



HAL
open science

Étude de la durabilité des géomatériaux par couplage hydromécanique, chimique et microstructurale: approche multi-physique et multi-échelle

Andry Rico Razakamanantsoa

► **To cite this version:**

Andry Rico Razakamanantsoa. Étude de la durabilité des géomatériaux par couplage hydromécanique, chimique et microstructurale: approche multi-physique et multi-échelle. Matériaux. Nantes Université, 2023. tel-04407670

HAL Id: tel-04407670

<https://univ-eiffel.hal.science/tel-04407670v1>

Submitted on 20 Jan 2024

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.

UNIVERSITE GUSTAVE EIFFEL

Document de synthèse

présenté pour obtenir

L'Habilitation à Diriger des Recherches

Mention Génie civil

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DE L'INGÉNIERIE ET DES SYSTÈMES

**Étude de la durabilité des géomatériaux par
couplage hydromécanique, chimique et
microstructurale: approche multi-physique et
multi-échelle**

Andry Razakamanantsoa

MEMBRE DU JURY:

AGNÈS JULLIEN, DIRECTRICE DE RECHERCHE (Ex.), UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL, CAMPUS DE NANTES - PRÉSIDENTE

LORETTA BATALI, PROFESSEURE, UNIVERSITÉ TECHNIQUE DE GÉNIE CIVIL DE BUCAREST, ROUMANIE - RAPPORTEUR

DANIEL CHATEIGNIER, PROFESSEUR, UNIVERSITÉ DE CAEN NORMANDIE - RAPPORTEUR

ANTONIO-CORREIA GOMES, PROFESSEUR ÉMÉRITE, UNIVERSITÉ DE MINHO, PORTUGAL - RAPPORTEUR

OUALI AMIRI, PROFESSEUR, NANTES UNIVERSITÉ - EXAMINATEUR

IRINI DJERAN-MAIGRE, PROFESSEURE, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON - EXAMINATEUR

PATRICIA PATRIER, PROFESSEURE, UNIVERSITÉ DE POITIERS - EXAMINATEUR

DANIEL LEVACHER, PROFESSEUR ÉMÉRITE, UNIVERSITÉ DE CAEN NORMANDIE - EXAMINATEUR

Date de soutenance: 22/11/2023

Table des matières

Table des matières	2
Table des figures	4
Liste des tableaux	6
Partie 1 CURRICULUM VITAE DÉTAILLÉ	7
Partie 2 SYNTHÈSE DES TRAVAUX DE RECHERCHE DEPUIS LE DOCTORAT	27
I Introduction générale	29
II Comportement des géomatériaux d'étanchéité	33
1 Contexte et problématiques	33
2 Interactions dans les géomatériaux	37
3 Couplage hydromécaniques et chimiques combiné avec l'observation microstructurale	39
III Analyse de la structure interne des sols compactés et assimilés	45
1 Influence de l'hydratation du géomatériau lors de la mise en oeuvre en laboratoire .	45
2 Influence du mode de compactage sur les propriétés mécaniques et microstructurale : cas du sol traité à la chaux	46
3 Influence de la nature du fluide sur la microstructure des sols soumis aux cycles d'humidification/séchage	50
IV Étude des interactions à la surface des sols compactés	55
1 Instabilité de surface (dégradation) en lien avec l'hydratation du sol compacté par roulement : analyse microstructurale (Sediki et al. 2018)	55
2 Initiation à l'envol des poussières	60
V Conclusion générale	67
1 Synthèse des activités de recherche Post doctoral	67
2 Bilan	71
VI Références bibliographiques	75
Références	77

Partie 3	PROJET DE RECHERCHE	87
I	Introduction	89
1	Stratégie de mise en oeuvre	90
II	Axes de recherche	93
1	Interactions dans les géomatériaux	93
2	Interaction sol-atmosphère : Émission des particules	96
III	Moyens de mise en œuvre	99
1	Le laboratoire Géomatériaux et Interactions Environnementales	99
2	Équipes de recherche thématique	99
3	Réseau de recherche thématique : multi physique - multi disciplinaire – multi échelle	100
4	Cluster de recherche et inter transdisciplinaire : Integrated Research Cluster LUNG O2 avec le CHU de Nantes	100
IV	Actions de recherche et de formation	101
1	Action de formation au niveau international : Projet Partenariats avec l’Enseignement supérieur Africain (PEA) Madatlas (2021-2024)	101
2	Renforcement de collaboration internationales avec l’université de Kyoto et l’univer- sité de Fukuoka, USP Brésil et , U. Waterloo	102
3	Hub international sur la valorisation des matériaux géo et biosourcés : Waste to Wealth	102
4	Chaire industrielle	103
Partie 4	PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES	105
	BREVETS	107
	ARTICLES DANS DES REVUES INTERNATIONALES AVEC COMITE DE LECTURE . .	107
	NATIONAL	111
	NORME	114
	GUIDE	114
	EXPERTISE	114
	OUVRAGE	114
	POSTER	115

Table des figures

Figure 1 Installation de stockage de déchets non dangereux (ISDND), site de Chatuzange le Goubet (26)	34
Figure 2 Description schématique d’une installation de stockage de déchets non dangereux (ISDND)	35
Figure 3 Vue de profil des constituants d’une barrières de sécurité	36
Figure 4 Essai de gonflement libre selon la norme NF P 84 703	37
Figure 5 Image MEB des deux mélanges de bentonites BP1(a) et BP2(b)	40
Figure 6 Modification du chemin d’écoulement d’eau dû au compactage Ranaivomanana, Razakamanantsoa et Amiri 2018	41
Figure 7 Distribution granulométrique des différents matériaux testés (Furlan et al. 2021) .	42
Figure 8 Evolution de la densité, de la déformation volumique et de la résistance à la compression simple des mélanges de sédiments testés : S(Soil), L(Lime), C(Cement), FA (Fly Ash).....	43
Figure 9 Évolution temporelle de la résistance à la compression simple de chaque mélange testé de 0 à 90 jours de cure.....	43
Figure 10 Image MEB d’un limon traité montrant les composés cimentaires et la porosité .	47
Figure 11 Image micro XRF mettant en évidence les distributions de calcium dans des échantillons compactés (d, e, et f) traités à la chaux à 1, 2,5 et 4% préparés à l’OMC après 28 jours de durcissement à 20 °C.....	47
Figure 12 Représentation schématique de l’effet du compactage par pétrissage comparé au mode de compactage statique courante (déformation des agrégats, dispersion de la chaux).	48
Figure 13 Schémas représentant la matrice de sol compacté avec le schéma de l’écoulement associé.	49
Figure 14 Évolution de la résistance à la compression des éprouvettes soumises à un cycle d’imbibition et de séchage B, (ASTM, Période de pluie RP et période de sécheresse DP)	51
Figure 15 Évaluation de la résistance à la compression simple et les apports de la succion et du cycle d’imbibition et de séchage.....	53
Figure 16 Compacteur roulant de laboratoire : Schémas du dispositif(a), vue de profil de la roue et de l’éprouvette de sol compacté(b), vue de face de la roue et de l’éprouvette compactée(c).....	57
Figure 17 Configurations de compactage.....	57
Figure 18 Contrainte de cisaillement à l’interface obtenue à l’aide de la boîte de Casagrande	58
Figure 19 Distribution granulométrique des particules de sol collectés sur la surface de l’éprouvette soumises à 100 000 cycles de trafic	59
Figure 20 Distribution des pores des différents types de configurations de compactage	59

Figure 21	Contrainte de cisaillement représenté en fonction de la vitesse d'écoulement mesurée à différent endroit à la surface des éprouvettes.....	63
Figure 22	Contrainte de cisaillement à l'écoulement en fonction de la granulométrie des particules dont la partie hachurée correspond à l'objet du présent travail selon les conditions aux limites de Shao et Liu (2000).....	63
Figure 23	Vue de profil du simulateur de trafic (a) Schéma (b), Type de roue testé (c).....	64
Figure 24	Évolution de la dégradation de surface en fonction du nombre de passage de roue sculpté.....	64
Figure 25	Schéma des travaux de recherche.....	71

Liste des tableaux

1	Tortuosité hydraulique des mélanges	50
2	Présentation de la liste des expérimentations	51
3	Paramètres de cisaillement à l'interface d'une roue lisse	61
4	Condition de compactage et de dégradation de surface des éprouvettes	62

Première partie

CURRICULUM VITAE DÉTAILLÉ

Andry RAZAKAMANANTSOA
Directeur adjoint de l'équipe en
émergence Géomatériaux et Interactions
Environnementales Département GERS
(GERS-GIE)
Université Gustave Eiffel

+33-02 40 84 58 04
+33-06 40 75 06 70
✉ andry.razakamanantsoa@univ-eiffel.fr
Allée des Ponts et Chaussées 44344 Bouguenais Cedex

<https://orcid.org/0000-0003-2977-3552>
https://www.researchgate.net/profile/Andry_Razakamanantsoa
<https://www.madatlas.mg>
<https://next-isite.fr/cluster-lung-innovation>
<https://www.gislirgec.fr/pages/71/interaction-sol-atmosphere>
<https://www.gislirgec.fr/pages/76/valorisation-sediments>
<https://usumacinta.hypotheses.org/equipe>
http://proper-cedr.eu/project_partners.html

DIPLOMES, TITRES ET DEROULEMENT DE CARRIERE

Diplômes, titres universitaires et dates d'obtention

•Thèse de Doctorat

Décembre 2009

Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

Jury composé de:

- Président, Pr. Jean Marie Fleureau (Centrale Supélec Paris)
- Rapporteur, Pr. Daniel Levacher (U. Caen)
- Rapporteur, Pr. Patrick Pierson (UJF Grenoble)
- Examineur, Pr. Yves Berthaud (UPMC)
- Examineur, Pr. Hervé di Benedetto (ENTPE)
- Examineur, Pr. Irini Djeran-Maigre (INSA de Lyon) - Directrice de thèse

•Master 2 Sciences de l'environnement et risques naturels, industriels et urbain

Juin 2006

Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

•Ingénieur - Sciences de la terre et de l'environnement minier

Juin 2003

École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Formations complémentaires

- 2021 - Chargé d'évacuation, hygiène et sécurité (2 jours)
- 2019 - Habilitation - Inspecteur de Santé et de Sécurité au Travail (ISST, 1jour)
- 2018 - Sécurité incendie (2 jours)
- 2017 - Mur de soutènement - ENPC/ Pont Formation (3 jours)
- 2011 - Terrassement – ENPC/ Pont Formation (3 jours)
- 2010 - Incertitude de mesure – CNAM (2 jours)
- 2005 - Leadership –Youth Leadership Training Program (YLTP Madagascar) – Fondation Friedrich Ebert (60 jours)

Déroulement de carrière

- Depuis 2010 - Chargé de Recherche (CRCN)
- 2009-2010 - Attaché temporaire d'enseignement et de recherche à INSA de Lyon
- 2006-2009 - Préparation de la thèse de Doctorat
- 2004-2005 - Assistant Géologue (Responsable laboratoire géotechnique) – BRGM Madagascar

Management d'équipe et administration de la recherche

Depuis 2020 – Directeur adjoint du laboratoire GERS-GIE et Directeur par intérim de l'unité de recherche pour l'année 2022

- Pilotage des actions scientifiques et Veilles des productions scientifiques en cohérence avec les orientations du département.
- Administration de la recherche et rayonnement internationale : Groupe de travail Ingénierie Forensique (AFGC), Groupe de travail Carbonatation SCSNE, ...),
- Suivi et orientations des contrats de recherches
- Développement de partenariat industriel et de collaboration académique national et international : convention de recherche (CimBéton, Carmeuse, Natural Road, EDF...), montage de chaire industrielle en cours (IMT Douai, Estaca...)
- Animation de la recherche : animation d'accord cadre avec l'ESTACA, montage de Hub international Waste to Wealth, coordination des actions de recherches et de partenariat internationales avec Madatlas
- Management de l'équipe : gestion du personnel, évaluation, formation (expertise)...
- Gestion de crédit et négociation des accords avec les partenaires industriels, des administrations Françaises (DREAL, ...).
- Gestion des équipements scientifiques : Marché public (Porosimètre au Mercure, soufflerie), suivi de maintenance (chambre de carbonatation, PIV...)
- Maintien de la mise en œuvre des processus qualité pour le laboratoire (fiche de satisfaction client par exemple).

Depuis avril 2021 - Correspondant Sécurité et Prévention (COSP) de GERS-GIE (2% ETP).

- Mise en œuvre et suivi des dispositifs de prévention : SAS de protection pour la soufflerie/Stéréo PIV, rideaux de protection de rayonnement Laser, capteurs CO2 dans le bâtiment.
- Appui à la rédaction et validation du Document Unique d'Évaluation des Risques Professionnels (DUERP).
- Suivi des actions de préventions et de veille à la sécurité des agents dans le cadre de l'accomplissement de leurs missions.

ENSEIGNEMENT ET FORMATION À LA RECHERCHE

Organisation De Formations

AAP Appui au développement de l'enseignement supérieur français en Afrique (ADESFA) - Montage de formation en L3Pro Habitat écologique (Coordination ULS)	2023 Non retenue
AAP « Partenariat avec l'enseignement supérieur africain » (PEA) Madatlas Co-coordination du Workpackage Partenariat <ul style="list-style-type: none">• Développement de réseaux de partenariat international en appui des autres WorkPackage• Développement et mise en place de la stratégie de pérennisation du projet• Gouvernance du projet• Membre du comité de pilotage• Participation au conseil consultatif• Participation au conseil stratégique Co-coordination du Workpackage Recherche <ul style="list-style-type: none">• Mise en place de la stratégie de partenariat pour l'encadrement• Mise en place de la stratégie de recrutement des doctorants• Mise en place de la charte de thèse• Coordination et suivi des thèses	2022

Enseignement

Géomatériaux et Interactions avec l'Environnement

Année	Niveau	Intitulé du cours	Établissement	Volume Horaire
Depuis 2020	M2	Acquisition de données de qualité de l'air de l'option Environnement Mobilité et Santé	ECN Nantes	Coordination 30h
2016 - 2018	M2	Terrassement & Économie d'eau	U. Lorraine	TD (8h)
2016 - 2017	L3 Pro	Mécanique des sols	U. Nantes	TD (8h)
Depuis 2016	L3 Pro	Envol des poussières	U. Nantes	CM (4h) + TD
2013 - 2014	GC4	Storage in Civil Engineering - Erasmus	Curtin U. Polytech Nantes	CM (4h) + (2h) TD
2012-2017	GC4	Géotechnique - Mur de soutènement	Polytech-Nantes	C/TD 13h/an
Depuis 2012	M2 MNA	Storage in Civil Engineering, Geomembrane use in CE - Erasmus	U. Poitiers - ENSIP	CM (8h) +TD (2h)
2009-2010	IUT A	Environnement - étanchéité	IUT A - U. Lyon 1	32h(C/TD)
2008-2010	GC3	Mécanique des sols	INSA Lyon	54h(TP)
2007-2008	IUT A	Formulation de béton	IUT A-U. Lyon 1	28h(C/TD)
2007-2008	IUT A	Liants hydrauliques et bitumineux	IUT A-U. Lyon 1	28h(C/TD)

Introduction à la géotechnique, Mur de soutènement

Année	Intitulé du cours	Établissement	Volume horaire
2012-2016	Géotechnique appliquée (GC4)	Polytech Nantes	CM (13,13) +TD (27,5)
2015-2016	Géotechnique et Mur de soutènement (L. Pro)	Nantes Université	CM (4h) + TD (2h)
2011-2012	Hydraulique du sol (L. Pro)	IUT St Nazaire	TP (4h)

Encadrement

Les stages (Master 2, PFE, Master 1, L2, L3)

Depuis 2007, j'ai pu participer significativement à l'encadrement de 42 étudiants de niveau L3 au M2. Parmi ces étudiants, 4 viennent du National Institute of Technology (NIT), Inde et 7 de l'Université de Kyoto. Le tableau suivant récapitule l'ensemble des encadrements.

Encadrement de stage			
Nom	Année	Niveau	Encadrement (%)
Interaction sol/atmosphère			
Lucas MORIN Etablissement d'origine: ECN	2022	M1	100% Univ. Eiffel
Nicolas du Val D'Epemensil Etablissement d'origine: U. Southampton/ ESTACA	2022	M1	100% Univ.Eiffel
Sarah BEKHADJA Etablissement d'origine: U. Lyon 2	2022	M2	50%Univ Eiffel 50% U. Lyon 3
Victor ELVIRA Etablissement d'origine: ECN	2021	M1	100% Univ. Eiffel
Bachar OBEID Etablissement d'origine: Polytechnique	2021	M2	40% Univ. Eiffel 60% ESTACA
Edwin Garcia ELIBE Etablissement d'origine: ESTACA Laval	2020	PFE	60% Univ. Eiffel 40% ESTACA
Etienne PAGES Etablissement d'origine: Polytech Clermont	2018	TPFE	60% Univ. Eiffel 40% ESTACA
Mehanna DEBBAL Etablissement d'origine: U. Caen	2017	M1	60% Univ. Eiffel
Hiroki ARAKAWA Etablissement d'origine: U. Kyoto	2017	M1	60% Univ. Eiffel 20% U.Caen 20% U. Kyoto
Prabhu DAS BEBARTTA Etablissement d'origine: NIT Rourkela India	2017	BTech. 3	100% Univ. Eiffel
Surabhi BHUYAN Etablissement d'origine: NIT Rourkela India	2017	BTech. 3	100% Univ. Eiffel
Mahfoud LOUDIA Etablissement d'origine: U.Nantes	2016	M2 Pro	70% Univ. Eiffel 30% U.Nantes

Continued on next page

Table 0: Encadrement de stage (Continued)

Mustafa JAFARI	2015	PFE	70% Univ. Eiffel 30% Polytech Nantes
Etablissement d'origine: Polytech Nantes			
Juliette BRIAND Antoine LEMOAL	2014	PFE	70% Univ. Eiffel 30% Polytech Nantes
Etablissement d'origine: Polytech Nantes			
Haochen JIANG	2013	M2	70% Univ. Eiffel 30% EC Nantes
Etablissement d'origine: EC Nantes			
Interactions dans les géomatériaux (sédiments)			
Raphaëlle DEL NEGRO	2019	M2	40% Univ. Eiffel 20% U. Caen 40% INSA Lyon
Etablissement d'origine: Polytech Nantes			
Romain MUNCK	2015	M2	100% Univ. Eiffel
Etablissement d'origine: IMACS MNA Poitiers			
Mahfoud LOUDIA	2015	M1	60% Univ. Eiffel 40% U.Caen
Etablissement d'origine: U.Caen			
Leila SABARD	2014	M1	100% Univ. Eiffel
Etablissement d'origine: UJF Grenoble			
Caroline PAUGAM	2014	M1	100% Univ. Eiffel
Etablissement d'origine: U. Caen			
Maimouna DOSSO	2013	M1	100% Univ. Eiffel
Etablissement d'origine: UPMC			
Cherifi YAZID	2013	M1	60% Univ. Eiffel 40% U.Caen
Etablissement d'origine: U.Caen			
Kazuki YAMAGUCHI	2018	M1	60% Univ. Eiffel 20% U.Caen 20% U. Kyoto
Etablissement d'origine: U.Kyoto			
Takuro AKAMA	2016	M1	60% Univ. Eiffel 20% U.Caen 20% U. Kyoto
Etablissement d'origine: U.Kyoto			
Jishnu CHOUDHURY	2013	BTech.3	100% Univ. Eiffel
Etablissement d'origine: NIT Hamirpur Inde			
Ritesh GUPTA	2013	BTech.3	60% Univ. Eiffel 40% U.Caen
Etablissement d'origine: NIT Hamirpur Inde			

Continued on next page

Table 0: Encadrement de stage (Continued)

Yuki NAKAZAWA	2014	M1	60% Univ. Eiffel 20% U.Caen 20% U. Kyoto
Etablissement d'origine: U. Kyoto			
Fumiaki KIMURA	2013	M1	60% Univ. Eiffel 20% U.Caen 20% U. Kyoto
Etablissement d'origine: U. Kyoto			
Kazufumi SANO	2012	M1	60% Univ. Eiffel 20% U.Caen 20% U. Kyoto
Etablissement d'origine: U. Kyoto			
Interactions dans les géomatériaux : Terre crue (économie circulaire)			
Théo VINCESLAS	2015	M2	60% Univ. Eiffel 20% Polytech Nantes
Etablissement d'origine: Polytech Nantes			
Maxime LANGLAIS	2015	PFE	60% Univ. Eiffel 20% Polytech Nantes
Etablissement d'origine: Polytech Nantes			
Xiao Meng MENG	2014	M2	100% Univ. Eiffel
Etablissement d'origine: EC Nantes			
Xavier DESCHAMPS - Pierre GRISEL	2014	PFE	60% Univ. Eiffel 40% Polytech Nantes
Etablissement d'origine: Polytech Nantes			

Les thèses

Thèses Nationales

Nom	Titre	Porteur	Période
Rajat SHARMA	Air quality evolution at the local scale, in the absence of a calibration reference point.	Univ. Eiffel	2023-2026
Direction: A.Razakamanantsoa - Financement: Clear DOC - Taux: 50%			
B. Obeid*	modélisation des mécanismes d'inhibition et de rabattement de poussières. Application aux chantiers de terrassement	ESTACA (SIS)	2021-2024
Direction: F.Murzyn, A.Razakamanantsoa, B. Muresan-Paslaru - Financement: ESTACA / Région Pdl - Taux: 30%			
L.Verron	Identification des critères de convenance pour la valorisation des terres de déblais dans la construction	Univ. Eiffel (SIS)	2020-2023
Direction: B. Cazacliu (Univ.Eiffel) / M. Duc (Univ. Eiffel), A.Razakamanantsoa (Univ. Eiffel) E.Hamard (Univ.Eiffel) - Financement: Univ. Eiffel / Région PdL - Taux: 20%			

Continued on next page

Table 0: Thèses Nationales (Continued)

J.R. AnsaAsaree*	Développement d'un outil d'aide à la décision pour la valorisation des terres de déblais dans la construction	Univ. Eiffel (SIS)	2020-2023
Direction: D.Deneele (Univ.Eiffel), M.Duc (Univ. Eiffel), A.Razakamanantsoa (Univ. Eiffel), E.Hamard (Univ.Eiffel), B. Cazacliu (Univ. Eiffel) - Financement: ADEME - Taux: 20%			
M.Le Vern*	Étude expérimentale des mécanismes et des conditions d'envol des poussières. Application aux chantiers de terrassement	Univ. Eiffel (SIS)	2019-2021
Direction: F.Larrarte (Univ.Eiffel)F.Murzyn (ESTACA) A.Razakamanantsoa (Univ.Eiffel) - Financement: Région PdL/FNTP - Taux: 30%			
G.Das*	Optimisation de mise en oeuvre et évolution du comportement hydromécanique du traitement de sol à la chaux	Univ. Eiffel (SIS)	2019-2021
Direction: D. Deneele (Univ. Eiffel) A. Razakamanantsoa (Univ. Eiffel) - Financement: CIFRE LHOIST - Taux: 30%			
E.Hamard	Rediscovering of vernacular adaptative construction strategies for sustainable modern building: application to cob and rammed earth	ENTPE Lyon (MEGA)	2014-2017
Direction: Fabbri A., (ENTPE)B. Cazacliu, (Univ. Eiffel) A. Razakamanantsoa (Univ. Eiffel) - Financement: Univ. Eiffel - Taux: 30%			
O.Sediki*	Étude des mécanismes d'instabilité et d'envol des particules en lien avec l'hydratation des sols fins	Lorraine (EMMA)	2015-2018
Direction: M. Hattab (U.Lorraine)A. Razakamanantsoa (Univ. Eiffel) - Financement: CIFRE Vinci - Taux: 40%			

Thèses internationales

Nom	Titre	Porteur	Période
Tahin' ANDRI-AMBELONAN-DRO (Co-tutelle)	Cartographie des crues exceptionnelles à Madagascar à partir de vidéos d'amateurs.	Univ. Eiffel / Univ. Fianarantsoa	2022-2025
Direction: A.Razakamanantsoa - Financement: MADATLAS - Taux: 25%			
Andry RABEARIV- ELO (Co-Direction)	Mobilités et adaptation aux changements climatiques : Méthode cartographique pour l'appui à une politique d'entretien des routes.	Univ. Fianarantsoa	2022-2025
Direction: A.Jullien/A.Razakamanantsoa - Financement: MADATLAS - Taux: 25%			
Larissa RAMIAN-DRISOA (Co-Direction)	Système géo-décisionnel spatio-temporel pour l'adaptation au changement climatique dans le domaine agricole.	Univ. Fianarantsoa	2022-2025
Direction: A.Razakamanantsoa - Financement: MADATLAS - Taux: 20%			
Marielle RAKO-TOZANANY (Co-Direction)	Système géo-décisionnel spatio-temporel pour l'adaptation au changement climatique dans le domaine agricole.	Univ. Fianarantsoa	2022-2025
Direction: A.Razakamanantsoa - Financement: MADATLAS - Taux: 10%			

Table 0: Thèses internationales (Continued)

M. Francisco daSilva** Fine aggregate matrix of soil aggregate cement mixtures : rheological aspects, fatigue and carbonation Univ. Sao Paulo 2021-2024

Direction: Furlan A. (USP), A. Razakamanantsoa (Univ. Eiffel) - Financement: Print N°88887. 588046 / 2020-00 - Taux: 50%

Les Post Docs

Post Doctorants

Nom	Période	Direction	Titre	Enca-drement (%)
Ana Paola Furlan	01/2023-04/2023	Univ. Eiffel	Développement des indicateurs de durabilité des sols stabilisés avec des liants hydrauliques	100
Financement: Université de Sao Paulo				
Ana Paola Furlan	11/2019-04/2020	Univ. Eiffel	Développement des indicateurs de durabilité des sols stabilisés avec des liants hydrauliques	100
Financement: CAPES-PRINT-88887. 371953/2019				
Ouardia Sediki	12/2018-11/2019	Univ. Eiffel	Développement du guide "Recommandations pour la gestion des émissions de poussières et de l'usage de l'eau lors de la circulation sur pistes non revêtues"	100
Financement: FNTP/SPTF				
Ana Paola Furlan	10/2015-06/2016	Univ. Eiffel	Comportement au cisaillement de sédiments traités non saturés	100
Financement: CNPQ Brésil				
Yingjie Liang	10/2014-10/2015	GeM, Univ. Eiffel	Évaluation des voies de valorisation des sédiments de dragage	30
Financement: GIS Lirgec – Région Pays de la Loire				
Le Ngoc Hung	10/2014-10/2015	ECN, CSTB, Univ. Eiffel	Influence du comportement mécanique des sols sur leurs performances hydrodynamiques dans le cadre de l'infiltration à la parcelle	30
Financement: GIS Lirgec – Région Pays de la Loire				

Activite d'Evaluation (participation à des jurys et à des instances ou comités en lien avec l'enseignement)

Membre de comité de sélection de Maître de conférence (section 6o)

Nom	Année	Laboratoire	Université
MCF 4268	2014-2015	Polytech Nantes	Univ. Nantes
MCF 0222	2013-2014	LGCIÉ	INSA de Lyon

Jury de Thèse (examinateur non encadrant)

Nom	Date	Titre	Uni- versité
Mahzar Hussein	26/10/2022	Sustainable reuse of sediments in bio-based materials -Application to fluvial sediments with incorporation of natural Fibers	Uni Lasalle Rouen
Nicolas Poncelet	28/01/2022	Experimental characterization of desiccation cracking of a lime treated silty clay	ULB Bruxelles
Mme Xiao Wang	17/12/2019	Méthodologies de valorisation de sédiments marins mises en œuvre dans des ouvrages géotechniques en Chine	U. Caen
Mme. Boullosa Allariz Beatriz	11/12/2018	Déshydratation des sédiments	U. Caen
Mme. Seifi Sahar	23/11/2018	Conception d'écoliants et/ou éco-matériaux à partir de cendres volantes papetières et laitier moulu	U. Caen
Mme Rinah Andrianatrehina	11/04/2016	Comportement hydromécanique des sols fins compactés au voisinage de la saturation – Application aux remblais routiers	U. Havre

Revue d'articles de journal de rang A (39)

Elsevier Transportation Geotechnics, Construction and building materials, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Applied Clay Science, Water Research.

Springer Geotechnical and Geological Engineering, Clay and Clay Minerals, Water Ressources Management.

MDPI Sustainability

ASCE International Journal of Geomechanics, Journal of Materials In Civil Engineering.

ICE Virtual Library Environnemental Geotechnics, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Geotechnique Letters.

Membre de comité de rédaction de journal

- Depuis 2023: Frontiers in built Environment

Administration De La Recherche**Gestion de projets**

Projets nationaux

Intitulé du projet	Financement	Début/ Fin	Rôle
Merimée PHC Géolocat - Interaction Sol – Atmosphère	Campus France	2013/ 2015	Participant
Montant (k€): - k€ - Partenaires: ED SPIGA/ UPC Barcelone			
Capes - Cofecube (2013-2014)	Campus France	-	-
Montant (k€): - k€ - Partenaires: USP Bresil /ITA Bresil			
Capes - Cofecube	Campus France	2017/ 2018	Porteur
Montant (k€): 6k€ - Partenaires: USP Bresil /GeM -U. Nantes/ INSA Lyon/U Caen			
Economie d'eau (Phase I)	DGITM Convention. 15/349	- 2015	Porteur
Montant (k€): - 50K€ - Partenaires:			
Économie d'eau dans le terrasse- ment (phase II: Thèse CIFRE)	SPTF- F15098	RP3- 2015/ 2018	Porteur
Montant (k€): 120k€ + Thèse - Partenaires: FNTP/UMTM/SPTF/VCT/LEM3			
Condition d'envols - Couche limite proche de surface	FNTP	2018/ 2022	Porteur
Montant (k€): - 55K€ - Partenaires: FNTP			
Guide économie d'eau (Avenant phase II)	Vinci Con- struction Terrassement	Avenant CIFRE jusqu'au 03/2019	Porteur
Montant (k€): - 29K€ - Partenaires: FNTP/UMTM/SPTF/VCT/			
PHC SAKURA 2017	Campus France	-	Participant
Montant (k€): - K€ - Partenaires: Kagawa U./GeM U. Nantes/Ifsttar/Insa Lyon/ U. Caen			
ANR CONACYT – Val USES 2017	ANR PRCI	2017	Participant
Montant (k€): - 280K€ - Partenaires: Lyon 3/ Université de Lyon/ U. Caen			
COVASED:Co-valorisation des sédiments - Phase 1	FUI 6	2014/ 2017	Participant
Montant (k€): - 11,5K€ - Partenaires: Univ. Caen			

Continued on next page

Table 0: Projets nationaux (Continued)

Proper ROAD – CEDR – 2017 - Road Runoff Pollution Management and Mitigation of Environmental Risks	Europe H2020	2017/2018	Participant WP2 - Task 2
Montant (k€): - 30K€ - Partenaires: Aalborg University			
Durabilité de traitement de sol 2017	CIFRE LHOIST	2017/2021	Porteur
Montant (k€): - 115K€ + Thèse - Partenaires: Lhoist Sud Europe			
DGA Technique Terrestre	DGA-TT	2019	Porteur
Montant (k€): - 10K€ - Partenaires: DGA-TT			
Cluster LUNG O2	I Next	2019/2023	WP2 – Task 3: Integrative Respiratory Research from Bench to home/Measure – Env. exposure
Montant (k€): - 300K€ - Partenaires: CHU de Nantes/ Air PdL/ ESTACA/U. Nantes/ECN			
Smart Secure	Urbarisk Lab - LATTTS	2020/2022/2023	Porteur
Montant (k€): - 30K€ - Partenaires: CHU de Nantes/ Lyon3 /ECN			
SCY-TI	Premat-Mat	2023/2025	Porteur
Montant (k€): - 50K€ - Partenaires: Natural Road			
Stabilisation de sol - Enzyme	Natural Road	2023/2024	Porteur
Montant (k€): - 50K€ - Partenaires: Natural Road			
Eco-Liant – Ouvrage Hydraulique	CIM Béton	2022/2024	Porteur
Montant (k€): - 55K€ - Partenaires: Univ Eiffel (GERS-GIE/GERS-SRO)/ Cerema Blois			
Barrage Marquizado	EDF	2022/2025	Participant
Montant (k€): - 10K€ - Partenaires: Univ Eiffel (MAST/GERS-GIE)			

Projets internationaux

Intitulé du projet	Financement	Début/ Fin	Rôle
MADATLAS	AFD-ANR	2021/2026	WP3 Partenariat - WP4 Recherche
Montant (k€): - 3M€ - Partenaires: UF/IRD/UBM/Univ. Eiffel			
Liant alternatif stabilisation de la laterite	AIMCI I-Site	2022/2028	Porteur

Continued on next page

Table 0: Projets internationaux (Continued)

Montant (k€): - 30K€ - Partenaires:
 ESSA, ESPA, CNRIT, U. Kyoto, U.
 Fukuoka, U. Waterloo., INSA Lyon, U.
 Caen

Hub Waste to Wealth	Outil Incitatif Univ Eiffel	2022/ 2028	Porteur
---------------------	--------------------------------	---------------	---------

Montant (k€): - 7K€ - Partenaires: USP
 Sao Paolo, ESSA, ESPA Antananarivo,
 Uni Lasalle Rouen, U. Caen, INSA Lyon,
 U. Nantes, U. Kyoto, U. Fukuoka, U.
 Waterloo

Ecomat	LIA	Depuis 2023	Participant
--------	-----	----------------	-------------

Montant (k€): - K€ - Partenaires: Univ.
 Sherbrooke

Acquisition et Management de moyens d'essais et Gestion de Marché Public, (<15K€)

Année	Réf.	Équipements scientifiques	Financement	Montant (€)
2021	2021FOUR005NTE	Porosimètre	Uni. Eiffel	<150 000
2021	2021FOUR003NTE	Soufflerie Subsonique	Uni. Eiffel	<26 000
2020	-	Compteur de particules (Fidas 100)	Uni. Eiffel	22 100
2020	-	Générateur aérosols RBG 1000	Uni. Eiffel	18 400
2019	2019-UFNA09F	Chambre de carbonatation	LHOIST	20 790
2018	2018-MNA01F	Stéréo PIV 3D HF	Région Pdl – FEDER	247 574
2017	-	Tristar II Plus 3030 – BET	Syndicat Profes- sionnel des Ter- rassiers de France / LHOIST	47 800
2016	-	Compteur de particules (Fidas mo- bile)	DGITM	15 000

Coordination de groupements de recherche (GDR, GIS, ...)

