesse des constructions et de diminuer les coûts élevés de projets avec d'autres techniques. Cette technologie a permis de remplacer avec succès les matériaux nobles comme les sables et graviers, en cas de grave pénurie de ressources en sables et en gravies, pour des constructions en zones côtières. Ceci a permis des développemens à faible coût et des constructions de haute qualité. Cette technologie offre une solution technique intéressante, ainsi que la protection de l'environnement, l'utilisation de ressources en sédiments, ainsi que d'autres avantages environnementaux comme l'économie de matériaux classiques.

3. En contrôlant correctement la forme et la quantité de produits formés par réaction chimique dans le sédiment solidifié, on peut construire des couches de chaussée en sédiments solidifiés avec une bonne compressibilité et une stabilité aux conditions climatiques, (etats sec-humide), et la plate-formes ainsi construite présente une bonne intégrité. Pour une application dans des l'ingénierie des plates-formes de voirie, il est utile de résoudre le problème de la grande déformabilité de la route et de la fissuration liée au tassement dans les zones de sols mous.

4. La mise au point d'un agent de durcissement spécial pour les sédiments solidifiés à forte teneur en eau résout le problème de la faible résistance obtenue lors de la solidification et de la perméabilité élevée des sédiments solidifiés à forte teneur en eau. Il donne la possibilité de réduire la dynamique d'écoulement, la perméabilité et la teneur en eau appropriées au pompage de la boue de sédiments. Ce développement avec cet agent a permis d'appliquer avec succès cette technologie au projet de noyau de digue et au projet d'extension de terrains en mer.

5. Des études sur le renforcement de la résistance et le contrôle de la fluidité pour préparer un sédiment solidifié à haute teneur en eau avec une bonne fluidité, une

résistance élevée et une excellente performance d'anti-érosion ont été menees et débouché sur une technologie qui a été appliquée avec succès à la protection anti-érosion de fondations de pieux d'éoliennes en mer. Cette technique de solidification a résolu les problèmes d'érosion, de collision facile entre pieux et câbles sous-marins, de protection et de maintenance difficile à un stade ultérieur, causés par des enrochements et des sacs de sable utilisés comme matériaux anti-affouillement. En tant que nouvelle technologie, elle contribue au développement rapide de construction de champs eoliens en mer.

6. Les technologies évoquées sont toutes liées au développement et à l'application de technologies pertinentes dans le but de satisfaire aux exigences de protection de l'environnement, de durabilité de la structure réalisée en sédiments solidifiés et aux exigences de conception.

V. Perspectives de recherche et besoins futurs

L'objectif de cette étude et travaux était de personnaliser la fonction du sédiment solidifié en fonction du domaine d'application, d'assurer la protection de l'environnement et la durabilité du sédiment solidifié, afin de répondre aux exigences de base de l'application de sédiments solidifiés dans divers domaines et, d'élargir les domaines d'application. Afin de réaliser de plus grandes applications avec des sédiments solidifiés dans d'autres domaines, de nombreux travaux de recherche doivent encore être complétés, on peut en lister les principaux comme suit:

1. Suivre et surveiller la stabilité de l'utilisation de la structure à base de sédiments en service. Evaluer la durabilité et des propriétés fonctionnelles des structures en sédiments solidifiés pour constituer des données de surveillance à cause de l'absence d'application à long terme.

2. Optimiser et ajuster le processus de construction en sédiments solidifiés existants, normaliser et modéliser le processus de solidification de sédiments et augmenter la stabilité de la qualité et la polyvalence du processus.

3. Améliorer le système de surveillance de la qualité et resserrer les normes applicables à l'application de sédiments solidifiés.

4. Mener des recherches théoriques et expérimentales sur la durabilité des sédiments solidifiés et fournir un support de données raisonnable pour la conception de structures à base de sédiments solidifiés.

5. Mener des recherches sur la stabilité à long terme d'éléments nocifs tels que les métaux lourds dans un sédiment solidifié, résoudre les problèmes techniques posés par la présence de sous-produits industriels de déchets en vrac dans un sédiment solidifié.

