



HAL
open science

Comportement thermo-hydromécanique des sols fins : applications aux géostructures énergétiques

Sandrine Rosin-Paumier

► **To cite this version:**

Sandrine Rosin-Paumier. Comportement thermo-hydromécanique des sols fins : applications aux géostructures énergétiques. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Lorraine, 2022. tel-03935815

HAL Id: tel-03935815

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03935815v1>

Submitted on 12 Jan 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Université de Lorraine, Laboratoire LEMTA
« Laboratoire Energies & Mécanique Théorique et Appliquée »

École doctorale SIMPPÉ
« Science et Ingénierie des Molécules, des Produits, des Procédés et de l'Énergie »

Comportement thermo-hydrromécanique des sols fins : Applications aux géostructures énergétiques

Mémoire présenté pour l'obtention de
l'Habilitation à Diriger des Recherches
par

Sandrine ROSIN –PAUMIER

Soutenu le 29 novembre 2022

Composition du jury

Rapporteurs

Abdelmalek BOUAZZA	Professeur, Monash University, Melbourne
Hussein MROUEH	Professeur des Universités, Université de Lille
Pascal VILLARD	Professeur des Universités, Université Grenoble Alpes

Examineurs

Bernardo CAICEDO	Professeur, Universidad de los Andes, Bogotá
Yujun CUI	Professeur, École des Ponts ParisTech
Farimah MASROURI	Professeur des Universités, Université de Lorraine
Hossein NOWAMOOZ	Maître de Conférences HDR, INSA Strasbourg
Anne PANTET	Professeur des Universités, Université Le Havre Normandie

Invitée

Wiebke BAILLE	Chercheur, Ruhr Universität, Bochum
---------------	-------------------------------------

Remerciements

La rédaction d'un mémoire d'habilitation à diriger des recherches est une démarche personnelle mais pas solitaire. Je tiens en tout premier lieu à remercier ma marraine scientifique Farimah Masrouri pour son accueil chaleureux dans l'équipe, son accompagnement tout au long de ces douze années de travail et son soutien constant dans cette démarche d'habilitation. J'ai particulièrement apprécié les nombreux échanges scientifiques auxquels ont donné lieu l'écriture de ce mémoire.

Je remercie très sincèrement les membres du jury, Abdelmalek Bouazza, Hussein Mroueh et Pascal Villard pour leur relecture attentive et leurs remarques constructives. Merci à Yujun Cui, d'avoir accepté de présider ce jury et merci aux examinateur et invités, Bernardo Caicedo, Hossein Nowamooz, Anne Pantet et Wiebke Baille pour leurs actives participations. Les riches échanges au cours de la soutenance sont autant de liens qui renforcent et créent de futures collaborations scientifiques.

Ce travail d'habilitation est également l'occasion de prendre du recul sur l'ensemble de son parcours scientifique, je remercie les chercheurs qui m'ont formé à la recherche depuis l'Université de Rouen, puis l'université de Poitiers et l'INRAE. Tout au long de ce parcours, j'ai bénéficié d'un encadrement scientifique très riche. Je remercie en particuliers Anne Pantet, Philippe Monnet et Nathalie Touze-Foltz qui en plus de leurs précieux conseils au cours de ma thèse et mon post-doctorat, et pour leur soutien.

Ce mémoire synthétise un grand nombre de travaux de recherches qui sont le fruit de collaborations au sein de mon équipe, mon laboratoire mais également d'un réseau de chercheurs à l'échelle nationale et internationale. A l'échelle de l'équipe, en plus de notre responsable remerciée plus tôt, je remercie Adel Abdallah et Olivier Cuisinier pour leur amitié et les fructueux échanges scientifiques. Une pensée pour Jean-Paul Tisot dont l'aura reste présente dans notre équipe. Merci à nos techniciens, Jacques Tisot et Jordan Rudolph, pour leur assistance sur la plateforme d'essai. Merci aux secrétaires, doctorants, post-doctorants, chercheurs et apprentis-chercheurs qui ont participé ou participent actuellement à l'ambiance sereine, respectueuse et chaleureuse qui règne dans notre équipe. Un grand merci en particulier à Hossein Eslami, Ahmed

Boukelia et Mojdeh Lahoori dont j'ai eu la chance de co-encadrer les travaux de thèse. L'avancée des connaissances dépend de la qualité de votre travail, merci pour votre sérieux et votre ténacité. L'efficacité de notre travail d'équipe dépend également du bon fonctionnement de notre laboratoire. Merci aux équipes dirigeantes, administratives et techniques du LEMTA de faciliter notre travail de recherche par leurs compétences et leur écoute attentive. Merci à mes collègues chercheurs dont Sébastien Leclerc, Jean-Christophe Perrin et Yves Jannot pour leur implication dans nos projets communs.

Je remercie également les partenaires institutionnels et industriels de mes recherches, dont vous trouverez les noms tout au long de ce mémoire. Merci aux membres du projet GECKO dont je garde un très bon souvenir des échanges. Merci à Guillaume Stoltz (INRAE), Claude Fontaine (IC2MP), Hossein Nowamooz (INSA de Strasbourg) pour leur collaboration au cours de nos projets, c'est toujours un plaisir d'échanger avec vous. Un grand merci à Monsieur Poinignon et son équipe de l'ESITC de Metz, pour leur confiance, leur présence et leur soutien. Merci à Bernardo Caicedo et l'équipe de l'Universidad de los Andes pour leur accueil et la qualité des échanges scientifiques de ces dernières années.

Mon statut d'enseignante-chercheuse suppose également la réalisation d'un service d'enseignement à l'IUT de Nancy-Brabois. Je remercie les équipes de l'IUT (direction, service financier, scolarité) et l'équipe du CFA avec qui j'ai le plaisir d'interagir pour toutes les tâches en lien avec mes fonctions de responsable des études. Je remercie également mes collègues du département Génie Civil, pour certains devenus des amis, pour les moments de convivialité qui rendent les tâches administratives et d'enseignement plus légères. Merci également pour l'entraide qui a permis de surmonter les moments plus difficiles comme lors de la crise CoVid, les périodes de travaux ou pour la mise en place des nouveaux programmes pédagogiques.

Enfin, un immense merci à ma famille et mes amis pour l'énergie qu'ils me transmettent. Merci à mes parents qui m'ont toujours soutenu dans mes choix : merci pour votre confiance qui m'accompagne et me porte dans les moments de doute. Merci à mon mari et à mes enfants : la chaleur de notre foyer est le moteur de toute activité. J'ai également la chance d'être entourée par une grande famille et de nombreux amis que je remercie ici pour leur amitié et pour tous les moments de joie partagés.

Préambule

Mon parcours est marqué par 2 changements thématiques et d'équipes, qui m'ont permis d'étudier les matériaux fins sous des formes très différentes depuis l'état liquide jusqu'à l'état solide compacté non saturé. J'ai pu acquérir des compétences à plusieurs échelles d'investigation depuis l'échelle microscopique jusqu'à l'échelle macroscopique. L'ensemble de mes travaux portent sur l'impact de sollicitations externes de type chimiques, thermiques et hydriques d'origine naturelle (cycles climatiques) ou anthropique (stockage de déchets, stockage de chaleur, géothermie) sur les propriétés des sols. Lors de chaque changement d'équipe, j'ai été formée à de nouvelles méthodes grâce au soutien des équipes d'accueil. Le volume I de ce document retrace l'ensemble de ce parcours (pages 5 à 54).

Depuis mon arrivée dans l'équipe Mécanique des Sols j'ai eu l'occasion de focaliser mes recherches sur les géostructures énergétiques, technologies qui bénéficient d'un fort engouement ces dernières décennies en raison de leur potentielle capacité à répondre aux exigences énergétiques modernes. Après 10 ans de travail sur cette thématique, l'encadrement de 3 thèses soutenues et la publication de nombreux articles, il devenait intéressant de reprendre l'ensemble de ces informations afin de les organiser en un document cohérent qui permette de tirer des conclusions communes aux différentes investigations. Le volume II de ce document répond à cet objectif (page 53 à 191). Il comprend une revue bibliographique développée, qui résume l'état actuel des recherches sur la problématique du comportement thermo-hydrromécaniques des sols fins soumis à des sollicitations thermiques cycliques, ainsi que des développements récents en lien avec l'essor des géostructures énergétiques auxquels j'ai eu l'occasion de participer.

Cette habilitation me permettra d'aborder sereinement la suite de ma carrière en validant les nouvelles compétences acquises au cours de mon parcours de recherche, en particulier dans les domaines de la thermique et de la mécanique des sols non saturés, qui viennent compléter mon parcours universitaire. Je souhaite par la suite pouvoir encadrer de jeunes chercheurs dans leurs objectifs de recherche et mener à bien des projets de recherche ambitieux à l'échelle nationale et internationale. Les pistes de développement de mon projet scientifique sont présentés dans la partie projet incluse au volume II (pages 161 à 168).

VOLUME I : Présentation synthétique des travaux d'enseignement, d'encadrement et de recherche.

I : CURRICULUM VITAE.....	10
II : PRESENTATION SYNTHETIQUE DES ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT ET D'ADMINISTRATION	16
II.1. SERVICE D'ENSEIGNEMENT A L'IUT DE NANCY-BRABOIS, DEPARTEMENT GENIE CIVIL CONSTRUCTION DURABLE	16
II.2. RESPONSABILITES PEDAGOGIQUES	18
II.2.1. RESPONSABILITES A L'IUT DE NANCY-BRABOIS.....	18
II.2.2. RESPONSABILITES A L'ÉCOLE SUPERIEURE D'INGENIEURS DES TRAVAUX DE LA CONSTRUCTION DE METZ (ESITC)	20
II.3. EVOLUTION DES MISSIONS D'ENSEIGNEMENT ET D'ENCADREMENT	22
II.3.1. EVOLUTION DU DIPLOME UNIVERSITAIRE DE TECHNOLOGIE (DUT) EN BACHELOR UNIVERSITAIRE DE TECHNOLOGIE (BUT).....	22
II.3.2. NOUVELLES ACCREDITATION DES LICENCES PROFESSIONNELLES.....	23
III : PRESENTATION SYNTHETIQUE DES ACTIVITES DE RECHERCHE	24
III.1. PRESENTATION SYNTHETIQUE DU PARCOURS DE RECHERCHE	24
III.1.1. ETUDES DES LIENS ENTRE LES PROPRIETES MICROSCOPIQUES DES ARGILES ET LEUR COMPORTEMENT MECANIQUE MACROSCOPIQUE.....	24
III.1.2. TRANSFERTS ADVECTIFS ET DIFFUSIFS AU TRAVERS DE GEOSYNTHETIQUES BENTONITIQUES.....	25
III.1.3. COMPORTEMENT THERMO-HYDROMECHANIQUE DES SOLS NATURELS ET COMPACTES.....	26
III.2. LISTES DES MASTERS ENCADRES ET DES THESES ET POST-DOCTORATS CODIRIGES	37
III.3. ACTIVITES DE VALORISATION ET DE TRANSFERT : PARTICIPATION A DES PROJETS SCIENTIFIQUES	39
III.4. ACTIVITES COLLECTIVES ET RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE	44
III.5. PRODUCTION SCIENTIFIQUE	45
IV. LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX DU VOLUME I	52

I : Curriculum Vitae

FORMATION

2004 - 2007 : Doctorat à l'Université de Poitiers (mention TB), Université de Poitiers (86) UMR 6532 et 6609, sous la direction de M^{me} Pantet et M. Monnet, « Facteurs déterminant l'organisation et la rhéologie du système argile-eau pour des suspensions de smectites. »

2003 - 2004 : Master Recherche « Dynamique des environnements sédimentaires » aux Universités de Lille, Rouen et Caen (mention B). Stage encadré par M. Lafite, Université de Rouen, « Suivi hydrosédimentaire et géochimique d'un estuaire au cours d'un cycle de marée. »

2002 - 2003 : Master 1 Sciences de l'Environnement, l'Université de Tours (mention B). Stage encadré par M. Dupuet, Saunier-Techna, Tours, « Problématique de la pollution diffuse sur l'eau potable. ».

2001 - 2002 : Licence 3 Sciences de la Terre et de l'Univers à l'Université de Tours (mention AB). Stage encadré par M. Perres, OTV- Faprog, Rambouillet, « Epuration des eaux issues d'une usine de cosmétiques ».

1999 - 2001 : Licence 1-2 Sciences de la Vie à l'Université d'Orléans (mention AB).

1999 : Bac S – Lycée Marceau de Chartres.

EXPERIENCE PROFESSIONNELLE

Maîtresse de conférences à l'Université de Lorraine (54) depuis Septembre 2010 :

Recherches sur les matériaux fins soumis à différentes sollicitations thermo-hydro-mécaniques réalisées au LEMTA.

Enseignements en géotechnique, hydrogéologie et hydraulique souterraine réalisés à l'IUT de Nancy-Brabois, département Génie Civil ; Responsable de la Licence Professionnelle ERI

Ingénieure de recherche au Cemagref (devenu INRAE en 2020) site d'Antony (92) de Juin à Novembre 2009 : Quantification de la diffusion de composés organiques volatils au travers des géomembranes et des géosynthétiques bentonitiques.

Post-doctorante à l'INRAE site d'Antony (92) de décembre 2007 à mai 2009 : Evaluation de l'impact des lixiviats d'installation de stockage de déchets sur la barrière d'étanchéité passive.

Tableau I. 1 : Parcours professionnel.

Date	2004	2007	2010
Statut	Doctorante	Post-doctorante puis Ingénieure de recherche	Enseignante-Chercheuse
Employeur	Université de Poitiers	INRAE	Université de Lorraine
Laboratoire	IC2MP - Institut P'	RECOVER	LAEGO puis LEMTA
Lieu	Poitiers	Antony	Vandœuvre-lès-Nancy
Méthodes	Rhéologie des fluides Minéralogie	Chimie des eaux Mesure des transferts	Mécanique des Sols Géotechnique
Thématiques	Smectite, Echange cationique, Ecoulement des fluides complexes , Transition solide-liquide	Stockage de déchets Géosynthétiques Transferts advectifs et diffusifs de polluants	Géostructures énergétique Transferts hydrique, Comportement thermo- hydromécanique, Fissuration des sols
Publications	[RI1 1-3] [RN 1] [O1] [CI 1-3] [CN 1-4] [RS 1]	[RI 2-8] [RN 2] [CI 4-6] [CN 5-7] [RS 2]	[RI 9-17] [RN 3-4] [CI 7-19] [CN 8-16] [RS 3-8]

AUTRES COMPETENCES

Anglais lu, écrit, parlé et bases d'espagnol.

Sauveteur Secouriste du Travail depuis 2014, à jour des recyclages,

Brevet d'Aptitude aux Fonctions d'Animateur (B.A.F.A.)

Outils Informatiques de traitement de texte : MS Office, LaTeX, Access

Outils Informatiques de traitement des données : Image J, Surfer (cartographie), Origin

ENCADREMENT

[Les résumés de ces travaux sont disponibles en partie III.2 \(page 37\)](#)

Depuis mon intégration à l'Université de Lorraine, j'ai pris en charge l'encadrement de 6 stagiaires en master, 1 post-doctorant et j'ai participé à l'encadrement de 5 doctorants dont 3 en tant que co-encadrante à 50% avec autorisations à codiriger les thèses soutenues en 3 ans. J'ai obtenu la prime d'encadrement doctoral et de recherche (PEDR) sur les périodes de septembre 2014 à septembre 2018 puis de septembre 2018 à septembre 2022.