Période	Rôle	Cadre	Porteur
2019-2022	Membre du comité exécutif Lung O ₂ - WP2 « La recherche respiratoire intégrative de la paille au domicile », Task 3 : « Mesurer l'exposition environnementale intérieure et extérieure »	Cluster I-Next Lung Innovation (LUNG O ₂)	CHU de Nantes
Depuis 2020	Coordination du module de captation de polluant, option Environnement, Mobilité, Santé	Cluster LUNG O ₂	École Centrale Nantes
Depuis 2020	Membre du comité de Pilotage de l'option Environnement Mobilité et Santé « Mint »	Cluster LUNG O ₂	École Centrale de Nantes
Depuis 2021	Animation de l'accord cadre Univ. Eiffel et ES-TACA	Accord cadre	Univ. Eiffel et ES-TACA
Depuis 2020	Membre du comité scientifique de l'Observatoire Usumacinta (Mexique)	ANR PRCI Val Uses	U. Lyon, UNAM Mexique

Coordination et participation à des projets de recherche et de formation**Membre de comité d'organisation de conférences****1-conférences nationales**

05/2021	Membre du comité scientifique XVI Colloque Annuel Groupe Français des Argiles (Nantes)	https://gfa2020.sciencesconf.org
---------	--	---

2-conférences internationales

10/2018	Membre du comité d'organisation de la Journée d'Étude des Milieux Poreux (Nantes)	https://jemp2018.sciencesconf.org
06/2016	Membre du comité d'organisation de la Journée Geo-Environmental Engineering (GEE) (Nantes)	http://www.paralia.fr/tempor/GEE-2016n2.pdf

Rayonnement Et Diffusion De La Culture Scientifique

Conférences invités et animation de session

08/2023	Keynote: « Travaux routiers et enjeux du changement climatique » (University of Sao Paulo)	https://www.youtube.com/watch?v=e7SipI7-UCs
10/2020	Keynote: Dust Emission from unpaved road - 2nd International Symposium in Transportation Engineering (University of Sao Paulo)	https://youtu.be/7tuvOo1pdxA
05/2021	Animation de session S4 du XVI Colloque Annuel Groupe Français des Argiles (Univ. Eiffel)	https://gfa2020.sciencesconf.org
10/2016	Chairman de la session S26 Advanced soil mechanics for transportation and agriculture. - Engineering Mechanics Institute Conference, (EMI, ASCE) (Univ. Lorraine)	http://www.lem3.univ-lorraine.fr/2016EMI-IC/

Animation scientifique et technologique

2022	Membre du comité technique de « Thinking Huts » - Impression de Maison
Depuis 2020	Membre du Comité scientifique Cluster Lung Innovation (Lung O2)
Depuis 2020	Membre du Comité scientifique Observatoire de l'USUMACINTA – Mexique
Depuis 2020	Expert en Géotechnique - Projet Hytrased
2019/2021	Animation de l'accord cadre Univ. Eiffel / Estaca
2023	Animation du MOU ESTACA / Univ. Eiffel

Membre actif de réseau de recherche et Association savante

Depuis 2021	Réseau de Recherche France-Mexique MUFAMEX
Depuis 2021	Association Française du Génie Civil (AFGC)
Depuis 2018	French Interpore Chapter (FIC Interpore)
Depuis 2016	Engineering Mechanics Institute, ASCE
Depuis 2016	GdRI Multi-physics and Multiscale Coupling in Geo-environmental Mechanics (GdRI Geomech)
Depuis 2012	Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS)
Depuis 2013	Groupement d'Intérêts Scientifique – L'Institut Ligérien de recherche en Génie Civil et Construction (LiRGeC)

Action de communication et de vulgarisation scientifique

Valorisation des sédiments	https://app.kosmopolead.com/private/assets/gislirgec/videos-publiques/iut-valorisation-sediments/1/original (https://vimeo.com/210430186)	GIS Lirgec
Envois des poussières	http://www.gislirgec.fr/pages/71/interaction-sol-atmosphere (https://vimeo.com/223766838)	GIS Lirgec

Activités d'expertises scientifique et technologique

Depuis 2021	Expertise sur l'installation des plans d'eau d'irrigation	DREAL/ Police de l'eau
2017	Étude de sol pour le compte de la DGA TT	DGA TT
2017	Exécution des terrassements - Réalisation des ouvrages d'étanchéité en sol compacté	NF AFNOR - FD P11-302
2016	Étude barrage de Drennec. Problème de concrétion et érosion	Expertise
2016	Étude préliminaire sur les sédiments issus des casiers de lagunage du Grand Port Maritime de Dunkerque, Projet COVASED (RP2-F16062)	COVASED FUI

Mobilité sortante

Motif du séjour	Université - Localité	Nom du chercheur contact	Année
ANR PRCI Val Uses (Mexique)	LUNAM	Pr. IDM	2018
Projet Economie d'eau (CIFRE VCT)	UPC Barcelone (Espagne)	Pr. Jean Vaunat	2017
Durabilité des géomatériaux (CIFRE - Lhoist)	UP Bruxelles/ Lhoist (Belgique)	Dr. Gontran Herrier	2019
Durabilité des géomatériaux (AIMCI 2019)	Université de Kyoto (Japon)	Pr. Katsumi Takeshi	2019
Durabilité des géomatériaux (AIMCI 2019)	Université de Fukuoka (Japon)	Pr. Sato	2019
Durabilité des géomatériaux (AIMCI 2019)	Université de Antananarive (Madagascar)	Pr. Rakotosaona	2022
Formation (MADATLAS)	Université de Fianarantsoa (Madagascar)	Pr. Hajalalaina Aime Richard	2022
Hub Waste to Wealth (Outil incitatif)	Université de Sao Paulo (Brésil)	Dr. Furlan	2023

Appui Aux Politiques Publics: groupes de travail (GT)

Depuis 2022	Ingénierie Forensique pour l'AFGC
Depuis 2022	Carbonatation des sols traités à la chaux pour le compte de la société du Canal Seine Nord Europe (SCSNE).
Depuis 2022	Comité de Pilotage du Schéma régional des carrières des Pays de la Loire
Depuis 2022	Prestations d'expertises scientifiques sur l'étanchéité des ouvrages de plans d'eau instruits par la police de l'eau pour le compte du DREAL Pdl.
Depuis 2021	Plan régional Santé Environnement Pays de la Loire

Deuxième partie

**SYNTHÈSE DES TRAVAUX DE
RECHERCHE DEPUIS LE DOCTORAT**

Chapitre I

Introduction générale

Dans le contexte du développement durable et compte tenu de la croissance démographique mondiale en milieu urbain, la production de déchets ménager sera de plus en plus importante. Les contraintes socio-economiques et environnementales rendent de plus en plus difficile la construction de nouvelle structure de stockage. Il est ainsi indispensable de penser en amont la meilleure façon pour allonger la durée d'exploitation des infrastructures existantes. Si les techniques de dimensionnement et de construction d'ouvrages en terre sont aujourd'hui parfaitement connues et maîtrisées pour garantir le niveau de portance nécessaire, il y a moins de certitudes sur la performance hydraulique et à la durabilité de ces structures vis à vis des sollicitations physico chimiques de plus en plus importantes. Pour traiter ce problème, il faut concentrer les efforts à différents niveaux :

- (1) à l'échelle de l'ouvrage, il s'agit de construire une structure ayant une capacité de réception de plus en plus importante,
- (2) à l'échelle du déchet, il faut repenser notre mode de consommation et réduire, à la source, la production des déchets non recyclable,
- (3) à l'échelle du matériau, il faut concevoir des matériaux suffisamment résistants pour subir les nombreuses sollicitations combinées telles que :
 - La sollicitation mécanique liée à la charge de déchets contenue dans l'alvéole,
 - La sollicitation hydraulique liée à l'infiltration d'eau de pluie ou de ruissellement dans la structure,
 - la sollicitation thermique qui accompagne le process de biodégradation ,
 - la sollicitation chimique liée à la lixiviation des déchets.

Mon travail de recherche mené depuis la thèse a été centré sur l'étude de la durabilité de performance de géomatériaux d'étanchéité d'installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND). Ma contribution a été focalisée sur l'acquisition des connaissances autour du transfert en milieu poreux dans les géomatériaux d'étanchéité : LIXAR I, LIXAR II, BQT OSEO ANVAR, Bio-reacteur. Les géomatériaux concernés sont des géosynthétiques bentonitiques (GSB) et des sols traités compactés.

Une démarche méthodologique basée sur le couplage hydromécanique et chimique a été proposée et développé pour étudier le comportement des géomatériaux renforcés par ajout de polymère. L'analyse des besoins en caractérisations hydromécaniques des mélanges de géomatériaux d'origine minérale ou organique a permis de mettre en évidence les limites des méthodes de caractérisation disponibles telles que l'essai de gonflement libre et la mesure de perméabilité. Le travail

opérationnel a été de développer un moyen de mesure et des indicateurs simples et rapides pour quantifier la durabilité des géomatériaux, les expérimentations disponibles pouvant durer plusieurs mois. A la suite de ce travail, l'analyse de la pertinence des indicateurs de performances existants pour qualifier les géomatériaux a été effectuée.

Le premier chantier a consisté à identifier une alternative à l'essai de perméabilité conventionnel qui est une référence pour le dimensionnement des barrières d'étanchéités. Un essai de filtration amélioré a été proposé pour accéder rapidement au coefficient de perméabilité du matériau (Razakamanantsoa, Barast et Djeran-Maigre 2011). L'essai "filtre presse", selon la recommandation de l'American Petroleum Institute (API), a été amélioré pour accéder directement au coefficient de perméabilité d'un sol compacté. Cet essai consiste à appliquer une contrainte hydraulique élevée pour faire passer le fluide d'essai à travers une matrice de sol compacté ou de bentonite. En connaissant les paramètres de mise en œuvre et en considérant le caractère rhéofluidifiant du matériau testé, il a été possible d'accéder d'une manière relativement simple et rigoureuse à la cinétique de la perméabilité. Les premiers résultats ont montré le rôle fondamental du fluide d'essai sur la qualité des résultats. Il a été constaté que l'impact du fluide sur la modification de la chimie du milieu ne dépend pas de la durée de l'écoulement mais de la qualité du contact entre le fluide d'essai et les composants de la matrice poreuse à tester.

Le second chantier abordé consistait à étudier la possibilité d'amélioration de la durabilité de la performance des géomatériaux existants. Au-delà de la performance hydraulique, il a été démontré qu'il est indispensable d'étudier non seulement les performances mécaniques du géomatériau mais aussi ses performances hydrauliques et chimiques, ceci afin de renforcer la démarche d'analyse de la durabilité. L'ajout de polymère a été la piste explorée. Les polymères sont reconnus par leur capacité d'expansion et de rétention de polluants. Cependant, l'affinité de ce genre de matériau avec les matériaux d'étanchéité conventionnels reste inconnue dans le contexte des ISDND. Plusieurs de mes travaux ont permis de constater un certain nombre de limites aux essais standards classiquement utilisés; Ainsi, l'analyse fine du mécanisme de gonflement de la bentonite à l'aide de l'essai de gonflement libre a par exemple permis de montrer la limite de la représentativité de cet essai lorsqu'on est confronté à un mélange bentonite/polymère soumis à du lixiviat synthétique (Razakamanantsoa, Barast et Djeran-maigre 2012, Kazuki et al. 2017).

En analysant la contribution du mélange bentonite/polymère avec du sol sur le comportement aux cisaillements de la matrice de sol compacté (Razakamanantsoa et Djeran-Maigre 2016), le rôle des polymères dans la modification des propriétés de cohésion de la matrice poreuse a pu être quantifié. Il a ainsi été démontré que le polymère utilisé, selon sa nature, joue un rôle fondamental pour retenir les polluants d'origines minérales. L'introduction de l'analyse microstructurale dans la démarche d'investigation a permis de mettre en évidence des différences de texture entre les mélanges bentonitiques et bentonites/polymères.

Les différents travaux de recherches que j'ai mené pendant la thèse ont montré la limite des méthodes d'investigation conventionnels pour étudier la durabilité des géomatériaux : le mélange de bentonite polymère permet d'avoir une performance hydraulique 100 fois plus élevée que les géomatériaux standards, le concept de mesure de l'indice de gonflement libre comme indicateur fiable pour évaluer la capacité gonflante des géomatériaux d'étanchéité a atteint ses limites. Le caractère rhéo-fluidifiant du mélange de bentonite polymère génère un biais dans la qualité de mesure. Il a ainsi été nécessaire d'introduire une approche rhéologique pour décrire les phénomènes. Ainsi, la représentation rhéologique de l'essai de gonflement/essai de tassement œdométrique a été étudiée (Barast et al. 2017). Cette étude rhéologique a démontré la pertinence des mesures rhéologiques (viscosité, contrainte de cisaillement) pour compléter les essais de gonflement libre d'une manière rigoureuse en comparaison avec le gonflement œdométrique. En complément de

la rhéologie, la capacité d'adsorption en eau des matériaux d'étanchéités a été étudiés à l'aide de l'essai "Ensling test device" (Razakamanantsoa, Djeran-Maigre et Barast 2016). Il a été démontré l'importance de la capacité d'adsorption de la bentonite et la corrélation directe avec sa performance hydromécanique.

Ces travaux de recherche ont permis ainsi de répondre à des verrous scientifiques permettant de comprendre, de suivre et de quantifier les mécanismes qui gouvernent la durabilité des géomatériaux d'étanchéité. sous ses deux formes : Géosynthétique Bentonitique (GSB) et sol traité compacté.

Les résultats majeurs peuvent être présentés comme suit :

- (1) Développement de nouveau matériau d'étanchéité nécessitant de repenser en profondeur la stratégie de mesure de la performance hydraulique par rapport à la démarche conventionnelle : Limite de l'efficacité de l'Indice de gonflement libre, la limite de la pertinence du test de perméabilité avec de l'eau déminéralisée et la pertinence de la mesure de la cinétique en comparaison pour l'étude de la durabilité de performance.
- (2) Étude des différents facteurs qui influent sur la performance hydraulique des nouveaux géomatériaux dès la mise en œuvre : nature de fluide, capacité d'adsorption, mécanisme de lixiviation et l'impact sur la performance hydromécanique
- (3) Introduction du couplage hydromécanique et chimique pour comprendre le mécanisme qui gouverne le lien entre la performance mécanique et la réponse physicochimique résultant de la sollicitation par le lixiviat.
- (4) Développement d'indicateurs : La rhéologie semble être très pertinent pour compléter l'essai d'indice de gonflement libre pour quantifier le gain de performance d'un mélange de bentonite avec du polymère, les propriétés d'adsorptions semblent être un élément fondamental pour la qualification de la capacité d'hydratation de la bentonite par capillarité.
- (5) Dans le cas d'une matrice de bentonite compacté, il a été démontré que le suivi du nombre de volume des pores traversés par le fluide d'essai pour substituer le suivi de la cinétique de l'évolution de la conductivité hydraulique permet de matérialiser les échanges physico chimiques qui s'opère dans la matrice poreuse avec la solution de percolation. Ce suivi permet également de juger la compactibilité du fluide avec le matériau testé. Le travail de thèse a permis de montrer que le suivie des paramètres physiques pH et EC sont suffisants pour qualifier l'équilibre des échanges ioniques dans le milieu étudié.

Ces travaux ont permis d'avancer sur l'état de connaissance dans les géomatériaux d'étanchéité. Cependant, plusieurs questions restent encore en suspens concernant l'étude de comportement des matériaux d'étanchéité :

- L'étude de la performance hydromécanique des géomatériaux proposés a été focalisé sur la bentonite et le mélange bentonitique avec polymère. Quelle est la pertinence et l'efficacité de la proposition de formulation, dans le cas des sols traités et compactés (compacted clay Liner CCL)?
- Le rôle de la pré hydratation pour améliorer la performance hydromécanique des géomatériaux d'étanchéité a été une piste proposée mais sa quantification avec les essais de laboratoires et in situ restent peut évident et peu exploitée. Cet axe de recherche permet d'aborder l'Influence de la nature de fluide et la représentativité de celui-ci sur l'étude du comportement hydromécanique du matériaux?

- L'étude de la mise en œuvre des géomatériaux d'étanchéité met en évidence des questions relatives à leur performance : humidification, compactage, trafic... Quelle serait la transposition de la démarche dans un autre domaine? Notamment pour traiter les questions scientifiques dans le domaine du terrassement. Cette fois ci, l'objectif serait d'étudier finement le mécanisme qui gouvernent la performance mécanique du sol compacté.
- La mise en évidence du rôle de la capillarité témoigne de la contribution des mécanismes de non saturation dans le gain de performance hydraulique des géomatériaux d'étanchéités. Le même questionnement se pose sur la part quantitative entre l'effet du traitement au liant, la prise et la contribution de la non saturation sur le gain de performance mécanique des sols traités.
- L'importance de la connaissance fine de l'évolution de la microstructure est une évidence. Cette évolution est régulièrement mise en évidence comme une preuve qualitative. L'utilisation du couplage hydromécanique et chimique est ainsi indispensable pour étudier la durabilité des matériaux. L'apport du couplage combiné HMC avec la microstructure quantitative s'avère une piste de recherche très intéressante à exploiter pour pouvoir quantifier l'évolution de la durabilité d'une matrice poreuse.
- Comportement de la matrice poreuse sous sollicitation cyclique et environnementale :
L'étude de l'effectivité des différentes solutions proposés dans la littérature pour maintenir ou prolonger la durabilité des performances hydrauliques des géomatériaux d'étanchéités est un aspect à investiguer : pré-hydratation, ajout de polymère.
Dans le domaine du terrassement, à la différence des installations de stockages, le type de chargement mécanique est relativement différent. La circulation cyclique sur les pistes non revêtues peut être à l'origine d'instabilité hydromécanique de surface source d'endommagement.
L'analyse de durabilité de laboratoire souffre de manque de retour d'expérience des ouvrages réels. Ce point constitue un élément clé de la suite des études.

ORGANISATION DU RAPPORT DE SYNTHÈSE DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Le rapport de synthèse est articulé en trois grandes parties :

Partie 1 : Etude du comportement des géomatériaux d'étanchéité et de la transition vers l'application aux terrassements

Dans cette partie sera abordé la démarche d'étude basée sur le développement d'indicateurs et de moyens d'essai pour compléter, voire remplacer les mesures de conductivités hydrauliques connues pour leur complexité. La démarche de couplage Hydromécanique (HM) et l'intégration du suivie physico chimique (HMC) y seront détaillées.

Partie 2 : Analyse de la structure interne des sols compactés et assimilés

Cette partie se concentrera sur l'approche d'étude multi-échelle avec la prise en compte de la microstructure de la matrice de sol compacté (HMC μ) pour quantifier et expliciter les différents mécanismes mis en évidence : l'instabilité liée à l'hydratation, l'importance de la mise en œuvre, dont le compactage par pétrissage, la nature de la solution des fluides d'essai, etc...

Partie 3 : Études des interactions sol/atmosphère à la surface des sols compactés.

Dans un premier temps, il s'agit de d'étudier l'instabilité de surface en lien avec l'hydratation. puis, je m'intéresserai au mécanisme multiphysique qui gouverne l'envol des poussières dans couche limite de faible épaisseur. Cette partie présente une démarche innovante qui comprend l'étude du couplage multiphysique et la prise en compte des interactions entre sols et atmosphère, en mécanique des fluides et en mécanique des solides.

Chapitre II

Comportement des géomatériaux d'étanchéité

1 Contexte et problématiques

1.1 Les installations de stockages de déchets non dangereux (ISDND)

L'évolution démographique et l'évolution du mode de fonctionnement des villes entraînent une production croissante de déchets ménagers. Selon l'ADEME, la France produit en moyenne 92 millions de tonnes de déchets inertes par an, soit 27% des déchets produits par les ménages.

Le choix du lieu d'implantation des nouvelles structures d'installation de traitement et de stockage de déchets (Figure 1) est souvent un sujet sensible et litigieux en raison des nuisances écologiques, des pertes d'intérêt économique et d'autres considérations similaires (Vincent et al. 2017). Selon un rapport du sénat (Soulage 2010), il a été mis en évidence une tendance à la baisse du nombre d'ISDND qui voient le jour sur le territoire national, soit 1 à 2 par an.

La question relative à l'optimisation de la conception des ISDND devient une préoccupation stratégique pour les municipalités et les villes. Une alvéole d'une ISDND est composée d'une structure de fond qui vise à protéger la nappe phréatique, ainsi que d'une structure de couverture conçue pour préserver l'ouvrage des sollicitations externes, telles que l'environnement, la faune et la flore. (Figure 2).

L'évaluation de la performance hydromécanique des ISDND revêt une importance fondamentale pour les exploitants. Dans le but d'augmenter la durée d'exploitation des ISDND et leur capacité de stockage des déchets, les programmes de recherche Lixar I et Lixar II ont permis de mettre en évidence les différents facteurs qui influencent la performance des ISDND.

Pour permettre une accélération de la biodégradation des composantes organiques des déchets, l'eau de pluie infiltrée dans les déchets (lixiviat) est collectée au fond du dispositif de stockage pour être réinjectée en amont des alvéoles. L'ensemble du mécanisme entraîne une production de méthane et une réduction de volume suivi d'un tassement du déchet en place. Le contact permanent entre la barrière de sécurité et le lixiviat, chargé en éléments organiques et minérales dissous, peut la fragiliser et la rendre vulnérable. (Razakamanantsoa 2009).

Le dispositif d'étanchéité en fond des alvéoles de stockages est composé de deux types de barrières de sécurité. La première, qui est au contact direct avec le lixiviat, est appelée barrière active. Cette structure contient un système de drainage composé d'une géomembrane étanche et de géosynthétique bentonitique (GSB). La deuxième est une barrière passive composée de deux couches

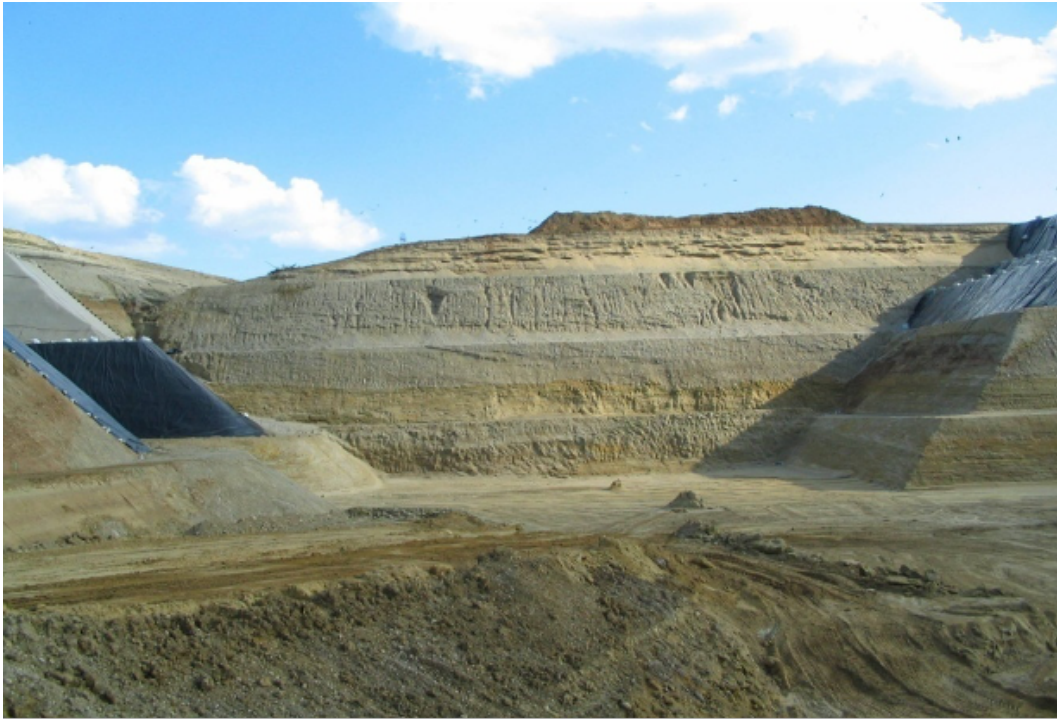


FIGURE 1 – Installation de stockage de déchets non dangereux (ISDND), site de Chatuzange le Goubet (26)

de sols compactés : une couche de sol compacté de 1 mètre d'épaisseur dont le coefficient de perméabilité doit être inférieur à 10^{-9} m/s et 5 mètres de couches de sol compacté avec un coefficient de perméabilité inférieur à 10^{-6} m/s. Ces deux barrières servent à la fois d'élément de support du chargement mécanique généré par le poids propre du déchet et de protection de prévention en cas de fuite de lixiviat au niveau de la barrière de sécurité active, ou du moins pour ralentir le risque de contamination de la nappe phréatique proche.

L'étude de l'évolution de la performance mécanique couplée à la résistance chimique du système sous sollicitation hydraulique s'avère indispensable pour comprendre et décrire le mécanisme de dégradation ou d'amélioration de la performance Hydromécanique et Chimique (HMC) et de la cinétique d'évolution des barrières. La considération de la durabilité de la performance HMC de l'infrastructure de stockage de déchets est intimement liée à la nature du géomatériau de constitution et aux différentes interactions qui s'opèrent dans la structure matricielle du géomatériau (endogènes). Les géomatériaux d'étanchéités subissent également des contraintes externes à la matrice du géomatériau (exogènes), liées essentiellement aux interactions avec l'environnement, notamment avec la faune et la flore.

Placés en couverture des alvéoles de stockages, Les géomatériaux de couverture subissent des déformations dues à la méthanisation, au tassement résiduel des déchets, aux infiltrations d'eau de pluie résultant des fissurations dues au retrait de séchage ou au développement racinaire des plantes qui recouvrent la couverture. Ces déformations et fissures contribuent à fragiliser durablement la structure et à dégrader la performance d'étanchéité de l'ensemble de la structure. Les animaux tels que les rongeurs ou les oiseaux peuvent aussi causer divers dommages physiques à la couverture.

les géomatériaux constituant le fond du stockage jouent un rôle clé dans la préservation de

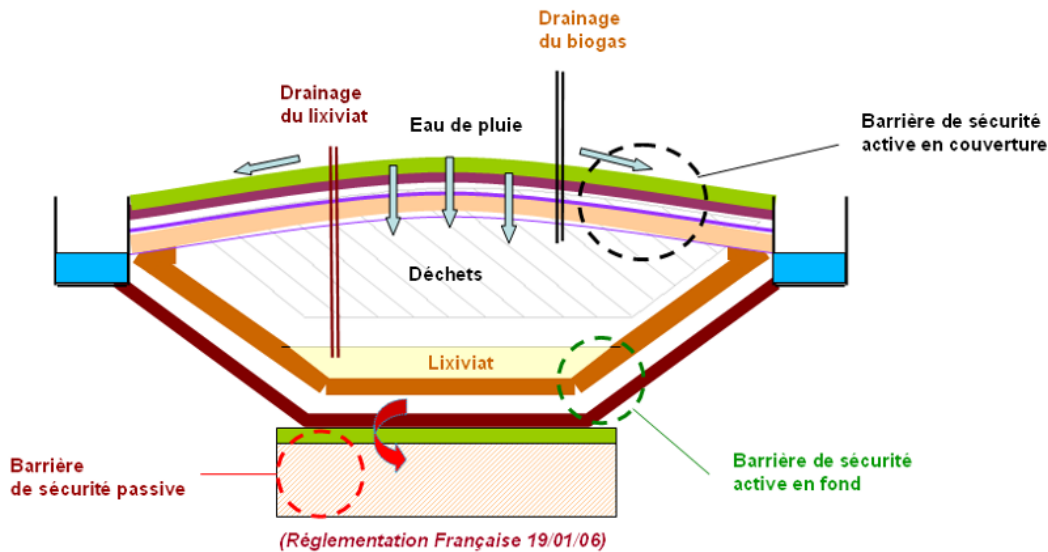


FIGURE 2 – Description schématique d’une installation de stockage de déchets non dangereux (ISDND)

l’intégrité et de la sécurité de l’ensemble de l’infrastructure de stockage, en assurant la résistance hydromécanique et la protection contre les pathologies liées aux conditions environnementales et aux déchets entreposés (fissuration, poinçonnement, lixiviation etc. .), de la construction jusqu’à la fin de vie de la structure.

Les ISDND sont donc conçu avec des barrières ouvragées dimensionnées pour prévenir des contaminations directes et indirectes de la nappe phréatique par la lixiviation des déchets.

Pour traiter d’une manière approfondie l’étude de durabilité des ISDND, il est ainsi naturel de se focaliser en premier lieu sur ce qui se passe dans la partie inférieure de l’ouvrage de stockage.

1.2 Géomatériaux d’étanchéité et barrières ouvragées

Pour rappel, le fond de stockage des alvéoles de ISDND peut être équipé d’une double structure : la barrière active, constituée de géosynthétique bentonitique (GSB) et la barrière passive, constituée de sol compacté, amendé à l’aide de bentonite ou de Kaolinite (5 à 10% de la masse sèche) (Figure 3). La conception des barrières ouvragées est basée sur des critères de mise en œuvre préconisés selon les réglementations en vigueur, notamment sur l’ouvrabilité ou sur la mise en œuvre.

Les ISDND sont conçus pour une durée d’exploitation d’au minimum 30 ans. Cette durée de vie correspond à la durée nécessaire pour que l’eau puisse traverser une couche de sol compacté de perméabilité égale à 10^{-9} m/s, ce qui correspond à un sol compacté de 1 mètre d’épaisseur. La perméabilité d’un matériau est calculée à partir de son coefficient de perméabilité, mais cela ne tient pas compte de la tenue mécanique et physico-chimique de l’ouvrage.

1.3 Performance hydraulique des géomatériaux

Les matériaux qui assurent l’étanchéité des barrières ouvragées sont constitués de bentonite sodique naturelle ou de bentonite calcique activée. Du fait de la raréfaction des bentonites sodiques naturelles de type Wyoming, la bentonite calcique activée est recommandée par les producteurs.

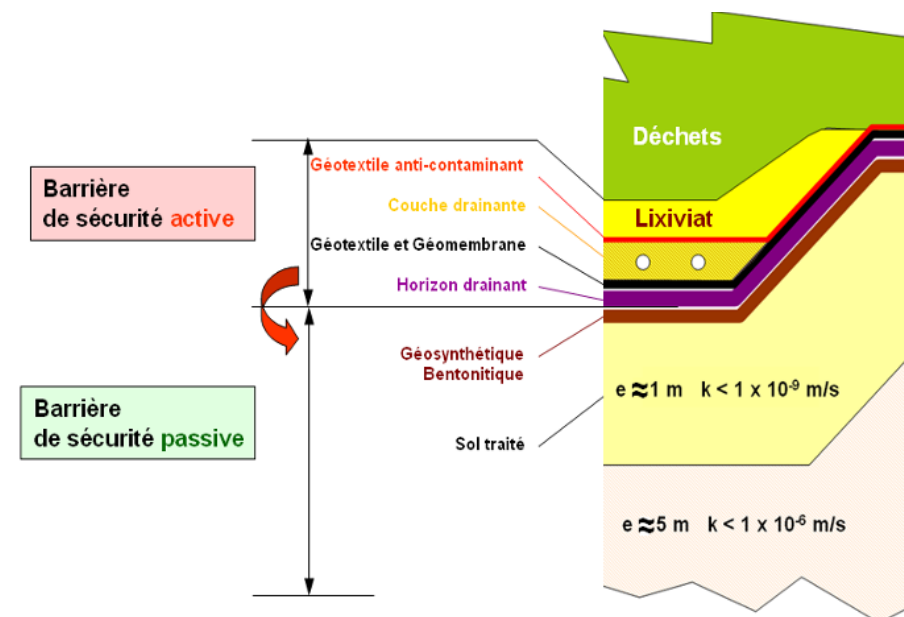


FIGURE 3 – Vue de profil des constituants d'une barrières de sécurité

Comme mentionné précédemment, les géomatériaux d'étanchéité sont amenés, au cours de leur durée de vie, à subir différentes et sévères sollicitations hydromécaniques et chimiques. Ces sollicitations peuvent modifier significativement les performances de ces géomatériaux au cours du temps.

La performance hydraulique des géomatériaux d'étanchéité est quantifiée à l'aide de l'essai de gonflement libre (NF P 84 703) et de la mesure de conductivité hydraulique de la bentonite. Ces caractéristiques sont essentielles pour s'assurer que les géomatériaux auront des propriétés d'étanchéité et d'auto-cicatrisation en cas de poinçonnement de la barrière ouvragée par des objets provenant des déchets.

Le gonflement d'une bentonite résulte de l'intercalation des feuillets de bentonite par des molécules d'eau immobiles. La déformation cumulée de la matrice formée par le gel de bentonite et de l'eau correspond au gonflement libre (Figure 4). Cette intercalation des feuillets de bentonites peut être plus de 100 fois plus importante dans le cas d'une bentonite sodique comparée à une bentonite calcique.

Le mécanisme d'intercalation des feuillets de bentonites s'accompagne essentiellement d'un développement de ponts hydrogène et de l'attraction Coulombienne, dont l'importance dépend de la force ionique des éléments minérales contenu dans le percolât. Dans le cas d'un GSB, le gonflement de la bentonite est inhibé en épaisseur grâce au géotextile et/ou géomembranes. Cette configuration permet de maintenir l'eau immobile dans la structure. L'écoulement de l'eau à travers la structure de GSB est ainsi empêchée, d'où la faible conductivité hydraulique. En revanche, la faible conductivité hydraulique d'un sol compacté amendé avec de la bentonite est essentiellement attribuée au gel formé par l'eau interstitielle et la bentonite. Ce gel alors va compléter les vides présents dans la matrice poreuse.

La performance hydraulique des bentonites est également impactée par les propriétés physico-chimiques des lixiviats. Le lixiviat résulte essentiellement de la percolation de l'eau d'infiltration à travers les déchets contenus dans les alvéoles de stockage. Il est ainsi chargé de composantes

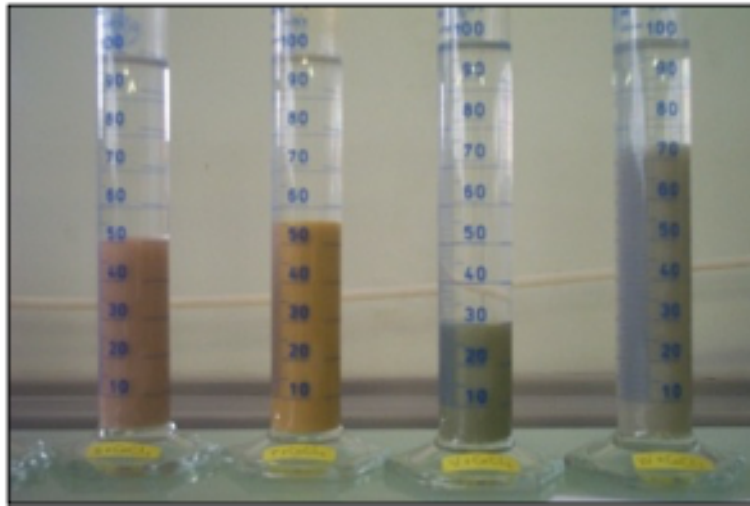


FIGURE 4 – Essai de gonflement libre selon la norme NF P 84 703

minérales ou organiques issus du milieu. La présence de dispositifs efficaces pour assurer le drainage de lixiviat est donc fondamentale pour la tenue dans le temps des ouvrages d'étanchéité. Au contact direct ou indirect avec du lixiviat artificiel, le Géosynthétique bentonitique (GSB) ou le sol compacté vont perdre leur performance hydraulique en raison de la dissolution des ions sodium disponibles dans la bentonite, qui sont alors remplacés par du Calcium (Ca^{2+}) ou du Magnésium (Mg^{2+}). Ainsi, le mécanisme de remplacement s'accompagne de la perte irréversible de la capacité gonflante de la bentonite. Le flux d'eau d'infiltration favorise le transport des éléments minéraux dissout. Ce mécanisme de dissolution et de transport résulte de la baisse de performance hydraulique de l'ouvrage d'étanchéité.