6. Étendre l'application de solidification de sédiments solidifiés à forte teneur en eau, en particulier dans le domaine de la protection des pieux éoliens en mer. Fournir une base fiable pour davantage de types de protection, ce qui necessite d'étudier la conception de la protection du périmètre des pieux d'éoliennes de manière plus approfondie.

7. Étendre l'application de la solidification de sédiments dans plus de champs d'application en fonction des besoins.

References bibliographiques

[1] Zhang X.B., Zhu Z.D., Wei R.J. Study on Strength and Microscopic Properties of Stabilized Silt [C]. Proceedings of Geo Shanghai 2018, International Conference: Ground Improvement and Geosynthetics, 2018, 129-136.

[2] Wang Y. Research on the reasonable structural type of highway subgrade in marine (deposited) soft soil area [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2011.

[3] Huang J.Y. Study on Reasonable distance and transport organization optimization of sea-rail transport by railway container [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.

[4] Ten L. The marine soft soil nature and its influence to engineering construction [J]. Shanxi architecture, 2016, 42(24): 54-55.

[5] Yu X.B., Liu S.Y., Miao L.C. Creep properties of Lianyungang soft clay and its engineering application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003(06): 1001-1006.

[6] Zhang X.Q., Wang G.X., Wang Y.H., Wang Z.L. The changes of erosion or progradation of tidal flat and retreat or extension of wetland vegetation of the Yancheng coast, Jiangsu [J]. Marine Sciences, 2006(06): 35-39+45.

[7] Wang L., Ding J.J., Ren Y.J., Ding Y.H., Ji Y.H., Liang Z.H. Rapid assessment of wetland ecosystem health in silting coastal area of Yancheng city, Jiangsu province [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2011, 35(04): 13-17.

[8] Chen C. Coastal tidal flat development mode choice and spatial configuration of different functional areas in Nantong coastal zones [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(01): 138-147.

[9] Gao J.C. Research on soft soil of shore deposit improved by cement mixing method [D]. Nanjing: Southeast University, 2005.

[10] Lu X.H., Cui M.X., Wang P.F., Li B. Application in Cement Soil of Stabilizer in Silt Soft Soil of Wuxi in China [J]. Journal of Coastal Research, 2018, SI (83).

[11] Ma X.H., Gu Y., Jin X.Y., Zhang J.F., Chen X.L. Review of Feasibility Study on 300000-ton Waterway Project in Lianyungang Port [J]. China Harbour Engineering, 2012(04): 25-29.

[12] Wu S.L., Zhu W., Lv Y.Y., Shu S., Han T.T., Wang F.L., Li Y.Q., Liu J.M. Quality control indexes and curing agent values for submerged poured solidifying-silt island; case study of the artificial island of Dalian Bay, China [J]. Construction and Building Materials, 2018, 190.

[13] Bao J.R., Zhu W., Min J.H. Technology of dredging and sludge treatment in small and medium-sized river regulation [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(1): 56-68.

[14] Feng Z.Y., Zhu C.G. Talking about the Difficulties in the Treatment Technology of Soft Ground in the Sea [J]. China New Technologies and Products, 2009(07): 35.

[15] Guo Y. Study on stabilization of muddy soil and mechanical properties of stabilized soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

[16] Wang Q.W., He L.C., Yang H.N., Jiao F.T., Tan F., Zhao X.M. Research Progress on Solidification of Soft Muddy Soil [J]. E3S Web of Conferences, 2019: 2006.

[17] Pu S.Y., Zhu Z.D., Song W.L., Wang H.R., Wei R.J. Deformation properties of silt solidified with a new SEU-2 binder [J]. Construction and Building Materials, 2019, 220: 267-277.

[18] Zou B., Shen R. Study on improving soft soil foundation with calcium acrylate [J]. Railway Engineering, 2000, 5: 10-12.

[19] The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, GBJl45-90. China Planning Press, 1991.