¹ Dans ce documents les éléments entre crochets correspondent aux thèses [Tn], Master [Mn], Post-doctorats [PDn], Articles Internationaux et Nationaux [AIn, ANn] et Congrès [CIn, CNn] pour lesquels j'ai participé à l'encadrement et la rédaction.
Les références sont développées dans la partie III.5 (page 48).

Tableau I. 2 : Liste des co-encadrements réalisés et publications associées

Réf.	Nom P.	Date	Type d'encadrement	Publications
Post-doctorat :				
[PD1]	Arairo W.	mai 2013 – juill. 2014	Université de Lorraine, France.	[CI 11]
Doctorats :				
[T4]	Granados J	Oct. 2018 – prévue 2023	Participation à l'encadrement 20 %	
[T3]	Lahoori M.	Oct. 2017 à déc. 2020	Co-encadrement à 50 % avec ACT	[RI 14, 16-17; CI 18-19]
[T2]	Boukelia A.	Oct. 2013 à oct. 2016	Co-encadrement à 50 % avec ACT	[RI 13-14; CI 15-16; CN 14-17]
[T1]	Eslami H.	Oct. 2011 à oct. 2014	Co-encadrement à 50 % avec ACT	[RI 10-11, 13; RN 3-4; CI 10-17; CN 8, 13]
[T1]	Auvray R.	Oct. 2010	Participation à l'encadrement 20 %	[RI 9 ; CI 8]
Projets de recherche en Master :				
[M5]	Aouad M. Mermouri Y.	Oct. à mars 2018	Master Génie Civil, UL	
[M4]	Boz A.	mars à juill. 2017	MSc Student - EGE Univ., Turquie. Erasmus +	
[M3]	Lahoori M.	fév. à juill. 2017	Master Génie Civil, UL	[RI 15, CN 18]
[M2]	Troupel H.	fév. à juin 2014	Master Génie Civil, UL	[CN 12]
[M1]	Franchomme G.	fév. à juin 2011	Master Génie Civil, UL	[CI 7]

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

La liste de l'ensemble des communications est disponible en partie III.5 (page 45)

17	Articles publiés dans des revues internationales de rang A [RI]
1	Ouvrage [O]
4	Articles dans des revues nationales [RN]
19	Communications orales en congrès internationaux dont 18 avec articles publiés dans les actes [CI]
18	Communications en congrès nationaux avec actes [CN] dont 16 présentations orales et 2 affiches
2	Séminaires invités
10	Participations à des rapports scientifiques [RS]

PROJETS DE RECHERCHE

[Les résumés de ces projets sont présentés en partie III.3 \(page 39\)](#)

Participation en tant que porteur de projet :

Projet GNR FORPRO - Effet d'une contrainte thermique (20°C à 100°C) sur les propriétés hydromécaniques et minéralogiques des argiles et des argilites. Porteur : S. Rosin-Paumier (LAEGO). Partenaires : LEMTA, HydrASA. Dates : 2011 - 2012

Projet industriel Bouygues – DTP Terrassement - Etude de l'influence du traitement des sols sur les paramètres hydriques en particulier la perméabilité. Co porteurs : F. Masrouri et S. Rosin-Paumier (LEMTA). Dates : 2011 - 2015.

Projet industriel Bouygues – DTP Terrassement - Stockage géothermique. Co porteurs : F. Masrouri et S. Rosin-Paumier (LEMTA). Dates : 2013 - 2017.

Projet NEEDS – SolliScel, Effet de sollicitations thermo-hydriques sur la mobilité de l'eau au sein des matériaux de scellement des galeries de stockage. Porteur : S. Rosin-Paumier (LEMTA), 18,5 k€. Dates : 2022 – 2023.

Participation en tant que responsable d'une action de recherche :

Projet ANR GECKO - GEostructures, Couplage solaire hybride et stockAge d'énergie Optimisé : Solution pour bâtiments à énergie positive. Porteur JB. Bernard (ECOME Géothermie Professionnelle). Partenaires : LEMTA, BRGM, IFSTTAR, CEREMA, LGCGE. Dates : 2012 - 2015.

Participation dans des projets

Projet ANR LIXAR2 - Indicateurs de performance pour les géosynthétiques bentonitiques. Porteur : D. Guyonnet (BRGM) Partenaires : ADEME, INSA Lyon, Cemagref. Dates : 2005-2008.

Projet ANR PRECODD (Programme ECOTEchnologies et Développement Durable) Bioreacteurs. Porteur : R. Moretto (EEDEMS) Partenaires : LIRIGM/LTHE, Cemagref, INSA Lyon, BRGM, VEOLIA Propreté, Suez Environnement. Dates : 2006-2009.

Projet ANR GeoStab - Solidification and stabilisation for sustainable management of problematic soils. Porteur : O. Cuisinier (LEMTA). Universités partenaires : Univ. Lorraine – France, Univ. of Cassino - Italie, Univ. of Exeter - UK, Univ. of Lulea – Suède. Partenaires industriels : Ménard Sol Traitement du groupe Vinci (FR), Ginger CEBTP (FR), Exeter Environmental Services (UK), Simpleware (UK), Ramboll (SU), Technical (IT). Dates : 2014-2016.

Programme de recherche de l'ANDRA - FAVL II, Détermination des propriétés hydromécaniques des argiles téglines remaniées et des marnes de Brienne. Porteurs : O. Cuisinier et F. Masrouri (LEMTA) Dates : 2015-2017.

RESPONSABILITES ADMINISTRATIVES

[Le détail de ces responsabilités est développé en partie II.2 \(page 18\)](#)

Responsabilités à l'IUT Nancy Brabois et à l'ESITC :

2018-auj. Direction de la Licence Professionnelle, Métiers du BTP *Eau, Ressources & Infrastructures*. Choix et gestion des intervenants, planification de la formation, suivi

des apprentis, organisation des jurys, animation des conseils de perfectionnement et suivi des habilitations.

- 2014 -19 Membre du conseil du département Génie Civil – Construction Durable.
- 2016 -18 Responsabilité des projets tuteurés (PTU2 et PTU3) à l'IUT, coordination des interventions des enseignants et des vacataires pour en moyenne 60 groupes/an.
- 2014-16 En charge du réaménagement de la plateforme de reconnaissance des sols.
- 2011-14 Codirection de la Licence Professionnelle *Eau, Ressources & Infrastructures*, planification de la formation, gestion des absences.

Responsabilités à l'École Supérieure d'Ingénieurs des Travaux de la Construction (ESITC) de Metz :

- 2019-auj. Co-responsable du module de recherche pour les alternants en 4^e année.
- 2018-auj. Participations aux conseils de perfectionnement de l'ESITC.
- 2017-auj. Responsable du module de sensibilisation à la recherche pour les étudiants de 2^e année.
- 2016 -auj. Responsable du module « projets de recherche » pour les étudiants de 4^e année en formation initiale, encadrement de projets de recherche.

ACTIVITES COLLECTIVES ET RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE

[Le détail de ces actions est développé en parties III.3 et III.4 \(page 39\)](#)

Activités collectives

- 5 Participations à des comités de sélection (1 Attaché Temporaire à l'Enseignement et la Recherche et 4 Maitres de conférences).
- 5 Participations à des jurys de thèse en tant que coresponsable ou examinatrice.
- 3 Présidence de jurys de Bac Professionnels.
- 4 Actions de vulgarisation et de dissémination de la recherche (participation à des salons, réalisation de séminaires ouverts à un large public).
- 15 Relecture d'articles dans des revues internationales de rang A (Energies, Applied rheology, Geotextiles and Geomembranes, ...).
- 5 Participation à des comités scientifiques de congrès nationaux pour la relecture et la sélection des publications (RUGC 2015, 2016, 2017 et 2018, JNGG 2016).

Associations, sociétés savantes

- 2013-auj. Membre du Comité Français de Mécanique des Sols (CFMS).
- 2014-21 Membre élu au conseil d'administration de l'Association Universitaire du Génie Civil (AUGC) – 2 mandats - participation aux conseils d'administration, participation au développement du site web.
- 2014-18 Membre réseau GABI (European network for shallow geothermal energy applications in buildings and infrastructures) "European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research" (COST Action TU1405) UE.
- 2015-17 Membre du réseau ROSE (Recycling Of Secondary raw materials for a sustainable optimization of construction processes in civil Engineering) "European Innovation Partnership" UE.
- 2015-16 Membre du comité d'organisation des Journées Nationales Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur (JNGG), Nancy, 6-8 juillet 2016.

II : Présentation synthétique des activités d'enseignement et d'administration

De par mon statut d'enseignante-chercheuse, j'ai la charge depuis 2010 d'un service d'enseignement de 196 heures équivalent travaux dirigés (h éq. TD) par an. La totalité de mon service d'enseignement est réalisée auprès des étudiants en 3^e semestre de DUT et en licence professionnelle à l'IUT de Nancy-Brabois, département Génie Civil – Construction Durable. S'ajoutent à ces activités, des interventions ponctuelles dans d'autres organismes de formation, tel que l'encadrement de projets de recherche en 2^e ou 3^e année à l'École Nationale Supérieure de Géologie, des travaux pratiques (TP) Géotechnique en licence 3 Génie Civil et des activités de sensibilisation à la recherche à l'École supérieure d'ingénieurs des travaux de la construction de Metz (ESITC de Metz). Je suis également en charge de responsabilités administratives qui seront développées dans cette partie.

II.1. Service d'enseignement à l'IUT de Nancy-Brabois, département Génie Civil Construction Durable

La majeure partie de mes 196 heures équivalent TD d'enseignement est réalisée dans le domaine de la **Géotechnique** auprès des étudiants en 3^e semestre de DUT. Mes enseignements couvrent les principes fondamentaux de la Mécanique des Sols allant des propriétés physiques des grains et de l'eau, à l'étude des écoulements de l'eau dans les sols (loi de Darcy) permettant de développer les principes de consolidation puis de tassement des sols. Les calculs des forces de poussée-butée des terres sont ensuite abordés ainsi que des aspects plus spécifiques au Génie Civil tels que les calculs de stabilité des ouvrages et le dimensionnement des fondations (superficielles et profondes). Un module dédié aux étudiants souhaitant poursuivre leurs études, porte sur les techniques de mise hors d'eau des chantiers (batardeaux, techniques de pompages) et une initiation aux lois de comportement des matériaux.

Niveau	Matière	CM	TD	TP	eq. TD
DUT, semestre 3	Consolidation tassement	4	42		48
	Stabilité des sols		20		20
	Lois de comportement	18	7		22,2
	Dimensionnement de fondations	1	22		23,5
	Encadrement de projets	2	1	17	14,2
	Taches administratives		20		20
Licence professionnelle	Hydrogéologie - hydraulique souterraine	30	4		32,4
	Géologie	6	8		10,8
	Responsabilités		72		72
Master			16		9,6
Totaux		7	231	52	273

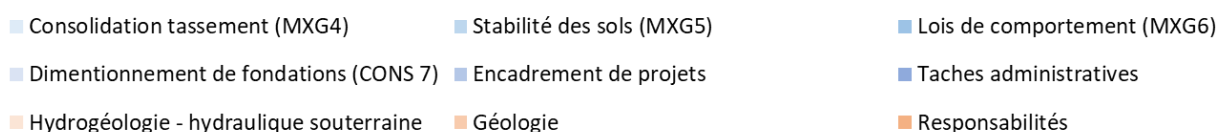


Figure I. 1 : Répartition des enseignements et des responsabilités administratives (2020-2021).

Les cours d'**Hydrogéologie et d'Hydraulique souterraine**, développés pour les étudiants de Licence Professionnelle Eau Ressource et Infrastructures (LPERI) portent sur la caractérisation des nappes d'eau souterraines incluant leur formation, leur alimentation et le tracé du réseau d'écoulement. Ces enseignements comprennent des cours et des exercices, agrémentés de vidéo et de mise en situation des étudiants. Les dernières séances sont dédiées à une initiation à la recherche bibliographique permettant aux étudiants en formation initiale de travailler par groupe sur des sujets d'actualité (épuisement des nappes fossiles, salinisation des aquifères, pollution diffuse, recharge des nappes, valorisation électrique ou thermique des aquifères ...). Ce travail donne lieu à la réalisation d'un poster exposé dans le département GC-CD de l'IUT. Les posters sont également présentés par les groupes au cours d'une séance finale en cours inversé.

Depuis plusieurs années, je coordonne la réalisation d'un projet pluri-disciplinaire de dimensionnement d'une retenue d'eau collinaire (Madine). Ce projet, encadré avec mes collègues (S. Janvier et G. Biewers) intègre une visite sur le terrain, des TD et TP en laboratoire et sur logiciel. Il permet aux étudiants de réaliser un travail pluridisciplinaire sur un cas concret incluant de la géologie (réalisation de coupes, de cartes simplifiées et d'un log litho-stratigraphique), de la topographie (réalisation d'un système d'information géographique, SIG sous ARCGIS), de la climatologie (calcul des apports), de l'hydrogéologie (calcul des fuites sous l'ouvrage) et de la géotechnique (calcul de la stabilité des pentes et des tassements sous l'ouvrage).

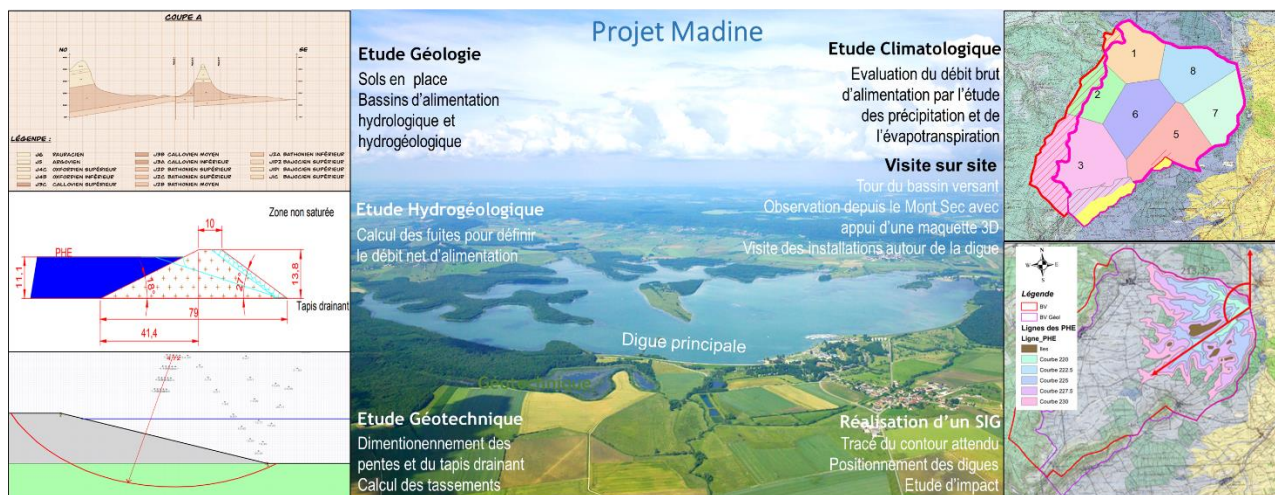


Figure 1. 2 : Illustration d'un projet pluri-disciplinaire réalisé avec les étudiants de la licence professionnelle Eau, Ressource et Infrastructures.