2 Interactions dans les géomatériaux

Dans le contexte des ISDND, les barrières ouvragées sont essentiellement constituées par de sol de classe Géotechnique B4/B5 avec une conductivité hydraulique voisine de 10^{-6} m/s. Ces matériaux ont une bonne tenue de structure mais présente une performance hydraulique médiocre. Les différentes solutions pour améliorer leur performance hydraulique sans générer une modification majeure au niveau des propriétés de structure de l'ouvrage consiste à rajouter de la bentonite, seule ou mélangée avec du polymère, et ainsi renforcer leur résistance chimique.

2.1 Propriétés de gonflement dans les géomatériaux d'étanchéité (Kazuki et al. 2017)

Les résultats précédents démontrent de la sensibilité des bentonites vis-à-vis du fluide d'imbibition composée de lixiviat synthétique. Le comportement des bentonites est ainsi gouverné par la nature ce fluide d'imbibition. Par ailleurs, la nature de la bentonite renseigne sur sa sensibilité chimique. Par exemple, une bentonite sodique présente une bonne performance hydraulique, cependant elle peut présenter une perte de performance significative au contact avec un lixiviat contenant des composantes à fortes forces ioniques.

Plusieurs solutions sont présentées dans la littérature pour augmenter la performance hydraulique et la résistivité chimique : on distingue essentiellement le traitement par pré-hydratation,

et le renforcement par ajout de polymère. La pré-hydratation consiste à humidifier la bentonite à l'aide de l'eau faiblement minéralisée. Le traitement par ajout de polymère consiste à mélanger de la bentonite en poudre ou en granules avec du polymère en poudre.

Les deux solutions ont été analysés en termes de performance au gonflement et en termes de conductivité hydraulique.

L'étude de la contribution de la pré-hydratation ou de l'ajout de polymère sur le gonflement a été réalisée en 2016 (Kazuki et al. 2017). A cette occasion, des essais de gonflement libre ont été réalisés sur trois bentonites calciques activés avec trois types de fluide : un polymère de NaCl à $10^{-3}M$, du lixiviat synthétique dont la composition est similaire au lixiviat présent dans les installations de stockage de déchets ménagers courants, et un polymère de $CaCl_2$. L'analyse statistique réalisée sur des résultats d'essai de gonflement libre a montré que la pré-hydratation retarde l'effet du fluide de contact sur la capacité de gonflement des bentonites testées. En revanche, le suivi de la conductivité électrique des fluides d'essais a montré une contribution contrastée des polymères sur le gonflement. Il faut cependant souligner une stabilité chimique des bentonites traités avec les deux types de polymères.

Cette étude a montré la limite de l'essai de gonflement libre pour mesurer les propriétés de gonflement d'un mélange binaire, organique et minérale. La durée de contact entre le fluide et la matrice granulaire, c'est à dire le temps de séjour du fluide dans la matrice granulaire, est ainsi fondamentale pour l'évaluation de la durabilité d'une matrice poreuse sous sollicitation hydromécanique et chimique.

2.2 Description rhéologique du gonflement de bentonite-polymère (Barast et al. 2017)

L'ajout de polymère a mis en évidence la limitation des méthodes de quantification simplifiée de la performance hydraulique des mélanges avec la bentonite. Il a été proposé d'utiliser la rhéologie (polymère – gel de bentonite) pour décrire finement le comportement du mélange de bentonite/polymère. Une étude comparative a été menée afin de vérifier les similitudes entre la rhéologie, les essais de gonflements libres et les essais oedométriques. Le gonflement libre (3D) et le gonflement uniaxial oedométrique (1D) ont été étudiés par la rhéologie. Deux bentonites calciques naturelles, et 3 bentonites calciques activées ont été étudiées. Un indicateur basé sur la rhéologie a été développé pour pouvoir faire une comparaison. En intégrant le coefficient d'aplatissement des feuillettes d'argiles dans l'exploitation de la rhéologie, on arrive à décrire finement le gonflement libre de toutes les bentonites testées. Ce n'était pas le cas pour l'essai oedométrique. La rhéologie constitue ainsi un bon indicateur pour décrire le gonflement des bentonites seules ou mélangées avec le polymère. Cet essai présente l'avantage de décrire finement le comportement des mélanges réalisés avec de la bentonite (d'origine minérale) et du polymère (d'origine organique).

2.3 Apport de l'observation microstructurale pour l'étude de la durabilité hydromécanique de géomatériaux compactés

Les contributions de la pré-hydratation et de l'ajout de polymère sur la conductivité hydraulique et sur la résistance aux cisaillements des sols compactés contenant une faible quantité de bentonite polymère ont été étudiés (Razakamanantsoa, Djeran-Maigre et Barast 2016).

L'étude a été réalisée avec du sable de fonderie mélangé à, de la bentonite calcique activée seule (B), du polymère hydrosoluble et poly ionique de charge positive (BP1) plus importante et du polymère poly-ionique avec une charge négative (BP2) plus importante.

Des essais de perméabilités ont été réalisés pour mettre en évidence l'influence de la pré-hydratation et des polymères. Les résultats montrent que la préhydratation permet de retarder l'effet de l'agressivité du fluide d'essai (lixiviat). La dissolution des ions « Na » et « Ca » semble être importante par rapport aux autres configurations testés. Sous l'effet du lixiviat, la bentonite contenue dans le mélange B et BP1 semblent être désactivés et se comportent comme des « filler ». La performance du mélange BP2 peut être expliquée par la capacité dispersante et la résistance chimique du polymère P2.

Les essais de cisaillements ont montré que l'ajout de bentonite seule dans le sol compacté permet d'augmenter la cohésion du mélange mais diminue la résistance au cisaillement de la matrice de sol. L'ajout de polymère dans le mélange bentonite sol permet de maintenir un niveau de cohésion similaire au sol sans bentonite. Les deux types de polymères ont contribué à l'augmentation de l'angle de frottement interne de la matrice de sol.

Plusieurs éléments de réponses découlent de cette étude. Ainsi, dans le cas des barrières ouvragées contenant essentiellement de la bentonite, la pré-hydratation joue un rôle retardateur de l'effet de la lixiviation sans l'atténuer. L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) confirme que le mélange bentonite/polymère forme un gel homogène une fois hydraté. C'est cette structure qui remplit les vides et les interstices dans une matrice granulaire.

La réaction du mélange de bentonite et de polymère au contact du fluide d'essai dépend de la nature des charges électriques de surface. Une surcharge en cations du polymère semble favoriser l'agrégation du mélange. Cette agrégation se matérialise par un gonflement plus élevé non quantifiable avec l'essai de gonflement libre standard. En revanche, une surcharge en anion favorise la dispersion de l'ensemble générant ainsi une conductivité hydraulique de plus en plus faible.

L'évolution temporelle de la performance hydraulique semble être insuffisante pour mettre en évidence les mécanismes d'interactions mis en œuvre dans la matrice poreuse. Concrètement, l'évolution temporelle de la performance hydraulique correspond au flux d'écoulement à travers la matrice poreuse, tandis que les mécanismes d'interaction en question semblent être étroitement liés à la durée de séjour du fluide dans la matrice.

3 Couplage hydromécaniques et chimiques combiné avec l'observation microstructurale

3.1 Degré de compactage et évolution de la conductivité hydraulique et de la microstructure du sol

Dans le cas du sol granulaire compacté, la bentonite seule ou mélangée avec du polymère, au contact avec de l'eau, forme un gel homogène. D'après les observations au microscope électronique à balayage, le gel tapisse les interstices de la matrice poreuse (Figure 5). Il est admis dans la littérature que l'écoulement de l'eau dans une matrice poreuse s'effectue via les chemins les plus simple d'accès. La condition d'écoulement dépend ainsi de plusieurs facteurs : constrictivité, tortuosité, interconnexion et morphologie des pores... Le rôle de ces différents facteurs est souvent négligé dans les modèles de prédictions de la perméabilité.

Les modèles de prédiction de la conductivité hydraulique récentes sont souvent complexes ou empiriques et négligent les différents aspects liés à la structure granulaire et à la matrice poreuse du sol (Van Genuchten, Mualem, Carman, Kozeny, Katz-Tompson, Brooks and Corey...). L'évaluation de la perméabilité est une question relativement courante dans le domaine du béton, mais moins évidente pour le sol, à cause de l'hétérogénéité naturelle du matériau. D'autant plus que

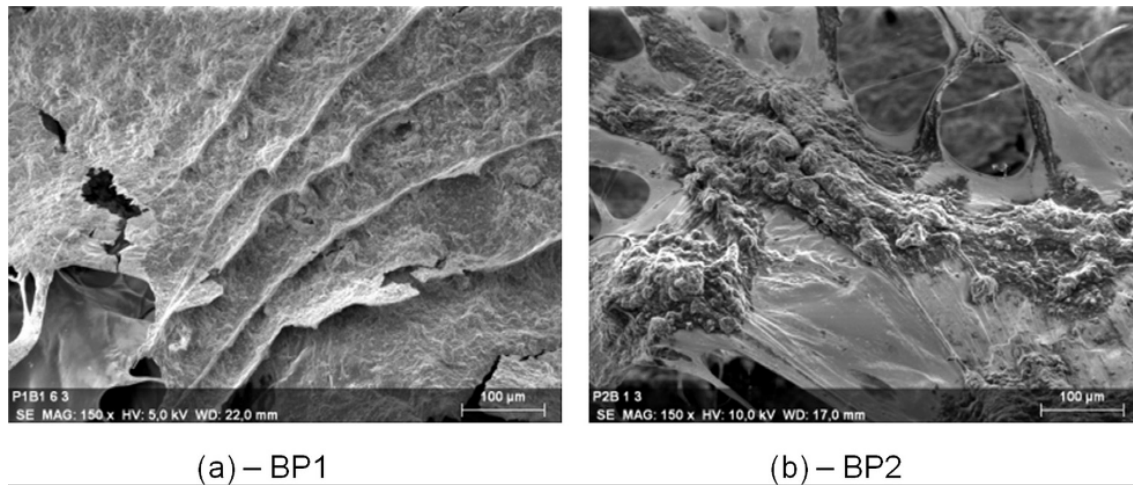


FIGURE 5 – Image MEB des deux mélanges de bentonites BP1(a) et BP2(b)

les deux géomatériaux présentent des caractéristiques fondamentalement différentes : le béton est formé à partir d'une structure relativement homogène tandis que le sol dépend à la fois des propriétés des matériaux (distribution granulaire), de la mise en œuvre (niveau de compactage) et de la structure granulaire (indice des vides). Du point de vue opérationnel, la prédiction de la perméabilité de sol compacté est une question importante, mais la mesure de conductivité hydraulique est relativement longue. A titre d'exemple, un essai de perméabilité de matériaux de 10^{-9} m/s peut durer facilement 2 mois.

Dans le domaine du béton, l'écoulement de fluide dans la matrice poreuse est souvent modélisé à l'aide de modèles capillaires ou tubulaires de différentes sections (Sammartino, Amiri et Aït-Mokhtar 1999). Cependant, ce mode d'écoulement est peu fréquent dans une matrice de sol compacté. Dans le domaine du béton, Aït Mokhtar (1999) avait intégré, dans son modèle de prédiction de la conductivité hydraulique, la distribution des pores obtenues par la porosimétrie au mercure (MIP). Les pores sont considérés comme des pores de formes cylindriques parallèles, de différentes sections. O. Amiri (Amiri, Aït-Mokhtar et Sarhani 2005) à son tour, a proposé un modèle de prédiction qui intègre la tortuosité et la constrictivité des pores avec les mêmes hypothèses. Ce dernier modèle se rapproche de ce qu'on peut observer avec le sol.

Pour prendre en compte la tortuosité des pores qui sont inter-connectés, un modèle de prédiction de la perméabilité a été proposé (Ranaivomanana, Razakamanantsoa et Ouali 2017). Il considère à la fois la structure (distribution des pores), à l'aide de la distribution granulaire, et le niveau de compacité par rapport à la référence Proctor. Cette approche permet de prendre en compte l'interconnexion entre le réseau des pores dans le sol. Quatre types de sol de chantier et quatre niveaux de compacité (85%, 95%, 100% et 105% de l'optimum Proctor) ont été étudiés pour mettre en évidence la contribution du niveau de compactage. L'influence de la différence de densité des géomatériaux sur l'évolution de la conductivité hydraulique a été étudiée. Les résultats du modèle de prédiction montrent un résultat satisfaisant pour l'ensemble des sols testés sauf pour l'altérite. Ce comportement de l'altérite a été associé à la friabilité de ce matériau. L'altérite est un matériau lité et friable sous l'effet du compactage. L'altérite est considérée comme un matériau évolutif!

Il a été confirmé également que la structure de sol compacté présente une distribution porale bimodale. Il est admis dans la communauté scientifique que l'écoulement d'eau qui régle la conductivité hydraulique s'effectue principalement au niveau des pores de grandes tailles (macro-pores) connectés entre eux (Figure 6).

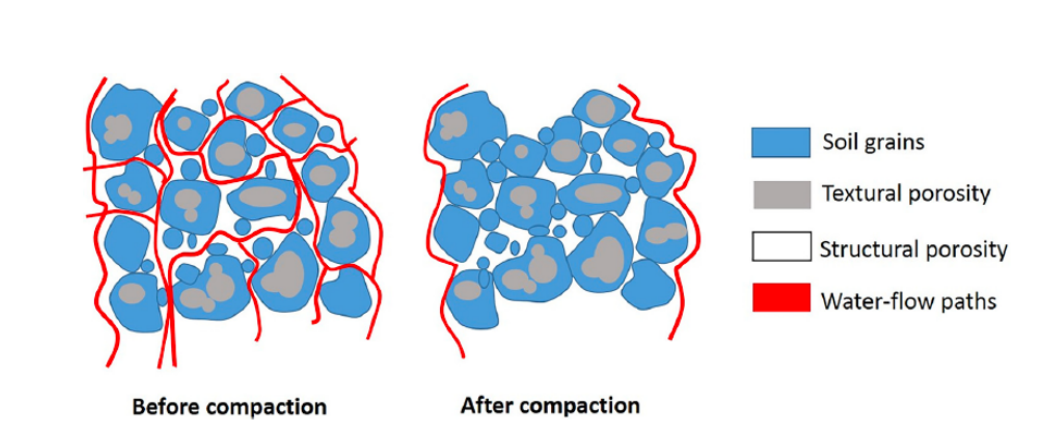


FIGURE 6 – Modification du chemin d'écoulement d'eau dû au compactage Ranaivomanana, Razakamanantsoa et Amiri 2018

L'effet du compactage sur l'évolution de la morphologie de la structure du sol a été montré. La structure de la matrice de sol semble être gouvernée par la granulométrie des constituants. La limitation de cette approche réside sur l'hypothèse relative à la prise en compte de la tortuosité de l'écoulement d'eau sans considération des micro-porosités de la structure de sol compacté. La prise en compte de la distribution granulométrique seule est alors moins pertinente pour décrire les mécanismes de structuration des particules fines lors de son hydratation.

3.2 Apport des fines sur la modification de structure : cas du sédiment compacté

Pour explorer finement la nature de la contribution de la granulométrie dans la structuration et la consolidation des géomatériaux, un mélange de cendre volante et de sédiment est étudié (Furlan et al. 2018, Furlan et al. 2021). La stabilisation chimique des sols induit des changements des caractéristiques physico-chimiques des sols dus aux interactions entre les additifs et le sol. Ces changements impliquent des améliorations du comportement mécanique du sol. Par conséquent, une analyse multi-échelle a été choisie afin de fournir une connaissance globale des mécanismes de stabilisation. Si l'analyse microscopique permet de mettre en évidence les nouveaux produits cimentaires issus des processus physico-chimiques, en revanche, il est important en ingénierie géotechnique de quantifier les impacts sur l'amélioration des performances mécaniques des sols stabilisés.

La contribution des cendres volantes comme additif complémentaire dans la stabilisation de sol a donc été étudié. Le sol utilisé est issu des sédiments dragués du port de La Baule (France), et deux additifs cimentaires ont été utilisés : du ciment CEM II/B-LL 32,5 CE CP2 et de la chaux vive Proviacal ST quicklime (Dugny sur Meuse). Les cendres volantes utilisées étaient fournies par la centrale de production Emile Huchet (St Avord) Les propriétés géotechniques des sédiments ont été déterminées selon le GTR et la distribution granulométrique est présentée sur la figure 7.

Cette étude porte sur l'identification d'une formulation contenant du cendres volantes (CV), de la chaux et/ou du ciment, pour améliorer les propriétés des sédiments de dragage (DS). Pour

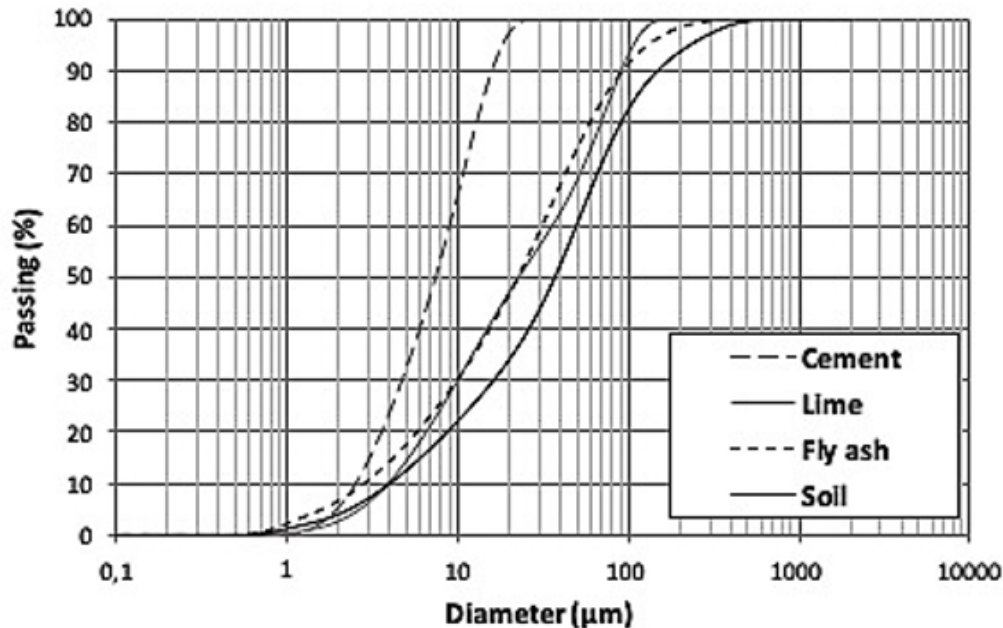


FIGURE 7 – Distribution granulométrique des différents matériaux testés (Furlan et al. 2021)

limiter l'influence de la température sur les propriétés du matériau étudié, les sédiments bruts ont été séchés à l'étuve à 50°C pendant 48h avant le traitement. Les configurations de mélanges dans ce travail sont issues des travaux de Yingjie Liang (Liang et al. 2014) : 2% de chaux (S2L), 7% de ciment (S7C) ou 2% de chaux et 7% de ciment (S2L7C). Un mélange binaire ou ternaire a également été proposé en incluant des cendres volantes (FA). Le taux d'ajout de cendres volantes est de 9%, à savoir 2% de chaux et 7% de ciment : S2L9FA, S7C9FA, S2L7C9FA. Les éprouvettes sont fabriquées avec les propriétés de compactages à l'optimum Proctor de chaque préparation puis emballées et conditionnées afin de limiter les échanges hydriques qui peuvent se produire pendant la phase de maturation de l'éprouvette. Les éprouvettes ont été maturées pendant 0, 7, 14, 28 et 90 jours. Des essais de compression simple ont ensuite été réalisés sur les éprouvettes à l'issue de la maturation, pour évaluer la résistance mécanique des éprouvettes. Il a été observé pendant les expérimentations que le retrait volumique se produit dans les 7 premiers jours de drainages des éprouvettes. Ainsi, les évolutions du retrait volumique ont été mesurées pendant les 9 premiers jours de maturation. La distribution des pores a été mesurée à l'aide d'un porosimètre au mercure (Figure 8).

Au début de la phase de maturation, c'est-à-dire pendant les 7 premiers jours, les cendres volantes remplissent les vides dans la matrice granulaire et jouent un rôle de remplissage "filler", comme indiqué par Le (Le et al. 2018). Pour mieux appréhender l'influence de l'ajout de cendre volante (FA) sur les propriétés physico chimiques et mécaniques des sédiments, il a été décidé de sélectionner deux échelles d'investigations : l'échelle microstructurale (nanométrique) et l'échelle de l'éprouvette (centimétrique). Deux informations majeures sont mises en évidence : un mécanisme de nucléation des cendres volantes semble se mettre en place et conduit à une réorganisation de la microstructure en supplément de la réduction de la macroporosité induite par la chaux et le ciment. A plus long terme, la microstructure devient plus dense en raison du développement des propriétés pouzzolaniques développés en partie par les cendres (FA). À l'échelle macroscopique, les sédiments stabilisés à l'aide des cendres (FA) présentent une densité plus élevée, un

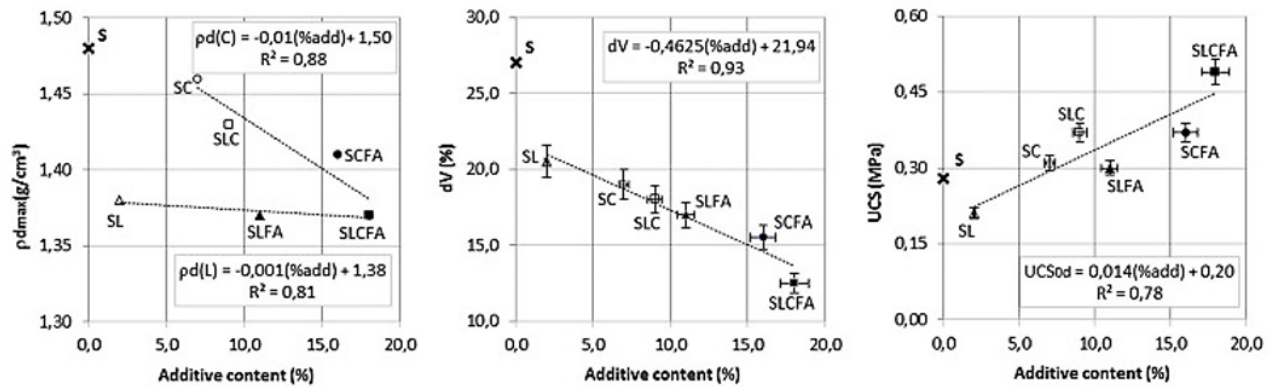


FIGURE 8 – Evolution de la densité, de la déformation volumique et de la résistance à la compression simple des mélanges de sédiments testés : S(Soil), L(Lime), C(Cement), FA (Fly Ash).

retrait plus faible et une résistance mécanique plus élevée que les autres configurations de traitement, à l'exception de la configuration où les cendres volantes sont en présence de ciment ou de chaux vive (figure 9).

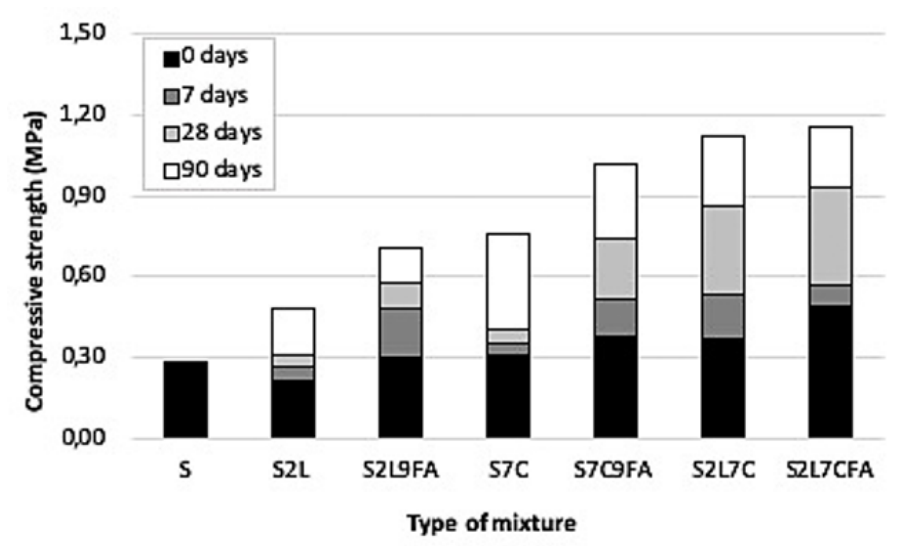


FIGURE 9 – Évolution temporelle de la résistance à la compression simple de chaque mélange testé de 0 à 90 jours de cure.

3.3 Prise en compte de la condition de mise en œuvre

Dans le contexte des travaux de terrassements, en particulier des pistes non revêtues, la condition de mise en œuvre de la structure semble être déterminante pour sa pérennité. L'hydratation des particules, le malaxage et le compactage constituent les actions majeures à mettre en œuvre. Le comportement de sol est souvent étudié en laboratoire sous une configuration d'hydratation et de compactage dont les critères de base reposent sur la facilité de mise en place et la répétabilité. Le sol fin est souvent broyé, puis l'hydratation s'effectue par pulvérisation. Le sol est ensuite homogénéisé par malaxage. Dans la pratique courante au laboratoire, la mise en œuvre du compactage standard consiste à une compression uni/bi axiale. Cette démarche a permis une mise en évidence du comportement du sol idéalisée en condition contrôlée.

En revanche, in situ, l'hydratation du sol est souvent effectuée d'une manière sommaire et loin de l'équilibre hydrique étudié au laboratoire. Le mode de compactage s'effectue soit à l'aide du rouleau lisse, soit avec un rouleau à pied dameur. On assistera ainsi à un mécanisme de compactage impliquant une rotation des tenseurs de contraintes in situ et suivant un chemin oedométrique ou uniaxial simplifié en laboratoire. La condition environnementale in situ est également un paramètre imprévisible et incontrôlable in situ.

Des faits majeurs montrent ainsi que la démarche standard de mise en œuvre en laboratoire est limitée pour mettre en évidence les différentes pathologies courantes dans la construction ou l'exploitation d'ouvrages en terres, de routes ou de pistes non revêtues. On distingue notamment le matelassage, le feuilletage, et toute sorte de mécanisme d'érosion et de dégradation de surface. Une attention particulière a été donnée sur les conséquences de la mise en œuvre sur le comportement du matériau à court et sur le long terme. Plusieurs verrous sont abordés :

- Influence de la rotation des tenseurs de contraintes générées par les rouleaux de compactages lisses pendant le compactage sur l'évolution des propriétés mécaniques du sol.
- Influence du mode de compactage (pétrissage et statique) sur l'évolution de la microstructure et de leur effet sur l'évolution de la tortuosité du matériau.
- Instabilité de surface (dégradation) en lien avec l'hydratation de sol compacté : analyse microstructurale

Pour répondre aux différents points soulevés, une approche combinant les caractéristiques hydromécaniques, la microstructure et une analyse multi-échelle, à la fois en laboratoire et sur le terrain, a été adoptée.

Chapitre III

Analyse de la structure interne des sols compactés et assimilés

1 Influence de l'hydratation du géomatériau lors de la mise en oeuvre en laboratoire

1.1 Influence de l'eau de préparation sur l'organisation granulaire

La contribution de l'eau dans la réorganisation granulaires pendant l'imbibition a été étudié en utilisant du mâchefer d'incinération (Le et al. 2018).

Le mâchefer d'incinération est un matériau contenant très peu de fines actives (Valeur au bleu inférieure à 0,057), avec une fraction granulaire présentant un coefficient d'uniformité de Hazen C_u de 35,5 et un coefficient de courbure C_c de 2,3. Il est constitué de matériau granulaire à forte proportion en quartz. Selon les analyses, la concentration de quartz dans le matériau provient de débris de verre contenus dans les déchets à l'origine du mâchefer. La sensibilité à l'eau de ce matériau et la contribution du compactage sur les propriétés mécaniques ont été étudiées en compression simple et en compression à l'oedomètre. Les résultats ont montré que le compactage a très peu d'effet sur l'évolution de la compression oedométrique. Cependant, en comparant les résultats d'essais de compression simple sur du mâchefer compacté, immergé dans l'eau, et les résultats sur d'autres éprouvettes similaires non immergées dans l'eau, il a été montré que le mâchefer immergé présente un rapport de déformation plus élevé, tout en conservant les mêmes niveaux de contrainte de compression.

Ces résultats montrent donc que le comportement mécanique de la matrice granulaire, compactée ou non, peut être fortement influencé par l'effet combiné des caractéristiques minéralogiques des grains et de la sensibilité à l'eau de la matrice granulaire.

1.2 Comportement de sol fin au compactage par roulement (Sediki et al. 2018).

Dans le cas des sols fins pulvérulents, l'humidification entraîne la formation d'agrégats de particules. Du point de vue microstructural, les agrégats contiennent des mésopores et des micropores, tandis que l'espace entre les agrégats contient des macropores et/ou des fissures de retrait. La compréhension du mécanisme de ré-arrangement des agrégats lors du compactage par roulement présente donc un intérêt particulier pour établir un lien entre l'organisation des agrégats et la microstructure.

D'après les travaux que nous avons menés dans le cadre de la thèse de Sédiki (Sediki et al. 2018), il a été mis en évidence, que la taille des macropores est significativement impactée par le compactage par roulement et par le cycle de trafic. En revanche, la géométrie des agrégats est déformée par ces processus, mais le volume et l'intensité des micropores sont très peu impactés. L'eau présente dans la matrice poreuse joue un rôle de lubrifiant en permettant la mobilisation des particules, qui contribuent alors à combler les vides.

La plasticité des agrégats de sol dépend donc de la quantité d'eau disponible pour l'hydratation. Lorsque la quantité d'eau disponible n'est pas suffisante, il y a moins d'agrégats susceptibles de se déformer.

2 Influence du mode de compactage sur les propriétés mécaniques et microstructurale : cas du sol traité à la chaux

2.1 Évaluation de la performance couplée Hydromécanique Chimique (HMC) et microstructurale d'une digue expérimentale après 7 ans d'exposition atmosphérique (Das et al. 2021b)

L'effet du traitement à la chaux vive à 2,5% a été étudié sur un remblai de sol limoneux (MLD) après 7 ans d'exposition atmosphérique.

La résistance à la compression simple (UCS ou R_c) des échantillons de sol prélevés dans le cœur du remblai a été mesurée. Les échantillons de sol ont été prélevés à des profondeurs de 0,30 m et 0,75 m le long de la pente de l'ouvrage. La performance mécanique de ces échantillons a été comparée à celle des éprouvettes préparées en laboratoire après 28 jours et 90 jours de cure à une température de 20 °C, ainsi qu'avec des éprouvettes ayant subi une cure accélérée de 90 jours à une température de 40 °C. La résistance à la compression simple obtenue in situ a été de 3,29 ($\pm 0,45$) MPa. Ce niveau de résistance in situ après 7 ans de cure est similaire à celui mesuré sur des éprouvettes soumises à une cure accélérée en laboratoire (3,8 MPa). Les valeurs élevées de résistance à la compression simple observées sur les éprouvettes prélevées au cœur de l'ouvrage peuvent s'expliquer en partie par le développement de composés cimentaires. Ces composés sont identifiés sur les images (Figure 10) en microscopie électronique à balayage (MEB) et également mis en évidence par l'observation d'un développement des pores inférieurs à 3000 Å.

Par ailleurs, un niveau de pH supérieur à 11 a été mesuré sur les échantillons prélevés sur l'ensemble du remblai. Cela démontre la présence active de chaux dans le remblai même après 7 ans de construction, malgré une exposition atmosphérique défavorable, telle que l'humidité et le vent. Même si, près de la surface du remblai, les contraintes atmosphériques ont plutôt provoqué une perte de teneur en eau et une baisse relative du pH. Cela suggère que l'effet de la chaux s'est dissipé dans la couche supérieure en raison de l'interaction continue entre le sol et l'atmosphère, incluant des réactions de carbonatation, ainsi que de l'influence de l'expansion racinaire de la végétation.

Un développement important des pores de taille inférieure à 3000 Å a été mesuré dans les carottes du sol traité à la chaux qui avait été échantillonnées. Ces pores de petites tailles favorisent le développement d'un réseau capillaire, ce qui accroît la succion du sol traité à la chaux. En conséquence, la capacité de rétention d'eau à long terme du sol traité à la chaux est augmentée. Ce phénomène est le résultat d'une distribution plus homogène de l'humidité dans le corps du remblai. Ce niveau d'humidité est très proche de l'humidité présente dans le sol au moment de la construction.

Ainsi, la persistance à long terme de l'effet de la chaux dans le cœur d'un remblai de sol limoneux traité à 2,5% de chaux a été confirmée. La présence de la chaux a ainsi été confirmée dans l'ensemble du remblai traité, malgré son exposition à un climat humide pendant 7 ans. Sur la base des mesures physico-chimiques, microstructurales et de l'observation de la microstructure, il a été démontré une performance mécanique élevée et persistante dans l'ensemble du remblai traité, alors que les limons sont connus pour leur faible réactivité à la chaux.

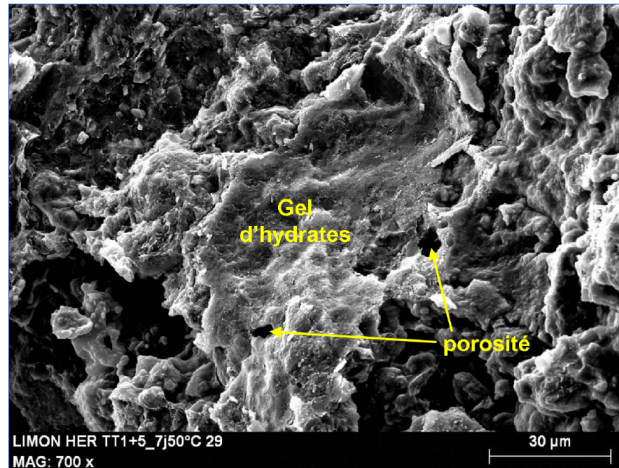


FIGURE 10 – Image MEB d'un limon traité montrant les composés cimentaires et la porosité

2.2 Réorganisation de la microstructure de sol fin par le compactage par pétrissage (Das et al. 2021a)

La résistance à la compression R_c et la microstructure d'un sol limoneux traité à la chaux vive à 1 %, 2,5 % et 4 %, et compacté par pétrissage, a été étudiée. Les résultats obtenus sont comparés avec une configuration du même limon, préparé dans les mêmes conditions, soumis à un compactage statique standard. Les images en μ XRF montrent que l'action du pétrissage améliore la dispersion de la chaux pendant le compactage du sol (11).