[20] Huang K., Wan J.W., Cheng G., Zeng Y. Testing study of relationship between water content and shear strength of unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2600-2604.

[21] Shao G.H. Structural Model of Lianyungang Marine Clay and Deformation Characteristic of Soft Ground [D]. Nanjing: Southeast University, 2010.

[22] Liu Y. Experimental study on structural property and shear strength improvement of soft soil [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2011.

[23] Cotecchia F., Chandler R.J. A general framework for the mechanical behaviour of clays [J]. Geotechnique, 2000, 50(4): 431-447.

[24] Shi X.C. Study on consolidation properties and deformation mechanism of marine ooze [Z]. Zhengzhou: Zhengzhou Institute of Technology, 2005.

[25] Cao H.M., Li G.L. The status quo and problems of comprehensive utilization of dredged soil [J]. China Water Transport, 2014, 14(8): 88-89.

[26] Liu X., Fan X.Q., Hong B.N. Experimental study of triaxial test of soils stabilized by cement mortar [J]. Rock Soil Mech, 2011, 32(6): 1676-1682.

[27] Tang Y.X., Liu H.L., Zhu W. Study on engineering properties of cement-stabilized soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 549-554.

[28] Shao Y.F., Xu R.Q., Liu Z.Y., Gong X.N. Experimental study on new variety of cement-stabilized soil [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science) 2006, 40(7): 1196-1200.

[29] Poh H.Y., Ghataora G.S., Ghazireh N. Soil stabilization using basic oxygen steel fine slags [J]. Mater. Civ. Eng, 2006, 18(2): 229-240.

[30] Wild S., Kinuthia J.M., Jones G.I., Higgins D.D. Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBS) on strength properties of lime-stabilized sulphate-bearing clay soils [J]. Eng. Geol, 1998, 51(1): 37-53.

[31] Kolias S., Kasselouri-Rigopoulou V., Karahalios A. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement [J]. Cem. Concr. Compos, 2005, 27(2): 301-313.

[32] Show K.Y., Tay J.H., Goh A.T.C. Reuse of incinerator fly ash in soft soil stabilization [J]. Mater. Civ. Eng, 2003, 15(4): 335-343.

[33] Lemaire K., Deneele D., Bonnet S., Legret M. Effects of LC mixtures treatment on the physicochemical, microstructural and mechanical characteristics of a plastic silt [J]. Eng. Geol, 2013, 166(8): 255-261.

[34] Baghdadi Z.A., Fatani M.N., Sabban N.A. Soil modification by cement kiln dust [J]. Mater. Civ. Eng, 1997, 4: 218-222.

[35] Miller G.A., Azad S. Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust [J]. Constr. Build. Mater, 2000, 14(2): 89-97.

[36] Rivard-Lentz D.J., Sweeney L.R., Demars K.R. Incinerator Bottom ash as a Soil Substitute: Physical and Chemical Behaviour 1275, ASTM Sp Techn Publ, 1997, pp. 246-262.

[37] Kukko H. Stabilization of clay with inorganic by-products [J]. Mater. Civ. Eng, 2000, 12(4): 307-309.

[38] Seco A., Ramirez F., Miqueleiz L., Garcia B., Prieto E. The use of nonconventional additives in Marls stabilization [J]. Appl. Clay Sci, 2011, 51: 419-423.

[39] Urena C., Azanon J.M., Corpas F., Nieto F., Leon C., Perez L. Magnesium hydroxide, seawater and olive mill wastewater to reduce swelling potential and plasticity of bentonite soil [J]. Constr. Build. Mater, 2013, 45: 289-297.

[40] Cai G., Zhang T., Liu S., Li J.H., Jie D.B. Stabilization Mechanism and effect evaluation of stabilized silt with lignin based on laboratory data [J]. Mar. Georesour. Geotechnol, 2016, 34(4): 331-340.

[41] Zhang M., Guo H., El-Korchi T., Zhang G., Tao M. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer [J]. Constr. Build. Mater, 2013, 47: 1468-1478.