L'évolution des métiers de l'enseignement va vers l'accentuation de ce modèle d'intégration multidisciplinaire des enseignements autour de projets réels. Dans cette optique, je participe à l'encadrement de projets (CONS7) avec mes collègues de structures (S. Amos, E. Holtz). Les étudiants, réalisent une maquette numérique (BIM) et calculent les descentes de charges pour leurs projets. Ma participation concerne le dimensionnement des fondations. Suite à cette séance, les étudiants peuvent ainsi compléter leur maquette numérique et réaliser les plans associés. Dans le même esprit, j'interviens en introduction des projets tuteurés (PTU3) afin de donner aux étudiants des notions de recherche bibliographique pour consolider leurs idées. Je les guide ensuite dans l'utilisation d'outils tels que Infoterre pour prendre en compte les contraintes environnementales tout au long de la conception de leurs projets. La réforme des Diplômes Universitaires de Technologie (DUT en 2ans) en Bachelor Universitaire Technologique (BUT en 3 ans) induit l'amplification de ce type d'enseignements, cette réforme induit de profondes modifications des contenus pédagogiques développés en partie II.3.

S'ajoutent à ces activités, des interventions dans d'autres organismes de formation, résumées comme suit :

2014-auj. : Licence 3 Génie Civil, Université de Lorraine, TP géotechnique (16 à 24 h/an).

2011-auj. : École Nationale Supérieure de Géologie, projets recherche 3A (6 h eq. TD/an).

2017-19 : Conservatoire National des Arts et Métiers, sensibilisation à la recherche (40 h/an).

2006-08 : Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP), Mécanique des Sols, Géologie (12 h/an).

2006-07 : Université de Poitiers (L1 et L3), Cartographie Géotechnique (24 h).

2004-07 : Ecole Supérieure d'Ingénieur de Poitiers, Mécanique des Sols, (68 h).

II.2. Responsabilités pédagogiques

II.2.1. Responsabilités à l'IUT de Nancy-Brabois

Mission de réaménagement de la plateforme d'essais géotechniques

Le département Génie Civil de l'IUT de Nancy-Brabois bénéficie de plateforme de travaux pratiques particulièrement diversifiées et équipées. J'ai participé de 2014 à 2016 au réaménagement de la plateforme de géotechnique. Après de nombreuses réunions de confrontation des propositions, nous avons demandé et obtenu une subvention régionale (50k€) qui nous a permis de sécuriser et moderniser considérablement la plateforme. Ainsi, la salle a été agrandie en redistribuant les espaces et six bancs d'essais ont été renouvelés ou créés et un îlot central informatisé permet désormais aux étudiants de traiter leurs données dans de bonnes conditions (Figure I. 3).

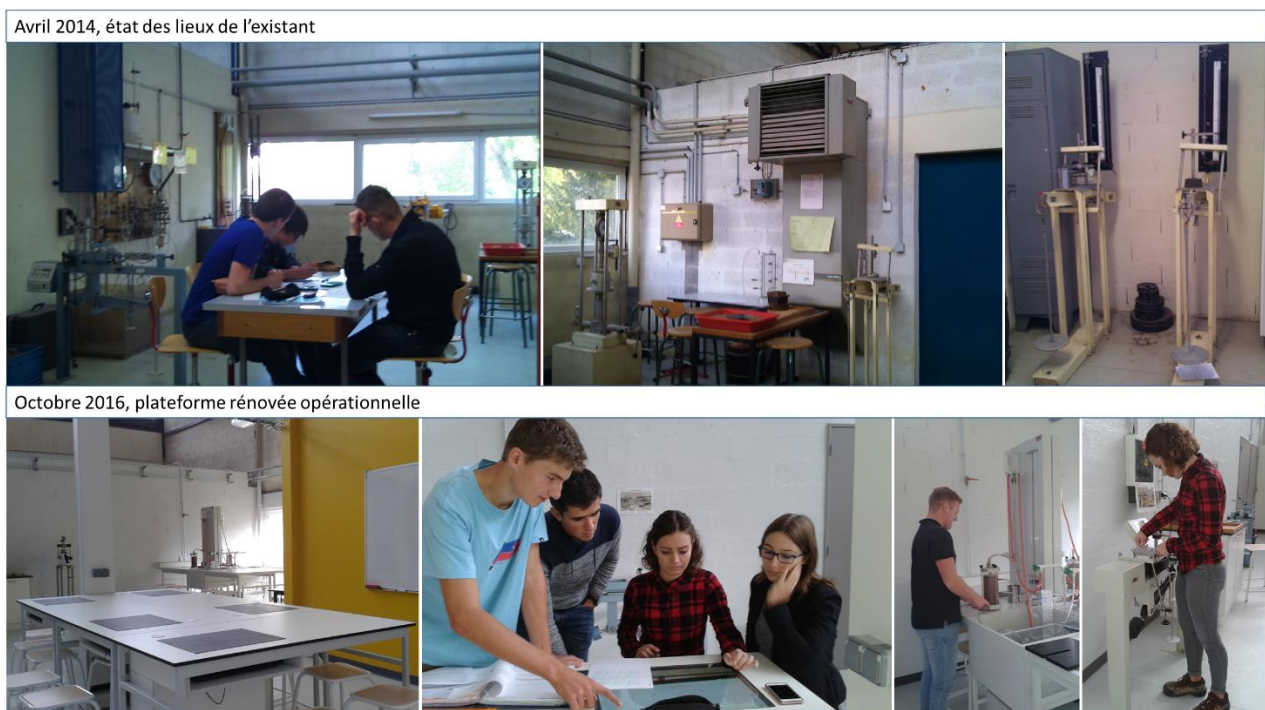


Figure I. 3 : Illustration de la rénovation de la plateforme d'essai de mécanique des sols, géotechnique.

Responsabilité des projets tuteurés (PTU2 et PTU3) de 2016 à 2019

Cette mission incluait la collecte de sujets auprès de l'organisateur du challenge Construction Durable qui se déroulait tous les 2 ans ou des collectivités locale à proximité de l'iut, grace au démarchage en mairie réalisé par les collègues du département. Les sujets étaient présentés, en séance plénière aux étudiants puis de nombreux temps forts étaient organisés visant à renforcer les échanges entre les étudiants et le réseau de professionnels volontaires (réseau Cobaty) pour favoriser leur prise de responsabilité et leur autonomie (Tableau I. 3). Ainsi, des échanges sur table

avec les professionnels étaient organisés sous forme de *speed-dating*. La réalisation de courtes séquences vidéo permettait aux groupes de communiquer de façon dynamique sur leur projet à destination des autres groupes. Chaque année, quelques groupes choisissaient de réaliser des maquettes de ponts en balsa en respectant les contraintes imposées par le Bridge Challenge de l'ENISE.

Un séminaire final était organisé en janvier avec des sessions thématiques en parallèle. Les groupes présentaient leur projet à tour de rôle en amphithéâtre au jury, composés de professionnels et d'enseignants, et aux étudiants de 1^{ère} année. A l'issue des présentations, les maquettes de ponts étaient soumises à des tests à l'effort sur le banc d'essai de l'atelier Génie Civil. Enfin, après délibération, des prix étaient offerts par l'association Cobaty. Les projets sélectionnés participaient au Challenge Construction Durable national et un voyage à St Etienne pour participer au Bridge Challenge était offert aux groupes ayant réalisés les meilleures maquette (d'un point de vue mécanique et esthétique).

Du fait d'un grand nombre d'intervenants, ces projets étaient relativement lourds à gérer mais les temps forts étaient l'occasion de repas communs sources de nombreux échanges et de dynamisme dans le département. Une organisation plus traditionnelle, sans intervention des professionnels, a été préféré par mon successeur.

Tableau I. 3 : Synopsis du déroulement des projets tutorés en seconde année de DUT GC-CD

juin à septembre	Récolte des sujets
Présentation des sujets fin septembre	1h de présentation des sujets 15-20min pause : constitution des groupes 30min : Présentation des cobatistes présents
octobre	Réunions de groupes Module Etude de cas : suivi de l'avancée des projets, conseils architecture et construction par les enseignants du département.
Journée projet Fin octobre	8-12h : discussion sur plans avec les Cobatistes 12-13h : Passage en mode défi vidéo, à remettre le lendemain 13-14h : buffet 15-19h : Travail en groupe avec aide des enseignants en communication et des Cobatistes
Séances de suivi Novembre à décembre	Module Etude de cas : suivi de l'avancée des projets, conseils architecture et construction et réunions de groupes
Soutenance notée mi janvier	SOUTENANCES notée PTU3 (10 min de SOUTENANCE, 10 min de discussion) au cours de la dernière séance Etude de Cas et remise de la note technique
Journée Challenge début février	Challenge COBATY avec sélection pour les challenges nationaux (10 min de SOUTENANCE, 15 min de discussion)

Direction des études en Licence Professionnelle

Métiers du BTP : Génie civil et construction, Spécialité : Eau, Ressources & Infrastructures.

Cette responsabilité fait suite aux missions de codirection qui m'ont été confiées de 2011 à 2014, période au cours de laquelle j'avais pu acquérir une bonne compréhension des contenus afin d'assurer la cohérence de l'enchaînement des modules lors de la programmation des emplois du temps. La prise de direction, en 2018, ajoute d'autres missions telles que la gestion des vacataires, le recrutement des étudiants, l'organisation des examens et des soutenances, la compilation et la transmission des notes aux étudiants repertoriée en Figure I. 4. Pour cela, j'ai été formée à l'utilisation de logiciels dédiés tels que ADE, Gestscol, Ecandidat, les serveurs de l'UL et du CFA. Ces activités m'ont également permis de mieux comprendre les responsabilités des services de l'université qui se chargent des aspects administratifs de l'inscription (service scolarité) et de contractualisation des étudiants en contrat de professionnalisation (service de formation continue) ou en alternance (Centre de Formation des Apprentis, CFA).

Une disponibilité importante est nécessaire pour être à l'écoute des étudiants et des enseignants qui peuvent être confrontés à des difficultés, de l'absentéisme, des problèmes de comportement, ou qui peuvent avoir besoin d'aide lors de la recherche de stages. La mise en place de l'alternance

suppose la rencontre des tuteurs en entreprise chaque année et fournir des conseils aux alternants sur les livrables. Ces missions de suivi des alternants (10 en moyenne par an) sont réparties entre les enseignants de la licence.

Cette mission inclut également la programmation, l'animation et la rédaction de comptes rendus et pièces administratives en lien avec les différents jurys (admission, diplomation, conseil de perfectionnement), et les comités de suivi. Un suivi rigoureux des compétences attendues par les professionnels est important pour faire évoluer la formation à chaque nouvelle habilitation. Actuellement, la conservation de cette licence en parallèle des spécialités du BUT (Bachelor universitaire de technologie) nous conduit à repenser le positionnement de cette Licence Professionnelle dans l'offre de formation. Le dossier d'auto-évaluation a été remis fin 2021 et les discussions sont en cours afin de rédiger la nouvelle demande d'accréditation (voir partie II.3).

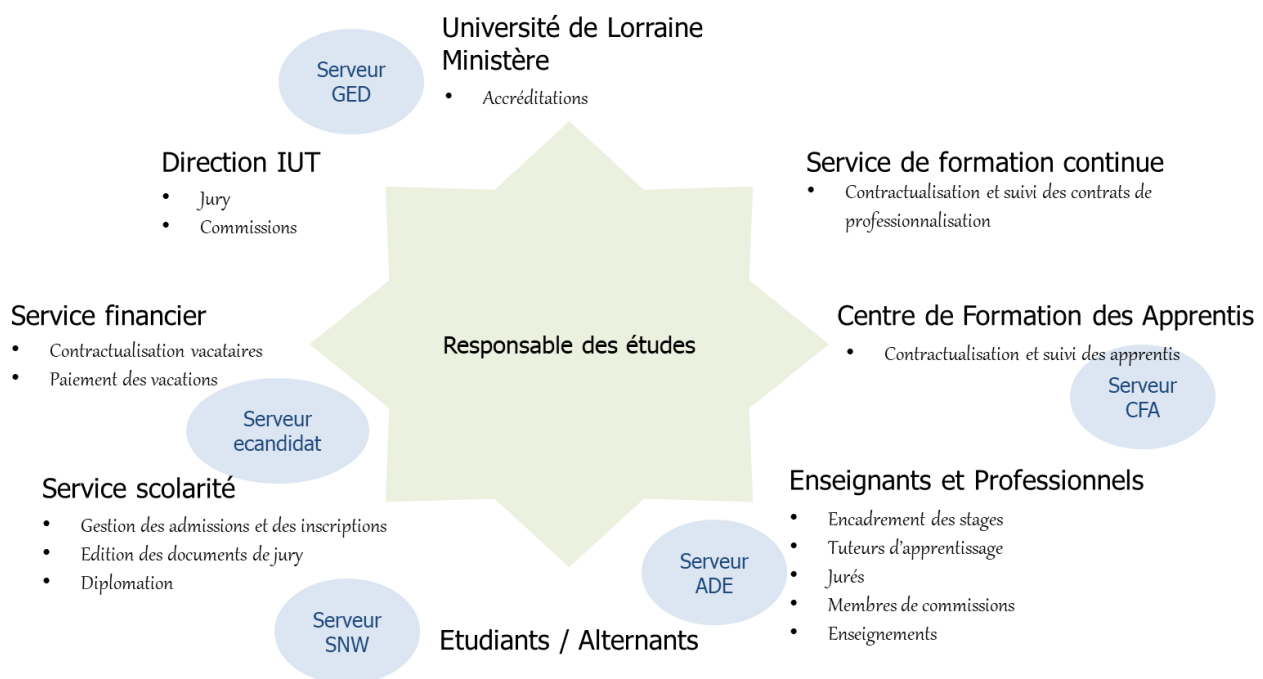


Figure I. 4 : Représentation schématisée des missions en lien avec la responsabilité des études.

II.2.2. Responsabilités à l'École supérieure d'ingénieurs des travaux de la construction de Metz (ESITC)

Les relations entre l'ESITC de Metz et notre équipe de recherche (LEMTA) se sont construites au fur et à mesure des années. Mes collègues participent depuis de nombreuses années aux enseignements dans cette école. Pour ce qui me concerne, j'ai tout d'abord encadré des projets de recherche avec les étudiants de 4^e année dès 2011 puis pris la succession de mon collègue A. Abdallah à la direction de ce module d'**initiation à la recherche (4^e année)** en 2016. Cette mission consiste en une séance préliminaire de formation à la recherche bibliographique puis les groupes choisissent leur sujet parmi les propositions faites par des chercheurs de différents laboratoires (IJL, LEMTA, ENIM, ENSA). Les groupes travaillent ensuite en lien direct avec leur chercheur référent et participent aux activités de recherche, théoriques, expérimentales ou numériques, en fonction de leur sujet. Plusieurs temps forts viennent rythmer les projets, tel qu'annoncés dans le synopsis proposé en Figure I. 5. La première rencontre individuelle de suivi (notée RIS) permet de vérifier la bonne compréhension de la problématique. Les soutenances bibliographiques sont réalisées en

présence du chercheur référent. Une séance de discussion sur la première version de l'article est ensuite organisée, elle permet également de discuter du projet de vidéo. La séance de visionnage des vidéos est réalisée en présence des autres groupes, ce qui leur permet de prendre connaissance du travail de leurs collègues et fait l'objet de nombreuses interactions. Enfin, une soutenance devant un jury composé de chercheurs finalise les projets.