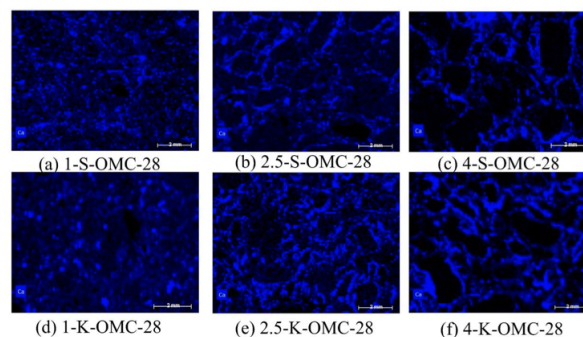


FIGURE 11 – Image micro XRF mettant en évidence les distributions de calcium dans des échantillons compactés (d, e, et f) traités à la chaux à 1, 2,5 et 4% préparés à l'OMC après 28 jours de durcissement à 20 °C.

En outre, l'effet du compactage par pétrissage induit une déformation significative de la structure du sol traité à la chaux par rapport au sol compacté de manière statique. On observe ainsi une déformation plus prononcée des agrégats accompagnée d'une meilleure dispersion de la chaux. La

différence de comportement entre les éprouvettes soumises au pétrissage et celles au compactage statique peut être expliquée par le schéma présenté dans la Figure 12.

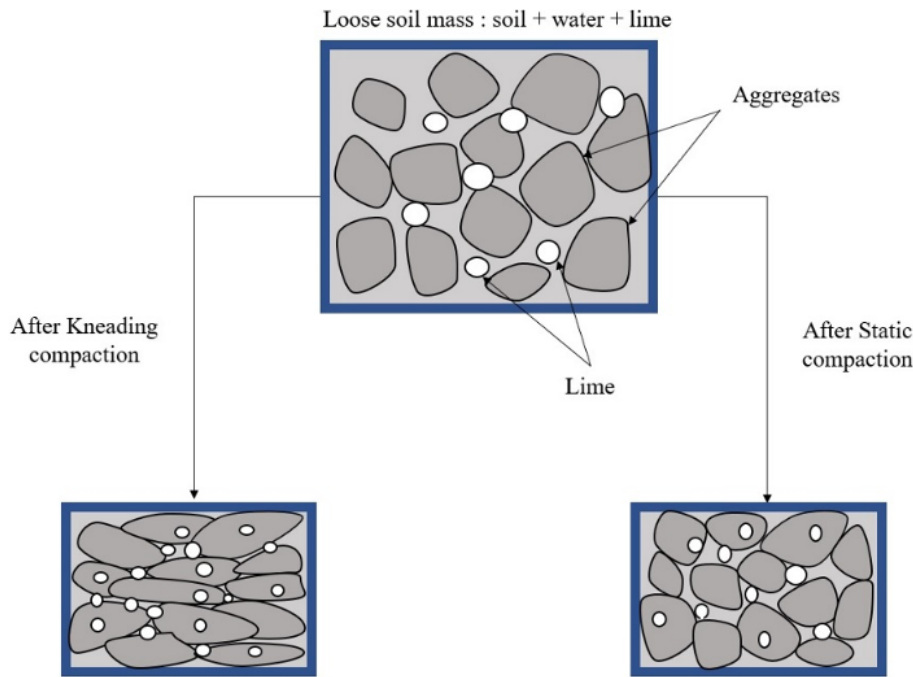


FIGURE 12 – Représentation schématique de l'effet du compactage par pétrissage comparé au mode de compactage statique courante (déformation des agrégats, dispersion de la chaux).

Une meilleure dispersion de la chaux dans la matrice de sol, associée à une disponibilité en eau, favorise le développement de réactions pouzzolaniques à long terme et, par conséquent, l'augmentation de la résistance mécanique du mélange de sol. Le sol traité à la chaux compacté par pétrissage, du côté humide de l'OPN (Optimum Proctor Normalisé), présente ainsi un gain significatif de performance mécanique, en particulier pour les éprouvettes qui ont subi une accélération de prise ou une durée de cure plus longue. Les éprouvettes de sol ayant subi une cure accélérée en laboratoire et les éprouvettes de sol prélevées in situ après 7 ans d'exposition environnementale présentent des niveaux de performance similaires. De plus, la tendance observée dans l'évolution des mésopores mesurés sur les éprouvettes est en cohérence avec le niveau de performance mesuré. Ces informations démontrent la pertinence de l'approche d'accélération de prise en laboratoire pour évaluer le niveau de performance mécanique à long terme, se rapprochant de ce qui peut être obtenu in situ.

L'étude de la performance mécanique et de l'évolution de la microstructure d'un sol limoneux traité à la chaux compacté par pétrissage en laboratoire a mis en évidence des corrélations fortes entre le comportement mécanique et la modification microstructurale. L'action de pétrissage a entraîné un gain de résistance à la compression, en particulier à long terme et pour le sol compacté du côté humide de l'OPN. Ces résultats ont également montré que la résistance à la compression simple et la microstructure évaluées à partir d'échantillons prélevés in situ après 7 ans d'exposition environnementale étaient en cohérence avec les observations en laboratoire. Des études supplémentaires seront nécessaires pour comprendre le comportement hydraulique du sol traité à la chaux compacté par pétrissage.

2.3 Influence de la nature de la solution interstitielle et la matrice de sol traité à la chaux en laboratoire (Das et al. 2022a)

Dans cette étude, l'objectif est d'analyser l'influence de l'interaction entre le fluide contenu dans le milieu poreux et la structure du sol traité à la chaux. Les échantillons de sol traité à la chaux, préparés avec des concentrations de chaux de 1, 2,5 et 4%, sont compactés par pétrissage ou de manière statique. Ces échantillons sont ensuite soumis à un écoulement en utilisant de l'eau déminéralisée (DW) et un fluide à faible force ionique ($LW = DW + 10^{-3} M NaCl$).

L'action de pétrissage génère une déformation plus prononcée des agrégats et réduit relativement la taille des macropores adjacents d'environ 105 Å. Cette modification entraîne une augmentation de la tortuosité hydraulique (T) du sol compacté par pétrissage par rapport au sol compacté de manière statique. (Figure 1). Par conséquent, la structure du sol compacté par pétrissage est donc plus accessible au fluide interstitiel et la chaux disponible peut être hydratée plus facilement.

Un diagramme schématique synthétique présenté dans la Figure 12 récapitule le mode d'écoulement dans une éprouvette de sol traitée la chaux compacté en statique et par pétrissage. Le pétrissage favorise la distribution en eau dans la matrice. Ce mécanisme est favorable au développement de la réaction pouzzolanique, et par conséquent, une formation importante de composés cimentaires peut se produire dans la matrice. Un tel phénomène peut être bénéfique pour les performances hydromécaniques à long terme. Cependant, l'eau déminéralisée (DW) semblerait être relativement plus agressive que de l'eau faiblement minéralisée (LW). L'instabilité ionique du DW dissout une plus grande concentration de Calcium (Ca) dans la matrice. La dissolution de certaines composantes, y compris les composés cimentaires, résultant ainsi en une augmentation du k du sol traité à la chaux. L'influence du DW sur le mécanisme de lixiviation et l'évolution de la conductivité hydraulique reste moins prononcée dans le sol statiquement compacté en raison de l'accessibilité limitée du fluide interstitiel aux composants du sol (comme le montre la Figure 13).

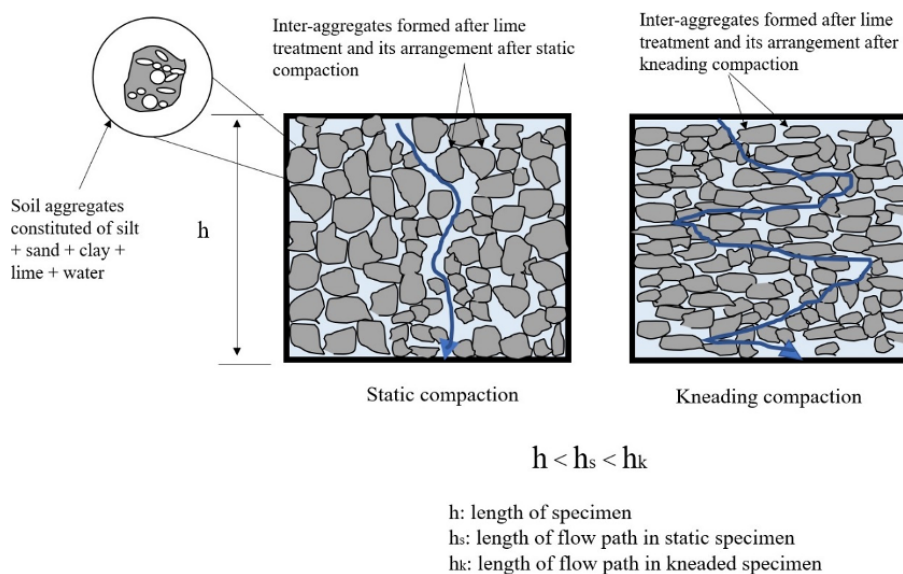


FIGURE 13 – Schémas représentant la matrice de sol compacté avec le schéma de l'écoulement associé.

L'étude de l'influence de la nature de la solution interstitielle sur la matrice de sol traité à la chaux en laboratoire a été réalisée.

TABLE 1 – Tortuosité hydraulique des mélanges

Specimen ID	Hydraulic tortuosity (T)	Specimen ID	k (m/s)	Hydraulic tortuosity (T)
1%-lime treated-DW	2.32	1%-lime treated-DW	2.9110^{-09}	24.84
1%-lime treated-LW	6.81	1%-lime treated-LW	3.5610^{-09}	23.34
2.5%-lime treated-DW	2.04	2.5%-lime treated-DW	1.4910^{-07}	2.27
2.5%-lime treated-LW	2.08	2.5%-lime treated-LW	2.1810^{-09}	19.46
4%-lime treated-DW	3.36	4%-lime treated-DW	3.0010^{-08}	4.12
4%-S-LW	3.12	4%-K-LW	4.5410^{-09}	12.34

Cette étude a permis de mettre en évidence que l'évolution hydromécanique du sol traité à la chaux est gouvernée par les interactions entre le fluide présent dans le milieu poreux et la structure du sol. La durée de l'interaction entre le fluide et la matrice poreuse de la structure du sol est déterminée par le mécanisme de compactage mis en œuvre. L'importance de cette influence est déterminée par la chimie du fluide interstitiel, ainsi que par la teneur en chaux ajoutée. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte la nature du fluide et les conditions de compactage lors de la conception et de l'évaluation des sols traités à la chaux. Ainsi, la mise en œuvre d'un compactage par pétrissage suivi de l'hydratation à l'aide de NaCl de 10^{-3} M, une solution à faible force ionique, entraîne une modification significative de la performance hydromécanique.

Il est donc essentiel de sélectionner une procédure de compactage et une solution interstitielle représentatives du mécanisme de compactage et de la présence d'eau interstitielle auxquels la structure est susceptible d'être exposée sur le terrain. Cela permettra d'approcher au mieux la performance hydromécanique à long terme des structures traitées à la chaux in situ. De plus, pour obtenir une modification significative des performances hydromécaniques, il est fondamental d'ajouter une quantité de chaux supérieure au point de saturation de la chaux.

3 Influence de la nature du fluide sur la microstructure des sols soumis aux cycles d'humidification/séchage

3.1 Évolution du comportement des sols compactés soumis à de l'eau déminéralisée

L'évolution physico-chimique et microstructurale d'un sol traité à la chaux, soumis à des cycles successifs de mouillage et de séchage (W-D), a été étudiée. De plus, la pertinence des conditions d'essai mises en œuvre en laboratoire par rapport aux conditions in situ a été discutée.

Des éprouvettes de sol limoneux (Limon de Marche les Dames MLD), traitées avec 2,5% de chaux vive, ont été soumises à 17 cycles d'humidification et de séchage après une période de 28 jours de cure. Deux conditions d'essai en laboratoire ont été utilisées à température ambiante : avec des périodes de pluie (RP) sévères et avec des périodes de sécheresse (DP) sévères. L'objectif était de reproduire les contraintes subies par le sol in situ en termes de durée du cycle et de niveau de saturation.

Le niveau de saturation admis pour reproduire les conditions d'essai RP et DP, et la durée requise par le sol MLD traité à la chaux 2.5% pour atteindre les niveaux supposés de saturation à la température de laboratoire 22.1°C à 25.2°C sont fournis dans le Tableau 2.

Les résultats obtenus ont été interprétés et comparés avec ceux obtenus avec la procédure de référence de l'ASTM (AP). Selon cette procédure, le mouillage des éprouvettes doit s'effectuer pendant 5 heures à température ambiante, ensuite le séchage est réalisé au four à 71°C ,pendant 43 heures.

TABLE 2 – Présentation de la liste des expérimentations

Designation	Conditions d'essai	Imbibition (h)	Drainage (h)	Température (°C)
AP	Norme ASTM	5	43	71
RP	Période de pluie intense	7	17	22.1-25.2
DP	Sècheresse sévère	2	70	22.1-25.2

Le séchage du sol traité à la chaux à 71°C a induit une perte intégrale de l'humidité du sol. Cette action conduit à un contact accru entre les particules du sol et à un développement significatif de la succion. Dans le cas du sol séché au four, un tel phénomène entraîne une augmentation artificielle de la résistance à la compression simple (RC), pouvant atteindre jusqu'à environ trois fois la valeur d'une éprouvette séchée à l'air ambiant (Figure 14), alors que les liaisons cimentaires disponibles, reflétée par la présence de pores plus petits que 3000 Å, était comparativement plus faible dans l'éprouvette séchée au four.

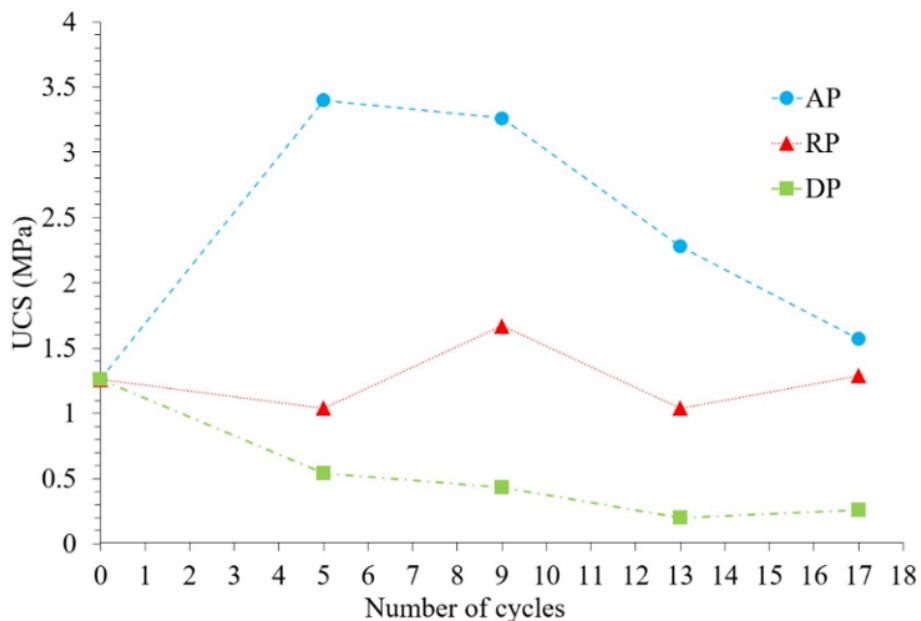


FIGURE 14 – Évolution de la résistance à la compression des éprouvettes soumises à un cycle d'imbibition et de séchage B, (ASTM, Période de pluie RP et période de sécheresse DP)

Le ratio de lixiviation des composants calcaïques par rapport à la teneur initiale en calcium présente dans le sol naturel était significativement bas pendant les cycles W-D, en raison d'une plus grande exposition de la partie extérieure de la structure du sol compacté pendant le mouillage. Cependant, le taux de lixiviation était comparativement plus élevé pour le sol séché à l'étuve. La durée de mouillage et la température de séchage utilisées semblent influencer de manière significative la vitesse d'avancement du front d'humidification dans la matrice de sol. Ce comportement a un impact significatif sur la durée nécessaire pour permettre à l'eau d'inonder le cœur de l'ouvrage et, par conséquent, sur sa durabilité.

Les résultats de l'étude sur l'évaluation du comportement physico-chimique et de la microstructure du limon traité soumis à différents cycles d'humidification et de séchage soulignent le rôle important des modifications physico-chimiques et microstructurales à prendre en compte lors de l'étude de l'évolution de la résistance à la compression (RC) dans un sol traité à la chaux soumis à des cycles d'humidification et de séchage (W-D/D-W). De plus, pour obtenir une prédiction proche de l'évolution in situ de la RC dans un sol traité à la chaux, il est essentiel de recréer en laboratoire des conditions d'essai permettant une représentation fidèle de la situation sur le terrain.

D'autres études complémentaires devraient être réalisées afin d'évaluer l'impact du cycle W-D/D-W sur le sol traité à la chaux. Par exemple, en prenant en compte les effets de l'eau lors des mouvements des bateaux sur les structures des ports, les digues ou les canaux fluviaux, etc. Cela permettrait ainsi d'acquérir une meilleure compréhension des façons dont les cycles W-D/D-W pourraient impacter d'autres caractéristiques de la matrice de sol. Un exemple serait l'influence de la carbonatation sur un sol traité à la chaux.

3.2 Évolution du comportement de sol traité à la chaux avec des fluides non conventionnels (Das et al. 2023)

Si l'influence des cycles de mouillage et de séchage (W-D) sur la résistance à la compression simple (Rc) est une problématique connue dans la littérature, la corrélation entre la Rc et l'évolution de la physico-chimie et de la structure des pores d'un sol traité à la chaux soumis à différents fluides chimiques est très peu analysée. C'est précisément cette corrélation qui fait l'objet du présent travail.

Des éprouvettes de limon traité à 2,5% de chaux vive ont été soumises à une cure de 28 jours, suivie de 5 cycles de mouillage et de séchage (W-D) en utilisant quatre fluides différents couramment utilisés en laboratoire. Ces fluides ont des actions distinctes les uns des autres : un solvant organique, le méthacrylate de méthyle (MMA), une solution à faible concentration de sel (5,84 g de NaCl), une solution à forte concentration de sel (35 g de NaCl) et de l'eau déminéralisée (DW).

Les résultats ont montré que l'emploi d'eau déminéralisée, pour évaluer l'influence des cycles W-D sur l'évolution de la compression simple du sol traité à la chaux après une saturation de 28 jours, peut avoir des effets défavorables sur les éprouvettes. En effet si avec l'utilisation d'eau déminéralisée lors des cycles W la Rc augmente de 40%, l'utilisation des solutions de 5.84g NaCl et 35g NaCl a plutôt montrée une augmentation de 60% à 70% de la Rc obtenue sur les éprouvettes soumises aux cycles W-D. Cette augmentation de Rc est principalement attribuée à un gain de succion dans le sol due au séchage à l'étuve à 71°C (Fig. 5). Par ailleurs, ces mêmes éprouvettes présentent des niveaux de pH du sol suffisant pour développer une liaison cimentaire pendant les cycles W-D. Ces résultats peuvent être expliqués par le développement des pores de taille inférieurs à 3000 Å et à l'augmentation de la succion du sol due à la présence du sel (Figure 15). En revanche, l'eau déminéralisée, dépourvue d'ions, a tendance à lessiver les ions de calcium solubles présents dans le sol, y compris le calcium provenant de la chaux vive. Ce phénomène

entraîne une diminution du pH du sol dans l'éprouvette et augmente significativement le pH cumulé de l'effluent à la fin des cycles d'humidification et de séchage. Par contre, le solvant MMA utilisé lors des cycles W-D semble avoir une faible réactivité avec le sol traité à la chaux, bien que la résistance à la compression (R_c) ait fortement évolué. Le pH du solvant MMA, mesuré avant et après les cycles W-D, est resté inchangé. Ce résultat indique qu'il n'y a pas de lessivage de la chaux pendant les cycles. Les molécules de MMA semblent plutôt induire un développement significatif des mésopores, ce qui entraîne une amélioration de la R_c .

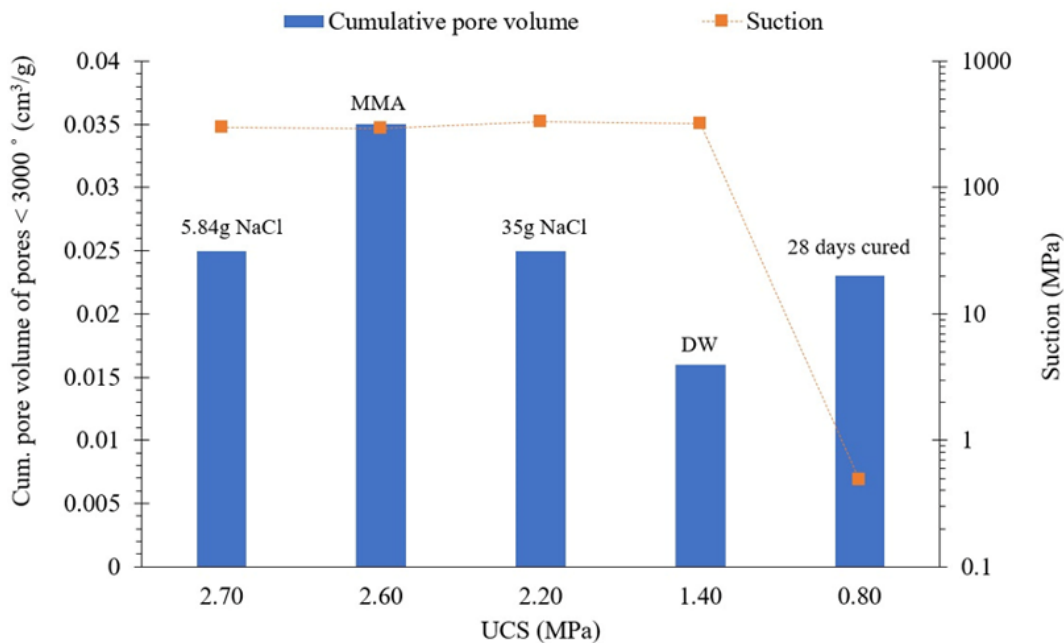


FIGURE 15 – Évaluation de la résistance à la compression simple et les apports de la succion et du cycle d'imbibition et de séchage

L'étude de la performance mécanique, de la physico-chimie et du développement de la structure poreuse d'un sol traité à la chaux, soumis à des cycles d'humidification et de séchage avec des fluides non conventionnels, a permis de mettre en évidence l'importance de tenir compte la chimie du fluide d'essai lors de l'évaluation de l'influence des cycles W-D sur le sol traité à la chaux. Bien que les fluides ayant des compositions chimiques différentes aient tous un impact sur l'évolution de la résistance à la compression (R_c), les résultats physico-chimiques et microstructuraux ont révélé que le mécanisme sous-jacent à cette évolution était également différent. La présente étude s'est appuyée sur des fluides couramment utilisés dans des projets de recherche similaires ou cités dans la littérature. Les différences de comportement observées soulignent la nécessité de mener des études supplémentaires pour mieux comprendre le mécanisme d'influence du fluide et son interaction avec la structure du sol traité à la chaux.

Chapitre IV

Étude des interactions à la surface des sols compactés

1 Instabilité de surface (dégradation) en lien avec l'hydratation du sol compacté par roulement : analyse microstructurale (Sediki et al. 2018)

1.1 Étude comparative des différents modes de compactage et de leur effet sur la microstructure

Le mode de compactage des matériaux in situ et en laboratoire peut différer. En pratique, les propriétés optimales de compactage sont définies en laboratoire, puis recommandées aux terrassiers sur le chantier afin d'atteindre une portance maximale avec le matériau. Cependant, les contraintes environnementales et logistiques sur le chantier peuvent parfois empêcher d'atteindre l'objectif de densité souhaité, et il n'existe pas d'informations disponibles dans la littérature sur l'équivalence entre les différentes méthodes.

Pour mettre en évidence les différents facteurs d'influence liés aux modes de compactage, les trois modes de compactage les plus couramment utilisés in situ et en laboratoire ont été reproduits à l'échelle du laboratoire afin d'évaluer leurs similitudes et différences : le compactage Proctor Normal, le compactage par pression uniaxiale (également appelé compactage statique) et le compactage par roulement réalisé à l'aide d'un compacteur à plaque standard utilisé pour compacter les plaques de bitume en laboratoire. Dans cette étude, un mélange de sol modèle a été utilisé.

Les objectifs de densité étaient les mêmes pour les trois modes de compactage, mais le niveau d'énergie déployé pour chaque mode de compactage était différent et calculé à l'aide de paramètres mesurés ou de capteurs. La densité sèche cible de $18,05 \text{ kN/m}^3$ a été atteinte avec les trois modes de compactage, mais l'énergie de compactage déployée avec le compactage dynamique était 3,8 fois plus élevée que celle du compactage statique et 4,8 fois plus élevée que celle du compactage par roulement.

La distribution des pores obtenue à partir des échantillons de sol compactés selon les trois modes a été mesurée à l'aide d'un porosimètre à mercure. Le compactage statique a généré deux familles de pores (0,83 et 21,3 microns), le compactage dynamique a généré une unique grande famille de pores autour de 1,31 micron, tandis que le compactage par roulement a généré deux familles de pores autour de 1,05 et 6,03 microns. À densité équivalente, les différents modes de

compactage ont entraîné une diminution des pores de grande taille, tandis que la famille de pores de plus petite taille, autour de 1 micron, est restée la même.

les résultats obtenus mettent en évidence une différence significative entre les microstructures des sols traités selon les différents modes de compactage. Cette constatation souligne l'importance de sélectionner le mode de compactage le plus représentatif pour étudier et comprendre les pathologies observées in situ. En choisissant le mode de compactage approprié, il devient possible de reproduire de manière plus précise les conditions de terrain et d'analyser les réponses mécaniques et les évolutions microstructurales du sol traité dans des conditions réalistes. Cela permet une meilleure compréhension des mécanismes de formation des pathologies et aide à développer des stratégies appropriées pour les prévenir ou les traiter.

1.2 Instabilité de surface en lien avec la condition de mise en oeuvre

L'instabilité de surface liée à l'hydratation du sol constitue un problème majeur dans le domaine du terrassement. La génération de poussière sur les chantiers de terrassement est une préoccupation importante, et cette génération de poussière est étroitement liée à l'état hydrique du sol aux différentes phases de la construction.

Dans le cadre de la thèse de Sédiki, les mécanismes régissant l'instabilité de la structure des sols fins compactés en relation avec leur hydratation, sous l'effet du cycle de trafic, ont été étudiés à différentes échelles. En effet, l'instabilité de la structure peut entraîner une fragilisation du sol compacté lorsque le milieu se déshydrate sous les sollicitations de trafic.

L'instabilité de la microstructure, résultant des sollicitations hydriques (par exemple, l'arrosage) et mécaniques (par exemple, le trafic), semble être à l'origine de la dégradation de la surface, conduisant à la génération de poussière sur les pistes non revêtues. Ces mécanismes ont été étudiés pour mieux comprendre leurs interactions et développer des approches de gestion adaptées, telles que le maintien d'un état hydrique approprié du sol, l'utilisation de techniques de stabilisation de surface ou l'adoption de mesures préventives pour minimiser la génération de poussière et les problèmes associés lors des travaux de terrassement.

Pour comprendre le mécanisme de dégradation, des expérimentations en laboratoire ont été réalisées à l'aide d'un simulateur de trafic (Figure 16). Les éprouvettes de sol sont compactées par roulement à l'aide d'un rouleau compacteur en acier lisse jusqu'à ce que l'objectif de densité présenté sur la figure 17a soit atteint. Le compactage par roulement a été choisi pour reproduire le mécanisme de compactage que le sol peut subir in situ. Les matériaux utilisés sont des matériaux modèles bien connus en laboratoire : le kaolin Speswhite (K) et le sable HN38 Hostun (S). Des éprouvettes sont réalisées avec les deux matériaux modèles en faisant varier la proportion de sable de 0% à 100%. Ils sont identifiés S50K50 pour 50% de sable et 50% de kaolin, S75K25, pour 75% de sable et 50% de kaolin.

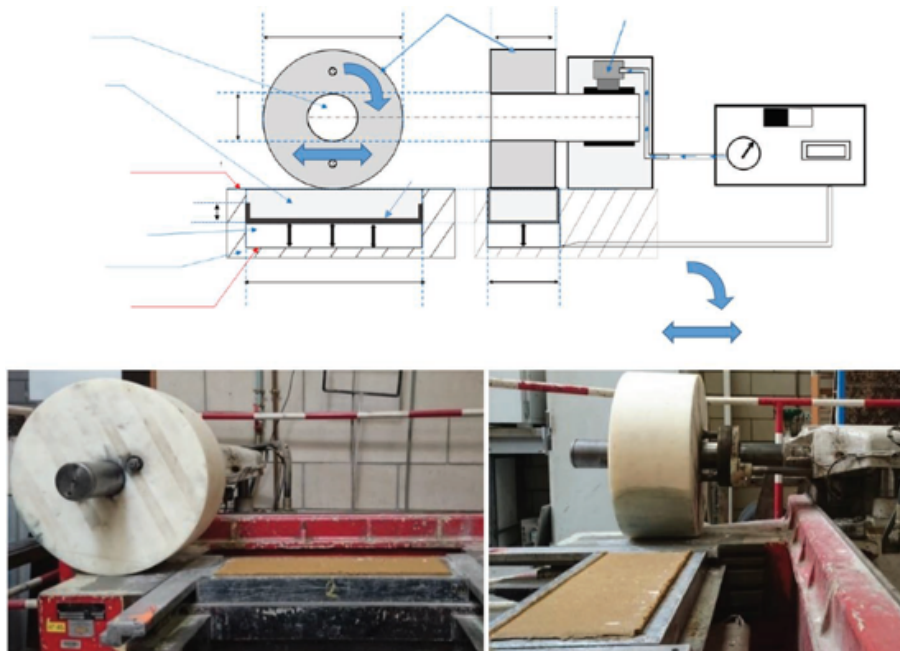
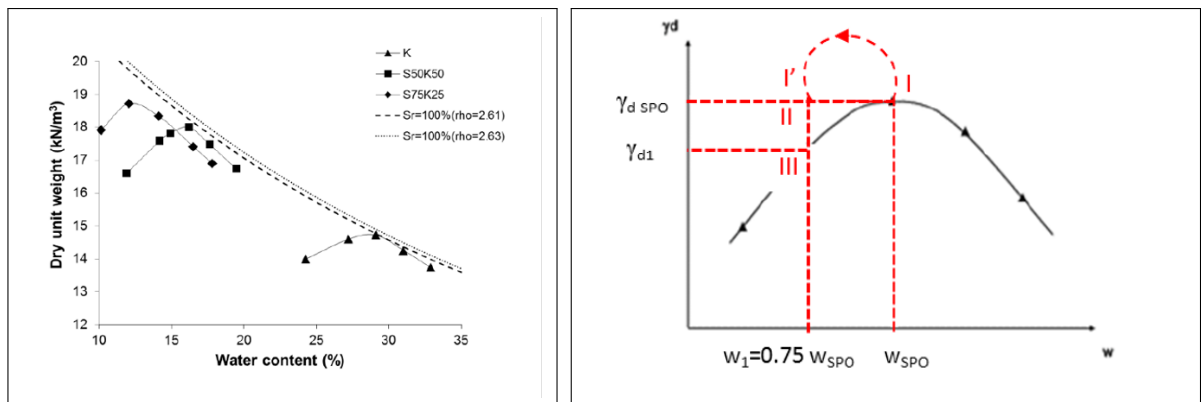


FIGURE 16 – Compacteur roulant de laboratoire : Schémas du dispositif(a), vue de profil de la roue et de l'éprouvette de sol compacté(b), vue de face de la roue et de l'éprouvette compactée(c)

Avant les cycles de trafic, les éprouvettes sont confectionnées pour atteindre des objectifs de densité spécifiques, puis elles sont soumises à différents chemins hydriques et mécaniques (Figure 17b).



(a) Courbes de compactages des sols utilisés

(b) Configurations de compactage testés

FIGURE 17 – Configurations de compactage

L'éprouvette de sol, notée I, a été compactée à l'optimum Proctor Normal (OPN). Une deuxième éprouvette a été compactée après séchage à 0,75 de la teneur en eau à l'OPN, notée I'. Les éprouvettes, notées II et III, ont été soumises aux cycles de roulement immédiatement après le compactage à l'OPN. Toutes les éprouvettes ont subi 10 000 cycles de passage de roue. Il est à noter que l'éprouvette I n'a été soumise qu'à seulement 100 cycles de trafic en raison d'un ornièrage trop important.

Les agrégats de particules obtenus après un cycle de trafic ont été collectés en surface et pesés.

La distribution granulométrique de ces agrégats de sol a été réalisée et comparée. Par la suite, la modification de la microstructure des éprouvettes induite par le trafic a été évaluée à l'aide d'un porosimètre au mercure.

Des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande montrent que la contrainte de cisaillement mesurée pour le mélange S75K25 est supérieure à celle du mélange S50K50 sous des efforts élevés. Par ailleurs, le mélange S75K25 présente une valeur de cohésion inférieure à celle de l'argile kaolin pure (169,4 kPa) préparée dans les mêmes conditions (Figure 18). Bien que la fraction argileuse ait diminué, l'angle de frottement de S75K25 est plus élevé que celui de S50K50 et de l'argile kaolin pure. Cela peut s'expliquer par la présence de la fraction sableuse dans le mélange S75K25. Le sable peut améliorer la résistance au cisaillement du sol en augmentant l'angle de frottement. Les grains de sable, en raison de leur forme et de leur rugosité, peuvent interagir les uns avec les autres et avec les particules d'argile, ce qui renforce la structure du sol et augmente sa résistance au cisaillement.