[42] Cristelo N., Glendinning S., Fernandes L., Pinto A.T. Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation [J]. Constr. Build. Mater, 2012, 29: 167-174.

[43] Verdolotti L., Iannace S., Lavrogna M., Lamanna R. Geo-polymerization reaction to consolidate incoherent pozzolanic soil [J]. Mater. Sci, 2007, 43(3): 865-873.

[44] Little D.N. Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime [J]. Base course, 1995.

[45] ASTM, D2487, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system), in: ASTM International West Conshohocken, PA, 2011.

[46] Ning J.G., Huang X. Experiment on structural formation and mechanism of strength increasing of stabilized soil [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(1): 97-102.

[47] Tomohisa S., Sawa K., Maitoh N. Hedoro hardening treatment by industrial wastes [J]. Journal of the Society of Materials Science, 1995, 44(503): 1023-1026.

[48] Zhuang X.S., Wang G.X. A study on the characteristics of soils consolidated with industrial wastes [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(8): 114-117.

[49] Liu Y.W., Wang Q., Liu S.W., Shangguan Y.L., Fu H.C., Ma B., Chen H.E., Yuan X.Q. Experimental investigation of the geotechnical properties and microstructure of lime-stabilized saline soils under freeze-thaw cycling [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019: 32-42.

[50] Xu G.F., Qi J.L., Jin H.J. Model test study on influence of freezing and thawing on the crude oil pipeline in cold regions [J]. Cold Regions Sci. Technol, 2010, 64(3): 262-270.

[51] Guidobaldi G., Cambi C., Cecconi M., Deneele D., Paris M., Russo G., Vitale, E. Multi-scale analysis of the mechanical improvement induced by lime addition on a pyroclastic soil [J]. Eng. Geol, 2017, 221: 193-201.

[52] Jha A.K., Sivapullaiah P.V. Mechanism of improvement in the strength and volume change behavior of lime stabilized soil [J]. Eng. Geol, 2015, 198(2): 53-64.

[53] Chudley S. GGBS strength development [J]. Concrete, 2018, 52(2): 49-50.

[54] GB/T 18046-2008, Ground granulated blast furnace slag used for cement and concrete [S].

[55] BSEN 15167-1：2006, Ground granulated blast furnace slag for use in concrete, mortar and grout — Part 1 Definitions, specifications and conformity criteria [S].

[56] Wang W.J., Zhu X.R. Study on strength property of nanometer silica fume reinforced cemented soil and reinforcement mechanism [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 922-926.

[57] Gao G.R., Li J.C. Study of effect of reinforcing soft cohesive ground with Portland cement [J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(1): 45-52.

[58] Mühlen P. Raw mix optimization with near infra-red online analysis in cross belt and airslide applications [C]. Proceedings of the Cement Industry Technical Conference, 2017 IEEE-IAS/PCA, F, 2017.

[59] Dejong J.G.M., Stein H.N., Stevels J.M. Hydration of tricalcium silicate [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology. 2010, 17(9): 246-50.

[60] Bentur A., Berger R.L. Chemical Composition of C-S-H Gel Formed in the Hydration of Calcium Silicate Pastes [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 62(3-4): 117-20.

[61] Trettin R., Oliew G., Stadelmann C., Wieker W. Very early hydration of dicalcium silicate-polymorphs [J]. Cement & Concrete Research, 1991, 21(5): 757-64.

[62] Yamamoto J., Takahashi S., Nawa T. Hydration of tricalcium aluminate [J]. Cement Science & Concrete Technology, 2011, 65(1): 69-75.

[63] Jupe A.C., Turrillas X., Barnes P., Colston S.L., Hall C., Häusermann D., Hanfland M. Fastin situx-ray-diffraction studies of chemical reactions: A synchrotron view of the hydration of tricalcium aluminate [J]. Physical Review B, 1996, 53(22): R14697-R700.