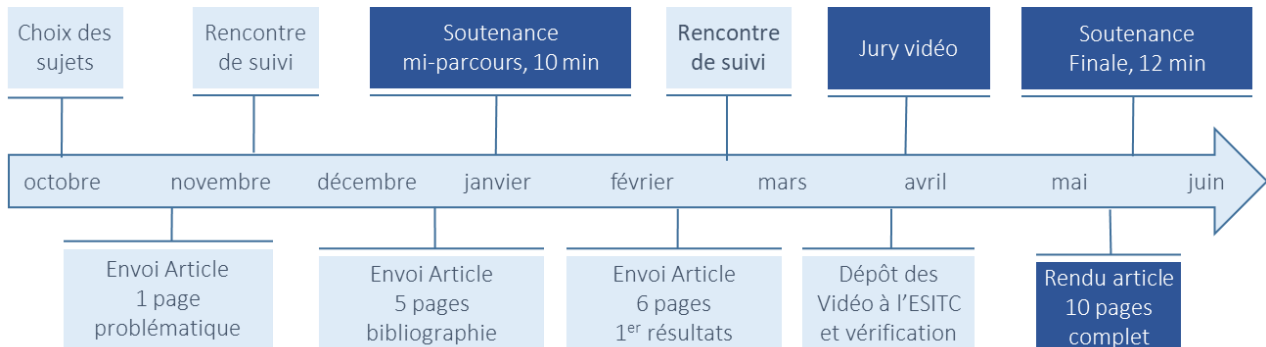


Figure 1. 5 : Synopsis du déroulement des projets de recherche de 4^e année à l'ESITC

En 2016, à l'occasion d'un conseil de perfectionnement, et suite à la nouvelle habilitation du diplôme par la CTI, il a été décidé de **sensibiliser les élèves à la recherche dès la 2nd année**. J'ai ainsi proposé la création d'un module de sensibilisation à la recherche que j'anime depuis 2017. Après une présentation initiale sur la recherche et les parcours des chercheurs, nous accompagnons, avec S. Roux (2017-2019) puis S. Janvier (depuis 2020), les étudiants dans l'élaboration d'un poster scientifique sur un sujet libre dans un thème imposé. Les thèmes imposés au cours des précédentes années sont :

- 2017 - 2018 : Les constructions de l'extrême
- 2018 - 2019 : Comment tenir compte des aléas exceptionnels dans le Génie Civil
- 2019 - 2020 : Comment le développement durable influence le Génie Civil
- 2020 - 2021 : Rénovation, reconstruction : comment faire cohabiter le respect des monuments historiques et les besoins contemporains ?
- 2021 - 2022 : Les spécificités architecturales des grands musées

Depuis 2020, l'ESITC s'est ouverte à l'apprentissage et le module « projet de recherche » s'est adapté. Avec A. Abdallah, nous proposons aux apprentis de réaliser une **étude bibliographique** sur une thématique en lien avec les activités de leur entreprise. Après une présentation initiale, en fin de 3^e année, sur la structuration de la recherche en France, des rencontres régulières sont organisées tout au long de la 4^e année afin de mener à bien leurs projets. Ainsi, une formation à la recherche bibliographique est donnée en début de 4^e année, deux visites de labo, à l'Institut Jean Lamour et au LEMTA sont organisés et quatre entretiens individuels sont organisés au cours de l'année. Les apprentis sont amenés à réaliser une courte séquence vidéo pour communiquer sur leur projet et les articles et soutenances finales sont organisées en fin d'année.

II.3. Evolution des missions d'enseignement et d'encadrement

II.3.1. Evolution du Diplôme Universitaire de Technologie (DUT) en Bachelor Universitaire de Technologie (BUT).

Afin d'homogénéiser les niveaux des diplômes aux standards européens et internationaux, le Bachelor Universitaire de Technologie prend depuis 2021 le relais du Diplôme Universitaire de Technologie. Programmé en 3 ans, au lieu de 2 ans pour le DUT, il confèrera le grade de licence aux diplômés (180 crédits européens). Les BUTs se déclinent en 24 spécialités². Le BUT Génie Civil - Construction Durable comprendra 4 parcours, au choix dès la 2nd année :

- Travaux Batiment (BAT) ;
- Travaux Publics (TP) ;
- Réhabilitation et amélioration des performances environnementales des bâtiments (REHAB) ;
- Bureaux d'études Conceptions (BEC).

L'ensemble de la pédagogie est profondément modifié puisque les enseignements s'organisent désormais autour de niveaux de compétences à atteindre dans 5 blocs. Par exemple, dans le parcours BEC, il faut atteindre le niveau 3 pour les trois premiers blocs et seulement le niveau 2 pour les deux derniers (Figure I. 6). Ce changement s'accompagne d'un renforcement de la pratique professionnelle avec 600h de projets qui suppose une adaptation de nos enseignements (pédagogie par projet) et se traduit par un morcellement des unités d'enseignement pour répondre aux besoins dans le cadre des projets.

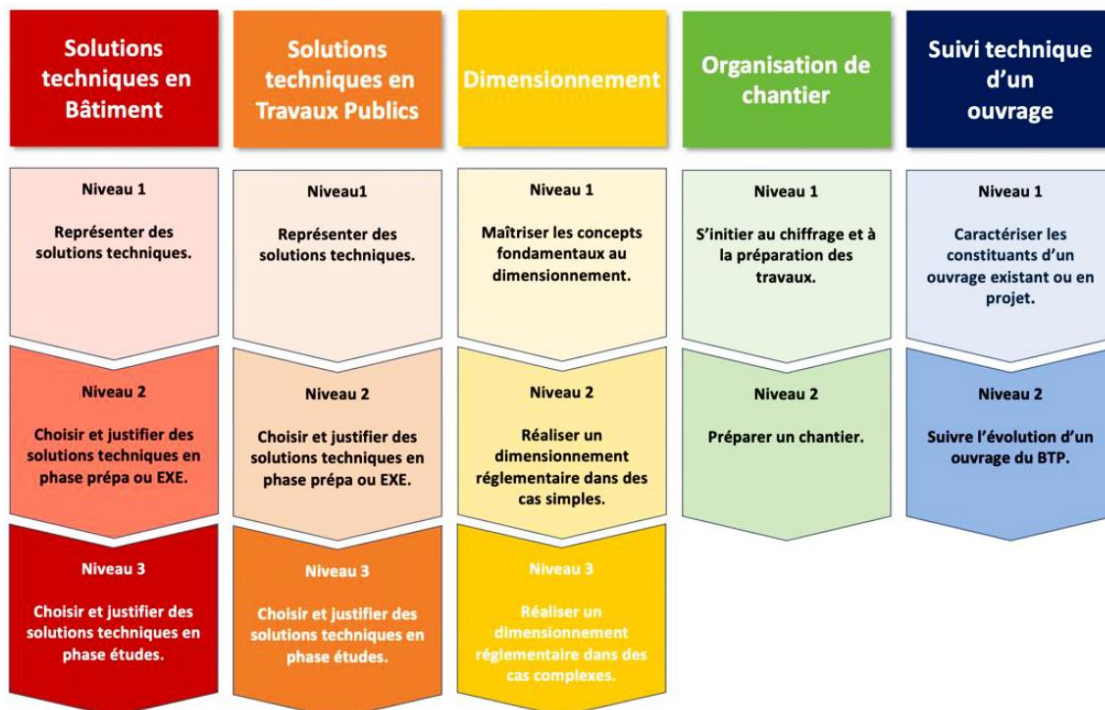


Figure I. 6 : Exemple de niveaux de compétence à atteindre dans chaque bloc pour le parcours Bureaux d'études Conceptions³

² [Le Bachelor universitaire de technologie \(iut.fr\)](http://Le Bachelor universitaire de technologie (iut.fr))

³ www.enseignementsup-recherche.gouv.fr

La transition entre les diplômes a été compliquée par le contexte sanitaire international au cours des années 2020 et 2021. Les séminaires nationaux n'ont pas pu avoir lieu et l'élaboration du programme a donc été réalisée sur la base d'échanges de mails et de réunion en visio, ce qui a considérablement réduit les possibilités d'échange et allongé les temps de décision. La mise en place de la seconde année à la rentrée 2022 est actuellement au cœur des discussions.

II.3.2. Nouvelles accréditation des licences professionnelles

La mutation du DUT en BUT a également des répercussions sur les licences professionnelles. En effet, un grand nombre de licence professionnelles seront intégrées au parcours de formation en BUT 3. Cependant, la Licence Professionnelle *Métiers du BTP : Génie civil et construction, Spécialité : Eau, Ressources & Infrastructures* (LP ERI) dont j'assure la direction des études depuis 2018 n'intégrera pas le BUT 3 car la spécialité « eau » ne fait pas partie des parcours identifiés pour le BUT Génie Civil-Construction Durable. De plus, cette spécialité « eau » qui était également bien représentée dans le département *Génie Chimique – Génie des Procédés* sous la forme d'une licence professionnelle intitulée *Génie des Procédés pour l'environnement - Eau : Mesures et Procédés*, ne sera pas intégrée au BUT Génie des Procédés. Pour répondre aux importants besoins des professionnels dans ce domaine de formation, une licence sera conservée en mode « suspendu » avec un parcours Génie-Civil et un parcours Génie-Chimique. Les discussions à propos du contenu de cette nouvelle licence sont actuellement en cours, la nouvelle demande d'accréditation sera déposée fin 2022.

III : Présentation synthétique des activités de recherche

Mes travaux de recherche s'intéressent à l'impact de sollicitations externes de type chimiques, thermique et hydriques d'origine naturelle (cycles climatiques) ou anthropique (stockage de déchets, géothermie) sur les matériaux fins utilisés dans le génie civil. Au cours de ma carrière j'ai eu l'occasion de travailler sur des sujets variés nécessitant des compétences pluridisciplinaires. Ces expériences successives m'ont permis de développer des compétences de fond sur la structuration des matériaux, de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. Chaque changement thématique a été l'occasion de valoriser les compétences acquises sur de nouvelles problématiques.

L'objet de la partie III.1 est d'inscrire mes recherches actuelles dans l'ensemble de mon parcours. La partie III.2 contient des résumés des masters, thèses et post-doctorats co-encadrés tandis que la partie III.3 présente les projets scientifiques auxquels j'ai participé. La partie III.4 résume les activités en lien avec le rayonnement scientifique et la partie III.5 rassemble l'ensemble des publications dont je suis auteur ou co-auteur.

III.1. Présentation synthétique du parcours de recherche

Mon parcours de recherche a débuté par l'étude du comportement mécanique d'une bentonite. Cette roche naturelle, riche en argile gonflante (la smectite) est largement utilisée dans des domaines variés tels que la cosmétique et l'agroalimentaire, mais surtout dans le génie civil en tant que fluide de forage ou matériau d'étanchéité (géosynthétiques bentonitiques). Lors de leur utilisation, ces matériaux sont soumis à des variations de leur environnement chimique qui est susceptible de modifier leur comportement hydromécanique et donc leur capacité à remplir de façon optimale leur fonction.

III.1.1. Etudes des liens entre les propriétés microscopiques des argiles et leur comportement mécanique macroscopique.

Lors d'un forage, la boue bentonitique est injectée sous pression à l'intérieur de la tige de forage puis remonte le long des parois du forage. Sur son passage, la boue va tout d'abord lubrifier la tête de forage puis englober les cuttings afin de faciliter leur extraction et enfin déposer une pellicule stabilisatrice sur les parois. Lors d'un arrêt temporaire des travaux, la boue se gélifie et les cuttings sont maintenus en suspension, évitant ainsi leur sédimentation. Lors de la reprise des travaux, la boue se fluidifie et l'excavation reprend. Pour garantir une bonne exécution des travaux, les propriétés rhéologiques à contrôler sont la viscosité du fluide, son seuil d'écoulement et ses propriétés thixotropiques. Ces propriétés sont généralement optimales dans le cas de l'utilisation d'une bentonite dite sodique, ce qui signifie que le cortège cationique de la smectite est principalement composé de sodium. Cependant, lors de sa progression dans les sols, la boue peut croiser des horizons de sol réactifs ou se mélanger à des eaux interstitielles chargées. La modification de l'équilibre chimique du fluide peut modifier ses propriétés rhéologiques et diminuer son efficacité en tant que fluide de forage.

Pour mieux comprendre l'occurrence de ces problèmes, pouvoir les anticiper puis y remédier, la stratégie scientifique adoptée au cours de ma thèse (laboratoires IC₂MP et P', Université de Poitiers) fut de caractériser les éléments unitaires, les feuillets d'argile, puis de préparer des suspensions de plus en plus concentrées afin d'observer l'évolution de la structuration des boues et de leurs propriétés. Pour cela différentes méthodes expérimentales furent employées en fonction des échelles d'investigation. Des méthodes minéralogiques telles que la diffraction de rayons X ou la microscopie électronique ont permis de caractériser les feuillets et leurs assemblages en tactoïdes plus ou moins développés en fonction du cortège cationique. Les méthodes de la mécanique des fluides (rhéométrie) ont ensuite permis de caractériser ces fluides tout d'abord à de très faibles concentrations [RI1]⁴ jusqu'à l'état pâteux [RI2]⁵.

La compréhension des processus fondamentaux d'interaction entre les particules m'a permis d'aborder l'étude des suspensions pâteuses sous un jour original en réfléchissant sur la place occupée par les particules en suspension. Les rhéogrammes apportent plus d'informations que l'étude de l'écoulement seul puisque les perturbations observées sur les rhéogrammes, notamment à faible vitesse de cisaillement, donnent des indications importantes sur la transition progressive de la suspension d'un état solide à liquide [RI3]⁶. Ces études nous ont permis de mieux définir le seuil d'écoulement de ces fluides complexes.

Poursuivant l'étude du comportement mécanique des suspensions argileuses, nous avons réalisé des essais rhéométriques afin de caractériser la déstructuration et les capacités de restructuration des suspensions en fonction du cortège cationique des argiles. Cette étude du caractère thixotrope des suspensions a montré l'existence d'une double cinétique à pas de temps respectivement court et long et pouvant avoir un effet antagoniste [CI3]⁷. Cette double cinétique peut être rapprochée de la structuration spécifique des argiles qui associe des liaisons fortes au sein des agrégats et des liaisons plus fragiles entre les agrégats (Touret et al. 1990)⁸.

La fin de ma thèse fut l'occasion d'utiliser les méthodes rhéométriques aux problématiques liées à l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques. Dans ces matériaux, une couche de bentonite, sous forme de poudre ou de granulés, est insérée entre deux géotextiles liaisonnés entre eux. Les résultats des essais rhéométriques réalisés sur des suspensions de bentonites extraites des GSB ont montré que la typologie des courbes d'écoulement étaient différentes en fonction de l'origine, naturelle ou industrielle, du caractère sodique de la bentonite utilisée. Ces résultats permettent d'envisager le développement d'une méthodologie de contrôle des caractéristiques des argiles utilisées pour la fabrication des géosynthétiques bentonitiques [RI4]⁹.