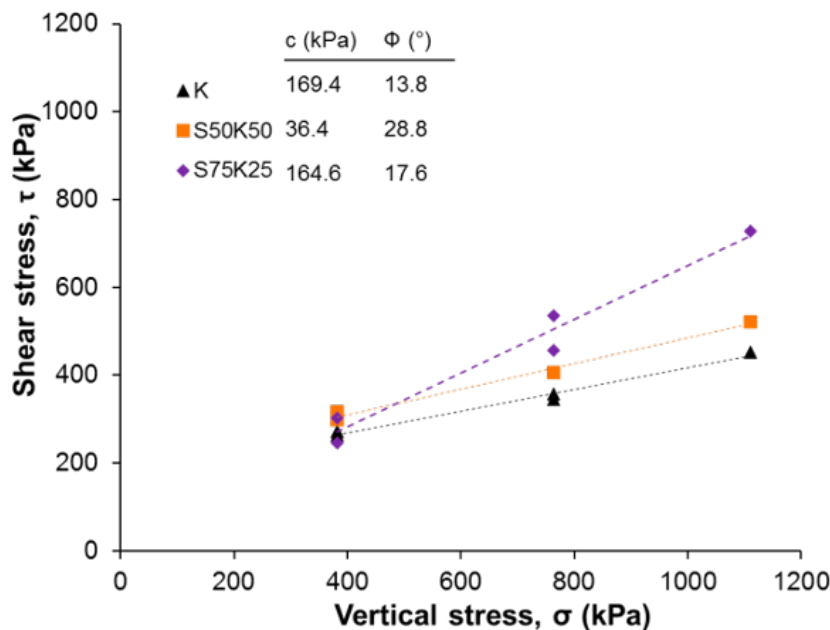


FIGURE 18 – Contrainte de cisaillement à l'interface obtenue à l'aide de la boîte de Casagrande

Les distributions granulométriques des agrégats de sol obtenues après 100 000 cycles de trafic montrent la formation d'agrégats de particules de sol plus grossiers par rapport au sol intact, pour toutes les configurations testées. Ce phénomène peut être attribué au détachement des agrégats de sol formés lors de l'humidification et pendant le compactage. (Figure 19). Lors de la fabrication de l'éprouvette par compactage par roulement, les particules de sol peuvent s'agréger et s'organiser pour former des agrégats plus compacts. Cependant, les cycles de trafic répétés peuvent exercer des contraintes de cisaillement sur ces agrégats, entraînant leur détachement et leur fragmentation. En conséquence, les agrégats de particules de sol deviennent plus grossiers par rapport au sol intact.

Ces observations soulignent l'importance de prendre en compte divers facteurs lors de la planification et de l'évaluation des structures de sol soumises à un trafic intensif. La composition du sol, le taux d'humidité, les propriétés mécaniques du sol et la charge appliquée pendant les cycles de trafic sont autant de facteurs qui peuvent influencer le processus de désagrégation et de

fragmentation des agrégats de sol.

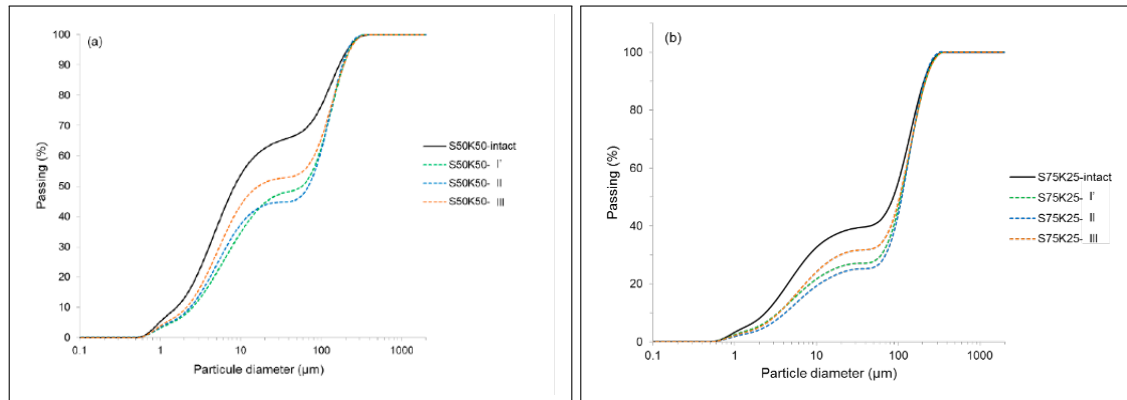


FIGURE 19 – Distribution granulométrique des particules de sol collectées sur la surface de l'éprouvette soumises à 100 000 cycles de trafic

À l'échelle de la microstructure, une comparaison a été réalisée entre les distributions de pores mesurées dans les sols non dégradés (ND) et les sols dégradés (D) pour chaque configuration testée. Cette comparaison permet d'analyser les changements dans la structure poreuse du sol suite aux cycles de trafic. Dans le cas de S50K50, une distribution monomodale avec un diamètre de micropore de 0,1 μm est observée à l'OPN. En revanche, pour les sols soumis à des cycles de trafic selon les configurations II et III, une distribution multimodale des pores est observée. Les tailles de pores varient entre 0,4 μm et 1,6 μm . Pour le mélange S75K25, deux tailles de macropores ont été mesurées. La première taille, d'environ 1 μm de diamètre, a été observée pour les configurations I-ND et I'-D. La deuxième taille de macropores, comprise entre 9 μm et 13 μm , a été observée pour toutes les configurations, à l'exception de I'-D (Figure 20). Par contre, la taille des micropores reste inchangée à 0,1 μm quelles que soient les configurations testées, pour les deux sols étudiés. Ces résultats suggèrent que la taille des micropores se forme lors de l'humidification du sol et est moins impactée par le compactage.

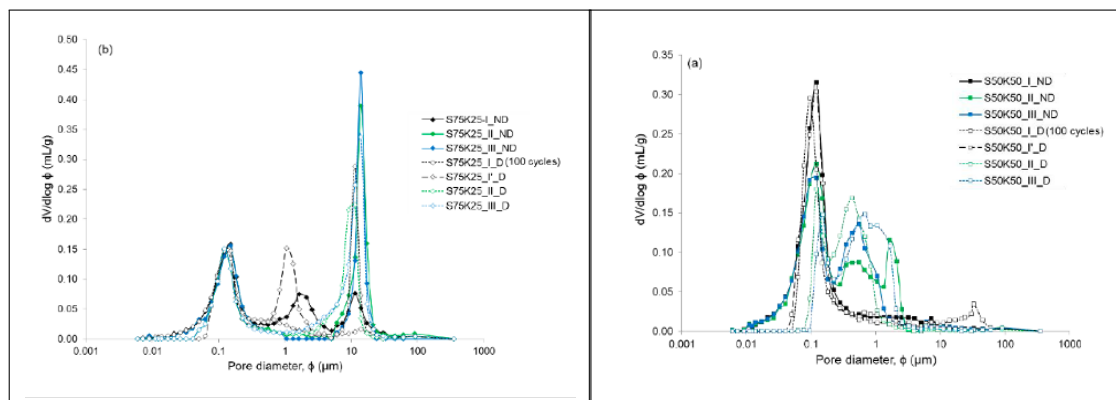


FIGURE 20 – Distribution des pores des différents types de configurations de compactage

D'un point de vue de la distribution granulométrique, les résultats indiquent qu'une quantité moindre de sol dégradé est mesurée dans la configuration de mise en œuvre II par rapport aux configurations I et III. Malgré des conditions hydriques similaires, la configuration I' présente des particules de sol dégradé de plus grande taille par rapport à la configuration II. Les sols présentant

une plus grande fraction de fines semblent donc être moins susceptibles de se dégrader en raison de leur cohésion plus élevée.

Ces observations suggèrent que la présence d'une fraction fine dans les sols peut contribuer à une plus grande cohésion, ce qui les rend moins dégradables lorsqu'ils sont soumis à des cycles de trafic. Les particules fines peuvent agir comme un liant, renforçant la structure globale du sol et par conséquent sa résistance à la dégradation.

L'évolution de la distribution granulométrique des sols dégradés met en évidence le fait que les cycles de trafic ont tendance à arracher plus facilement les agrégats de sol grossiers par rapport aux sols intacts.

Du point de vue de la microstructure, les effets des cycles de trafic sur la modification de la structure du sol peuvent également être observés. Dans le cas des sols fins testés, l'effet cumulé des cycles de trafic conduit à une diminution des macropores, à l'exception de S75K25-I, où l'humidité élevée du sol génère une augmentation de la taille des macropores. Les résultats de la distribution des pores montrent ainsi l'effet combiné du séchage et des cycles de trafic (I et I'). Les résultats montrent que la combinaison du compactage et des cycles de trafic (I) entraîne une réduction significative de la taille des macropores par rapport à la combinaison du compactage, du séchage et des cycles de circulation (I'). Ces observations suggèrent que l'effet du séchage seul sur la réduction de la taille des macropores est considéré comme moins significatif par rapport à l'effet combiné du compactage et des cycles de trafic.

Le mécanisme de génération de poussières sous l'effet du trafic a été étudié à l'aide d'un simulateur de trafic équipé de pneus lisses. Lorsque le sol est soumis à des sollicitations de trafic, des agrégats de sol se détachent de la surface. Ce phénomène crée une rugosité de surface qui favorise l'accélération de la dégradation de la surface du sol compacté. Les agrégats de sol présents à la surface de l'éprouvette testée se désagrègent ensuite progressivement sous l'effet des cycles de trafic et des conditions environnementales.

La répétition de ce processus de dégradation de surface conduit à la désagrégation totale des agrégats de sol, aboutissant à une distribution granulométrique similaire à celle du sol intact avant humidification. Ce mécanisme est similaire à celui qui régit la génération de poussières sur les pistes non revêtues soumises aux cycles de trafic.

Ces observations soulignent l'importance de considérer l'impact du trafic sur la dégradation de la surface du sol compacté, susceptible d'entraîner la formation de poussières. Comprendre ce mécanisme est crucial pour élaborer des mesures de prévention et de contrôle de la génération de poussières dans les environnements de chantier et de circulation où les pistes non revêtues sont présentes.

2 Initiation à l'envol des poussières

2.1 Bilan des efforts de stabilisation des particules fines en suspension dans la couche limite de faible épaisseur (Le Vern et al. 2020b)

Une fois présentes à la surface, les particules de poussière ont le potentiel de s'envoler, ce qui dépend de plusieurs paramètres. Le mécanisme d'envol se produit dans une zone proche de la surface du sol. Cependant, dans le domaine de la mécanique des fluides appliquée, l'écoulement dans une couche limite de faible épaisseur est relativement peu étudié, notamment parce que la

présence d'une zone de turbulence importante limite la possibilité d'analyser en détail les mécanismes impliqués.

Cependant, il est reconnu que les particules constituant les poussières sur les chantiers présentent un double problème, tant en termes de sécurité que de santé. Du point de vue de la sécurité, les nuages de poussière générés entraînent une réduction de la visibilité en raison de la concentration accrue de poussière dans l'atmosphère. Du point de vue de la santé, bien que ce problème soit peu documenté, les particules fines et ultrafines (PM 2,5 ; PM 10), y compris celles générées sur les chantiers, peuvent provoquer des exacerbations de pathologies respiratoires en raison de leur inhalation par les personnes travaillant sur les chantiers ou vivant à proximité.

Il est donc important de prendre des mesures adéquates pour réduire l'émission de poussières sur les chantiers, afin de protéger à la fois la sécurité des travailleurs et la santé des personnes environnantes. Cela peut inclure l'utilisation de méthodes de contrôle de la poussière telles que l'arrosage des surfaces, l'utilisation de barrières de confinement, la limitation de la vitesse des véhicules, ou la mise en place de mesures de protections individuelles pour les travailleurs exposés.

Actuellement, les principales méthodes utilisées pour limiter l'envol de poussière sur les chantiers sont principalement basées sur l'arrosage, mais elles nécessitent des quantités d'eau importantes. Au cours de la dernière décennie, des actions ont été entreprises en collaboration avec les syndicats professionnels des terrassiers de France pour réduire ces émissions de poussière et préserver cette ressource précieuse. Ces actions ont permis de dresser un état des lieux des différentes solutions disponibles pour réduire les émissions de poussière à la source. Il s'agit d'une étude préliminaire qui analyse l'interaction entre le sol et l'atmosphère pour des sols compactés.

Pour améliorer la connaissance sur les effets de l'envol des poussières sur l'environnement, une étude a été menée en essayant de reproduire ce qui peut être observé sur les chantiers.

Les sols sont compactés en laboratoire à l'aide d'un compacteur roulant. Cette méthode permet de reproduire, dans une certaine mesure, les conditions de compactage rencontrées sur les chantiers. Le compacteur roulant permet de simuler la rotation du tenseur des contraintes et les paramètres de frottement à l'interface entre le compacteur et le sol, qui sont généralement observés lors du compactage sur le terrain (Tableau 3).

Éprouvette	Sol/Sol		Sol/Ethalon		Ca	Delta a
	C (kPa)	fi	ca	Delta a		
S0K100	170,1	13,7	79,9	11,7	59,6	13,0
S50K50	194,8	15,9	93,2	15,8	52,7	16,2
S75K25	36,4	31	38,4	25	4,2	25,7

TABLE 3 – Paramètres de cisaillement à l'interface d'une roue lisse

L'étude de l'envol des particules dans la couche limite de faible épaisseur a été réalisée en utilisant une soufflerie. Cette approche permet de simuler les conditions d'écoulement de l'air et de mesurer le frottement à l'interface entre l'air et les particules de sol.

Dans cette étude, les sols compactés ont été placés dans la soufflerie et soumis à un écoulement d'air contrôlé. La vélocimétrie LASER a été utilisée pour mesurer les vitesses et les mouvements des particules de sol suspendues dans l'air. Cette technique permet de quantifier le frottement

entre l'air et les particules, ainsi que les forces qui agissent sur les particules et qui peuvent contribuer à leur envol.

Trois mélanges de sols modèles ont été formulés en utilisant du sable d'Hostun HN38 et de la Kaolinite Speswhite. Les mélanges sont désignés comme suit : S0K100 pour le mélange composé entièrement de kaolinite Speswhite; le mélange S50K50 qui est composé à parts égales de sable d'Hostun HN38 et de kaolinite Speswhite et le mélange S75K25 qui est composé de 75% de sable d'Hostun HN38 et de 25% de kaolinite Speswhite. (Tableau 4).

Pour les besoins expérimentaux, seule la vitesse horizontale générée lors de l'écoulement en soufflerie a été prise en compte. Quatre vitesses de vent différentes ont été testées : 4, 8, 12, 16 et 20 m/s. Ces vitesses ont été sélectionnées pour évaluer l'effet de la vitesse de vent sur le phénomène d'envol des particules de sol et la génération de poussières dans la couche limite de faible épaisseur. En faisant varier la vitesse du vent, il est possible de quantifier l'influence de la vitesse de l'écoulement d'air sur le détachement et le transport des particules de sol, ainsi que sur les caractéristiques des poussières générées.

Sample	Soil	Dry Density after Compaction (kg.m ⁻³)	Water Content during Compaction (%)	Water Content during Traffic Degradation (%)	Number of Wheel Passes (N)	Tire Type ^a
Sample I	S0K100	1470.00	28.20	21.12	20 000	M
Sample II	S50K50	1801.00	16.00	12.98	20 000	M
Sample III	S75K25	1873.00	12.40	9.45	20 000	M
Sample IV	S75K25	1873.00	12.40	8.95	10 000	M
Sample V	S75K25	1873.00	12.40	9.30	20 000	C

^a M: tire MITAS FL-08; C: tire CONTINENTAL IC 10 (Figure 3)

TABLE 4 – Condition de compactage et de dégradation de surface des éprouvettes

Il a été démontré que le compactage par roulement permet de réduire de manière significative la rugosité de surface des sols, sans toutefois la supprimer complètement. Ce processus de compactage par roulement permet de lisser la surface du sol en éliminant les aspérités et les irrégularités. (Figure 21).

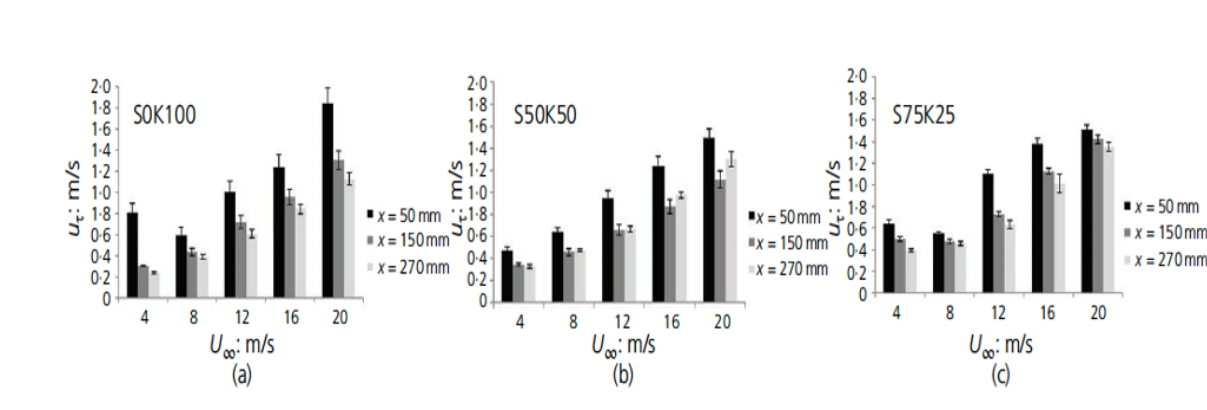


FIGURE 21 – Contrainte de cisaillement représenté en fonction de la vitesse d’écoulement mesurée à différent endroit à la surface des éprouvettes

Les sols sableux, en raison de leur granulométrie plus grossière, ont une surface plus rugueuse par rapport aux sols argileux. En conséquence, lorsqu’ils sont soumis à des contraintes de cisaillement, les particules de sol sableux sont plus susceptibles de subir des mouvements de saltation, c’est-à-dire des sauts et des rebonds à la surface du sol, ce qui peut entraîner des envols de particules dans l’atmosphère plus importants que les sols purement argileux. En effet les sols argileux ont une cohésion plus élevée et une structure plus compacte, ce qui limite ces mouvements et donc l’envol. Il est donc essentiel de prendre en compte ces différences lors de l’évaluation et de la gestion des problèmes d’envol de particules dans des environnements sableux (Figure 22).

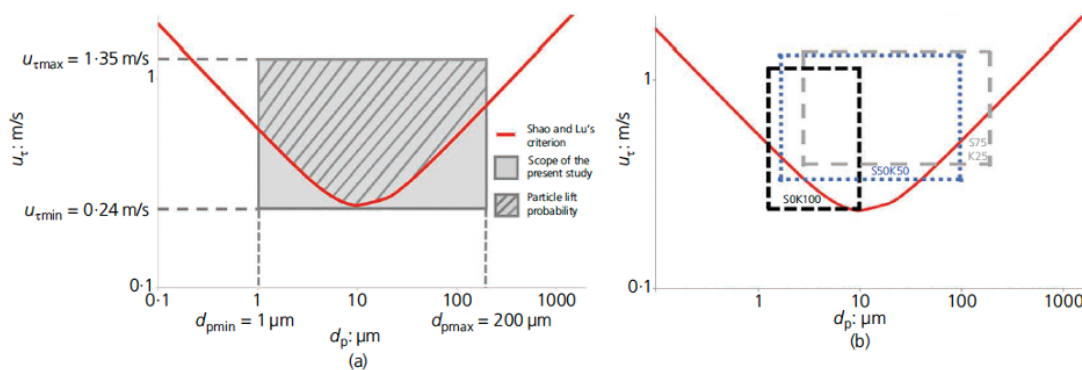


FIGURE 22 – Contrainte de cisaillement à l’écoulement en fonction de la granulométrie des particules dont la partie hachurée correspond à l’objet du présent travail selon les conditions aux limites de Shao et Liu (2000)

Le travail accompli consiste en une étude exploratoire qui s’est principalement focalisée sur le phénomène d’érosion éolienne, un mécanisme particulièrement problématique pour les sols sableux.

2.2 Bilan des contraintes appliquées sur les sols sous trafic (Le Vern et al. 2020a)

Les conditions d'initiation de l'envol des particules ont été mises en évidence. Il s'agit désormais de souligner l'importance de prendre en compte la dégradation de surface des sols et son incidence sur la turbulence générée lors de l'écoulement dans l'air.

Un modèle statistique d'envol de particules est utilisé. Ce modèle nécessite des paramètres d'entrée qui sont établis à l'aide d'essais en laboratoire. L'évaluation de la dégradation des sols soumis à des cycles de circulation d'un pneu est présentée.

L'évolution de la quantité de particules arrachées et de la granulométrie de ces particules est quantifiée en fonction du cycle de passages de la roue du simulateur de trafic (Figure 23) sur la surface (Figure 24). Les écoulements d'air qui se développent à proximité de la surface des sols dégradés sont caractérisés, en particulier la turbulence induite par le vent.

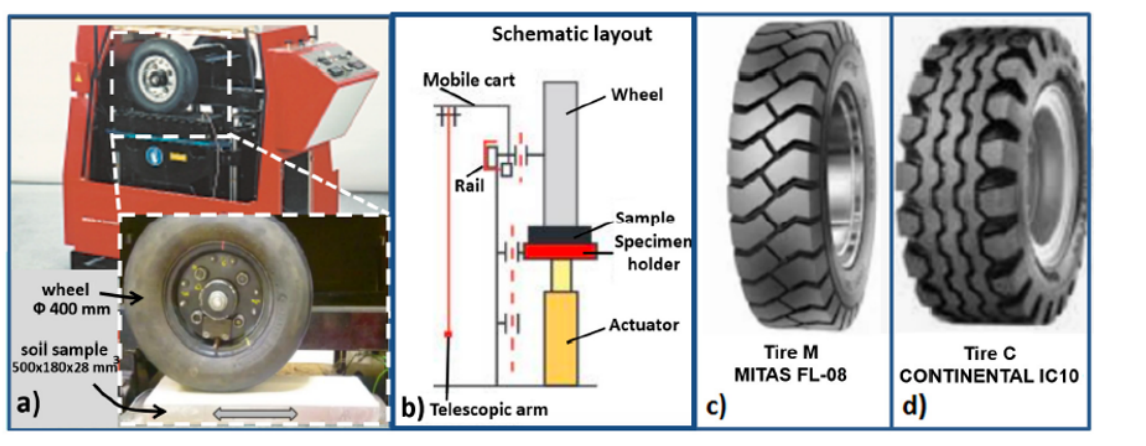


FIGURE 23 – Vue de profil du simulateur de trafic (a) Schéma (b), Type de roue testé (c)

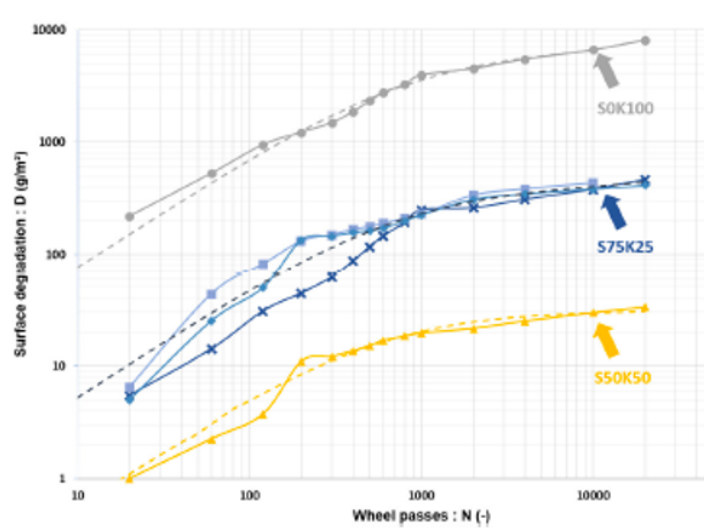


FIGURE 24 – Évolution de la dégradation de surface en fonction du nombre de passage de roue sculpté

Les résultats des mesures ont confirmé une différence significative, s'étendant sur plusieurs ordres de grandeur, entre les émissions mesurées pour les sols argileux et celles des sols sableux. Par ailleurs, il a été observé, quelque soit le sol, que la turbulence générée à une vitesse d'écoulement de 16 m/s entraîne des émissions de poussière environ 30 fois plus élevées que celles estimées à une vitesse de 8 m/s.

Les mécanismes qui gouvernent l'initiation de l'envol des poussières ont été analysés (Le Vern et al. 2020b) en tenant compte du couplage entre le trafic et l'environnement (Le Vern et al. 2020a). Sur la base des expériences en laboratoire, une campagne d'essais sur le terrain a été réalisée en utilisant des engins de chantiers de terrassement. Cette approche a permis de mieux comprendre l'influence de la vitesse du véhicule, de la charge et du type de véhicule sur la capacité de l'écoulement à remettre en suspension des particules (Duran Garcia et al. 2021).

Pour aller plus loin dans la recherche sur ce sujet, une thèse en cours, menée par Bachar Obéid depuis 2021, vise à identifier les capacités de différents types d'appendices (bavettes) à accentuer ou à réduire les émissions de poussières lors du chargement et de la phase de roulement, en utilisant des conditions expérimentales simplifiées. Cette étude vise à explorer des solutions potentielles pour réduire les émissions de poussières générées par les engins de chantier.

Chapitre V

Conclusion générale

1 Synthèse des activités de recherche Post doctoral

La méthodologie développée pendant la thèse pour étudier la durabilité des géomatériaux d'étanchéité a été transposée dans le domaine du terrassement et des ouvrages en terre. Le point de départ de cette recherche consistait à établir une corrélation entre la durabilité mécanique de l'ouvrage et les propriétés de sa structure. Ces propriétés, qu'elles soient à l'échelle de la matrice ou des agrégats de particules, dépendent de plusieurs facteurs notamment les propriétés des matériaux utilisés et les conditions de leur mise en œuvre.

Au cours des dix dernières années, mes recherches se sont donc concentrées sur le développement de deux thèmes de recherche émergents, innovants et finalisés, répondant à des besoins techniques et sociétaux : l'étude des interactions dans les géomatériaux et l'étude des interactions entre les géomatériaux et l'environnement.

Le premier thème de recherche portait principalement sur la durabilité des traitements de sol et leur performance à long terme (interactions endogènes). Les travaux réalisés ont eu pour objectif d'approfondir notre compréhension de la durabilité des traitements de sol, en étudiant les mécanismes d'interaction entre les matériaux utilisés et leur environnement, ainsi que les effets à long terme sur la performance des ouvrages.

Le deuxième thème de recherche s'est focalisé sur l'étude de l'interaction des géomatériaux avec l'environnement (interactions exogènes). Les recherches menées avaient pour objectif de comprendre l'impact des facteurs environnementaux tels que les conditions climatiques, la présence de contaminants, l'activité biologique, etc., sur les propriétés et la durabilité des géomatériaux. L'objectif est de mieux appréhender les réponses des géomatériaux à ces interactions et de développer des approches durables et adaptées pour la construction et la gestion des infrastructures.

Mes travaux de recherche ont eu pour objectif de répondre à deux questions clés :

- dans quelle mesure les conditions de mise en œuvre peuvent-elles renseigner sur la durabilité mécanique de l'ouvrage?
- comment prendre en compte les interactions à long terme entre l'ouvrage et son environnement?

Pour ce faire, la démarche méthodologique de couplage hydromécanique développée pendant la thèse a été adaptée et combinée à l'observation puis à la quantification de l'évolution microstructurale.

Les lois d'empilement granulaire, les lois de contact de type Hertz et divers autres principes sont régulièrement appliqués pour décrire la réponse mécanique d'une matrice poreuse soumise à des sollicitations cycliques, que cette réponse soit de nature élastique ou viscoélastique. Cependant, pour offrir une clarification plus approfondie quant à l'impact de la morphologie des grains et pour incorporer les propriétés physico-chimiques d'une matrice poreuse, nous avons décidé de considérer l'influence de la composition minéralogique et morphologique des grains sur la structuration de la matrice granulaire ainsi que sur sa performance hydromécanique. L'étude a été réalisée sur du mâchefer d'incinération. Les résultats confirment le rôle structurant du quartz et l'importance du remplissage des interstices de la matrice pour consolider la structure (Le et al. 2018). Le mécanisme de remplissage des interstices d'une matrice poreuse et la hiérarchisation des mécanismes de cohésion qui s'y développent ont ensuite été analysés (Furlan et al. 2018, Furlan et al. 2021).

Les résultats des essais menés sur des sédiments traités au moyen de différents liants et de cendres volantes ont fourni des éléments de réponse aux questions précédentes. Au jeune âge, les cendres volantes remplissent les espaces vides de la matrice et confèrent une amélioration de la cohésion de celle-ci. En fonction de la disponibilité de l'eau dans la matrice, une amélioration progressive de la performance mécanique et de la résistance au cisaillement peut être observée, cela étant attribué à la formation de composants cimentaires. (Furlan et al. 2018). Les composantes cimentaires néoformées contribuent à la consolidation de la matrice. Les travaux de A.Furlan (Furlan et al. 2018, Furlan et al. 2021) ont mis en évidence l'importance cruciale de l'organisation de la microstructure sur la performance mécanique. Cependant, la corrélation précise entre la microstructure et la performance mécanique n'a pas été complètement élucidée à ce stade.

L'influence du degré de compactage sur l'amélioration des performances hydrauliques et mécaniques a été examinée sur un sol naturel (Ranaivomanana, Razakamanantsoa et Ouali 2017) et sur des sols traités au liant hydraulique (Ranaivomanana, Razakamanantsoa et Amiri 2018). Il a été démontré que le degré de compactage joue un rôle significatif dans la réduction de la taille des macropores d'une matrice de sol compacté. De plus, une corrélation linéaire a été établie entre le degré de compactage et le logarithme de la perméabilité. Cette corrélation met en évidence l'importance du niveau de compactage dans la régulation de la perméabilité du sol.

L'influence des différents modes de compactage sur la microstructure a également été analysée finement (Sediki et al. 2019a). Il a été démontré que la distribution des micropores, d'une taille inférieure ou égale à 1 micromètre, est influencée par l'humidification et les conditions de préparation du mélange. Pour l'ensemble des modes de compactage étudié, qu'il s'agisse de roulement, de compactage dynamique ou de compactage statique, le sol compacté présente généralement une distribution bimodale des pores. L'effet des différents modes de compactage est par contre observable au niveau de l'intensité des macropores. Ces résultats mettent en évidence le fait que l'hydratation et la préparation du sol influencent la taille et la distribution des pores dans les agrégats (micropores), tandis que le mode de compactage détermine la taille et le volume des pores entre les agrégats (macropores). Par conséquent, on peut s'attendre à une diminution du coefficient de perméabilité du sol lorsqu'il est soumis à un compactage par roulement/pétrissage par rapport aux matériaux compactés de manière statique conventionnelle.

Lors de la réalisation de travaux de terrassement ou d'ouvrages en terre, l'opération de compactage du sol in-situ est souvent réalisée à l'aide de compacteur à rouleau lisse ou à pied d'âne selon la nature du sol en place. Le sol compacté à l'aide d'un rouleau pied d'âne est soumis à une combinaison de contrainte de roulement et de poinçonnement. Selon Lekarp, (Lekarp, Isacsson et Dawson 2000) le roulement du rouleau développe de la rotation de tenseur des contraintes sur le sol tandis que le poinçonnement produit un effet de pétrissage en continu (Kouassi 1998). Ces deux méthodes de compactage appliquent des combinaisons de contraintes relativement différentes par rapport aux méthodes appliquées couramment en laboratoire. En effet, lors de la confection des éprouvettes en laboratoire, la méthode la plus répandue consiste à compacter le sol par compression uniaxiale (simple ou double compression). La distribution des contraintes dans le sol lors du compactage est alors complètement différente des méthodes de terrain.

Bien que cette méthode classique de préparation des échantillons en laboratoire assure la reproductibilité et une modélisation homogène du comportement mécanique des échantillons de sol, il est essentiel de noter que cette approche conventionnelle de compactage ne parvient pas à reproduire les sollicitations mécaniques, hydriques et environnementales similaires à celles auxquelles le sol pourrait réellement être confronté in situ.

Pour se rapprocher des conditions de mise en œuvre similaires à ce qui serait appliqué sur les matériaux in situ, nous nous sommes inspirés de précédentes études sur le compactage par pétrissage. Selon la littérature, l'étude de l'influence du mode de compactage par pétrissage sur la performance mécanique a été initiée par Kouassi sur du sol naturel (Kouassi 1998). Par la suite, cette étude a été étendue à la performance hydraulique sur du sol traité à la chaux (Cuisinier et al. 2011). Cependant, ces études ont décrit les effets positifs de la méthode de pétrissage sans avoir procédé à une quantification et à une comparaison avec les méthodes conventionnelles de référence. Par conséquent, l'influence spécifique du pétrissage sur la performance mécanique des sols compactés est encore peu connue. Pour combler cette lacune de connaissance, nous avons mis au point un dispositif de fabrication d'éprouvettes en laboratoire permettant de produire des éprouvettes cylindriques de taille standard adaptées aux essais mécaniques en laboratoire. Une attention particulière a été portée à l'énergie de compactage appliquée au cours du processus de fabrication. De plus, jusqu'à présent en France, il existe très peu de données de terrain concernant les propriétés et les caractéristiques des structures traitées à la chaux à long terme. Contrairement aux ouvrages d'art ou aux infrastructures en béton, dont les performances mécaniques restent généralement stables pendant plusieurs années, on observe une évolution potentielle positive de la performance hydromécanique des sols traités au fil du temps.

Dans le cadre de la thèse de Das (Das et al. 2021b), nous avons analysé les propriétés hydromécaniques et microstructurales d'une digue expérimentale constituée de sol traité à la chaux, et compacté par pétrissage. Cette digue, soumise aux aléas climatiques dans l'ouest de la France, a été maintenue en place et instrumentée pendant 7 ans.

Les analyses ont révélé qu'après 7 ans, la performance mécanique au sein de la digue était trois fois supérieure à celle observée au jeune âge, démontrant ainsi une amélioration progressive au fil du temps. De plus, une amélioration significative de la performance hydraulique a été également constatée, avec un coefficient de perméabilité 10 à 100 fois plus faible qu'au jeune âge. Les analyses de pH et de microstructures ont également mis en évidence la présence de liant dans la matrice après ces 7 ans d'expositions environnementales sévères. Des études comparatives en laboratoire entre la performance mécanique d'une éprouvette prélevée sur site et celles d'une

éprouvette fabriquée en laboratoire, puis soumise à une cure accélérée, ont révélé des valeurs de performances similaires (Das et al. 2021a).

Nos résultats ont démontré que le processus de pétrissage favorise une répartition plus homogène de l'eau et du liant au sein de la matrice de sol compacté. Cette distribution uniforme du liant et de l'eau contribue à la formation de micropores, à la réduction des macropores entraînant ainsi une amélioration des performances hydromécaniques de la structure.

L'influence de la nature du fluide d'infiltration (pluie, eau de mer...) sur la tenue dans le temps des sols traités à la chaux a été étudiée (Das et al. 2022a). Il a été confirmé que, lors des expérimentations en laboratoire sur les matériaux d'ouvrages en terres, le choix du fluide d'essai doit prendre en compte les conditions de mise en œuvre in-situ. Le fluide utilisé doit être représentatif de l'eau avec laquelle le matériau sera en contact sur le site. Par exemple, l'utilisation d'eau déminéralisée peut entraîner une lixiviation trop agressive, ce qui représente un cas extrême auquel le matériau ne sera jamais exposé in-situ.

Pour approfondir l'étude des mécanismes régissant la durabilité d'une matrice de sol soumise à des sollicitations extérieures, l'influence des cycles de trafic sur la microstructure du sol compacté ainsi que sur son interaction avec l'environnement atmosphérique a été examinée dans le cadre de la thèse de Sédiki (Sediki et al. 2018). Les résultats ont révélé que les éprouvettes compactées avec les paramètres de compactage optimaux (teneur en eau et densité) présentent une faible résistance immédiatement après le compactage, ce qui explique la formation systématique de traces de pneus lors des premiers cycles de passage de véhicules.