[64] Rose J., Bénard A., Mrabet S.E.l., Masion A., Moulin I., Briois V., Olivi L., Bottero J.Y. Evolution of iron speciation during hydration of C_4AF [J]. Waste Management, 2006, 26(7): 720-4.

[65] Barauskas I. Influence of pozzolana on the hydration of C_4AF rich cement in chloride environment [J]. Ceramics-Silikáty, 2013, 57(1): 45-52.

[66] Du Y.J., Jiang N.J., Shen S.L., Jin F. Experimental investigation of influence of acid rain on leaching and hydraulic characteristics of cement-based solidified/stabilized lead contaminated clay [J]. Hazard. Mater, 2012, 225-226: 195-201.

[67] Du Y.J., Wei M.L., Reddy K.R., Liu Z.P., Jin F. Effect of acid rain pH on leaching behavior of cement stabilized lead-contaminated soil [J]. Hazard. Mater, 2014, 271: 131-140.

[68] Wu Y.F., Yi G.Y., Liu Q.R., Li F.H., Zhao L.W. Current situation of comprehensive utilization of fly ash [J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(6): 100-104.

[69] Yang S., Liu W.B. Application of image-pro plus in the shear strength and micro-structure of solidified soil mixed with fly ash [J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 168-177.

[70] Chen Y.X., Wang B.T., Zhang Y.Q. Experimental study on lime improved mucky soil [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(34): 273-277.

[71] De B.R., Bollens Q., Gomes C.A., Duvignaud P.H., Verbrugge J.C. Time and temperature dependency of the geomechanical properties of silty soils treated with lime, in: Proc. Int. Conf. on Advance Characterization of Pavement and Soil Materials, Taylor & Francis Balkema, Athènes, 2007, pp. 13-521.

[72] Rajasekaran G., Rao S.N. Lime stabilization technique for the improvement of marine Clay [J]. Jpn. Geotech. Soc, 2008, 37(2): 97-104.

[73] Wang Y., Li G.F., Huang K.J., Gao M.J. Effect of cement and limestone on performance of inshore saline subgrade soil [J]. Nanjing Forestry Univ, 2014, 38(5): 165-169.

[74] Yu B.W., Du Y.J., Jin F., Liu C.Y. Multiscale study of sodium sulfate soaking durability of low plastic clay stabilized by reactive magnesia-activated ground granulated blast-furnace slag [J]. Mater. Civ. Eng, 2016, 28(6): 04016016.

[75] Kong X.H., Song S.G., Wang M.Y., Zhao Q.M. Experimental Research of Low Liquid Limit Silt Stabilizedby Lignin in the Flooding Area of Yellow River [J]. Geotech Geol Eng, 2019: 1-7.

[76] Zhao F.Q., Ni W., Wang H.J., Liu H.J. Activated fly ash/slag blended cement [J]. Resources,

Conservation and Recycling, 2007, 52(2): 303-313.

[77] Kim M.S., Jun Y.B., Le C.H. Use of CaO as an activator for producing a price-competitive non-cement structural binder using ground granulated blast furnace slag [J]. Cement and Concrete Research, 2013, 54: 208-214.

[78] Błaszczyński T., Król Z., Maciej R. Alkaline Activator Impact on the Geopolymer Binders [J]. Materials Science and Engineering, 2017, 245: 22-36.

[79] Guo Y., Xu R.Q., Shao Y.C. Study on mechanism of muddy soil stabilization [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(6): 1071-1075.

[80] Liu Y.W., Wang Q., Liu S.W. Experimental investigation of the geotechnical properties and microstructure of lime-stabilized saline soils under freeze-thaw cycling [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019: 32-42.

[81] JTG E 51-2009, Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering [S].

[82] GB/T 50123-1999, Standard for soil test method [S].

[83] Ocean Dumping: Modification of an Ocean Dredged Material Disposal Site Offshore of Mobile, Alabama [J]. The Federal Register/FIND, 2019, 84(122).

[84] Jung J.M., Choi K.Y., Chung C.S., Kim C.J., Kim S.H. Fractionation and risk assessment of metals in sediments of an ocean dumping site [J]. Marine pollution bulletin, 2019, 141.