III.1.2. Transferts advectifs et diffusifs au travers de géosynthétiques bentonitiques.

La collaboration, initiée en fin de thèse, avec l'équipe géosynthétique du Cémagref (devenu INRAE en 2020), s'est poursuivie dans le cadre d'un post-doctorat. Cela m'a permis de réaliser de façon fructueuse ma première conversion thématique depuis la mécanique des fluides complexes vers la quantification des transferts advectifs et diffusifs au sein des barrières argileuses. En effet, les

⁴[RN 1] Paumier S, Pantet A, Monnet P et al. African Journal of Science and Technology (AJST), 2007.

⁵[RI 2] Rosin-Paumier S et al. Advances in Materials Science and Engineering, 2008, p.856714.

⁶[RI 3] Paumier S et al. Applied rheology 19:2, 2009, 23824, 1-11.

⁷[CI 3] Paumier S et al. AERC, 74th Annual European Rheology Conference, Naples, Italie, 2007.

⁸Touret O, Pons C H, Tessier D, Tardy Y, 1990. Clay Minerals 25/2 : 217-233

⁹[RI 4] Rosin-Paumier S et al. Geosynthetics International, 2010, 17 (1), pp.1 - 11.

géosynthétiques bentonitiques (GSB) sont régulièrement utilisés pour compléter la barrière passive située sous les installations de stockage de déchets (ISD). Dans ces conditions, les GSB participent à limiter les éventuels transferts de polluants entre l'ISD et l'environnement en cas de défaillance de la barrière active (dispositif d'étanchéité par géomembrane). Différents types de bentonites, sodique naturelle ou calcique activée, de diverses provenances géographiques, sont utilisés pour l'élaboration des géosynthétiques bentonitiques. Les conductivités hydrauliques de certaines bentonites pourraient être plus affectées que d'autres lors de la mise en contact avec un lixiviat. Afin d'optimiser son efficacité, il faudrait choisir le GSB employé en fonction de la susceptibilité de la bentonite qu'il contient à l'effluent auquel il sera exposé. Cette question prend tout son sens lors du stockage de déchets dans des bioréacteurs puisqu'il est alors possible de prétraiter les lixiviats avant réinjection.

Pour répondre à ces problématiques, l'équipe géosynthétique s'est investie dans les projets ANR LIXAR1 et 2. Le projet LIXAR 1 a montré que la réalisation d'essais en oedoperméamètre permettait d'évaluer précisément l'évolution de la conductivité hydraulique des GSB lors d'un contact avec des effluents. Cependant, ces essais sont longs (3-6 mois) rendant coûteuse toute étude comparative. La mission qui m'a été confiée dans le cadre du projet LIXAR 2 fut d'utiliser des outils rapides de caractérisation des fluides afin d'évaluer l'effet de fluides issus de stockage sur les bentonites utilisées pour la constitution des GSB. Des essais comparatifs ont donc été réalisés au moyens d'essais de gonflement, d'essais au filtre-pressé et d'essais rhéométriques. Les résultats ont montré que la susceptibilité des bentonites était inégale en fonction des fluides testés. L'impact d'un lixiviat sur la conductivité hydraulique d'une bentonite est à la fois lié à la conductivité électrique du fluide et à sa composition cationique. Ainsi, un seuil de conductivité électrique à ne pas dépasser a été identifié pour chaque composition du lixiviat. Ensuite, nous avons mis en œuvre un programme expérimental conséquent associant les résultats de nombreux essais oedoperméométriques et des analyses chimiques. Ces travaux ont permis de mieux comprendre l'incidence de fluides chargés (lixiviats synthétiques) [RI6]¹⁰ puis de lixiviats réels [RI8]¹¹ sur la conductivité hydraulique des géosynthétiques bentonitiques. Cette étude constitue ma première participation à un projet ANR [RS1, RI8]¹².

En plus des transferts advectifs décrits précédemment, des transferts diffusifs peuvent également se produire au travers des géomembranes qui composent la barrière active entre l'ISD et l'environnement. Ayant été formée aux méthodes de quantification des composés chimiques dans les eaux, j'ai participé à la conception de cellules permettant la quantification de ces transferts pour ce qui concerne les composés organiques volatils (benzène, toluène, ...) puis réalisé des campagnes de mesures dans le cadre du Projet ANR PRECODD BIOREACTEUR [RS2, RI5 et 7]¹³.

III.1.3. Comportement thermo-hydrromécanique des sols naturels et compactés

L'ensemble de ce bagage scientifique m'a permis d'intégrer en 2010 l'équipe de Mécanique des Sols du Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA, UMR CNRS 7563). Les principales actions entreprises par l'équipe concernent l'étude du comportement

¹⁰ [RI 6] Rosin-Paumier S. et al. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29 (3), pp.211 - 221.

¹¹ [RI 8] Rosin-Paumier S., et Touze-Foltz N. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, 33, pp.15 - 24.

¹² [RI 8] Rosin-Paumier S., et Touze-Foltz N. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, 33, pp.15 - 24.

¹³ [RI 7] Paumier S. et al. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137, 1039-1046

[RI 5] Touze-Foltz N et al. *Geotechnical Special Publication*, 2011, 1121-1130.

thermo-chimio-hydromécanique couplé (TCHM) des sols fins par des approches expérimentales et numériques. Ces sols, naturels ou anthropiques, présentent différents états hydriques depuis l'état saturé à l'état sec et peuvent éventuellement être traités pour atteindre les performances mécaniques requises. L'intégration à cette équipe constitue ma seconde conversion thématique.

Les sols sont des matériaux complexes dans lesquels coexistent des phases aqueuses, gazeuses et des particules solides. Toute modification de l'une de ces phases engendre des modifications sur les propriétés Thermiques Hydriques et Mécaniques (THM) du matériau. Ces couplages prennent tout leur sens lors de l'application d'un flux de chaleur à un sol (Figure I. 7). En effet, lors d'une augmentation de température, l'énergie cinétique des particules augmente ce qui tend à augmenter la distance entre les particules constitutives d'un corps. Ce phénomène thermodynamique bien connu est à l'origine de l'expansion volumique des corps (Khalili et al, 2010)¹⁴. En conséquence, si le volume du matériau n'est pas contraint :

- les phases solides se dilatent ce qui peut induire une diminution de la limite d'élasticité du matériau qu'il compose en fonction de son état initial (normalement consolidé ou surconsolidé) ;
- la viscosité de la phase liquide diminue, ce qui facilite sa mobilité au sein du matériau.

Ainsi, les sollicitations thermiques et hydriques modifient les équilibres établis dans le matériau et provoquent des variations de volume et de consistance du matériau. Nous retrouverons tout au long de ce document les conséquences hydromécaniques à l'échelle macroscopique de ces modifications des propriétés des particules.

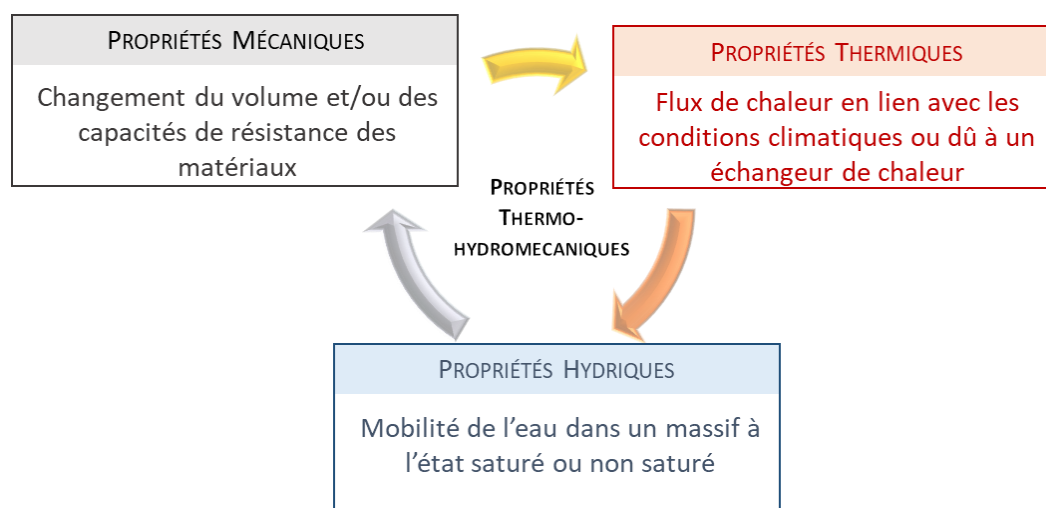


Figure I. 7 : Illustration des couplages thermo-hydromécaniques dans les sols.

Mes travaux se sont alors attachés à mieux comprendre l'occurrence et l'impact de sollicitations thermo-hydriques d'origine anthropique ou naturelle sur les propriétés hydromécaniques des matériaux fins (Figure I. 3). La partie I.3.1 présentera ma participation à des travaux de recherche en lien avec la problématique de la fissuration des sols superficiels. Cette partie rend compte de l'effet de l'application de variations thermo-hydrique naturelles à l'interface sol-atmosphère. Mais les sols peuvent également subir des variations anthropiques au sein des massifs comme lors du stockage de déchets nucléaires (aspect développé en partie I.3.2) ou lors d'applications géothermiques. Mes recherches en lien avec le développement des géostructures énergétiques seront développées en détails dans le second volume de cette demande d'habilitation.

¹⁴ Khalili N, Uchaipichat A, Javadi A. 2010. Mechanics of Materials 42: 593–598

Ces problématiques scientifiques sont actuelles et soutenues par notre région (Grand Est), l'Agence Nationale de la Recherche (projets ANR) et par l'Union Européenne (projets ITN et COST). Elles ont également une forte potentialité applicative, ce qui nous permet d'entretenir de solides relations partenariales avec des entreprises (BOUYGUES) ou des organismes publics (ANDRA¹⁵, BRGM¹⁶). Ces projets supports, listés en partie III.3, ont permis de financer les équipements utilisés tout au long de ces études dans le cadre de doctorats et de post-doctorat des étudiants que j'ai pu co-encadrer au cours de ces dernières années (synthèse en partie III.2).

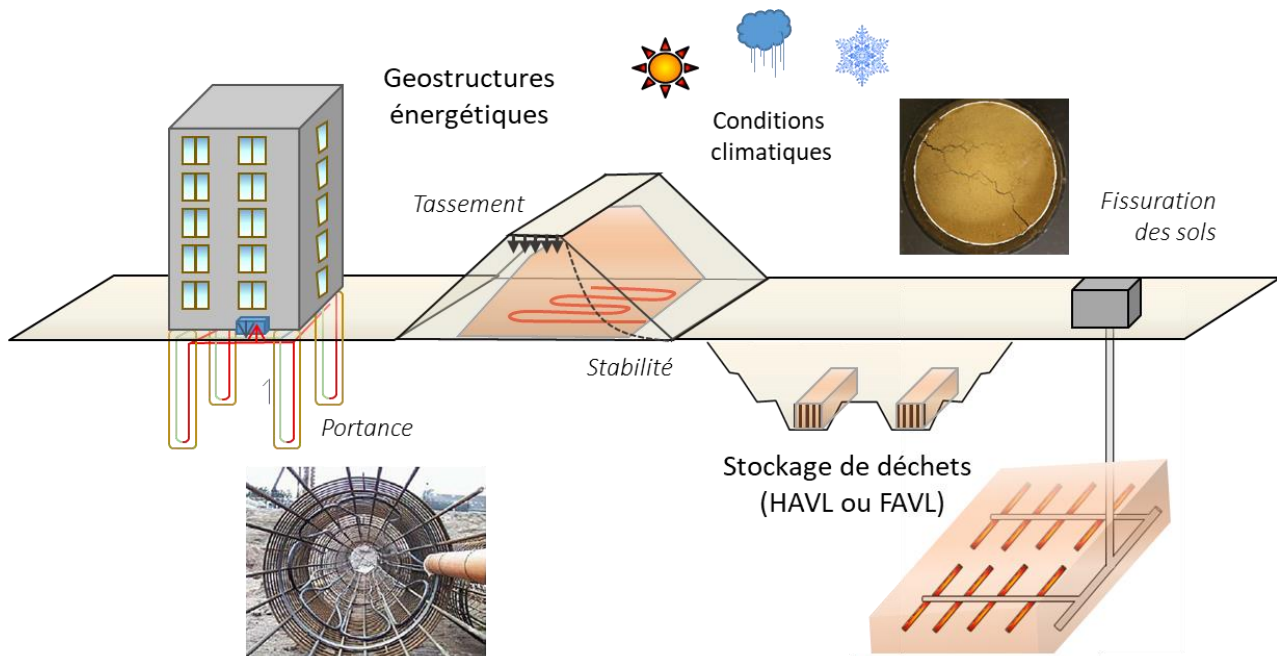


Figure I. 8 : Exemples de situations dans lesquels les sols, naturels ou anthropiques sont soumis à des sollicitations thermo-hydrémécaniques.

III.1.3.1. Fissuration des sols

Les cycles de variation de la température, l'occurrence de précipitations, l'intensité et l'orientation du vent ou encore la puissance du rayonnement solaire se combinent en tout instant et appliquent des sollicitations thermo-hydrémécaniques complexes aux sols. Sous l'effet de ces sollicitations, des fissures peuvent apparaître dans les sols et entraîner une déstabilisation des massifs et une augmentation de la perméabilité du milieu qui favorisent les transferts vers les couches plus profondes et peuvent compromettre leur stabilité.

Dans ce contexte, de nombreuses études ont porté sur des sols naturels, pour des problématiques agronomiques par exemple, mais une minorité se sont intéressées aux sols compactés. Pourtant ce phénomène revêt une grande importance en géotechnique et en géotechnique de l'environnement puisque ces fissures peuvent perturber les fondations des bâtis individuels, les couches de forme des routes, les remblais, etc. Dans un autre contexte, la propagation de fissures en couverture de barrières ouvragées argileuses mises en place pour l'isolation des déchets, peuvent conduire à des infiltrations dans le massif. Mes premières activités lors de l'intégration de l'équipe Mécanique des Sols du LEMTA m'ont conduite à participer à une thèse en cours sur le thème de la fissuration des sols compactés. Ma participation à cette thématique a consisté à développer, avec le doctorant

¹⁵ Agence nationale pour la gestion des déchets radioactif

¹⁶ Service géologique national

chargé de la réalisation des essais (Romain Auvray), un protocole de quantification de la fissuration par analyse d'image.

Pour cette étude, un mélange constitué, en proportion massique, de 40 % de limon de Xeulley et de 60 % de bentonite FVO fut utilisé. Les propriétés physiques et géotechniques de ce mélange sont décrites dans les publications [R19]¹⁷. Une campagne expérimentale a permis de suivre la fissuration d'éprouvettes de 20 mm d'épaisseur préparées par compactage statique dans un moule cylindrique de 102 mm de diamètre au fond rainuré. Les éprouvettes sont placées dans une enceinte dont l'hygrométrie est réglée par des solutions salines saturées (20°C).