Dans le cas où le sol est compacté du côté sec de l'optimum, nos résultats ont montré que l'éprouvette subit à la fois un tassement résiduel du matériau, ce qui entraîne une modification de la structure et une dégradation de la surface. L'analyse de la distribution granulométrique des agrégats prélevés à la surface du sol compacté a montré que le passage répété de la roue lisse arrache les agrégats formés lors du processus d'humidification et du malaxage du sol. Ces agrégats se désagrègent progressivement à mesure que les roues passent. Des mécanismes similaires ont été observés avec les roues sculptées dans les travaux de thèse de Le Vern (Le Vern et al. 2020b).

L'étude de l'évolution de la couche limite à l'interface entre l'air et la surface du sol compacté, qui contient des agrégats de particules, a été réalisée en utilisant la vélocimétrie laser dans une soufflerie. Les résultats ont démontré que le compactage par roulement permet de réduire significativement la rugosité de surface des sols sans l'éliminer complètement. Lorsqu'on considère l'effet du vent, il a été observé que les sols compactés, composés de particules grossières sableuses, sont plus susceptibles de subir des déplacements par saltation par rapport aux particules d'argile. L'écoulement de l'air dans la fine couche limite de faible épaisseur près de la surface, contenant des particules de sol dégradées, a été caractérisé. L'évolution du niveau de turbulence n'est pas linéaire par rapport à la vitesse du vent étudiée.

Le schéma suivant récapitule l'ensemble des travaux de recherche que j'ai mené au sein de l'Université Gustave Eiffel (Figure 25).

Ces deux thèmes de recherche complémentaires ont donc permis de progresser dans notre compréhension des interactions dans les géomatériaux, tant du point de vue de leurs performances internes que de leurs interactions avec l'environnement. Les résultats obtenus ont contribué à l'avancement des connaissances dans le domaine de l'ingénierie géotechnique et ont ouvert de

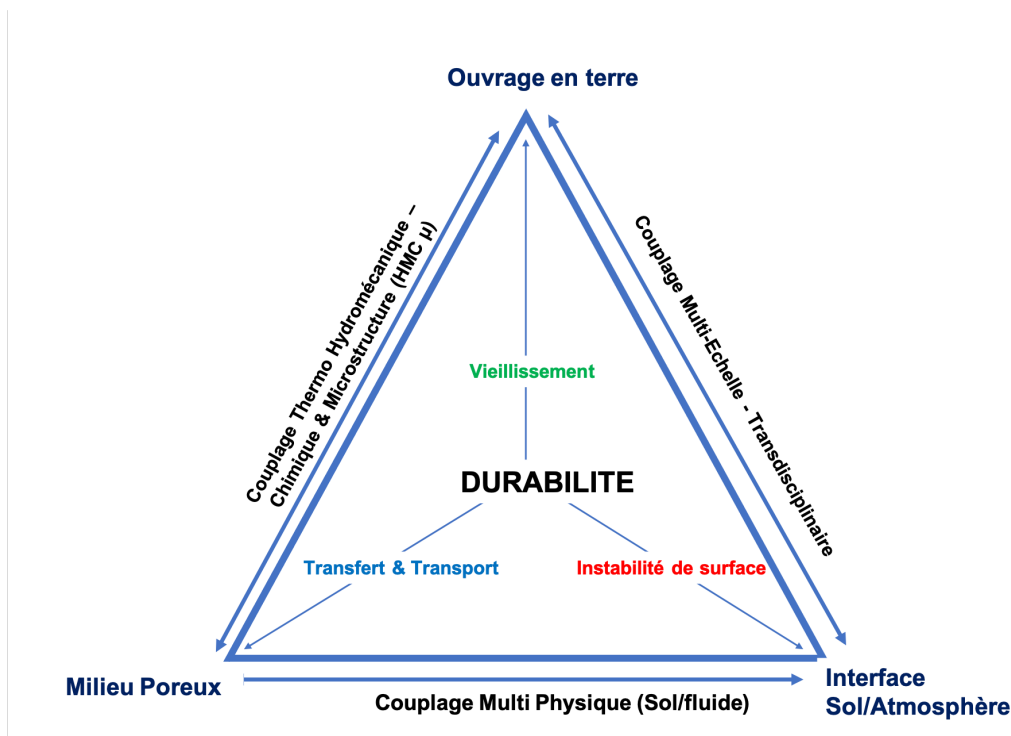


FIGURE 25 – Schéma des travaux de recherche

nouvelles perspectives pour la conception et la réalisation de structures durables et résilientes.

2 Bilan

Quatre axes de recherche ont pu être développés ces dernières années. Il s'agit de :

1- La durabilité Une avancée significative a été réalisée dans la compréhension des différents mécanismes impliqués depuis la construction jusqu'à la dégradation des structures de transport construites en sol traité.

Les travaux de recherche réalisés pendant ma thèse ont permis de mettre en évidence que l'approche couplée hydromécanique chimique (HMC) est indispensable pour étudier les mécanismes de transfert hydrique et évaluer les interactions physico-chimiques mises en place dans le milieu poreux. L'objectif était d'analyser dans quelle mesure le comportement hydromécanique, notamment le gonflement et la conductivité hydraulique, à l'échelle des particules de bentonite peut avoir des conséquences majeures sur la durabilité et les performances d'une barrière ouvragée composée de géomatériaux tels que les géosynthétiques bentonitiques (GSB), et les sols granulaires compactés. Cette partie de la recherche a permis le développement d'une méthodologie permettant l'étude de la durabilité et l'évaluation des interactions dans les géomatériaux d'étanchéité. Cette méthodologie peut également être appliquée à d'autres matériaux.

L'intégration de l'observation microstructurale pour renforcer la méthode de qualification des mécanismes régissant le comportement hydromécanique et chimique a considérablement contribué à la compréhension des réponses physiques et de l'évolution de la structure sur le comportement mécanique des géomatériaux compactés.

2- La modélisation des différents mécanismes régissant le comportement des structures en sol traité, le transfert entre le chantier et le laboratoire

Les travaux de recherche sur les sols compactés conventionnels consistaient à étudier, en laboratoire, les différents mécanismes mis en jeu lors de la mise en œuvre et à chercher à optimiser les paramètres fondamentaux dans des conditions expérimentales contrôlées telles que l'humidité relative et la température. Cependant, il est important de noter que dans la pratique sur le chantier, les aléas climatiques, les conditions logistiques variables et l'expérience des opérateurs jouent un rôle déterminant dans l'atteinte des objectifs fixés en laboratoire. Bien que cette approche soit intéressante pour l'optimisation, son efficacité est limitée pour analyser les pathologies pouvant entraîner une instabilité de la structure lors de la mise en œuvre et compromettre sa durabilité à long terme.

Dans le cadre des travaux de recherche sur les sols compactés, une démarche d'étude par analyse inverse a été développée. Cette approche vise à comprendre les mécanismes d'endommagement et/ou d'instabilité en réalisant des expérimentations à l'échelle 1 à l'aide de planches d'essai ou le montage d'expérimentations in situ dans les conditions environnementales réelles du site. Ces expérimentations permettent d'analyser les différents paramètres impliqués et de tenter de les reproduire en laboratoire afin de valider les différents mécanismes en jeu.

Cette démarche d'analyse inverse offre une approche complémentaire à l'étude en laboratoire en permettant de prendre en compte les conditions réelles du terrain et les interactions complexes qui peuvent affecter la performance des sols compactés. Elle contribue ainsi à une meilleure compréhension des mécanismes à l'œuvre et à une évaluation plus précise de la durabilité et de la stabilité des structures sur le long terme.

3- La quantification de l'évolution microstructurale et l'influence de la microstructure sur le comportement hydro mécanique et physico chimique des sols fins traités ou non.

Il est intéressant de noter que l'observation microstructurale, utilisée notamment dans l'étude des géomatériaux d'étanchéité, a apporté une contribution significative à la description des paramètres en jeu. Cependant, cette approche présente des limites car elle ne permet pas de définir quantitativement la contribution de chaque paramètre considéré. Ainsi, la quantification de l'évolution de la microstructure s'est avérée indispensable pour évaluer les interactions au sein de la structure poreuse et en quantifier l'impact sous sollicitations endogènes et/ou exogènes, et éventuellement les intégrer dans les calculs de dimensionnement.

4- L'étude de l'interaction des géomatériaux avec l'atmosphère.

Jusqu'à récemment, l'interaction des géomatériaux avec l'atmosphère n'était pas un sujet considéré. Il a donc fallu développer cette nouvelle thématique de recherche, monter des projets avec des partenaires anciens et en trouver de nouveaux.

Dans le cas des pistes non revêtues, l'étude de la dégradation de la surface sous sollicitation du trafic et de l'environnement a nécessité l'adoption d'une démarche couplant la mécanique des sols et la mécanique des fluides. Cette approche d'étude permet de prendre en compte simultanément les mécanismes actifs dans les géomatériaux (mécanique des solides) ainsi que les interactions de ces derniers avec leur environnement (mécanique des fluides).

Lors de la mise en œuvre d'une structure de sol compacté, l'hydratation des particules de sol permet la formation d'agrégats contenant des micropores et des mésopores connectés ou non connectés. Le processus de compactage induit une déformation globale des agrégats sans impact significatif sur le volume des micropores. L'action du compactage se concentre principalement

sur la déformation volumétrique des agrégats et la réduction de l'espace inter-agrégat, entraînant ainsi une diminution de la taille des pores inter-agrégats. Le comportement hydromécanique de la structure peut être considérablement influencé par la distribution de l'eau dans la matrice poreuse.

Sous l'effet des cycles de chargement et de roulement générés par le trafic, les agrégats proches de la surface se fragilisent et se désagrègent complètement suite aux passages répétés des roues. Le mécanisme à l'origine de l'envol des particules a été étudié en examinant l'écoulement et en analysant la couche limite de faible épaisseur. Une méthodologie a été développée pour prendre en compte les différents mécanismes impliqués. Cette approche a été utilisée pour aborder les problématiques liées à l'économie des ressources en eau dans les chantiers de terrassement.

Chapitre VI

Références bibliographiques

Références

- Amiri, O., A. Aït-Mokhtar et M. Sarhani. 2005. « Tri-dimensional modelling of cementitious materials permeability from polymodal pore size distribution obtained by mercury intrusion porosimetry tests ». *Advances in Cement Research* 17 (1) : 39-45. <https://doi.org/10.1680/adcr.2005.17.1.39>. eprint : <https://doi.org/10.1680/adcr.2005.17.1.39>. <https://doi.org/10.1680/adcr.2005.17.1.39>.
- Barast, G., A. Razakamanantsoa, I. Djeran-Maigre, T. Nicholson et D Williams. 2017. « Swelling properties of natural and modified bentonites by rheological description ». *Modified Clays for Barriers, Applied Clay Science* 142 : 60-68. ISSN : 0169-1317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.008>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131716300084>.
- Barast, G., A. Razakamanantsoa, I. Djeran Maigre et D. Williams. 2016. « Description rhéologique du gonflement des bentonites naturelles et calcique activées », 370-377. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, juillet.
- Bechet, B., D. Demarre, D. Deneele et A. Razakamanantsoa. 2016. *Etude Barrage Drennec. Problème de concrétion et érosion*. Rapport technique.
- Cuisinier, Olivier, Jean-Claude Auriol, Tangi Le Borgne et Dimitri Deneele. 2011. « Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil ». *Engineering Geology* 123 (3) : 187-193. ISSN : 0013-7952. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.07.010>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795211001839>.
- Das, G., A. Razakamanantsoa, G. Herrier et D. Deneele. 2021a. « Compressive strength and microstructure evolution of lime-treated silty soil subjected to kneading action ». *Transportation Geotechnics* 29 : 100568. ISSN : 2214-3912. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100568>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214391221000581>.
- Das, G, A. Razakamanantsoa, G. Herrier et D. Deneele. 2022a. « Influence of pore fluid-soil structure interactions on compacted lime-treated silty soil ». *Engineering Geology* 296 : 106496. ISSN : 0013-7952. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106496>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001379522100507X>.
- Das, G., A. Razakamanantsoa, G. Herrier et D. Deneele. 2022b. « Influence of wetting fluids on the compressive strength, physicochemical, and pore-structure evolution in lime-treated silty soil subjected to wetting and drying cycles ». *Transportation Geotechnics* 35 : 100798. ISSN : 2214-3912. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100798>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214391222000824>.

- Das, G., A. Razakamanantsoa, G. Herrier et D. Deneele. 2023. « Physicochemical and Microstructural Evaluation in Lime-Treated Silty Soil Exposed to Successive Wetting-Drying Cycles Submitted to Different Testing Conditions » [en EN]. Publisher : American Society of Civil Engineers, *Journal of Materials in Civil Engineering* 35, n° 3 (mars) : 04022458. ISSN : 1943-5533, visité le 6 février 2023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004636](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004636). <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0004636>.
- Das, G., A. Razakamanantsoa, G. Herrier, L. Saussaye, D. Lesueur et D. Deneele. 2021b. « Evaluation of the long-term effect of lime treatment on a silty soil embankment after seven years of atmospheric exposure : Mechanical, physicochemical, and microstructural studies ». *Engineering Geology* 281 : 105986. ISSN : 0013-7952. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105986>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795220318834>.
- Das, G., A. Razakamanantsoa et E. Rayssac. 2021. « A regulated device to simulate the in-situ wetting and drying conditions in compacted soil (applied). »? Dépôt Europe EP21306691.3.
- Das, Geetanjali, Andry Razakamanantsoa, Dimitri Deneele et Gontran Herrier. 2022c. « Hydraulic performance and microstructure evolution of kneading compacted lime-treated silty soil permeated with low-ionic strength solution. » In *20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2022*, 6 p. 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2022, SYDNEY, AUSTRALIE, 01-/05/2022 - 05/05/2022. SYDNEY, Australia, mai. <https://hal.science/hal-03629297>.
- Das, Geetanjali, Andry Razakamanantsoa, Gontran Herrier et Dimitri Deneele. 2022d. « Hydro-mechanical and Pore-Structure Evolution in Lime-Treated Kneading Compacted Soil », 251-260. Mars. <https://doi.org/10.1061/9780784484012.026>.
- . 2022e. « Physicochemical and microstructure evaluation in lime-treated silty soil exposed to successive wetting-drying cycles using different testing conditions. » Juin. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004636](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004636).
- Djeran-Maigre, I., P. Charruau, D. Levacher et A. Razakamanantsoa. 2018. « Les sédiments de l'Usumacinta : réalités du terrain et prélèvements. » Lyon, juin.
- Djeran-Maigre, I., I Morse, L. Briançon, E. Delfosse, D. Levacher et Andry Razakamanantsoa. 2022. « Uses of Usumacinta River sediments as a sustainable resource for unpaved roads : An experimental study on a full-scale pilot unit », 9 : 100136. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100136>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666691X22000343>.
- Djeran-Maigre, Irini, Daniel Levacher, Andry Razakamanantsoa et Stéphane Vacherie. 2020. « Les sédiments fluviaux de l'Usumacinta du Mexique et leur valorisation. » In *JNGG 2020, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, 9 p. JNGG 2020, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Lyon, FRANCE, 02-/11/2020 - 03/11/2020. Lyon, France, novembre. <https://hal.science/hal-03033598>.
- DJERAN-MAIGRE, Irini, A. Morsel, Mazhar HUSSAIN, Daniel LEVACHER, Andry RAZAKAMANANTSOA et E. Delfosse. 2022. « Behaviour of masonry lateral loaded walls made with sediment-based bricks from the Usumacinta river (Mexico) ». *Cleaner Engineering and Technology* 11 : 100587. ISSN : 2666-7908. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100587>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790822001926>.

- Djeran-Maigre, Irini, Ahmad Morsel, Mazhar Hussain, Daniel Levacher, Andry Razakamanantsoa et E. Delfosse. 2022. « Behaviour of masonry lateral loaded walls made with sediment-based bricks from the Usumacinta river (Mexico) ». *Cleaner Engineering and Technology* 11 (novembre) : 100587. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100587>.
- Djeran-Maigre, Irini, Andry Razakamanantsoa, Daniel Levacher, Mazhar Hussain et Estelle DELFOSSE. 2023. « A Relevant Characterization of Usumacinta River Sediments for a Reuse in Earthen Construction and Agriculture ». *SSRN Electronic Journal* (janvier). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4341668>.
- Duran Garcia, E., M. Le Vern, F. Murzyn, A. Razakamanantsoa et F. Larrarte. 2021. « Comparative study of the flow in the wake of cab-over and articulated dump trucks : application to dust suspension ». *European Journal of Mechanics B/Fluids*.
- Furlan, A., A. Razakamanantsoa, H. Ranaivomanana, O. Amiri, D. Levacher et D. Deneele. 2021. « Effect of fly ash on microstructural and resistance characteristics of dredged sediment stabilized with lime and cement ». *Construction and Building Materials* 272 : 121637. ISSN : 0950-0618. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121637>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820336412>.
- Furlan, A., A. Razakamanantsoa, H. Ranaivomanana, D. Levacher et K. Takeshi. 2018. « Shear strength performance of marine sediments stabilized using cement, lime and fly ash ». *Construction and Building Materials* 184 (septembre). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.231>.
- Furlan, Ana, Andry Razakamanantsoa, Yingjie LIANG et Dimitri Deneele. 2015. « Feasibility study of chemical stabilization of dredged marine sediment » (janvier) : 143-148. <https://doi.org/10.5150/cmcm.2015.029>.
- Geetanjali, D., A. Razakamanantsoa, L. Saussaye, F. Losma et D. Deneele. 2022. « Carbonation investigation on atmospherically exposed lime-treated silty soil ». *Case Studies in Construction Materials* 17 : e01222. ISSN : 2214-5095. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01222>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522003540>.
- Gupta, R., D. Levacher et A. Razakamanantsoa. 2016. « Analogy between T-Bar and vane shear test », 33-40. *Geo-Environnemental Engineering*, Nantes, juin.
- Hamard, E., C. Cammas, A. Fabbri, A. Razakamanantsoa, B. Cazacliu et J-C. Morel. 2017. « Historical Rammed Earth Process Description Thanks to Micromorphological Analysis ». *International Journal of Architectural Heritage* 11 (3) : 314-323. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1222462>. eprint : <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1222462>. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1222462>.
- Hamard, E., E. Cazacliu, A. Razakamanantsoa et J-C. Morel. 2016. « Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building ». *Building and Environment* 106 : 103-119. ISSN : 0360-1323. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.009>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132316302165>.
- Hamard, E., B. Lemerrier, B. Cazacliu, A. Razakamanantsoa et J-C Morel. 2018a. « A new methodology to identify and quantify material resource at a large scale for earth construction – Application to cob in Brittany ». *Construction and Building Materials* 170 (mai) : 485-497. ISSN : 0950-0618. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.097>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818305877>.

- Hamard, E., B. Lemercier, B. Cazacliu, A. Razakamanantsoa et J-C. Morel. 2018b. « Identification and quantification of material resource for earth construction ». In *International Symposium on Earthen Structures*. 22-24/08. Bangalore, India. Août.
- Haochen, J., et Andry Razakamanantsoa. 2013. *Intermediate report of the project water saving on earthwork and unpaved road : water spray distribution under three geometric configurations*. Rapport technique. Août.
- Hejase, Bilal, et Umit Ozguner. 2022. « Physics-Based Simulation and Automation of a Load-Haul-Dump Operation for an Articulated Dump Truck ». *Vehicles* 4 (1) : 167-181. ISSN : 2624-8921. <https://doi.org/10.3390/vehicles4010011>. <https://www.mdpi.com/2624-8921/4/1/11>.
- Hussain, M., D. Levacher, N. Leblanc, Z. Hafida, I. Djeran-Maigre, A. Razakamanantsoa et i L. Saout. 2021a. « Properties of Mexican Tropical Palm Oil Flower and Fruit Fibers for Their Prospective Use in Eco-Friendly Construction Material ». *Fibers* 9 (11). ISSN : 2079-6439. <https://doi.org/10.3390/fib9110063>. <https://www.mdpi.com/2079-6439/9/11/63>.
- Hussain, M., D. Levacher, N. Leblanc, Z Hafida, I. Maigre-Djeran et A. Razakamanantsoa. 2022a. « Influence of Palm Oil Fibers Length Variation on Mechanical Properties of Reinforced Crude Bricks ». In *Bio-Based Building Materials*, 1 : 707-714. Construction Technologies and Architecture. Trans Tech Publications Ltd, février. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.707>.
- Hussain, M., D. Levacher, N. Leblanc, H. Zmamou, J-B Besnier, I. Djeran-Maigre et A. Razakamanantsoa. 2021b. « Analysis of sediment-based fired bricks strengths : A case study of fluvial sediments from Mexico ». In *Proceedings of the Geo-Environmental Engineering*. 171-179. Mai.
- Hussain, M., D. Levacher, N. Leblanc, H. Zmamou, I. Djeran-Maigre, A. Razakamanantsoa et Hussain Ali. 2023a. « River dredged sediments reuse in fired bricks – A case study of Usumacinta River, Mexico ». *Journal of Building Engineering*.
- Hussain, M., D. Levacher, N. Leblanc, H. Zmamou, I. Djeran-Maigre, A. Razakamanantsoa et L. Saouti. 2022b. « Reuse of harbour and river dredged sediments in adobe bricks ». *Cleaner Materials* 3 : 100046. ISSN : 2772-3976. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100046>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772397622000065>.
- Hussain, M., D. Levacher, L. Saouti, N. Leblanc, Z. Hafida, I. Djeran-Maigre et A. Razakamanantsoa. 2022c. « Implementation on a Preparation and Controlled Compaction Procedure for Waste-Fiber-Reinforced Raw Earth Samples ». *Journal of Composites Science* 6 (1). ISSN : 2504-477X. <https://doi.org/10.3390/jcs6010003>. <https://www.mdpi.com/2504-477X/6/1/3>.
- Hussain, M., N. Levacher D.and Leblanc, H. Zmamou, I. Djeran-Maigre, A. Razakamanantsoa et Hussain Ali. 2023b. « A possible direct recycling of dredged sediments from the Usumacinta River (Mexico) into fired bricks. » *Journal of Building Engineering*. (submitted).
- Hussain, M., L. Saouti, D. Levacher, I. Djeran-Maigre, A. Razakamanantsoa, N. Leblanc et H. Zmamou. 2020a. « Production of waste fibre-reinforced raw earth specimens by controlled compaction ». In *3rd Euromaghreb Conference “Sustainability and Bio based Materials on the road of Bioeconomy, Rouen*. Octobre.

- Hussain, Mazhar, Daniel Levacher, Nathalie Leblanc, Hafida Zmamou, Irini Djeran-Maigre et Andry Razakamanantsoa. 2022d. « Possible recycling of dredged sediments in earth bricks - case studies of marine, fluvial and dam sediments », 765-774. Janvier. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2022.078>.
- HUSSAIN, Mazhar, Daniel LEVACHER, Nathalie LEBLANC, Hafida ZMAMOU, Irini DJERAN-MAIGRE et Andry RAZAKAMANANTSOA. 2022. « Production and Characterization of Fired Bricks from river dredged sediments ». 9th International Conference on Engineering for Waste et Biomass Valorisation, juin.
- Hussain, Mazhar, Daniel Levacher, Nathalie Leblanc, Hafida Zmamou, Irini Djeran-Maigre et Andry Razakamanantsoa. 2022. « River dredged sediments suitability for fired and crude bricks », 100046. GEE Geo-Environmental Engineering - May 2022 - Osaka - Japon, mars. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100046>.
- Hussain, Mazhar, Daniel Levacher, Nathalie Leblanc, Hafida Zmamou, Irini Djeran-Maigre et Andry Razakamanantsoa. 2020b. « Sediment-based fired bricks strength optimization - A discussion on different approaches », 649-658. Janvier. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2020.072>.
- Hussain, Mazhar, Daniel Levacher, Nathalie Leblanc, Hafida Zmamou, Irini Djeran-Maigre et Andry Razakamanantsoa. 2023c. « Usumacinta River sediments as a renewable resource for landscaping and agronomy. » *Geoderma Regional* GEODRS-D-23-00086.
- Hussain, Mazhar, Daniel Levacher, Nathalie Leblanc, Hafida Zmamou, Irini Djeran-Maigre, Andry Razakamanantsoa et Léo Saouti. 2023d. « Analysis of physical and mechanical characteristics of tropical natural fibers for their use in civil engineering applications ». *Journal of Natural Fibers* 20 (février). <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2164104>.
- Kazuki, S., G. Barast, A. Razakamanantsoa, I. Djeran-Maigre, K. Takeshi et D. Levacher. 2017. « Comparison of prehydration and polymer adding effects on Na activated Ca-bentonite by free swell index test ». *Applied Clay Science* 142 (juin) : 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.009>. <https://hal.science/hal-01383087>.
- Kouassi, Paulin. 1998. « Comportement des sols fins compactés : application aux remblais et aux ouvrages en terre ». 1998BOR10663. Thèse de doct. <http://www.theses.fr/1998BOR10663>.
- Le, N.H., A. Razakamanantsoa, M-L. Nguyen, V.T. Phan, P-L. Dao et D.H. Nguyen. 2018. « Evaluation of physicochemical and hydromechanical properties of MSWI bottom ash for road construction ». *Waste Management* 80 : 168-174. issn : 0956-053X. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.007>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18305452>.
- Le Vern, M., A. Razakamanantsoa, F. Murzyn, F. Larrarte et V. Cerezo. 2022. « Effects of soil surface degradation and vehicle momentum on dust emissions and visibility reduction from unpaved roads ». *Transportation Geotechnics* 37 : 100842. issn : 2214-3912. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100842>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221439122200126X>.
- Le Vern, M., O. Sediki, A. Razakamanantsoa, F. Murzyn et L. Frédérique. 2020a. « Experimental Assessment of Dust Emissions on Compacted Soils Degraded by Traffic ». *Atmosphere* 11 (avril) : 369. <https://doi.org/10.3390/atmos11040369>.

- Le Vern, M., O. Sediki, A. Razakamanantsoa, F. Murzyn et L. Frédérique. 2020b. « Experimental Study of Particle Lift Initiation on Roller Compacted Sand-Clay Mixtures ». *Environmental Geotechnics* (février) : 1-12. <https://doi.org/10.1680/jenge.19.00172>.
- Le Vern, Mickael, A. Razakamanantsoa, F. Murzyn et F. Larrarte. 2020c. *Étude expérimentale des mécanismes et des conditions d'envols des poussières. Applications aux chantiers de terrassement*. Journée Techniques Route. Nantes, France.
- Le Vern, Mickael, Andry Razakamanantsoa, Frederic Murzyn, Frédérique Larrarte et Veronique Cerezo. 2021a. « Study on a test track of dust resuspension induced by a vehicle ». Mars.
- Le Vern, Mickael, Ouardia Sediki, Andry Razakamanantsoa, Frederic Murzyn, Frédérique Larrarte, Pascal Insenga et Philippe Gotteland. 2021b. « Development of a model to quantify dust emissions from truck traffic on earthmoving sites : approach and preliminary results ». Mai.
- Lekarp, Fredrick, Ulf Isacson et Andrew Dawson. 2000. « State of the art. I : Resilient response of unbound aggregates ». *Journal of transportation engineering* 126 (1) : 66-75.
- Levacher, D., Sonia Khadraoui, K. Sano, Takeshi KATSUMI, Baptiste Anger et Andry Razakamanantsoa. 2013a. *Measurement of undrained shear strength during natural sediments drying*. Geo-Environmental Engineering 31 May-1 June Seoul Korea.
- Levacher, Daniel, Sonia Khadraoui, K. SANO, Takeshi Katsumi, Baptiste Anger et Andry Razakamanantsoa. 2013b. « Measurements of undrained shear strength during natural drying » (mai).
- LEVACHER, Daniel, et Andry RAZAKAMANANTSOA. 2014. « A Sedi-bar test for measuring consistency of sediments ». In *4th International Symposium on Sediment Management, FER-RARA, ITALIE*, 8p. Septembre.
- Levacher, Daniel, Andry Razakamanantsoa et El Cherifi. 2014. « Un nouvel outil de mesure de la cohésion non drainée des sédiments et sols mous », 1007-1016. Janvier. ISBN : 9782359210125. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2014.111>.
- Levacher, Daniel, Andry Razakamanantsoa et Ritesh Gupta. 2016. « Sediment shear strength. Using the laboratory T-bar and effect of the diameter ». *Revue Paralia* 9 (janvier) : s01.1-s01.6. <https://doi.org/10.5150/revue-paralia.2016.s01>.
- . 2015. « Shear resistance of sediments during dehydration : Use of laboratory T-bar testing and size diameter effect. » In *Coastal and Maritime Mediterranean Conference*. <http://dx.doi.org/10.5150/cmcr>
- Levacher, Daniel, Andry Razakamanantsoa, Ritesh Gupta et Takeshi Katsumi. 2016. « Comparative Su measurements with vane shear and T-bar testing on soft soils in laboratory ». *Japanese Geotechnical Society Special Publication 2* (janvier) : 465-468. <https://doi.org/10.3208/jgssp.OTH-25>.
- LEVACHER, Daniel, Andry RAZAKAMANANTSOA, Fumiaki KIMURA et Takeshi KATSUMI. 2014. « Use of Sedi-bar test for the characterization of soft soils and sediments ». In *13th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering, SAPPORO, JAPON*, pp. 8-15. Mai.
- Liang, Yingjie, Daniel Levacher, Dimitri Deneele et Andry Razakamanantsoa. 2014. « Effets des cendres volantes sur le comportement mécanique de sédiments méditerranéens traités à base de ciment et de chaux », 1017-1026. Janvier. ISBN : 9782359210125. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2014.112>.

- Ranaivomanana, H., G. Das et A. Razakamanantsoa. 2022. « Modeling of Hysteretic Behavior of Soil–Water Retention Curves Using an Original Pore Network Model ». *Transport in Porous Media* 142 (3) : 559-584. <https://doi.org/10.1007/s11242-022-01759-7>. <https://doi.org/10.1007/s11242-022-01759-7>.
- Ranaivomanana, H., A. Razakamanantsoa et A. Ouali. 2017. « Permeability Prediction of Soils Including Degree of Compaction and Microstructure ». *International Journal of Geomechanics* 17 (4) : 04016107. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000792](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000792). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000792](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000792).
- Ranaivomanana, H, Andry Razakamanantsoa et O Amiri. 2018. « Effects of Cement Treatment on Microstructural, Hydraulic, and Mechanical Properties of Compacted Soils : Characterization and Modeling ». *International Journal of Geomechanics* 18, n° 9 (septembre) : 04018106. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GM.1943-5622.0001248>.
- Ranaivomanana, Harifidy, et Andry Razakamanantsoa. 2018. « Toward a better understanding of the effects of cement treatment on microstructural and hydraulic properties of compacted soils ». *MATEC Web of Conferences* 163 (janvier) : 06007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816306007>.
- Rayssac, E., Louis Battist et A. Razakamanantsoa. 2020. *Projet de plan d'eau artificielle (2020 – 2023)*. Rapport technique. Police de l'Eau/ DREAL.
- Rayssac, E., D. Bodenès, Mickael Le Vern, Sergio Palma Lopes, Gugole Gautier et Andry Razakamanantsoa. 2020. *Etude de sol pour le compte de la DGA TT*. Rapport technique. DGATT.
- Razakamanantsoa, A. 2020. « Dust Emission from unpaved road. » In *2nd International Symposium In Transportation Engineering, Sao Paolo, Brazil*. Octobre.
- . 2013a. *Etude de l'effet du compactage sur la microstructure et la perméabilité des sols fins*. Rapport technique. RFF/IFSTTAR, décembre.
- . 2017. « Exécution des terrassements - Réalisation des ouvrages d'étanchéité en sol compacté », sous la direction de Norme AFNOR FD P11-302.
- Razakamanantsoa, A., G. Barast et I. Djeran-Maigre. 2014. « Characterization of mixed bentonite-polymer for landfill use ». *Environmental Geotechnics* 3 (<http://dx.doi.org/10.1680/envgeo.13.00095> (IF : 2,5)) : 28-35.
- . 2011. « Hydraulic conductivity determination of compacted sand-bentonite mixture using filter press ». *Geotechnical Testing Journal* 34, n° 1 (janvier) : pp.9-18. <https://doi.org/10.1520/GTJ103080>. <https://hal.science/hal-00958758>.
- Razakamanantsoa, A., D. Deneele et I. Djeran-Maigre. 2016. « Effect of clod size distribution on the mechanical behavior of lime and cement treated clay ». In *EMI (ASCE)*. Octobre.
- Razakamanantsoa, A., I. Djeran-Maigre et G. Barast. 2016. « Characterisation of bentonite polymer for bottom liner use ». *Environmental Geotechnics* 3 (1) : 28-35. <https://doi.org/10.1680/envgeo.13.00095>. eprint : <https://doi.org/10.1680/envgeo.13.00095>. <https://doi.org/10.1680/envgeo.13.00095>.
- Razakamanantsoa, Andry. 2018. « Dust collection system, method for determining at least one property of a dust releasing material, and ground watering method. » ? 0 (16825477.9 – 1001).

- Razakamanantsoa, Andry. 2013b. *Économies d'eau pour l'arrosage des pistes sur chantier de terrassement*. Rapport d'Activité IFSTTAR.
- Razakamanantsoa, Andry. 2009. « Etudes du comportement hydromécanique, chimique et de la durabilité des géomatériaux d'étanchéité mélangés avec des polymères ». 2009ISAL0120. Thèse de doct., INSA Lyon. <http://www.theses.fr/2009ISAL0120/document>.
- Razakamanantsoa, Andry. 2013c. *Rapport d'étude : Economie d'eau dans l'arrosage des pistes non revêtues*. Rapport technique.
- RAZAKAMANANTSOA, Andry. 2012. *Rapport d'étude SPTF, RA/1209/RAZ. Rapport l'arrosage des pistes non revêtues*. Rapport technique. SPTF.
- Razakamanantsoa, Andry. 2015. « Système de collecte de poussières, procédé de détermination d'au moins une propriété d'un matériau en matière de dégagement de poussières, et procédés d'arrosage d'un sol. »
- Razakamanantsoa, Andry, J.P. David, Erwann Rayssac et Auriol J.C. 2012. *Effect of the sample preparation on geotechnical properties of partially saturated lime-cement treated silt*. 3rd International Seminar on Earthworks in Europe 19-20 March Berlin Germany.
- Razakamanantsoa, Andry, Irini Djeran-Maigre et G. Barast. 2013. « Hydraulic behaviour of activated calcium bentonite mixed with polyionic charged polymers for landfill and earthwork applications » (juillet).
- Razakamanantsoa, Andry R., Gilles Barast et Irini Djeran-maigre. 2012. « Hydraulic performance of activated calcium bentonite treated by polyionic charged polymer ». *Applied Clay Science* 59-60 : 103-114. ISSN : 0169-1317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.01.022>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131712000452>.
- Razakamanantsoa, Andry Rico, et Irini Djeran-Maigre. 2016. « Long term chemo-hydro-mechanical behavior of compacted soil bentonite polymer complex submitted to synthetic leachate ». *Waste Management* 53 : 92-104. ISSN : 0956-053X. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.04.023>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16301866>.
- Razakamanantsoa, Andry. 2015. *Durabilité des bentonites polymères dans les barrières étanches*. ISBN : 978-3-8416-6364-1. Sous la direction d'Universitaire Européenne. 336.
- Sammartino, S., O. Amiri et Aït-Mokhtar. 1999. « Analytic Modelling and Experimental Study of the Porosity and Permeability of a Porous Medium - Application to Cement Mortars and Granitic Rock ». *Magazine of Concrete Research - MAG CONCR RES* 51 (janvier) : 391-396. <https://doi.org/10.1680/mac.1999.51.6.391>.
- Saussaye, Lucile, Geetanjali Das, Andry Razakamanantsoa, Erwann Rayssac, Dimitri Deneele, Christophe Chevalier, Louis Battist et al. 2020. « Dignes expérimentales du CER de Rouen en sol limoneux traité à la chaux et non traité : évaluation après 7 ans ». In *JNNG 2020, 10èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, 9 p. JNNG 2020, 10èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Lyon, FRANCE, 02-/11/2020 - 03/11/2020. Lyon, France, novembre. <https://hal.science/hal-03033619>.