[85] Zhang C.L., Guan F.F., Li L. Progrès dans le traitement, l'élimination et l'utilisation des ressources des boues de dragage en Chine [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(12): 95-99.

[86] Rulkens W.H. Treatment of contaminated dredged sediments: the Dutch approach and experience[C]//Environmentally Devastated Areas in River Basins in Eastern Europe. Springer Berlin Heidelberg, 1998.

[87] Bo L.J., Wang D.J., Yan X., Peng X.L., Ran J. Utilisation des ressources environnementales et évaluation des risques liés aux sédiments [J]. Journal chinois de la Science du sol, 2013, 44(4): 1017-1024.

[88] Zeng R., Xu Y., Yang Y., Wang X.L., Qu Y.M. Recherches sur le statu quo et contre-mesures de gestion des zones de déversement en mer en Chine [J]. Développement et gestion des océans, 2018, 35(01):40-45.

[89] Ministère de la construction ferroviaire [2010] 255 N°, Spécification de conception de la durabilité de la structure en béton ferroviaire [S].

[90] TB 10102-2010, Selon le code pour les essais géotechniques en génie ferroviaire [S].

[91] RISN-TG003-2007, Directives techniques pour l'application d'agents de durcissement du sol [S].

[92] Huang C.X. Study on cement-sodium silicate-stabilized soil [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2002.

[93] CJJ/T80-1998, Spécification technique pour le durcissement de la couche de fond et de la sous-base [S].

[94] CJ/T3073-1998, Agent de durcissement des sols [S].

[95] Li J. Recherche d'application d'un agent de durcissement sur la couche de base d'un revêtement de sol solidifié dans une zone gelée saisonnière [D]. Changchun: Université de Jilin, 2008.

[96] Zhao Y.Q. Recherche sur le mécanisme de développement et de solidification de l'agent de traitement du sol [J]. Science et technologie et économie de la conservation de l'eau, 2005(100): 620-622.

[97] Li H.M. Étude expérimentale d'un nouvel agent solidifiant pour la solidification des sols [D]. Qingdao: Université technologique de Qingdao, 2011.

[98] Song N.J., Chen X.Z., Zhao H.Y. Progrès de la recherche et application d'un agent de traitement du sol [J]. Science et technologie des matériaux de construction de la Chine, 2009, 01(07): 58-60.

[99] Shi L. Application d'un agent durcissant au sol en génie routier [J]. Technologie d'ingénierie Ningxia, 2004(4): 11-14.

[100] Ding J.W., Zhang S., Hong Z.S. Experimental study of solidification of dredged clays with high water content by adding cement and phosphogypsum synchronously [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2818-2822.

[101] Yue H.P. Application research of renolith in Yunnan pavement engineering [D]. Xian: Changan University, 2010.

[102] Cui Y.T., Liu W.B., Xu B.Q. The study of compression modulus and changes in microstructure of dredged mud before and after solidification [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(15): 260-267

[103] Pu S.Y., Zhu Z.D., Wang H.R., Song W.L., Wei R.J. Mechanical characteristics and water stability of silt solidified by incorporating lime, lime and cement mixture, and SEU-2 binder [J]. Construction & Building Materials, 2019: 111-120.

[104] Long Y.W. Analysis on the status quo and prospect of the development and utilization of marine wind energy resources in China [J]. Low Carbon World, 2016(2), 194.

[105] Guan D.W., Zhang J.S., Zhao J.L., Li J.L. Research progress on scouring of offshore wind power single pile foundation under complex dynamic environment [J]. Ocean Development and Management, 2018, 46-49.

[106] Taylor H. Nanostructure of C-S-H: Current status [J]. Advcembased Mater, 1993, 1(1): 38-46.

[107] Brown P.W., Franz E., Frohnsdorff G., Taylor H.F.W. Analyses of the aqueous phase during early C_3S hydration [J]. Cement & Concrete Research, 1984, 14(2): 257-262.