La teneur en eau est déterminée par l'intermédiaire de mesures de masse obtenues par une balance toutes les 10 min. L'évolution de la hauteur de l'éprouvette est mesurée toutes les 8 heures par un capteur laser de déplacement fixé sur une vitre glissante (Figure I. 9). Ces valeurs ont permis de déterminer l'évolution de la déformation verticale $\Delta h/h_0$, h_0 étant la hauteur de l'éprouvette après compactage. Enfin, des photographies de la surface de l'éprouvette sont réalisées toutes les 30 min ce qui permet, par l'intermédiaire d'une méthode d'analyse d'images, d'évaluer l'aire des fissures et le rapport entre la surface des fissures et la surface de l'éprouvette appelé CIF (Miller et al., 1998¹⁸). Deux valeurs de CIF différentes, Cif^* et Cif_{tot} ont été définies pour cette étude :

$$Cif^* = \frac{\text{Aire des fissures}}{\text{Aire de la surface de l'éprouvette}} \quad Cif_{tot} = \frac{\text{Aire des fissures} + \text{Aire du retrait}}{\text{Aire de la surface initiale de l'éprouvette}} \quad \text{Équation 1}$$

Les mesures des différents paramètres sont effectuées jusqu'à l'obtention de l'équilibre de la masse de l'éprouvette qui est atteint lorsque la variation de la teneur en eau de l'éprouvette en 24 heures est inférieure à 0,05%.

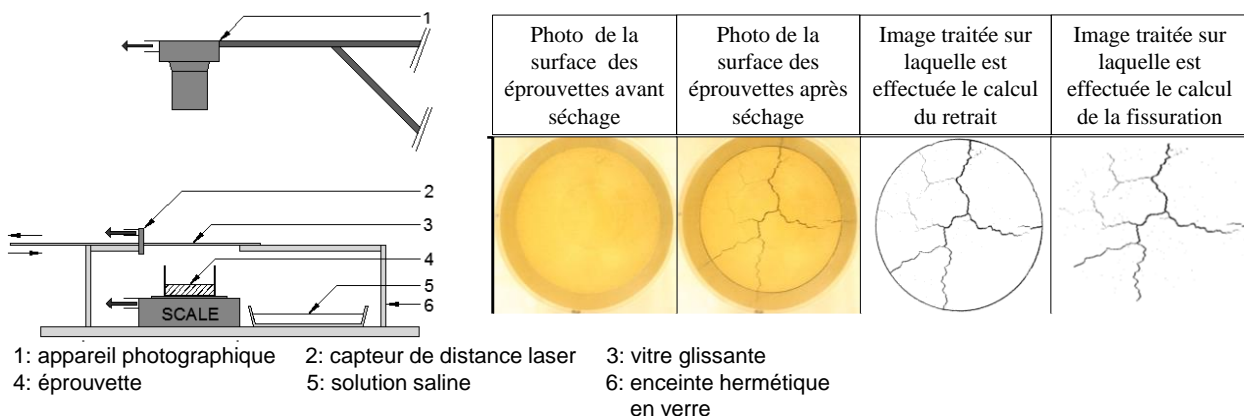


Figure I. 9 : Schéma du dispositif expérimental et exemple de traitement d'images.

Chaque image est filtrée afin de révéler ses différences par rapport à l'image initiale de l'éprouvette. Les différences d'intensités de niveaux de gris permettent une binarisation efficace de l'image par l'usage d'un seuil (Figure I. 9). Ainsi les pixels des éléments du sol (plus claires) sont transformés en pixels blancs, tandis que les pixels des fissures sont transformés en pixels noirs. Des combinaisons d'outil morpho-mathématiques et de filtres sont ensuite utilisées pour optimiser l'efficacité du seuillage.

Les résultats ont montré une bonne reproductibilité de la cinétique de séchage ainsi que les déformations verticales pour des éprouvettes préparées à des états de compactage similaires et

¹⁷ [R19] Auvray R. et al. European Journal of Environmental and Civil Engineering, Taylor & Francis, 2013, 18 (1), pp.11 - 32.

¹⁸ Miller, C.J., Mi, H., Yesiller, N., 1998. J. of the American Water Resources Ass. 34 (3), 677-686.

soumises à une même sollicitation thermo-hydrigue similaires. En revanche, les déformations radiales ainsi que l'aire des fissures observées différaient, pointant ainsi la nécessité de mesurer et de confronter les évolutions de la teneur en eau, des déformations verticales et latérales, ainsi que du C_{if}^* et du $C_{if_{tot}}$ afin d'interpréter correctement les résultats [CI8]¹⁹.

Un algorithme a donc été développé afin de déterminer la valeur du retrait moyen à partir du calcul du nombre de pixel noir entourant la surface de sol (Lakshmikantha et al. 2009, Peng et al. 2006)²⁰. La méthode a été validée de deux manières différentes par comparaison des résultats obtenus sur des images construites numériquement avec une surface de fissures connue, et sur des images d'éprouvettes fissurées. L'écart entre les valeurs obtenues par ces deux méthodes est de 2,5 % pour l'aire de retrait et de 5 % pour l'aire des fissures.

Ainsi, lors des essais suivants, le traitement des images a permis de distinguer la surface fissurée au sein de l'éprouvette de la zone de rétraction [RI9]¹⁵. La Figure I. 10 montre l'évolution de la surface fissurée qui permet de déterminer le C_{if}^* au cours des cycles. En cohérence avec ce qui a pu être observé lors de l'application de cycles de séchage-humidification sur d'autres matériaux (Alonso et al., 2005, Nowamooz et Masrouri 2008 et 2010)²¹, les déformations verticales liées au retrait furent particulièrement importantes lors du 1^{er} cycle de séchage puis se s'équilibrèrent au cours des cycles suivants. Pour ce qui concerne les déformations radiales, le C_{if}^* et le $C_{if_{tot}}$ ont fortement évolué lors du 1^{er} séchage ; puis l'évolution est devenue plus graduelle, jusqu'à converger vers un état d'équilibre (Figure I. 10).

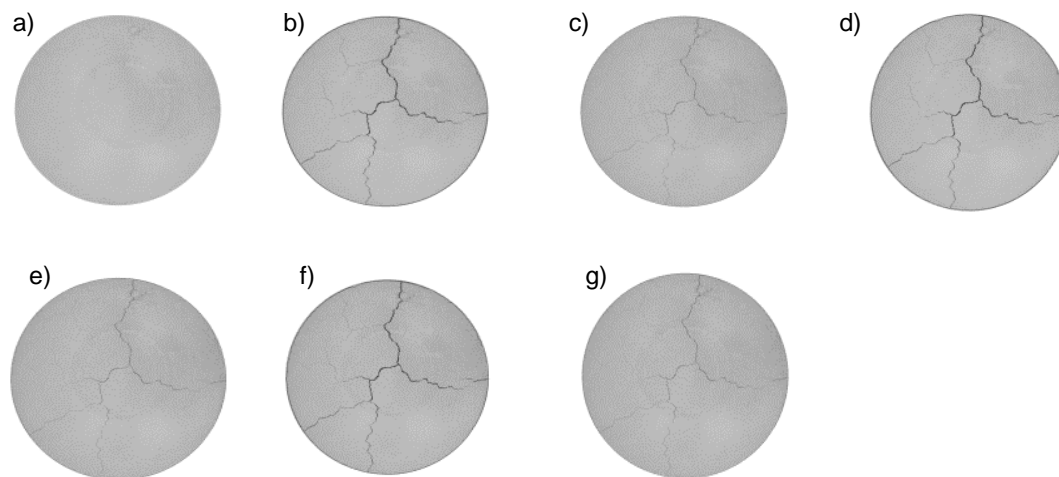


Figure I. 10 : Surface de l'éprouvette à différents stades : a) état initial b) après la 1^{er} séchage c) après la 1^{ère} réhumidification d) après le 2nd séchage e) après la 2nd réhumidification f) après le 3^e séchage f) après la 3^e réhumidification.

¹⁹ [CI 8] Auvray R et al. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013.

²⁰ Peng, X., Horn, R., Peth, S., Smucker, A., (2006). Soil & Tillage Research 91, 173-180.

Lakshmikantha, M, Prat, P., & Ledesma, A., (2009). Geotechnical Testing Journal 32 (6), 505-515.

²¹ Alonso, E.E., Romero, E., Hoffmann, C, Garía-Escudero, E., (2005). Engineering Geology 81, 213-226.

Nowamooz, H., & Masrouri, F., (2008). Engineering Geology 101 (3-4) 154-164.

Nowamooz, H., & Masrouri, F., (2010). Comptes Rendus Geosciences 342 (1), 901-910

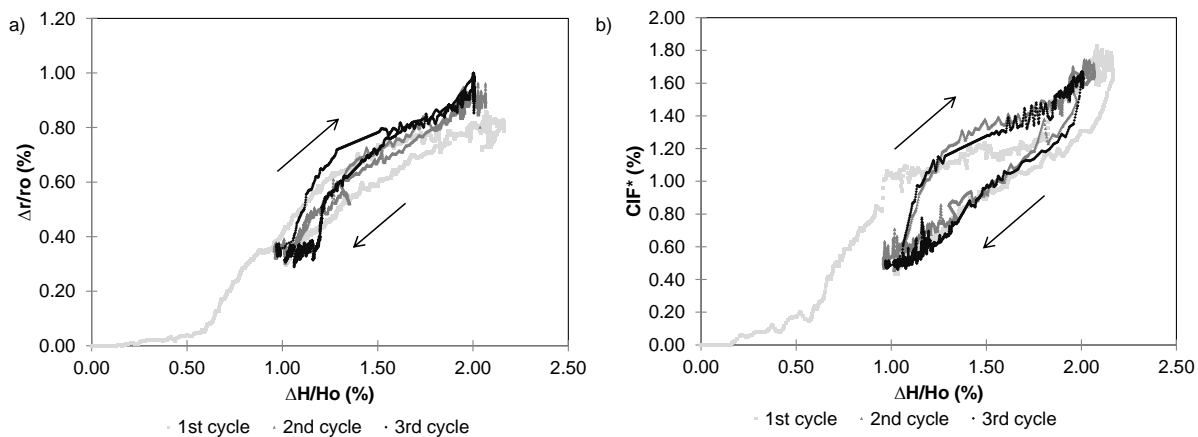


Figure I. 11: Evolution des paramètres mesurés en fonction de $\Delta H/H_o$. a) Les déformations radiales b) CIF^* .

Cette étude a également montré l'existence de boucles d'hystérésis importantes entre les chemins de séchage et de réhumidification lors du suivi du CIF^* (Figure I. 11b). Ces boucles d'hystérésis ont également été observées dans des études précédentes⁶, dans les milieux continus, elles s'expliquent par la double échelle de structuration du milieu (micro et macrostructure) (Gens et Alonso, 1992)²². Lors du 1^{er} séchage, avec la diminution de la teneur en eau et l'augmentation de la succion, le réarrangement de la macrostructure induit une densification de l'éprouvette avec une diminution du volume des grands pores et une diminution de la hauteur moyenne et du diamètre de l'éprouvette. Ces déformations ne sont qu'en partie réversibles et ne sont pas linéaires dans le temps du fait de la distribution hétérogène de la géométrie des pores; du temps de progression des effets du séchage et de la réhumidification dans l'éprouvette; et du piégeage de l'air (Hillel, 1980)²³. Des phénomènes similaires pourraient expliquer la répartition des fissures au sein des éprouvettes de sol. Des études supplémentaires sont envisagées pour confirmer cette hypothèse et investiguer la problématique de la profondeur maximale atteinte par les fissures en vue d'une bonne prise en compte de leur impact sur les transferts et la stabilité du milieu.

III.1.3.2. Effet de cycles humidification-séchage sur la conductivité hydraulique des matériaux

Les sollicitations de type thermo-hydropneumatiques d'origine anthropique sont nombreuses et tendent à se développer. Dans certaines situations, la chaleur résulte de l'activité humaine et doit être évacuée. Par exemple, lors du stockage des déchets nucléaires, il est nécessaire d'évaluer l'effet de la dissipation de la chaleur résiduelle sur l'efficacité du confinement. Au cours du projet FAVL II (stockage de déchets de Faible Activité et Vie Longue), nous avons simulé en laboratoire les sollicitations hydriques cycliques subies par des matériaux de couverture dues à l'alternance des saisons (Figure I. 12). Pour cela, des éprouvettes d'argile ont été soumises à des cycles hydriques (de 40 % à 95% d'humidité relative) à 10°, 20° ou 40°C en chambre climatique.

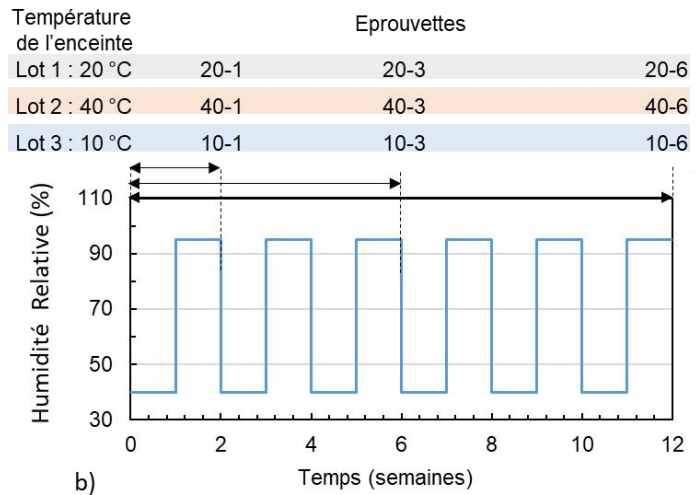
²² Gens, A., & Alonso, E.E., (1992). Canadian Geotechnical Journal 29, 1013-1032.

²³ Hillel, D., (1980) Fundamentals of soil physics. Academic Press Inc., New York, 413 p.

O'Kane, J.P., Pokrovskii, A., & Flynn, D., (2004). Proc. Of EGU conference, vol. 6, 07303.



a)



b)

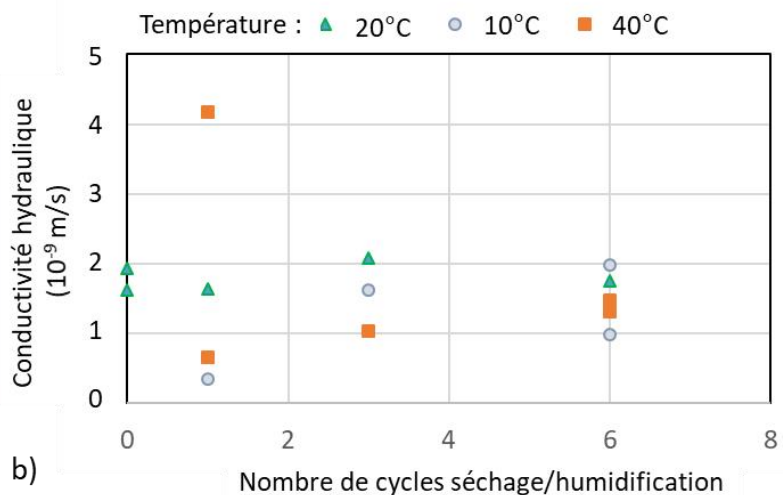
Figure I. 12 : a) Eprouvettes d'argile téguline et b) programme des sollicitations thermo-hydriques appliquées.