- Sediki, O., E. Rayssac et A. Razakamanantsoa. 2021. *Guide FNTTP : Recommandation pour la gestion des émissions de poussières et de l'usage de l'eau lors de la circulation sur piste non revêtues*. Sous la direction de FNTTP et Univ Eiffel. <https://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/librairie/collections-ifsttar/ouvrages-edites-par-lifsttar/recommandations-pour-la-gestion-des-emissions-de-poussieres-et-de-lusage-de-leau-lors-de-la-circulation-sur-pistes-non-revetues/>, janvier.
- Sediki, O., A. Razakamanantsoa, M. Hattab et T. Le Borgne. 2016a. « Influence d'un compacteur roulant sur le compactage des sols fins », 434-441. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nancy, juillet.
- Sediki, O., A. Razakamanantsoa, M. Hattab, T. Leborgne et J-M. Fleureau. 2016b. « Fine grained soils behavior compacted with laboratory rolling compaction ». In *EMI(ASCE) Metz*. Octobre.
- Sediki, O., A. Razakamanantsoa, E. Rayssac et D. Bodenes. 2019a. « Procédé et dispositif de détermination du coefficient et du potentiel d'émission de particules d'un matériau, et procédé de gestion d'une voie de circulation. » *Brevet 0 (18 55260)*.
- Sediki, O., A.R. Razakamanantsoa, M. Hattab et T. Le Borgne. 2016c. « An original laboratory roller compaction method for fine grained soil » . Geo-Environmental Engineering, Nantes, juin.
- Sediki, O., A.R. Razakamanantsoa, M. Hattab, T. Le Borgne, J.M. Fleureau et P. Gotteland. 2018. « Degradability of unpaved roads submitted to traffic and environmental solicitations : Laboratory scale ». (Hong Kong, China) (août). <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03251272>.
- Sediki, Ouardia, Andry Razakamanantsoa, Mahdia Hattab, Tangui Leborgne et Jean-Marie Fleureau. 2016d. « Fine grained soils behavior compacted with rolling compaction ». In *Conference of the ASCE Engineering Mechanics Institute*. Metz, France, octobre. <https://hal-centralesupelec.archives-ouvertes.fr/hal-01789912>.
- Sediki, Ouardia, Andry Razakamanantsoa, Erwann Rayssac et Daniel Bodenes. 2019b. « Method and device for determining the particles emission coefficient and potential of a material, and method for controlling a flow path ». Brevet Européen N° 16825477.9 – 1001, INV. G01N15/04 G01N1/10 (juin).
- Soulage, D. 2010. « Rapport d'information fait au nom de la mission commune d'information sur le traitement des déchets ». ? 0 : 183.
- Suryaleen, Rout, et Prasad Singh Suresh. 2020. « Characterization of pond ash-bentonite mixes as landfill liner material ». PMID : 32342798, *Waste Management & Research* 38 (12) : 1420-1428. <https://doi.org/10.1177/0734242X20918013>. eprint : <https://doi.org/10.1177/0734242X20918013>. <https://doi.org/10.1177/0734242X20918013>.
- Verron, L., E. Hamard, B. Cazacliu, Razakamanantsoa A., T. Duc M. Vincelas, A. Hellouin de Menibus, B. Lemercier, Ansa-Asare Rhoda Julia et T. Lecompte. 2022. « Estimating and mapping the availability of earth resource for light earth building using a soil geodatabase in Brittany (France) ». *Resources, Conservation and Recycling* 184 : 106409. issn : 0921-3449. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106409>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922002531>.

- Vincent, P., L. Chatel, J.M. Deleuil et F. Olivier. 2017. « Étude de localisation d'installations de stockage de déchets non dangereux : déterminants des critères d'exclusion et de sélection au regard de la réglementation et des jeux d'acteurs ». *Sciences Eaux et Territoires* 0, n° Articles hors-série 2017 (décembre) : 1-8. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2017.HS.11>. <https://revue-set.fr/article/view/6763>.
- Vinceslas, T., E. Hamard, A. Razakamanantsoa et F. Bendahmane. 2020. « Further development of a laboratory procedure to assess the mechanical performance of cob ». *Environmental Geotechnics* 7 (3) : 200-207. <https://doi.org/10.1680/jenge.17.00056>. eprint : <https://doi.org/10.1680/jenge.17.00056>.

Troisième partie
PROJET DE RECHERCHE

Chapitre I

Introduction

Mes activités de recherche s'inscrivent dans le contexte du développement durable, d'économie circulaire, d'économie de ressources naturelles et de l'adaptation au changement climatique.

Les démarches adoptées visent à apporter des réponses à des verrous scientifiques et technologiques :

- Sur les mécanismes d'interactions dans les géomatériaux
- Sur les différentes phases en lien avec les interactions sol-atmosphère.

L'ensemble du projet vise à étendre les champs d'activités de recherche sur des thématiques de recherche finalisées répondant à des enjeux sociétaux majeurs avec une prise en compte des changements climatiques.

Les activités de recherches menées pendant les dix dernières années portent essentiellement sur les études de couplage hydromécanique, chimique et l'introduction de l'analyse quantitative de la microstructure. Mon domaine de recherche relève de la géomécanique environnementale et se concentre sur l'étude du comportement des géomatériaux naturels et/ou alternatifs en interaction avec leur environnement.

Par définition, les géomatériaux naturels englobent les matériaux d'origine minérale, qu'ils contiennent ou non des additifs minéraux et/ou organiques. En revanche, les géomatériaux alternatifs sont principalement d'origine industrielle et sont souvent classés comme des déchets. Les additifs sont utilisés pour pallier aux défauts de performances hydromécaniques et chimiques des géomatériaux. Dans ce projet de recherche, les géomatériaux englobe les sols, les argiles, les liants, les matériaux de déconstruction, les matériaux recyclés, les sous-produits industriels ainsi que les déchets minéraux. Les géomatériaux étudiés peuvent se présenter sous différents états et de phase : liquide, solide ou en phases transitoires. Ils sont analysés à différentes échelles, allant de l'infiniment petit à l'échelle de l'ouvrage.

Les géomatériaux sont utilisés pour l'aménagement/construction d'ouvrages en terre dans de nombreux domaines du génie civil comme dans les infrastructures de transport (route, voies fluviales, voies ferrovières), les aménagements urbains ou industriels (par exemple la construction de batiments en terre).

Actuellement, les travaux de recherche en cours se focalisent sur deux axes opérationnels liés aux infrastructures et aux villes : les interactions dans les géomatériaux et l'interaction des géomatériaux avec l'atmosphère dont l'émission de particules fines.

Dans le premier axe, j'étudie les interactions au sein des géomatériaux, en mettant l'accent sur les propriétés hydromécaniques, chimiques et microstructures. Mes travaux se sont focalisés sur le comportement des géomatériaux utilisés dans les infrastructures de transport, que sont les sols naturels présents sur les chantiers. Mon objectif est ainsi de comprendre ces interactions entre les géomatériaux et les additifs utilisés pour améliorer leurs performances, ainsi que leur interaction avec leur environnement, telle que l'influence des conditions atmosphériques. Afin de développer des méthodes de conception et de construction résistantes et durables.

Dans le deuxième axe, je m'intéresse à l'interaction des géomatériaux avec l'atmosphère, en mettant l'accent sur l'émission de particules fines. Je cherche à comprendre les mécanismes à l'origine de la libération de ces particules, particulièrement dans les zones urbaines. Je m'intéresse aux sources d'émission, aux facteurs influençant les niveaux de particules fines et aux solutions pour réduire ces émissions, en vue d'améliorer la qualité de l'air et la santé des populations.

1 Stratégie de mise en oeuvre

1.1 Description

Pour réaliser mon projet de recherche, une stratégie simplifiée sur quatre niveaux est proposée ci-après :

(1) **Renforcement des activités du laboratoire GERS-GIE ainsi que des équipes de recherche thématique interne à l'Université Gustave Eiffel,**

(2) **Développer les compétences et renforcer les équipes de recherche :**

Je vise à développer les compétences et à renforcer les équipes de recherche à l'intérieur de l'Université Gustave Eiffel et en collaboration avec d'autres universités à différents niveaux géographiques. Cette démarche englobe des initiatives novatrices telles que la création de Chaires industrielles, la mise en place de Hubs internationaux ou l'établissement de Laboratoires Mixtes Internationaux. L'objectif est de collaborer avec d'autres équipes de recherche pour partager les compétences et les ressources. Cela permettra non seulement de bénéficier des forces de chaque institution, mais aussi d'améliorer la visibilité de nos activités de recherche à l'échelle internationale. Cette approche favorisera la réalisation d'études approfondies et la résolution de problèmes complexes dans le domaine des géomatériaux et de l'environnement.

En fin de compte, cette stratégie contribuera à renforcer la réputation internationale de l'Université Gustave Eiffel et à consolider son rôle en tant qu'acteur majeur dans la recherche et le développement durable,

(3) **Favoriser la dissémination par le biais de formations à l'échelle nationale et internationale** est un élément clé de notre stratégie. Cette démarche implique le partage de mes résultats et analyses pour contribuer à l'avancement de mon domaine. À travers des formations de niveau Master, des séminaires, des sessions "keynote" lors de conférences, ainsi que des universités d'été, nous créons des opportunités pour transmettre nos connaissances à une audience variée. Cette audience peut être constituée d'étudiants, de chercheurs, de professionnels et d'autres acteurs du secteur,

Pour renforcer le rayonnement scientifique à l'échelle nationale et internationale, nous mettons en place plusieurs initiatives. Celles-ci incluent l'organisation de conférences internationales, la promotion de mobilités pour les chercheurs, la promotion d'échanges académiques entre établissements, la co-construction de modules d'enseignement, l'intégration de groupes de travail thématiques, ainsi que la mise en oeuvre d'expertises scientifiques,

comme par exemple les congrès GEE 2020¹, GFA 2020² ou GDR MeGe³, JESPA, Transport on demand USP..

1.2 Actions en cours

Au fil des années, j'ai entrepris plusieurs actions pour avancer dans la réalisation de mon projet de recherche.

Je travaille à renforcer les compétences de l'équipe technique, leur permettant ainsi de participer à des expertises et des formations pour transmettre le savoir. Bien que le recrutement de cadres de recherche puisse assurer la pérennité de nos travaux, il demeure complexe à mettre en œuvre. Notre laboratoire ne dispose pas d'un vivier d'étudiants, mais plutôt d'une équipe technique composée d'agents permanents. Par conséquent, il est crucial de renforcer les compétences de cette équipe. En effet, une équipe technique compétente joue un rôle essentiel dans la capitalisation et la transmission des connaissances techniques accumulées sur plusieurs années.

J'ai également cherché à renforcer les dispositifs d'expérimentation de pointe dans le domaine de la microstructure et de l'interaction sol-atmosphère, incluant les émissions de particules fines. Cette démarche vise à consolider la qualité de nos productions scientifiques, à renforcer l'excellence, la visibilité et le rayonnement scientifique des thématiques existantes. La présence d'équipements de pointe au sein du laboratoire favorisera également le développement de notre réseau.

Une autre démarche entreprise est la consolidation de notre réseau de partenaires académiques à l'échelle internationale. Cela vise à renforcer le rayonnement scientifique du groupement de recherche, tout en consolidant la reconnaissance internationale de notre approche transversale : multiphysique, multidisciplinaire et multi-échelle. Cette approche est particulièrement pertinente pour aborder des sujets de recherche à fort impact, répondant à des enjeux plus larges voire planétaires tels que la gestion des ressources, l'empreinte carbone et l'adaptation aux changements climatiques.

Enfin, j'ai exploré des thématiques plus larges liées à l'adaptation aux changements climatiques, y compris l'adaptation des infrastructures en fonction des ressources existantes et d'autres considérations pertinentes.

1. Geotechnical Engineering Education

2. Groupe Français des Argiles

3. Couplage Multi-Physiques et Multi-échelles en Mécanique Géo-environnementale

Chapitre II

Axes de recherche

1 Interactions dans les géomatériaux

1.1 Eco-matériaux pour la construction d'ouvrage en terre

Dans le contexte de l'économie des ressources, la recherche et le développement d'additifs alternatifs visant à améliorer les performances des matériaux géotechniques en génie civil (connus sous le nom d'éco-liants) constituent une composante essentielle de mon projet. Le terme éco-liants désignent un matériau de liaison et vise à remplacer les liants traditionnels couramment utilisés tel que la chaux ou le ciment, qui sont associés à des émissions élevées de dioxyde de carbone lors de leur production. Le développement des éco-liants se heurte souvent à des barrières en termes d'application car les besoins opérationnels et les besoins fondamentaux ne sont pas souvent en harmonie. Ils exigent également un approfondissement de nos connaissances concernant leurs interactions avec les géomatériaux, afin de maîtriser leur mise en œuvre et leur durabilité. Cette démarche facilitera considérablement leur acceptation par les intervenants du domaine du génie civil.

Pour permettre le développement des éco-liants, les actions de recherches précédentes, notamment les études rhéologiques, vont être mises à profit pour élaborer des indicateurs de performances hydromécaniques, couplées aux performances physico chimiques à différentes échelles de l'ouvrage. L'objectif consiste à comprendre les différents mécanismes intervenant lors de la mise en œuvre des géomatériaux avec ces liants alternatifs et d'établir des corrélations avec les paramètres hydromécaniques qui en résultent. Un regard particulier est notamment apporté pour clarifier les liens entre les besoins opérationnels et les questionnements fondamentaux.

Une attention particulière sera donnée à l'étude de ces mécanismes qui régissent le comportement à l'échelle locale du géomatériau. En effet, ils jouent un rôle significatif dans la performance globale du géomatériau.

Pour ce faire, les techniques d'analyses de la microstructure et de la rhéologie, couplées avec les paramètres géotechniques usuels seront utilisées. Et, nous nous appuyerons sur le modèle analytique de description du mécanisme de gonflement et la compressibilité d'une pâte d'argile à l'aide de la rhéologie que nous avons développé dans le cadre du travail de (Razakamanantsoa, Djeran-Maigre et Barast 2016). L'intérêt scientifique et technologique de cet axe de recherche repose dans la possibilité qu'elle offre pour poursuivre l'étude des différents mécanismes qui se développent à l'interface des phases de transition liquide-solide.

L'étude rhéologique permettra à la fois d'accéder à des propriétés intrinsèques des géomatériaux (ex. la déshydratation, la rétention d'eau, le mécanisme de prise...), et de matérialiser les différents mécanismes d'interaction aux jeunes âges lors des traitements de géomatériaux avec ajout d'additifs d'origine minérale, organiques ou la combinaison des deux.

La quantification de la relation entre les processus physico-chimiques impliqués et les améliorations en termes de performances hydromécaniques à différentes échelles temporelles représente un objectif central de cette section du projet.

1.2 Comportements des géomatériaux composites et application au traitement et à la valorisation des géomatériaux et des matériaux bio-sourcés

Le traitement de géomatériaux est une thématique de recherche abordée par de nombreux laboratoires de recherches dans le monde. Souvent, l'étude du traitement de sol est focalisée sur l'optimisation de la formulation et du traitement pour atteindre un objectif de performance mécanique. L'originalité de l'approche proposée repose sur l'étude fine des différents mécanismes d'interactions qui s'opèrent dans les géomatériaux naturels et traités avec une prise en compte des sollicitations anthropiques et environnementales. La démarche méthodologique est basée sur un couplage chémo-hydromécanique, combiné à une analyse quantitative de la microstructure. C'est une démarche d'analyse expérimentale et de modélisation effectuée à différentes échelles.

Plusieurs méthodes de valorisation des matériaux en limites d'emplois ont été proposées dans la littérature depuis de nombreuses années. Cependant, à ce jour, il existe très peu de retours opérationnels connus. Ces matériaux en limites d'emplois regroupent, entre autres, des matériaux tels que les sédiments de dragage, les sols urbains faiblement pollués ou les déchets fibrés.

En France, hormis la réglementation contraignante sur l'utilisation des matériaux en limites d'emplois, tel que les sédiments marins, les différentes études existantes se limitent à présenter des conclusions sur le potentiel d'ouvrabilité de ces matériaux, c'est à dire, le potentiel d'un matériau ou d'un mélange à être mis en œuvre facilement et efficacement dans un processus de construction ou de fabrication. Dans le cadre de ces études, les conditions de traitement sont généralement identiques ou proches des matériaux répertoriés dans des guides tels que "le Guide de Traitement de sol", "le Guide des terrassements"..etc.

Le développement de filières de valorisation de ces matériaux se heurte à plusieurs obstacles majeurs : une méconnaissance de la durabilité des structures construites, des filières de valorisation restreintes, un manque d'outils d'identification de ces filières et l'incapacité des filières proposées à générer des matériaux de construction innovants à forte valeur ajoutée.

Par conséquent, afin de mieux valoriser ces matériaux, il est essentiel de mettre au point des outils qui prennent en compte à la fois les paramètres d'identification géotechnique et leur interaction avec les procédés de mise en œuvre ainsi que les modifications de la microstructure. Cette démarche doit aboutir à une clarification de l'influence de la mise en œuvre sur la performance des géomatériaux néo-formés. Une attention particulière sera dédiée à l'étude des mécanismes qui gouvernent la performance hydromécanique générée par des processus physiques et/ou physico-chimiques.

Dans le cadre de mes recherches, plusieurs aspects seront abordés avec des techniques d'analyse avancées en géomécanique.

Il s'agira d'abord d'étudier le mécanisme de déshydratation des géomatériaux en lien avec leur environnement. Cette section abordera, par exemple, les défis liés de séchage de sédiments dragués, la gestion efficiente de l'eau lors de la construction de voies provisoires, l'influence de la sécheresse sur l'évolution de la microstructure des sols compactés ou la modification de structure due à la carbonatation. Le deuxième aspect qui devra être abordé concerne l'exploration des différentes possibilités de formulation des géomatériaux, y compris avec l'intégration d'additifs minéraux et organiques, la valorisation de déchets fibres bio-sourcés ou de sous-produits industriels tels que les cendres volantes, le GGBS et les laitiers d'aciérie.. Enfin, un dernier objectif sera de développer de nouveaux outils et méthodologies de classification et de formulation de matériaux de construction respectueux de l'environnement en adoptant une approche intégrée entre la géotechnique et la géologie.

D'un point de vue opérationnel, cette thématique devrait aboutir à la proposition d'une classification des terres crues en fonction des types d'ouvrages envisagés, d'une proposition de formulation de géomatériaux éco-compatibles et durables, ainsi qu'à la proposition de solutions de co-valorisation de déchets en utilisant les additifs appropriés.

Les matériaux étudiés dans le cadre de ces activités de recherche englobent : la terre crue, divers additifs tels que les biopolymères, les géopolymères et les liants hydrauliques, les géomatériaux multi-composants (comme les sédiments, les cendres, les fibres, etc.), ainsi que les sols provenant de déconstructions industrielles et/ou urbaines.

A ce jour, plusieurs conventions de collaborations sont en phase de finalisation avec plusieurs entreprises et multinationales.

1.3 Durabilité des géomatériaux sous sollicitation hydromécanique chimique, anthropique et environnementale

1.3.1 Études de durabilité des géomatériaux traités

Plusieurs aspects sont abordés dans cette partie du projet :

- L'étude du vieillissement :
 - Par des cycles d'humidification et séchage représentatifs des conditions in situ,
 - Par la lixiviation pour mettre en évidence le transfert minéral qui s'opère dans la matrice.
 - Par la carbonatation artificielle et la mise en lumière des mécanismes régissant le comportement mécanique de la matrice compactée.
- L'étude de traitement alternatif pour renforcer le potentiel pouzzolanique des liants conventionnel.

1.3.2 Modélisation expérimentale du comportement hydromécanique, chimique et microstructurale

Cette phase du projet implique l'utilisation du champ de vitesse pour déterminer les paramètres de transfert au sein d'un milieu poreux. La modélisation physique à l'échelle du laboratoire sera effectuée en employant une technique de mesure appelée "Fluorescence Induite par Laser avec Ratio" (PLIF, pour son acronyme en anglais). En ce qui concerne la modélisation analytique des paramètres de transfert en milieu poreux, elle comprendra :

- Une analyse détaillée de la courbe de rétention d'eau,
- la modélisation du transfert hydrique et l'analyse de l'évolution du milieu poreux sous sollicitation en combinant les aspects hydro-mécaniques et chimiques. Une méthode d'expérimentation innovante va être mise en place pour mesurer les paramètres d'écoulement,
- La modélisation de l'évolution des phénomènes de carbonatation à l'aide de la microstructure, en utilisant également la méthode d'expérimentation innovante précédemment mentionnée.

La modélisation analytique associée sera développée en collaboration avec le laboratoire GeM, de l'université de Nantes.

1.3.3 Carbonatation des sols stabilisés.

Plusieurs aspects sont abordés dans cette partie du projet. La fabrication des liants conventionnels utilisés pour la stabilisation de sol est connue pour émettre une quantité significative de CO_2 . Le phénomène de carbonatation naturelle qui s'opère lors des travaux préparatoires dans les chantiers de terrassements entraîne une baisse de performance du matériau une fois mis en place. D'une manière globale, l'imperméabilisation des sols dus à la méthode de mise en œuvre a un impact significatif sur la gestion de l'eau de pluie, source d'inondation non contrôlée. L'imperméabilisation du sol est souvent liée à la carbonatation artificielle non contrôlée de la matrice de sol en place.

Le présent projet, vise à développer un liant alternatif à base de matériau en limite d'emploi géo et bio-sourcé. La formulation, l'évolution de performance et l'apport du traitement dans la microstructure seront étudiés. Par la suite, le potentiel de stockage de CO_2 du nouveau matériau mis en place sera ensuite étudié et amélioré.

Un projet de thèse est en phase de préparation et devrait débiter en octobre 2023. Ce projet sera réalisé en collaboration avec un ou plusieurs partenaires privés.

2 Interaction sol-atmosphère : Émission des particules

2.1 Étude de l'instabilité de structure d'un sol compacté sous l'effet de cycles de sollicitation hydromécanique.

Le processus de dégradation qui se produit à l'interface entre le sol et l'atmosphère, en réponse aux cycles de sollicitation liés au trafic, sera examiné et expliqué en utilisant la microstructure comme support d'analyse. Cette partie du projet traite les questions relatives à la dégradation des pistes non revêtues ainsi que des problèmes de nuisance visuelle causés par les émissions de poussières et leur rabattement.

Dans un premier temps, le mécanisme de génération de l'envol des poussières lors de la réalisation des pistes non revêtues est étudié. Ensuite le mécanisme de transport des poussières (initiation, envol et dispersion) est abordé. Cette seconde phase de l'étude comprend l'analyse des corrélations entre les propriétés des sols compactés et les paramètres de la couche limite proche de la surface. Différents aspects sont analysés à la fois en laboratoire et sur le chantier : Analyse de l'évolution de la rugosité de surface, caractérisation de la couche limite en laboratoire et modélisation de l'influence de la rugosité de surface sur le flux d'envols.

Il s'agit d'une approche pluridisciplinaire et novatrice : elle intègre le couplage à plusieurs échelles, de différentes disciplines et de multiples aspects physiques. Cette analyse trans-disciplinaire

couvre plusieurs aspects. Cela comprend l'analyse de la perception des risques d'exposition et de la vulnérabilité des travailleurs sur chantier, le croisement des analyses de l'impact des émissions sur la qualité de l'air à l'échelle locale et régionale, la corrélation entre la génération de poussière et le transfert d'agents pathogènes d'une part, et d'autre part, l'analyse de la corrélation entre les maladies respiratoires et les agents pathogènes transportés par les particules de poussière.

Cette partie de projet sera réalisée en collaboration avec l'ESTACA, le GeM de l'Université de Nantes, le CHU de Nantes et l'Université de Lyon.

2.2 Dispersion des particules fines

Le comportement aérodynamique en vols des particules fines (PM) d'origine minérale dépend fortement de leur taille. Les PM10 entraîne une densification du nuage de poussière généré lors de passage de véhicule. Les PM10 se déposent par gravité assez rapidement, non loin de la source. Pour ce qui est des PM2,5, la présence de ces particules fines semble être plus problématique car elles peuvent rester en suspension dans l'air et se diffuser pendant une durée indéterminée. Et, du point de vue sanitaire, les PM2,5 sont plus dangereuses pour la santé (OMS).

Afin de mettre en évidence la dispersion des particules PM10 et PM2,5, plusieurs campagnes de mesures ont été effectuées par des élèves de l'École Centrale de Nantes sur une période de 2 ans dans le cadre du Projet MINT. Ce projet s'inscrit dans le cadre du cluster Lung Innovation (<https://lungo2.fr>), animé par le CHU de Nantes, en collaboration avec l'école centrale de Nantes et l'université Gustave Eiffel. Le cluster vise à promouvoir la recherche respiratoire Nantaise dans le monde.

Les expositions aux particules fines des personnes en mobilités en milieu urbain ont été étudié à pied, en vélo, en transport en commun et en voiture. Les résultats révèlent des niveaux d'exposition aux particules fines plus élevés à proximité des chantiers et de certains points de croisement, notamment les gares. L'étude précédente a souligné l'importance de disposer d'informations régulières sur la qualité de l'air à l'échelle locale, avec une distribution spatiale fine, à intervalles réguliers et à un maillage serré incluant les quartiers, les points de croisement, les chantiers et les individus.

La précédente étude soulève deux questions cruciales : premièrement, quelle est la documentation concernant les rayons de diffusion spatiale et temporelle des particules PM10 et PM2,5 ; deuxièmement, quels sont les facteurs qui influencent la dispersion de ces particules ?

D'un point de vue opérationnel, les réponses aux questions précédentes fournissent des éléments pour aborder les questions de sécurité liées à la réduction de la visibilité causée par les nuages de poussière sur les chantiers et les carrières. La corrélation entre les émissions et l'environnement sera utilisée pour mettre en évidence les effets des émissions de particules PM2,5 sur la santé respiratoire des individus.

2.3 Mécanisme d'atténuation de l'exposition aux particules fines

Les résultats des études menés dans le projet MINT ont révélé une exposition significative aux particules fines dans l'air ambiant à proximité des chantiers, notamment les PM10 et PM2,5. Mais si la diffusivité des PM2,5 en milieu ouvert est démontrée, elle est peu documentée dans la littérature. Dans le contexte de la pandémie de COVID-19, il a été décidé d'étudier le mécanisme visant à atténuer l'impact des particules fines (PM) sur les individus. Le potentiel de perte de débit à travers les différents dispositifs de protection respiratoire les plus couramment utilisés a été testé.

Les résultats préliminaires ont montré que l'efficacité de la protection dépend significativement de l'expérience de la personne en ce qui concerne le port de masque.

Afin d'approfondir la compréhension des risques de fuites, des modélisations physiques de l'exposition aux particules fines seront effectuées dans une salle dédiée ainsi qu'en soufflerie. Plusieurs scénarios d'activité respiratoire seront testés, comprenant la respiration au repos, la respiration normale et la toux. Cette phase du projet est actuellement en cours de réalisation dans le cadre de l'appel à projets (APP) Smart and Secure (2019-2023).

Chapitre III

Moyens de mise en œuvre

1 Le laboratoire Géomatériaux et Interactions Environnementales

Le laboratoire a été créé en 2020 au sein du département Géotechnique, Environnement, Risques naturels et Sciences de la Terre (GERS) de l'université Gustave Eiffel. Implanté sur le campus de Nantes, cette unité de recherche est composée d'une petite équipe constituée de 3 chercheurs et de 3 techniciens permanents.

Compte tenu du développement des activités du laboratoire, l'équipe technique est formée pour être en mesure de mener des actions d'expertise en collaboration avec les chercheurs et de contribuer de manière substantielle aux activités de formation, incluant l'enseignement, la supervision de stages, et l'accompagnement des doctorants et stagiaires.

2 Équipes de recherche thématique

L'équipe de recherche thématique interne est un groupement de chercheur et de pool de techniciens autour d'un sujet ou d'une thématique de recherche et/ou de formation.

En parallèle de la création du laboratoire, deux équipes de recherche inter-département ont été constituées. Par exemple :

- L'équipe "Terre crue" rassemble les laboratoires de l'université GERS-GIE¹, MAST-GPEM² et GERS-SRO³. Cette collaboration renforce la présence de l'Université Gustave Eiffel dans le cadre du projet national "Terre".
- L'équipe "Interaction sol/atmosphère et qualité de l'air" rassemble les laboratoires de l'université GERS-GIE, GERS-EE⁴ et AME-EASE⁵.

Les chercheurs et les techniciens qui constituent ces équipes de recherches sont rattachés à leur laboratoire d'origines mais interviennent ponctuellement sur les sujet de recherche fédérateurs. Cette démarche permet de renforcer la mutualisation des moyens techniques, scientifiques et humains de chaque laboratoire.

1. Géomatériaux et Interaction Environnementale
2. Granulats et procédés d'élaboration des matériaux
3. Sols, roches et ouvrages géotechniques
4. Eau et Environnement
5. Environnement-aménagement, Sécurité et Eco-conception

3 Réseau de recherche thématique : multi physique - multi disciplinaire – multi échelle

À l'échelle de la région Pays de la Loire, cette méthode de fonctionnement est formalisée au moyen d'accords-cadres ou de consortiums.

Par exemple, un accord-cadre a été signé en 2019 entre l'ESTACA et l'Université Eiffel. J'en assure la coordination à l'Université Gustave Eiffel depuis 2020. Cet accord a permis de mettre en œuvre plusieurs actions : mutualisation des dispositifs d'expérimentation, des moyens de recherches sur des problématiques liés à la qualité de l'air et à l'interaction sol/atmosphère, co-encadrement de thèse et de stage Master. Un projet de renouvellement de cet accord cadre est en cours. La poursuite de cette collaboration vise à concrétiser la co-construction d'une Chaire Industrielle avec l'IMT Douai, axée sur la diffusion des particules en milieu industriel, sur les chantiers de terrassement et dans les carrières à ciel ouvert.

A l'échelle nationale, des collaborations de recherches sont déjà opérationnelles depuis plusieurs années, renforcées par des productions scientifiques en partenariat avec le laboratoire M2C de l'Université de Caen et le laboratoire GEOMAS de l'INSA Lyon. Les thèmes opérationnels abordés incluent une variété de matériaux à valoriser, tels que les déchets industriels ou non, les géomatériaux ou les géosynthétiques bentonitiques . La gestion des sédiments est déjà un domaine abordé par ces recherches, qui englobent des initiatives visant la caractérisation rhéologique des sédiments, la compréhension des mécanismes de déshydratation, ainsi que leur valorisation sous forme de briques.

4 Cluster de recherche et inter transdisciplinaire : Integrated Research Cluster LUNG O2 avec le CHU de Nantes

A l'échelle régionale, l'Université Gustave Eiffel fait partie de l'équipe du Cluster Lung Innovation (LungO2) piloté par le CHU de Nantes. Je co-anime le groupe de travail WP3 sur l'environnement, « la qualité de l'air et exposome ». L'objet du cluster est de développer des actions de recherches et de créer un réseau d'experts scientifiques multidisciplinaires en vue d'améliorer la prise en charge des patients dans le domaine des maladies respiratoires. Le volet environnemental vise à établir une corrélation entre l'environnement et l'aggravation des crises respiratoires, en mettant en relation la zone d'exposition (exposome) et les affections respiratoires.

En accord avec les différents partenaires, des réponses à différents Appel A Projet (AAP) sont envisagés en 2023.

Chapitre IV

Actions de recherche et de formation

Le développement de collaboration de recherche doit passer par la consolidation du rayonnement international. Cela entraîne des initiatives de collaboration à l'échelle internationale

1 Action de formation au niveau international : Projet Partenariats avec l'Enseignement supérieur Africain (PEA) Madatlas (2021-2024)

Le projet Madatlas est un projet international de formation dans le domaine de la cartographie et assimilé. Il est mis en oeuvre par l'Université de Fianarantsoa, l'Université de Gustave Eiffel, l'Université de Bordeaux Montaigne et l'Institut de Recherche pour le Développement et vise à renforcer la capacité de l'Université de Fianarantsoa, à Madagascar sur une période de 4 ans.

Le projet Madatlas est l'un des premiers projets fédérateurs, interdisciplinaires et internationaux de l'Université Gustave Eiffel depuis sa création.

En tant que membre du comité de pilotage du projet, j'ai apporté une contribution significative à la mise en place et à la co-construction des éléments structuraux du projet. Cela inclut la supervision de l'assemblage de la maquette de formation, l'établissement de procédures de recrutement adaptées au projet (gestionnaire de projet, partenariats, doctorants, etc.), ainsi que l'organisation et la participation à des mobilités d'enseignants. De plus, en qualité de co-coordonateur des travaux des WP Recherche et WP Partenariat du projet, je joue un rôle essentiel dans la gestion de ces aspects du projet. Le projet est financé à hauteur de 2,7 millions d'euros par l'Agence Française pour le Développement au titre de l'appel à projet (APP) PEA 2021-2025.

La pérennisation des actions qui vont être réalisés dans ce projet, la montée en compétence des enseignants Malgaches et l'employabilité des étudiants constituent les objectifs phares des WP que je co-coordonne.

Parmi une dizaine de thèse qui sont programmées, je suis impliqué dans co-encadrement de deux thèses dont une en co-tutelle :

- Une thèse sur l'utilisation de la video d'amateur pour étudier les risques d'inondations (en cours)
- Une thèse sur la cartographie du réseau routier couplés aux inventaires des ressources naturelles mobilisables (en cours de démarrage).

Ces thèses vont apporter une contribution significative au rayonnement de mes activités de recherche à l'internationale, tout en traitant des sujets de recherche cruciaux pour l'orientation des

politiques publiques en matière de besoins d'entretien et de création d'infrastructures adaptées au changement climatique.

Par ailleurs, je suis impliqué dans la planification des chantiers écoles et des campagnes de mesures sur la qualité de l'air qui sont prévus dans le projet. Les expérimentations seront réalisées en collaboration avec la startup Nantaise Atmotrack. Atmotrack est spécialisé dans le développement et la commercialisation de capteurs géolocalisables de particules fines (PM).

De plus, la collaboration avec l'Université de Fianarantsoa présente l'avantage de mettre à disposition un vivier d'étudiants compétents sur l'exploitation de flux de données importantes grâce à l'Intelligence Artificielle. Le projet est également une opportunité pour continuer les actions déjà mis en œuvre dans le cadre du projet MINT 2.2.3).

2 Renforcement de collaboration internationales avec l'université de Kyoto et l'université de Fukuoka, USP Brésil et , U. Waterloo

La collaboration avec l'Université de Kyoto commencée en 2013 a été initiée par le Professeur Daniel Levacher de l'Université de Caen (M2C). A ses débuts, la collaboration s'est concentrée sur l'accueil d'étudiants pour leurs stages de fin d'étude dans le cadre du cursus ingénieur.

Cette année, une décision commune a été prise pour formaliser la collaboration et l'ouvrir à des échanges de chercheurs ainsi qu'à la réponse à des appels à projets internationaux. Cette démarche, soutenue tout particulièrement par l'Université de Kyoto, vise à renforcer la coopération entre nos institutions.

La collaboration avec l'Université de Fukuoka est relativement récente. La visite du responsable du département de génie civil de l'Université de Fukuoka, ainsi que notre visite de leur laboratoire cette année, ont permis d'identifier des initiatives de recherche clés qui nécessitent d'être explorées conjointement.

Les actions menées avec l'université de Kyoto et l'université de Fukuoka ont le soutien du Research Institute for Environmental Geotechnics (RIEG, Japon). Ainsi, deux accords-cadres sont en cours de réflexion : l'un entre l'Université Gustave Eiffel et l'Université de Kyoto, et l'autre entre l'Université Gustave Eiffel et l'Université de Fukuoka. Les deux accords vont permettre de mettre en place une équipe de recherche internationale dans le domaine des géomatériaux avec un focus sur les transferts en milieu poreux (U. Eiffel/U. Nantes/ U. Kyoto) et sur la durabilité des géomatériaux (U. Fukuoka).

A court terme, nous envisageons de répondre à l'AAP PARTENARIATS HUBERT CURIEU (PHC) avec le Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), ainsi qu'à des programmes de mobilité des chercheurs.

3 Hub international sur la valorisation des matériaux géo et biosourcés : Waste to Wealth

Depuis 2017, une collaboration scientifique avec l'Université d'Antananarivo et le Centre National de Recherche Industrielle et Technologique (CNRIT) a été entreprise et est financée dans le cadre de l'outil incitatif AIMCI 20. Le sujet de recherche abordé concerne la stabilisation des latérites avec un liant écologique et des fibres de bambou.

Un consortium international a été monté autour de ce projet comprenant l'INSA Lyon, l'Université de Caen, l'Université Lasalle Rouen, l'Université Gustave Eiffel, l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, l'École Supérieure des Sciences Agronomiques d'Antananarivo et le CNRIT. Une convention de collaboration entre les différents établissements sus-cités est en cours de signature. Les actions de recherches menées en 2022 ont permis de consolider la collaboration existante et de l'étendre à d'autres établissements tels que l'USP Sao Paolo (Brésil), l'Université de Fukuoka (Japon) et l'Université de Waterloo (Canada).

L'objectif ultime de cette partie du projet est de créer à terme un laboratoire mixte international. Pour ce faire, un projet de HUB international est prévu pour consolider les collaborations en cours : en mutualisant les ressources et les compétences, et en augmentant le rayonnement. Parallèlement, une initiative de valorisation internationale des travaux antérieurs est en cours de planification au moyen d'un projet visant à créer une start-up.. L'activité principale de la start-up consistera à valoriser les matériaux développés lors des actions de recherches menées par le consortium.

Dans le cadre de cette dynamique, j'ai été sélectionné en 2023 en tant que lauréat de l'outil incitatif de l'Université Gustave Eiffel. Ce programme va me permettre d'établir et de renforcer un HUB international, favorisant ainsi les échanges et la collaboration entre divers intervenants dans les domaines des géomatériaux et de l'environnement.

De plus, j'ai également été l'un des lauréats de l'APP "maturation-prématuration" 2023 pour le projet "Waste to Wealth". Ce projet a pour objectif de transformer les déchets en ressources valorisables, en mettant en œuvre des solutions novatrices et durables.

Ces reconnaissances et financements soulignent l'importance de mon engagement envers le développement durable et la résolution des problématiques environnementales, notamment dans le domaine du génie civil.

4 Chaire industrielle

Le montage d'une chaire industrielle pilotée par l'IMT Douai et l'Université Gustave Eiffel, en collaboration avec l'ESTACA, est prévu sur la thématique "particules diffuses sur sites industriels, chantiers de terrassement et carrières à ciel ouvert". Le début de cette chaire est prévue en 2024 pour une durée de 5 ans.

Cette chaire accompagnera les actions des sections 2.2.3 et 2.2.2 relatives aux émissions de poussières.

Quatrième partie

PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES

BREVETS

- Das, G., A. Razakamanantsoa et E. Rayssac. 2021. « A regulated device to simulate the in-situ wetting and drying conditions in compacted soil (applied). » ? Dépôt Europe EP21306691.3.
- Razakamanantsoa, Andry. 2018. « Dust collection system, method for determining at least one property of a dust releasing material, and ground watering method. » ? 0 (16825477.9 – 1001).
- Razakamanantsoa, Andry. 2015. « Système de collecte de poussières, procédé de détermination d'au moins une propriété d'un matériau en matière de dégagement de poussières, et procédés d'arrosage d'un sol. »
- Sediki, O., A. Razakamanantsoa, E. Rayssac et D. Bodenes. 2019a. « Procédé et dispositif de détermination du coefficient et du potentiel d'émission de particules d'un matériau, et procédé de gestion d'une voie de circulation. » *Brevet* 0 (18 55260).
- Sediki, Ouardia, Andry Razakamanantsoa, Erwann Rayssac et Daniel Bodenes. 2019b. « Method and device for determining the particles emission coefficient and potential of a material, and method for controlling a flow path ». *Brevet Européen* N° 16825477.9 – 1001, INV. G01N15/04 G01N1/10 (juin).

ARTICLES DANS DES REVUES INTERNATIONALES AVEC COMITE DE LECTURE

- Barast, G., A. Razakamanantsoa, I. Djeran-Maigre, T. Nicholson et D Williams. 2017. « Swelling properties of natural and modified bentonites by rheological description ». *Modified Clays for Barriers, Applied Clay Science* 142 : 60-68. issn : 0169-1317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.008>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131716300084>.
- Das, G., A. Razakamanantsoa, G. Herrier et D. Deneele. 2021a. « Compressive strength and microstructure evolution of lime-treated silty soil subjected to kneading action ». *Transportation Geotechnics* 29 : 100568. issn : 2214-3912. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100568>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214391221000581>.
- Das, G, A. Razakamanantsoa, G. Herrier et D. Deneele. 2022a. « Influence of pore fluid-soil structure interactions on compacted lime-treated silty soil ». *Engineering Geology* 296 : 106496. issn : 0013-7952. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106496>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001379522100507X>.
- Das, G., A. Razakamanantsoa, G. Herrier et D. Deneele. 2022b. « Influence of wetting fluids on the compressive strength, physicochemical, and pore-structure evolution in lime-treated silty soil subjected to wetting and drying cycles ». *Transportation Geotechnics* 35 : 100798. issn : 2214-3912. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100798>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214391222000824>.
- Das, G., A. Razakamanantsoa, G. Herrier, L. Saussaye, D. Lesueur et D. Deneele. 2021b. « Evaluation of the long-term effect of lime treatment on a silty soil embankment after seven years of atmospheric exposure : Mechanical, physicochemical, and microstructural studies ». *Engineering Geology* 281 : 105986. issn : 0013-7952. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105986>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795220318834>.

- Das, Geetanjali, Andry Razakamanantsoa, Gontran Herrier et Dimitri Deneele. 2022e. « Physicochemical and microstructure evaluation in lime-treated silty soil exposed to successive wetting-drying cycles using different testing conditions. » Juin. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004636](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004636).
- Djeran-Maigre, I., I Morse, L. Briançon, E. Delfosse, D. Levacher et Andry Razakamanantsoa. 2022. « Uses of Usumacinta River sediments as a sustainable resource for unpaved roads : An experimental study on a full-scale pilot unit », 9 : 100136. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100136>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666691X22000343>.
- DJERAN-MAIGRE, Irini, A. Morsel, Mazhar HUSSAIN, Daniel LEVACHER, Andry RAZAKAMANANTSOA et E. Delfosse. 2022. « Behaviour of masonry lateral loaded walls made with sediment-based bricks from the Usumacinta river (Mexico) ». *Cleaner Engineering and Technology* 11 : 100587. ISSN : 2666-7908. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100587>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790822001926>.
- Djeran-Maigre, Irini, Ahmad Morsel, Mazhar Hussain, Daniel Levacher, Andry Razakamanantsoa et E. Delfosse. 2022. « Behaviour of masonry lateral loaded walls made with sediment-based bricks from the Usumacinta river (Mexico) ». *Cleaner Engineering and Technology* 11 (novembre) : 100587. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100587>.
- Djeran-Maigre, Irini, Andry Razakamanantsoa, Daniel Levacher, Mazhar Hussain et Estelle DELFOSSE. 2023. « A Relevant Characterization of Usumacinta River Sediments for a Reuse in Earthen Construction and Agriculture ». *SSRN Electronic Journal* (janvier). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4341668>.
- Furlan, A., A. Razakamanantsoa, H. Ranaivomanana, O. Amiri, D. Levacher et D. Deneele. 2021. « Effect of fly ash on microstructural and resistance characteristics of dredged sediment stabilized with lime and cement ». *Construction and Building Materials* 272 : 121637. ISSN : 0950-0618. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121637>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820336412>.
- Furlan, A., A. Razakamanantsoa, H. Ranaivomanana, D. Levacher et K. Takeshi. 2018. « Shear strength performance of marine sediments stabilized using cement, lime and fly ash ». *Construction and Building Materials* 184 (septembre). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.231>.
- Geetanjali, D., A. Razakamanantsoa, L. Saussaye, F. Losma et D. Deneele. 2022. « Carbonation investigation on atmospherically exposed lime-treated silty soil ». *Case Studies in Construction Materials* 17 : e01222. ISSN : 2214-5095. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01222>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522003540>.
- Hamard, E., C. Cammas, A. Fabbri, A. Razakamanantsoa, B. Cazacliu et J-C. Morel. 2017. « Historical Rammed Earth Process Description Thanks to Micromorphological Analysis ». *International Journal of Architectural Heritage* 11 (3) : 314-323. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1222462>. eprint : <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1222462>. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1222462>.

- Hamard, E., E. Cazacliu, A. Razakamanantsoa et J-C. Morel. 2016. « Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building ». *Building and Environment* 106 : 103-119. ISSN : 0360-1323. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.009>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132316302165>.
- Hamard, E., B. Lemercier, B. Cazacliu, A. Razakamanantsoa et J-C Morel. 2018a. « A new methodology to identify and quantify material resource at a large scale for earth construction – Application to cob in Brittany ». *Construction and Building Materials* 170 (mai) : 485-497. ISSN : 0950-0618. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.097>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818305877>.
- Hussain, M., D. Levacher, N. Leblanc, Z. Hafida, I. Djeran-Maigre, A. Razakamanantsoa et i L. Saout. 2021a. « Properties of Mexican Tropical Palm Oil Flower and Fruit Fibers for Their Prospective Use in Eco-Friendly Construction Material ». *Fibers* 9 (11). ISSN : 2079-6439. <https://doi.org/10.3390/fib9110063>. <https://www.mdpi.com/2079-6439/9/11/63>.
- Hussain, M., D. Levacher, N. Leblanc, H. Zmamou, I. Djeran-Maigre, A. Razakamanantsoa et Hussain Ali. 2023a. « River dredged sediments reuse in fired bricks – A case study of Usumacinta River, Mexico ». *Journal of Building Engineering*.
- Hussain, M., D. Levacher, N. Leblanc, H. Zmamou, I. Djeran-Maigre, A. Razakamanantsoa et L. Saouti. 2022b. « Reuse of harbour and river dredged sediments in adobe bricks ». *Cleaner Materials* 3 : 100046. ISSN : 2772-3976. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100046>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772397622000065>.
- Hussain, M., D. Levacher, L. Saouti, N. Leblanc, Z. Hafida, I. Djeran-Maigre et A. Razakamanantsoa. 2022c. « Implementation on a Preparation and Controlled Compaction Procedure for Waste-Fiber-Reinforced Raw Earth Samples ». *Journal of Composites Science* 6 (1). ISSN : 2504-477X. <https://doi.org/10.3390/jcs6010003>. <https://www.mdpi.com/2504-477X/6/1/3>.
- Hussain, M., N. Levacher D.and Leblanc, H. Zmamou, I. Djeran-Maigre, A. Razakamanantsoa et Hussain Ali. 2023b. « A possible direct recycling of dredged sediments from the Usumacinta River (Mexico) into fired bricks. » *Journal of Building Engineering*. (submitted).
- Hussain, Mazhar, Daniel Levacher, Nathalie Leblanc, Hafida Zmamou, Irini Djeran-Maigre et Andry Razakamanantsoa. 2023c. « Usumacinta River sediments as a renewable resource for landscaping and agronomy. » *Geoderma Regional* GEODRS-D-23-00086.
- Hussain, Mazhar, Daniel Levacher, Nathalie Leblanc, Hafida Zmamou, Irini Djeran-Maigre, Andry Razakamanantsoa et Léo Saouti. 2023d. « Analysis of physical and mechanical characteristics of tropical natural fibers for their use in civil engineering applications ». *Journal of Natural Fibers* 20 (février). <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2164104>.
- Kazuki, S., G. Barast, A. Razakamanantsoa, I. Djeran-Maigre, K. Takeshi et D. Levacher. 2017. « Comparison of prehydration and polymer adding effects on Na activated Ca-bentonite by free swell index test ». *Applied Clay Science* 142 (juin) : 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.009>. <https://hal.science/hal-01383087>.
- Le, N.H., A. Razakamanantsoa, M-L. Nguyen, V.T. Phan, P-L. Dao et D.H. Nguyen. 2018. « Evaluation of physicochemical and hydromechanical properties of MSWI bottom ash for road construction ». *Waste Management* 80 : 168-174. ISSN : 0956-053X. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.007>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18305452>.

- Le Vern, M., A. Razakamanantsoa, F. Murzyn, F. Larrarte et V. Cerezo. 2022. « Effects of soil surface degradation and vehicle momentum on dust emissions and visibility reduction from unpaved roads ». *Transportation Geotechnics* 37 : 100842. ISSN : 2214-3912. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100842>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221439122200126X>.
- Le Vern, M., O. Sediki, A. Razakamanantsoa, F. Murzyn et L. Frédérique. 2020a. « Experimental Assessment of Dust Emissions on Compacted Soils Degraded by Traffic ». *Atmosphere* 11 (avril) : 369. <https://doi.org/10.3390/atmos11040369>.
- . 2020b. « Experimental Study of Particle Lift Initiation on Roller Compacted Sand-Clay Mixtures ». *Environmental Geotechnics* (février) : 1-12. <https://doi.org/10.1680/jenge.19.00172>.
- Ranaivomanana, H., G. Das et A. Razakamanantsoa. 2022. « Modeling of Hysteretic Behavior of Soil-Water Retention Curves Using an Original Pore Network Model ». *Transport in Porous Media* 142 (3) : 559-584. <https://doi.org/10.1007/s11242-022-01759-7>. <https://doi.org/10.1007/s11242-022-01759-7>.
- Ranaivomanana, H., A. Razakamanantsoa et A. Ouali. 2017. « Permeability Prediction of Soils Including Degree of Compaction and Microstructure ». *International Journal of Geomechanics* 17 (4) : 04016107. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000792](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000792). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000792](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000792).
- Ranaivomanana, H, Andry Razakamanantsoa et O Amiri. 2018. « Effects of Cement Treatment on Microstructural, Hydraulic, and Mechanical Properties of Compacted Soils : Characterization and Modeling ». *International Journal of Geomechanics* 18, n° 9 (septembre) : 04018106. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GM.1943-5622.0001248>.
- Razakamanantsoa, A., G. Barast et I. Djeran-Maigre. 2014. « Characterization of mixed bentonite-polymer for landfill use ». *Environmental Geotechnics* 3 (<http://dx.doi.org/10.1680/envgeo.13.00095> (IF : 2,5)) : 28-35.
- . 2011. « Hydraulic conductivity determination of compacted sand-bentonite mixture using filter press ». *Geotechnical Testing Journal* 34, n° 1 (janvier) : pp.9-18. <https://doi.org/10.1520/GTJ103080>. <https://hal.science/hal-00958758>.
- Razakamanantsoa, Andry R., Gilles Barast et Irini Djeran-maigre. 2012. « Hydraulic performance of activated calcium bentonite treated by polyionic charged polymer ». *Applied Clay Science* 59-60 : 103-114. ISSN : 0169-1317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.01.022>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131712000452>.
- Razakamanantsoa, Andry Rico, et Irini Djeran-Maigre. 2016. « Long term chemo-hydro-mechanical behavior of compacted soil bentonite polymer complex submitted to synthetic leachate ». *Waste Management* 53 : 92-104. ISSN : 0956-053X. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.04.023>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16301866>.

- Verron, L., E. Hamard, B. Cazacliu, Razakamanantsoa A., T. Duc M. Vineslas, A. Hellouin de Menibus, B. Lemercier, Ansa-Asare Rhoda Julia et T. Lecompte. 2022. « Estimating and mapping the availability of earth resource for light earth building using a soil geodatabase in Brittany (France) ». *Resources, Conservation and Recycling* 184 : 106409. issn : 0921-3449. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106409>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922002531>.
- Vineslas, T., E. Hamard, A. Razakamanantsoa et F. Bendahmane. 2020. « Further development of a laboratory procedure to assess the mechanical performance of cob ». *Environmental Geotechnics* 7 (3) : 200-207. <https://doi.org/10.1680/jenge.17.00056>. eprint : <https://doi.org/10.1680/jenge.17.00056>.

ARTICLES DE CONGRES AVEC COMITE DE LECTURE

NATIONAL

- Djeran-Maigre, I., P. Charruau, D. Levacher et A. Razakamanantsoa. 2018. « Les sédiments de l'Usumacinta : réalités du terrain et prélèvements. » Lyon, juin.
- Djeran-Maigre, Irini, Daniel Levacher, Andry Razakamanantsoa et Stéphane Vacherie. 2020. « Les sédiments fluviaux de l'Usumacinta du Mexique et leur valorisation. » In *JNGG 2020, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, 9 p. JNGG 2020, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Lyon, FRANCE, 02-/11/2020 - 03/11/2020. Lyon, France, novembre. <https://hal.science/hal-03033598>.
- Hussain, Mazhar, Daniel Levacher, Nathalie Leblanc, Hafida Zmamou, Irini Djeran-Maigre et Andry Razakamanantsoa. 2022d. « Possible recycling of dredged sediments in earth bricks - case studies of marine, fluvial and dam sediments », 765-774. Janvier. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2022.078>.
- . 2020b. « Sediment-based fired bricks strength optimization - A discussion on different approaches », 649-658. Janvier. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2020.072>.
- Levacher, Daniel, Andry Razakamanantsoa et El Cherifi. 2014. « Un nouvel outil de mesure de la cohésion non drainée des sédiments et sols mous », 1007-1016. Janvier. ISBN : 9782359210125. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2014.111>.
- Levacher, Daniel, Andry Razakamanantsoa et Ritesh Gupta. 2016. « Sediment shear strength. Using the laboratory T-bar and effect of the diameter ». *Revue Paralia* 9 (janvier) : s01.1-s01.6. <https://doi.org/10.5150/revue-paralia.2016.s01>.
- Liang, Yingjie, Daniel Levacher, Dimitri Deneele et Andry Razakamanantsoa. 2014. « Effets des cendres volantes sur le comportement mécanique de sédiments méditerranéens traités à base de ciment et de chaux », 1017-1026. Janvier. ISBN : 9782359210125. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2014.112>.
- Saussaye, Lucile, Geetanjali Das, Andry Razakamanantsoa, Erwann Rayssac, Dimitri Deneele, Christophe Chevalier, Louis Battist et al. 2020. « Dignes expérimentales du CER de Rouen en sol limoneux traité à la chaux et non traité : évaluation après 7 ans ». In *JNGG 2020, 10èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, 9 p. JNGG 2020, 10èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Lyon, FRANCE, 02-/11/2020 - 03/11/2020. Lyon, France, novembre. <https://hal.science/hal-03033619>.

Sediki, O., A. Razakamanantsoa, M. Hattab et T. Le Borgne. 2016a. « Influence d'un compacteur roulant sur le compactage des sols fins », 434-441. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nancy, juillet.

INTERNATIONAL

CONFERENCES

Das, Geetanjali, Andry Razakamanantsoa, Dimitri Deneele et Gontran Herrier. 2022c. « Hydraulic performance and microstructure evolution of kneading compacted lime-treated silty soil permeated with low-ionic strength solution. » In *20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2022*, 6 p. 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2022, SYDNEY, AUSTRALIE, 01-/05/2022 - 05/05/2022. SYDNEY, Australia, mai. <https://hal.science/hal-03629297>.

Das, Geetanjali, Andry Razakamanantsoa, Gontran Herrier et Dimitri Deneele. 2022d. « Hydro-mechanical and Pore-Structure Evolution in Lime-Treated Kneading Compacted Soil », 251-260. Mars. <https://doi.org/10.1061/9780784484012.026>.

Furlan, Ana, Andry Razakamanantsoa, Yingjie LIANG et Dimitri Deneele. 2015. « Feasibility study of chemical stabilization of dredged marine sediment » (janvier) : 143-148. <https://doi.org/10.5150/cmcm.2015.029>.

Gupta, R., D. Levacher et A. Razakamanantsoa. 2016. « Analogy between T-Bar and vane shear test », 33-40. Geo-Environnemental Engineering, Nantes, juin.

Hussain, M., D. Levacher, N. Leblanc, Z Hafida, I. Maigre-Djeran et A. Razakamanantsoa. 2022a. « Influence of Palm Oil Fibers Length Variation on Mechanical Properties of Reinforced Crude Bricks ». In *Bio-Based Building Materials*, 1 : 707-714. Construction Technologies and Architecture. Trans Tech Publications Ltd, février. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.707>.

Hussain, M., D. Levacher, N. Leblanc, H. Zmamou, J-B Besnier, I. Djeran-Maigre et A. Razakamanantsoa. 2021b. « Analysis of sediment-based fired bricks strengths : A case study of fluvial sediments from Mexico ». In *Proceedings of the Geo-Environmental Engineering*. 171-179. Mai.

Hussain, M., L. Saouti, D. Levacher, I. Djeran-Maigre, A. Razakamanantsoa, N. Leblanc et H. Zmamou. 2020a. « Production of waste fibre-reinforced raw earth specimens by controlled compaction ». In *3rd Euromaghreb Conference "Sustainability and Bio based Materials on the road of Bioeconomy, Rouen*. Octobre.

HUSSAIN, Mazhar, Daniel LEVACHER, Nathalie LEBLANC, Hafida ZMAMOU, Iridi DJERAN-MAIGRE et Andry RAZAKAMANANTSOA. 2022. « Production and Characterization of Fired Bricks from river dredged sediments ». 9th International Conference on Engineering for Waste et Biomass Valorisation, juin.

Hussain, Mazhar, Daniel Levacher, Nathalie Leblanc, Hafida Zmamou, Iridi Djeran-Maigre et Andry Razakamanantsoa. 2022. « River dredged sediments suitability for fired and crude bricks », 100046. GEE Geo-Environmental Engineering - May 2022 - Osaka - Japon, mars. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100046>.

Le Vern, Mickael, Andry Razakamanantsoa, Frederic Murzyn, Frédérique Larrarte et Veronique Cerezo. 2021a. « Study on a test track of dust resuspension induced by a vehicle ». Mars.

- Le Vern, Mickael, Ouardia Sediki, Andry Razakamanantsoa, Frederic Murzyn, Frédérique Larrarte, Pascal Insenga et Philippe Gotteland. 2021b. « Development of a model to quantify dust emissions from truck traffic on earthmoving sites : approach and preliminary results ». Mai.
- Levacher, Daniel, Sonia Khadraoui, K. SANO, Takeshi Katsumi, Baptiste Anger et Andry Razakamanantsoa. 2013b. « Measurements of undrained shear strength during natural drying » (mai).
- LEVACHER, Daniel, et Andry RAZAKAMANANTSOA. 2014. « A Sedi-bar test for measuring consistency of sediments ». In *4th International Symposium on Sediment Management, FER-RARA, ITALIE*, 8p. Septembre.
- Levacher, Daniel, Andry Razakamanantsoa et Ritesh Gupta. 2015. « Shear resistance of sediments during dehydration : Use of laboratory T-bar testing and size diameter effect. » In *Coastal and Maritime Mediterranean Conference*. <http://dx.doi.org/10.5150/cmcm.2015.033>.
- Levacher, Daniel, Andry Razakamanantsoa, Ritesh Gupta et Takeshi Katsumi. 2016. « Comparative Su measurements with vane shear and T-bar testing on soft soils in laboratory ». *Japanese Geotechnical Society Special Publication 2* (janvier) : 465-468. <https://doi.org/10.3208/jgssp.OTH-25>.
- LEVACHER, Daniel, Andry RAZAKAMANANTSOA, Fumiaki KIMURA et Takeshi KATSUMI. 2014. « Use of Sedi-bar test for the characterization of soft soils and sediments ». In *13th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering, SAPPORO, JAPON*, pp. 8-15. Mai.
- Ranaivomanana, Harifidy, et Andry Razakamanantsoa. 2018. « Toward a better understanding of the effects of cement treatment on microstructural and hydraulic properties of compacted soils ». *MATEC Web of Conferences* 163 (janvier) : 06007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816306007>.
- Razakamanantsoa, A., D. Deneele et I. Djeran-Maigre. 2016. « Effect of clod size distribution on the mechanical behavior of lime and cement treated clay ». In *EMI (ASCE)*. Octobre.
- Razakamanantsoa, Andry, Irini Djeran-Maigre et G. Barast. 2013. « Hydraulic behaviour of activated calcium bentonite mixed with polyionic charged polymers for landfill and earthwork applications » (juillet).
- Sediki, O., A. Razakamanantsoa, M. Hattab, T. Leborgne et J-M. Fleureau. 2016b. « Fine grained soils behavior compacted with laboratory rolling compaction ». In *EMI(ASCE) Metz*. Octobre.
- Sediki, O., A.R. Razakamanantsoa, M. Hattab et T. Le Borgne. 2016c. « An original laboratory roller compaction method for fine grained soil” ». *Geo-Environmental Engineering*, Nantes, juin.
- Sediki, O., A.R. Razakamanantsoa, M. Hattab, T. Le Borgne, J.M. Fleureau et P. Gotteland. 2018. « Degradability of unpaved roads submitted to traffic and environmental solicitations : Laboratory scale ». (Hong Kong, China) (août). <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03251272>.
- Sediki, Ouardia, Andry Razakamanantsoa, Mahdia Hattab, Tangui Leborgne et Jean-Marie Fleureau. 2016d. « Fine grained soils behavior compacted with rolling compaction ». In *Conference of the ASCE Engineering Mechanics Institute*. Metz, France, octobre. <https://hal-centralesupelec.archives-ouvertes.fr/hal-01789912>.

KEYNOTE

Razakamanantsoa, A. 2020. « Dust Emission from unpaved road. » In *2nd International Symposium In Transportation Engineering, Sao Paolo, Brazil*. Octobre.

NORME

Razakamanantsoa, A. 2017. « Exécution des terrassements - Réalisation des ouvrages d'étanchéité en sol compacté », sous la direction de Norme AFNOR FD P11-302.

GUIDE

Sediki, O., E. Rayssac et A. Razakamanantsoa. 2021. *Guide FNTF : Recommandation pour la gestion des émissions de poussières et de l'usage de l'eau lors de la circulation sur piste non revêtues*. Sous la direction de FNTF et Univ Eiffel. <https://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/librairie/collections-ifsttar/ouvrages-edites-par-lifsttar/recommandations-pour-la-gestion-des-emissions-de-poussieres-et-de-lusage-de-leau-lors-de-la-circulation-sur-pistes-non-revetues/>, janvier.

EXPERTISE

Bechet, B., D. Demarre, D. Deneele et A. Razakamanantsoa. 2016. *Etude Barrage Drennec. Problème de concrétion et érosion*. Rapport technique.

Haochen, J., et Andry Razakamanantsoa. 2013. *Intermediate report of the project water saving on earthwork and unpaved road : water spray distribution under three geometric configurations*. Rapport technique. Août.

Rayssac, E., Louis Battist et A. Razakamanantsoa. 2020. *Projet de plan d'eau artificielle (2020 – 2023)*. Rapport technique. Police de l'Eau/ DREAL.

Rayssac, E., D. Bodenès, Mickael Le Vern, Sergio Palma Lopes, Gugole Gautier et Andry Razakamanantsoa. 2020. *Etude de sol pour le compte de la DGA TT*. Rapport technique. DGATT.

Razakamanantsoa, A. 2013a. *Etude de l'effet du compactage sur la microstructure et la perméabilité des sols fins*. Rapport technique. RFF/IFSTTAR, décembre.

Razakamanantsoa, Andry. 2013b. *Économies d'eau pour l'arrosage des pistes sur chantier de terrassement*. Rapport d'Activité IFSTTAR.

———. 2013c. *Rapport d'étude : Economie d'eau dans l'arrosage des pistes non revêtues*. Rapport technique.

RAZAKAMANANTSOA, Andry. 2012. *Rapport d'étude SPTF, RA/1209/RAZ. Rapport l'arrosage des pistes non revêtues*. Rapport technique. SPTF.

OUVRAGE

Razakamanantsoa, Andry. 2015. *Durabilité des bentonites polymères dans les barrières étanches*. ISBN : 978-3-8416-6364-1. Sous la direction d'Universitaire Européenne. 336.

POSTER

Le Vern, Mickael, A. Razakamanantsoa, F. Murzyn et F. Larrarte. 2020c. *Étude expérimentale des mécanismes et des conditions d'envols des poussières. Applications aux chantiers de terrassement.* Journée Techniques Route. Nantes, France.

Levacher, D., Sonia Khadraoui, K. Sano, Takeshi KATSUMI, Baptiste Anger et Andry Razakamanantsoa. 2013a. *Measurement of undrained shear strength during natural sediments drying.* Geo-Environmental Engineering 31 May-1 June Seoul Korea.

Razakamanantsoa, Andry, J.P. David, Erwann Rayssac et Auriol J.C. 2012. *Effect of the sample preparation on geotechnical properties of partially saturated lime-cement treated silt.* 3rd International Seminar on Earthworks in Europe 19-20 March Berlin Germany.

Abstract

Le présent travail synthétise les avancées scientifiques réalisées dans l'étude de la durabilité hydromécanique des géomatériaux en utilisant une approche couplée hydromécanique chimique (HMC) et microstructurale. Initialement axée principalement sur les géomatériaux d'étanchéité, cette démarche a été étendue aux géomatériaux utilisés dans les ouvrages en terres et en terrassement, offrant ainsi une application plus vaste. En particulier, elle s'est révélée particulièrement pertinente dans l'étude des bentonites renforcées par l'ajout de polymères. L'adaptation de la démarche aux diverses problématiques du terrassement et des ouvrages en terres a donc permis une avancée significative dans la compréhension de nombreux mécanismes d'interaction qui sont observés lors du compactage, notamment par pétrissage, du traitement des sols à la chaux ou avec des liants alternatifs ou même lorsqu'on tente de traiter les sédiments de dragage..

L'intégration de l'observation microstructurale s'est révélée essentielle pour une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents au comportement hydromécanique et chimique des géomatériaux compactés.. Mais il a été nécessaire de développer et d'optimiser des méthodes pour quantifier la microstructure afin de renforcer la fiabilité des calculs de dimensionnement des ouvrages en terre. Ces nouvelles méthodes permettent d'évaluer les interactions au sein de la structure poreuse et de quantifier l'impact des sollicitations endogènes. Ainsi, le couplage entre l'approche hydromécanique chimique (HMC) et la quantification de la microstructure a été appliqué à l'étude de différents types de matériaux, tels que le sol naturel, le sol traité à la chaux, ainsi que d'autres liants alternatifs tels que la terre crue, les déchets biologiques et les géosourcés.

Deux grands axes de recherche ont été développés pour étudier la durabilité.

Le premier axe concerne l'étude des interactions dans les géomatériaux pour le domaine du terrassement et des ouvrages en terres, en se focalisant sur la rhéologie et l'observation microstructurale. Le couplage hydromécanique chimique (HMC) avec intégration de la microstructure a permis de prendre en compte des paramètres tels que le degré de compactage, l'apport du pétrissage et les conditions de mise en œuvre ; notamment par l'étude d'une digue expérimentale 7 ans après sa mise en œuvre. L'analyse de la structure interne des géomatériaux compactés a permis de mieux appréhender le rôle de l'hydratation dans la formation des agrégats, l'influence de la nature du fluide d'essai et du mode de compactage lors du traitement à la chaux. Cette analyse a également permis de mieux comprendre les durabilités hydromécanique et chimique des géomatériaux en laboratoire et de faire des corrélations avec les comportements sur le chantier.

Le deuxième axe de recherche s'est concentré sur l'étude des interactions entre les géomatériaux et l'atmosphère en utilisant une approche multiphysique et multiechelle. L'analyse de l'instabilité hydrique des sols compactés a permis d'explorer les mécanismes de dégradation de surface, les processus d'envol des poussières et les stratégies de suppression de la poussière. Des recherches en cours visent à mieux comprendre les mécanismes d'initiation de l'envol des particules (en étudiant l'impact des véhicules circulant sur une piste non revêtu par exemple) et à évaluer les contraintes associées à ces phénomènes. La gestion de l'envol des poussières, ainsi que les aspects liés à la sécurité et à la santé, ont été examinés de manière approfondie. Cet axe a permis d'ailleurs de proposer un guide technique à destination des pouvoirs publics et des entreprises de construction, regroupant les connaissances acquises pour une meilleure maîtrise des émissions de poussière sur les chantiers de terrassement.

En conclusion, ce travail met en évidence les progrès réalisés dans l'étude de la durabilité hydromécanique des géomatériaux en utilisant une approche couplée hydromécanique chimique, et intégrant également l'observation microstructurale. Les interactions dans les géomatériaux ont été étudiées en prenant en compte la microstructure, tandis que les interactions avec l'atmosphère ont été abordées en utilisant une approche multiphysique. Ces avancées ouvrent de nouvelles perspectives pour la conception et la réalisation d'ouvrages durables dans le domaine du terrassement et des ouvrages en terres, ainsi que dans le domaine de l'environnement de manière plus générale.