Des essais de perméamétrie à paroi flexible ont été réalisés en cellules triaxiales pour mesurer la conductivité hydraulique des éprouvettes soumises aux variations thermo-hydriques après re-saturation. Les résultats montrent que les conductivités hydrauliques des éprouvettes après l'application de ces cycles thermo-hydriques très contraignants restent très proches des conductivités hydrauliques des éprouvettes témoins non sollicitées (Figure I. 13). Le potentiel de gonflement des matériaux semble suffisamment important pour palier au retrait volumique lors de l'application des cycles. Lors de ces essais, une attention particulière a été portée pour évaluer au mieux la géométrie des éprouvettes mais ce point reste une des source majeure d'incertitude sur les résultats.

Le stockage de déchets radioactifs requiert une bonne maîtrise de l'évolution des propriétés sur des temps longs. En continuité de ces études, un projet de recherche a été proposé dans le cadre de l'appel à projet Needs (2021). Nous nous proposons d'étudier les transferts d'humidité sous forme de vapeur au sein du massif qui pourraient être favorisés par l'existence d'un gradient de température entre le cœur du massif et le milieu environnant. La méthodologie IRM, présentée en partie III.1.3.3 pourrait permettre de mieux appréhender ces phénomènes.



a)



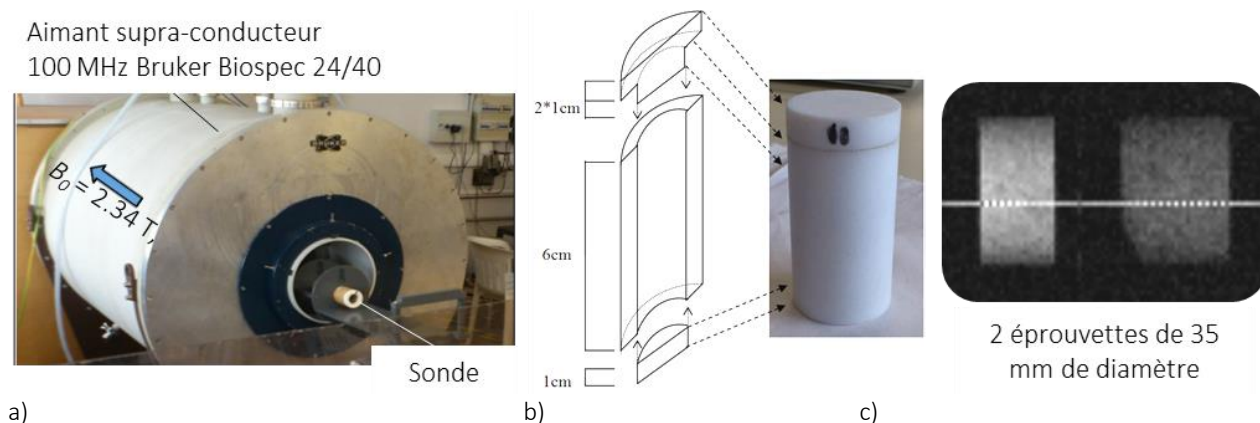
b)

Figure I. 13 : a) Perméamètre à paroi flexible et b) conductivités hydrauliques obtenues après plusieurs cycles de séchage/humidification.

III.1.3.3. Migration de l'eau au sein des matériaux

La migration de l'eau au sein de matériaux compactés sous l'effet de gradient de température ou d'hygrométrie est une problématique complexe ayant des conséquences sur les propriétés de transfert de chaleur, les propriétés mécaniques et la potentielle fissuration des sols.

Pour évaluer la quantité d'eau au sein d'une éprouvette (teneur en eau), la méthode classique consiste à sécher les échantillons à l'étuve et à en suivre l'évolution pondérale. Avec cette méthode, les résultats sont différés et l'échantillon est perturbé de sorte qu'il est impossible d'obtenir des informations spatio-temporelles sur la dynamique de l'eau au sein du matériau. L'utilisation de l'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) apporte des informations intéressantes sur le calcul de la vitesse de propagation d'un front de séchage ou d'un front d'humidification sous l'effet de sollicitations externes. Simpson et al. (2011)²⁴ présentent les études successives qui ont permis de développer une méthode permettant de suivre l'évolution spatiale de paramètres hydriques au sein d'un échantillon. Dès 1970, Prebble et Currie²⁵ ont suggéré la réalisation de courbes de calibration reliant les paramètres du signal RMN à la teneur en eau du matériau étudié. Suite à ces études préliminaires, d'autres auteurs ont pu obtenir des images tridimensionnelles de la distribution spatiale de l'eau au sein d'un sol structuré, à l'aide des méthodes classiques d'IRM. Par exemple Amin et al. (1997)²⁶ ont utilisé une technique d'écho de spin pour mesurer l'infiltration de l'eau dans le sol. Néanmoins, ces procédures d'imagerie sont très difficilement applicables aux sols contenant des éléments métalliques, comme c'est le cas dans les argiles. En effet, ces éléments ont pour effet de diminuer les temps de relaxation en RMN (c.a.d le temps nécessaire au système pour revenir à l'état d'équilibre) et les techniques classiques d'imagerie ne permettent plus de caractériser le système. Des procédures spécifiques, telle que la méthode SPI (Single Point Imaging) ont alors été développées par Emin et Creighton (1985)²⁷ pour remédier à ce problème.



a) *Aimant supra conducteur permettant la réalisation d'imagerie par résonance magnétique nucléaire.* b) *Echantillon confiné dans une cellule d'essai.* c) *Image 2D d'une bentonite, portée à deux teneurs en eau différentes, obtenue par la méthode de Single Point Imaging.*

Au cours du projet GNR FORPRO, réalisé en collaboration avec Dominique Proust et Claude Fontaine du laboratoire HydrASA (devenu depuis l'institut Ic₂mp) de Poitiers, nous avons étudié l'argilite constitutive des galeries de stockage de déchets nucléaires à Bure (Projet Cigéo) [rapport RS3, Figure I. 14]. Un protocole a été mis au point grâce à l'appui scientifique de Didier Stemplenn et Sébastien Leclerc (équipe transversale IRM du LEMTA) afin d'appliquer la méthode SPI à des

²⁴ Simpson A.J., McNally D.J., Simpson M.J. (2011). Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spect. 58 : 97–175.

²⁵ Prebble R.E., Currie J.A. (1970). Soil Sci. 21: 273–288.

²⁶ Amin M. H. G., Chorley R. J., Richards K. S., et al. (1997). Hydrological processes 11 : 471-483.

²⁷ Emid S., Creighton J.H.N. (1985), High resolution NMR imaging in solids, Physica B, 128, 81-83

éprouvettes d'argilite. Tout d'abord, un étalonnage expérimental fut nécessaire afin de relier un paramètre intrinsèque à l'argilite (le temps de relaxation T2) à la teneur en eau de l'argilite. La courbe d'étalonnage obtenue (Figure I. 15b) permet d'interpréter l'approche qualitative de mobilité de l'eau en une réelle quantification de la teneur en eau (Figure I. 15a). Ainsi, pour une éprouvette d'argilite soumise à un séchage à 20°C pendant une semaine, la cinétique de séchage varie entre 1,1 et 0,6 point de teneur en eau par jour pour des distances à la surface de séchage de 0,2 et 3,3 cm respectivement. L'utilisation de cette méthode non destructive permet de déterminer la part d'eau présente en chaque point de l'échantillon et d'appréhender la dynamique des transferts d'eau et d'humidité dans les sols soumis à des sollicitations thermiques.

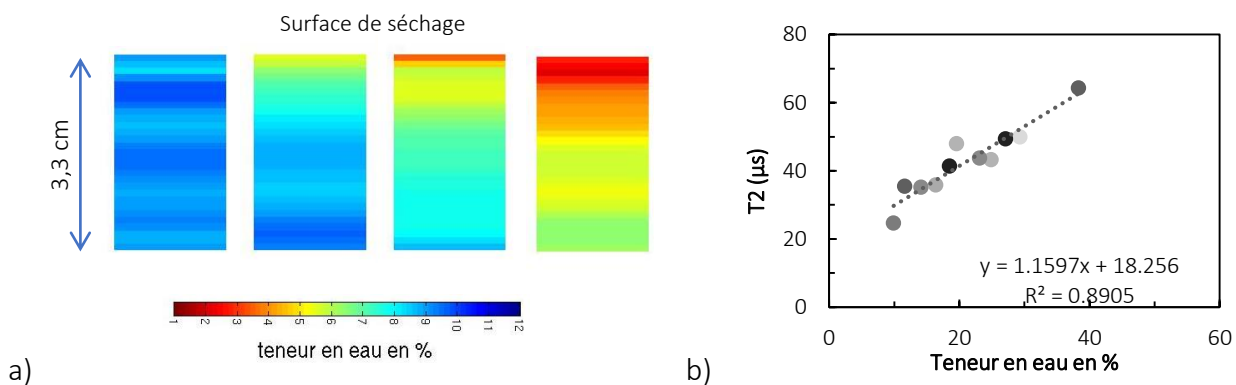


Figure I. 15 : a) Evolution de la teneur en eau au sein d'une éprouvette d'argilite au cours de l'application d'une hygrométrie de 33% pendant 143h selon l'application de b) la courbe de calibration.

A l'échelle d'un ouvrage, la mobilité de l'eau dans un sol non saturé peut être prise en compte dans les modèles en incluant les paramètres de la courbe de conductivité hydraulique non saturée. La méthode classique de détermination de cette courbe repose généralement sur la constitution d'une colonne de sol homogène, proche de la saturation soumise à l'évaporation au sommet de la colonne verticale (les côtés étant hermétiquement clos) (Wind, 1968)²⁸. A intervalle de temps régulier, les masses de la colonne et de chaque élément sont mesurées dans le but de connaître l'évolution de la teneur en eau du matériau. De plus, une mesure de succion du matériau est effectuée à différentes profondeurs via l'insertion de papiers filtre au sein de la colonne de sol. Le gradient de potentiel dans la colonne de matériau est ainsi obtenu. La conductivité hydraulique non saturée peut alors être calculée en utilisant les profils transitoires de la teneur en eau et de la pression d'eau interstitielle en conjonction avec la loi de Darcy (Equation 4).

$$k(\Psi) = \frac{v}{\left(\frac{d\Psi}{dh} - 1\right)} \quad \text{Équation 2}$$

Avec v le flux d'évaporation mesuré ($m.s^{-1}$), k le coefficient de conductivité hydraulique non saturé ($m.s^{-1}$) et Ψ le potentiel matriciel exprimé en hauteur d'eau (m).

Cette méthode offre de bons résultats sur des sols naturels ou compactés mais suppose sa préparation en une multitude d'éprouvettes superposées. De plus, elle nécessite de nombreuses manipulations, parfois délicates dans le cas d'un matériau pulvérulent ou qui se rétracte. Pour pallier à ce problème, nous avons développé une méthode pour définir ces courbes grâce aux résultats obtenus en IRM. En effet, à partir de la répartition des teneurs en eau au sein de l'éprouvette fourni par l'IRM, il est possible de définir la pression d'eau interstitielle régnant en chaque point grâce à une courbe de rétention d'eau préétablie. Ces profils, acquis à différents pas

²⁸ WIND G.P., 1968. Proc. of the Wageningen Symp., ed. Rijtema&Wassink, V1:181-191.

de temps, permettent d'utiliser la méthode des profils instantanés (Wind, 1968)¹⁴. Les détails de cette méthode sont décrits dans l'article [CI 9]²⁹.

Dans le cadre du master de Hugo Troupel, la méthode classique et la méthode avec l'utilisation de l'IRM ont été appliquées sur de l'argilite. Les courbes obtenues sont cohérentes l'une avec l'autre même si les suctions appliquées dans le cadre de la campagne d'essais à l'IRM (flux d'air pulsé) étaient nettement supérieures à celle obtenues sous flux d'air naturel (Figure I. 16). L'intérêt de cette méthode repose également sur le temps d'acquisition des données qui est de plusieurs semaines pour la méthode classique et de seulement quelques heures pour les essais en IRM.

Cette méthodologie IRM permet, à l'échelle micrométrique, de suivre les mouvements d'eau au sein d'éprouvettes de sol non saturées naturelles ou compactées. La poursuite de ces essais pourrait permettre de quantifier les vitesses et les quantités d'eau mobilisées au cours des cycles de chauffage/refroidissement successifs.

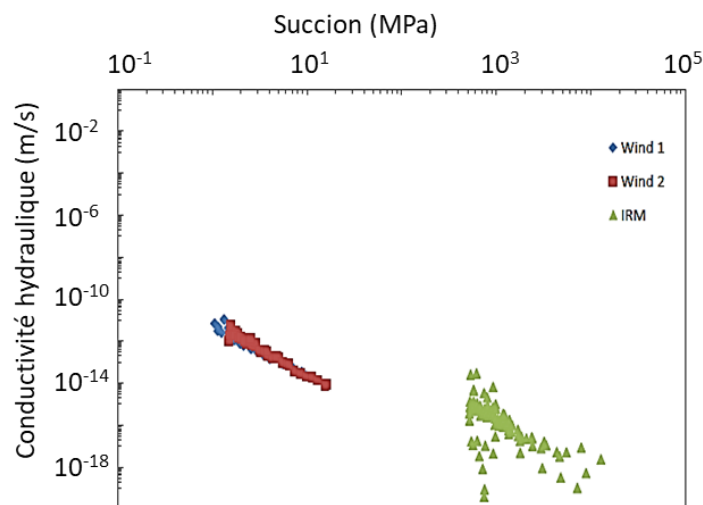


Figure I. 16: Conductivité hydraulique non saturée en fonction de la succion pour l'argilite de Bure [M2].

Dans les parties III.1.3.1. à III.1.3.3. les matériaux sont soumis à des variations de température dans un cadre naturel (III.1.3.1 et III.1.3.2.) ou lors du stockage de déchets nucléaires (III.1.3.3.). Ces variations entraînent des migrations d'eau quantifiables de façon globale à l'aide de méthodes pondérales classiques. Pour suivre plus précisément les mouvements d'eau au sein des matériaux, des méthodes s'appuyant sur la technologie IRM ont été appliquées. Ces études permettent de caractériser des matériaux soumis à des variations cycliques de la température afin par exemple de maintenir à long terme les propriétés hydriques des matériaux.

III.1.3.4. Présentation synthétique de la partie IV dédiée aux géostructures énergétiques

L'étude du comportement thermo-hydrromécanique des sols permet de caractériser les comportements des sols sous sollicitation thermique cyclique afin d'aider au développement vertueux de systèmes susceptibles de limiter l'empreinte carbone de nos sociétés et d'anticiper les comportements futurs des sols soumis à des sollicitations nouvelles. Dans cet esprit, le concept de

²⁹ [CI 9] Rosin-Paumier S et al. Unsaturated Soils: Research & Applications Vol.2. Khalili, Russell et al. (eds) CRC Press, 2014, 1155-1162p.

géostructures énergétique, cherchant à valoriser d'un point de vue énergétique des structures construites par l'homme, est particulièrement intéressant. Cependant, les sollicitations thermiques imposées questionnent sur l'évolution des propriétés mécaniques et hydriques des matériaux en contact avec ces structures. La durabilité et la sécurité à long terme des géostructures énergétiques ne peuvent être évaluées qu'à condition d'une bonne compréhension des phénomènes thermo-hydromécaniques couplés en œuvre dans les sols.

Les travaux de recherche réalisés sur ce thème sont détaillés en volume II. Après une revue bibliographique sur le comportement thermo-hydromécanique des sols, un travail de fond est présenté sur la base d'essais couplés THM réalisés en laboratoire sur des éprouvettes de sol compacté et saturé dans le cadre de la thèse de Mojdeh Lahoori.

Nos travaux de recherches se sont orientés autour de deux grands types de géostructures énergétiques : les pieux énergétiques et les remblais de stockage de chaleur. Pour ce qui concerne les fondations thermoactives, les sondes géothermiques sont insérées dans les pieux de fondation [RI12]³⁰. Nos travaux ont permis d'évaluer l'impact des variations cycliques de la température sur les propriétés des sols avoisinants afin d'en évaluer les conséquences sur les fonctions de portances de ces structures. Cette problématique a été étudiée dans le cadre du projet ANR GECKO (GEOstructures, Couplage solaire hybride et stockAge d'énergie Optimisé : Solution pour bâtiments à énergie positive – 2012-2015). Ce projet, rédigé suite à de nombreuses discussions avec Jean-Baptiste Bernard (société Ecome), le porteur du projet, fut l'occasion de travailler en collaboration avec de nombreuses équipes de recherche : l'IFSTTAR (devenu Université Gustave Eiffel en 2020), le CEREMA, l'Université de Lille. La responsabilité de la tâche II « sol et interface sol/pieux » m'a été confiée. Dans ce cadre, de nombreux essais de laboratoires ont été réalisés à différentes échelles d'investigation lors de la thèse de Hossein Eslami (2011-2014) [RI10 et RI11]³¹. Les résultats de ces essais ont ensuite été utilisés par Wahib Araïro (Post doctorat) pour calibrer une loi constitutive bilinéaire dans un cadre thermo-mécanique et modéliser des cas tests. Ces résultats ont été inclus dans la tâche VI « Modélisation des fondations énergétiques et de leurs interactions avec les structures portées » co-écrite avec Hussein Mroueh, responsable de cette tâche (LGCgE, Université de Lille). Nous avons également réalisé des essais sur un site test mis en place par Julien Habert (Cerema), Sébastien Burlon et Fabien Szymkiewicz (LCPC) et équipé en fibre optique par Charles Maragna et Xavier Rachez (BRGM). Les résultats ont été inclus dans la tâche III « Analyse in situ des effets de la température sur le comportement mécanique des sols et des structures » [CI17]³².

Le second exemple de géostructure énergétique qui sera développé en volume II concerne le développement de solutions de stockage d'énergie sous forme de chaleur dans des remblais ou des massifs de sol compacté. Ahmed Boukelia, que j'ai co-encadré, a réalisé un doctorat sur ce thème (2013-2016), dans le cadre d'un programme de recherche soutenu par Bouygues TP et la région Lorraine. Les nombreux échanges avec Tangi Leborgne (Bouygues TP) ont permis de choisir des dimensions plausibles pour ce stockage et de travailler sur un matériau prélevé sur chantier en quantité suffisante pour l'ensemble des expérimentations réalisées à différentes échelles d'investigation. Ce travail a montré la faisabilité du système et a abouti à l'identification d'un état de compactage optimal pour le stockage inter-saisonnier sous forme de chaleur sensible [RI13]³³. Par la suite, Mojdeh Lahoori (thèse 2018-2021) a complété cette étude en développant un outil de suivi in situ des propriétés thermiques d'un sol compacté au cours de son master puis de son

³⁰ [RI 12] Vieira, J. et al. *Energies*, MDPI, 2017, 10 (12)

³¹ [RI 11] Eslami H. et al. *Acta Geotechnica*, Springer Verlag, 2017, 12 (5), pp.1105-1118.

[RI 10] Eslami H. et al. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2013, 19 (5), pp.628 - 648.

³² [CI 17] Rosin-Paumier S et al. *EGU2020: Sharing Geoscience Online*, 4-8 mai 2020

³³ [RI 13] Boukelia A et al. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 2019, vol 23-9, pp. 1125-1138

doctorat que j'ai co-encadré [RI14, annexe 3]³⁴. Dans ce cadre, une étude numérique réalisée en collaboration avec Hossein Nowamooz et Fujiao Tang (INSA de Strasbourg) a permis d'évaluer l'efficacité thermique du système [RI17]³⁵. Enfin, la faisabilité de l'usage de géosynthétiques pour limiter les pertes de chaleur au cours des intersaisons a été étudiée en collaboration avec Guillaume Stoltz de l'INRAE d'Aix en Provence [RI15, annexe 5]³⁶.

Pour investiguer les propriétés des sols et leurs évolutions sous l'effet de sollicitations thermo-hydromécaniques, les équipements de la plateforme expérimentale de Mécanique des Sols du LEMTA permettent d'imposer différents chemins mécaniques, hydriques et thermiques dans différentes conditions physico-chimiques. Les appareillages utilisés peuvent être des outils manufacturés où des prototypes développés pour répondre aux problématiques scientifiques à différentes échelles d'investigation depuis l'échelle microscopique jusqu'à l'échelle métrique. Des fiches synthétiques des principales méthodes utilisées pour réaliser ces travaux de recherche sont présentées en annexe de ce document.

L'ensemble de ces travaux de recherches est développé en détails dans le volume II de ce document.

III.2. Listes des masters encadrés et des thèses et post-doctorats codirigés

Cette partie liste les encadrements scientifiques de niveaux master à post-doctorat que l'on m'a confié depuis mon recrutement à l'Université de Lorraine au sein de l'équipe de Mécanique des Sols dirigée par Farimah Masrouri.

Thèses co-encadrées avec ACT :

[T3] Mojdeh Lahoori a bénéficié d'une bourse ministérielle d'octobre 2017 à décembre 2020 pour réaliser sa thèse sous l'encadrement de Farimah Masrouri et mon co-encadrement (ACT 50%). La thèse intitulée "Thermo-hydrromechanical behavior of an embankment to store thermal energy" porte sur le développement du stockage de chaleur dans des géostructures énergétiques telles que des remblais. L'objectif était d'évaluer les performances thermiques et mécaniques d'un sol compacté lorsqu'il est soumis à des variations de température monotones et cycliques afin de garantir sa durabilité. Après une revue bibliographique détaillée, de nombreux essais thermo-hydromécaniques couplés ont été réalisés sur la plateforme d'essais. Ces travaux ont été financés par le budget propre de l'équipe Mécanique des Sols. Ils ont été l'occasion de nombreuses collaborations scientifiques au sein du LEMTA avec Yves Jannot mais aussi à l'échelle nationale avec Guillaume Stoltz (INRAE), Fujiao Tang et Hossein Nowamooz (INSA de Strasbourg). La thèse a été soutenue le 17 décembre 2020.

Publications associées : [RI14, 16 et 17; CI18 et 19]

[T2] Ahmed Boukelia a été recruté par l'École supérieure d'ingénieurs des travaux de la construction (ESITC) de Metz et la région Lorraine d'octobre 2013 à octobre 2016 pour réaliser sa thèse sous l'encadrement de Farimah MASROURI et mon co-encadrement (ACT 50%). La thèse est intitulée « Modélisation physique et numérique des géo-structures énergétiques ». L'objectif était d'étudier

³⁴ [RI 14] Lahoori M et al. Applied Thermal Engineering 2020, vol. 167, pp. 114795.

³⁵ [RI 17] Tang F et al. Renewable Energy 172 (2021) 740-752

³⁶ [RI 15] Lahoori M et al. Geosynthetics International 2021, 28/2, 186-194.

la faisabilité thermique et mécanique d'un stockage de chaleur dans un remblai. L'entreprise DTP Terrassement (Bouygues TP), finança l'accompagnement de la thèse (équipement et missions). Ces travaux ont été réalisés en étroite collaboration avec cette entreprise représentée par Tangi Leborgne. Le matériau limoneux a été préparé, caractérisé puis soumis à des sollicitations thermo-hydromécaniques en laboratoire. Les résultats expérimentaux ont été utilisés dans une modélisation couplée thermo-hydraulique couplée. La thèse a été soutenue le 12 décembre 2016.
Publications associées : [RI13 et 14 ; O5 ; CI15 et 16 ; CN14 à 17]

[T1] Hossein Eslami a été recruté par l'École Supérieure d'Ingénieurs des Travaux de la Construction de Metz d'octobre 2011 à octobre 2014 pour réaliser sa thèse sous l'encadrement de Farimah Masrouri et mon co-encadrement (ACT 50%). La thèse intitulée « Comportement Thermo-hydromécanique des sols au voisinage des géo-structures énergétiques » avait pour objectif d'améliorer la compréhension et la quantification de l'impact de la variation de la température sur la capacité portante des pieux géothermiques, en particulier dans les matériaux argileux. Pour cela, des méthodes expérimentales ont été développées afin de permettre la réalisation d'essais pénétrométriques et pressiométriques. Le financement des appareillages et des missions en lien avec ce travail a été pris en charge dans le cadre du projet ANR GECKO. Ce projet fut l'objet de nombreux échanges avec les partenaires du projet. La thèse a été soutenue le 28 novembre 2014.
Publications associées : [RI10, 11 et 13 ; O4 ; RN3 et 4 ; CI10 à 17 ; CN8 à 13]

Participation à des thèses :

Jaime GRANADOS réalise actuellement sa thèse intitulée « An experimental study of desiccation in different soil types » sous la direction de Bernardo Caicedo, professeur à l'Universidad de los Andes, Bogota, Colombie. Son travail est focalisé sur les phénomènes de dessiccation à l'interface sol-atmosphère. Jaime a réalisé à ce sujet une campagne d'essais dans notre laboratoire lors d'une mobilité internationale financée par le projet européen GEORES.

Romain Auvray a bénéficié d'une bourse ministérielle d'octobre 2010 à octobre 2013 pour réaliser sa thèse sous l'encadrement de Farimah Masrouri. L'objectif de la thèse était d'étudier la fissuration due à la dessiccation des sols gonflants. Ma participation à cette thématique a consisté à développer avec le doctorant un protocole de quantification de cette fissuration par analyse d'image [RI9, CI8].

Post-doctorant co-encadré :

[PD1] Wahib Arai a réalisé son post-doctorat dans notre équipe de mai 2013 à juillet 2014. Son travail intitulé « Simulation des essais pressiométriques avec prise en compte de l'effet de la température dans le cadre de l'étude des pieux énergétiques » s'inscrit dans le cadre du projet ANR GECKO qui a financé ce travail [CI11].

Master 2 encadrés ou co-encadrés :

Asli Boz a réalisé un séjour académique dans le cadre du programme ERASMUS+ mobilité intra-européenne de mai à juillet 2017. Son travail intitulé "Impact of leaching by sea-water on transfer properties of stabilised sediments" comporte une importante partie bibliographique et la mise au point d'essais expérimentaux qui ouvrent la voie à de futures investigations sur les sédiments de dragages. Ces travaux furent l'occasion de nombreux échanges avec Alper Sezer, professeur associé à l'Ege University, Izmir, Turquie.

Mojdeh Lahoori a réalisé son stage de master dans notre équipe de mars à juillet 2017. Son travail intitulé « Utilisation de géosynthétiques en couverture de remblais de stockage de chaleur » fut l'objet de plusieurs publications [RI15, CN18] coécrites avec Yves Jannot, ingénieur de recherche au LEMTA et Guillaume Stoltz, ingénieur de recherche à l'INRAE.

Zineddine Amira et **Aghiles Mebarez** ont réalisé leur stage de master dans notre équipe de novembre à février 2016. Leur travail intitulé « Fissuration des sols fins argileux. » a permis de réaliser des essais de fissuration à différentes échelles d'investigation afin de mieux appréhender l'initiation de la fissuration.

Hugo Troupel a réalisé son stage de master dans notre équipe de février à juin 2014. Son travail intitulé « Evolution de la conductivité hydraulique d'une argilite non saturée sous sollicitation thermique » (février – juin 2014) a été réalisé dans la cadre du projet GNR-FORPRO [CN12]. Il a bénéficié de l'appui technique de Sébastien Leclerc, ingénieur de recherche au LEMTA. Ses résultats ont permis de progresser sur l'utilisation de l'IRM pour la caractérisation des transferts en milieu non saturé.

Gaëlle Franchomme a réalisé son stage de master dans notre équipe de mai à septembre 2011. Son travail intitulé « Fondations géothermiques : apport de la pénétrométrie à l'aiguille pour évaluer la sensibilité des paramètres d'un sol aux variations de température » a permis, en plus d'un important travail bibliographique, de développer la méthodologie d'essai mini-pénétrométrique [02, CI7].

III.3. Activités de valorisation et de transfert : participation à des projets scientifiques

En tant que porteur ou co-porteur de projet :

Effet d'une contrainte thermique (20°C à 100°C) sur les propriétés hydromécaniques et minéralogiques des argiles et des argilites.

Projet GNR-FORPRO II, Action 2011-XVIII

Porteur : S. Rosin-Paumier, LAEGO

Partenaires : LEMTA, HydrASA

Date : 11/2011-11/2012

Budget : 21.5 k€

Des méthodes existent pour déterminer la teneur en eau d'échantillons de sol, mais elles ne sont pas adaptées pour observer une évolution temporelle et spatiale de la localisation de l'eau au sein d'échantillons complexes tels que les argiles. L'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) permet de suivre l'évolution spatiale de différents paramètres du sol au sein d'un échantillon. Le projet GNR-Forpro (2011-12) dont j'ai assuré la responsabilité a permis de développer ces protocoles [RA 1]. Les courbes de conductivités hydrauliques non saturées obtenues [CN 1] permettent une meilleure prise en compte de l'évolution du front de séchage sous l'effet de sollicitations thermo-hydriques. Au sein de ce projet, j'ai activement participé à l'acquisition des données et assuré l'intégralité de son suivi depuis le montage scientifique jusqu'à la rédaction du rapport final.

Publications associées : [RS 3, CI 9, CN 9, O3]

BOUYGUES – TP : Contractualisation 2013-2016

Porteurs : F. Masrouri, S. Rosin-Paumier, LEMTA

Dates : 01/10/2013-30/09/2016

Budget : 45k€

Les travaux réalisés avec l'entreprise Bouygues TP ont pour objet de concevoir des solutions innovantes pour stocker les excédents d'énergie dans les ouvrages du Génie Civil tels que les remblais. Ces innovations passent par le développement de méthodes expérimentales à l'échelle du laboratoire pour apprécier la faisabilité du projet, quantifier son efficacité et évaluer sa durabilité. Les échanges scientifiques entretenus au cours de ce projet avec T. Leborgne ont permis de donner un cadre réaliste aux données utilisées dans le cadre du doctorat de A. Boukelia [T 3]. Les étapes successives du projet ont consisté à optimiser l'état de compactage du sol pour un stockage de chaleur, évaluer son efficacité thermique et en simuler l'évolution à long terme. Publications associées : [RS 7], [RI 13, CI 15-16, CN 12-15, O 5]

Projet NEEDS – SolliScel, Effet de sollicitations thermo-hydriques sur la mobilité de l'eau au sein des matériaux de scellement des galeries de stockage.

Porteur : S. Rosin-Paumier, LEMTA

Dates : 01/02/2022-30/06/2023

Budget : 18,5k€

Les matériaux argileux envisagés pour participer au scellement des galeries de stockage seront soumis à des sollicitations thermo-hydrromécaniques couplées susceptibles de perturber leurs propriétés de transfert. En effet, la migration de l'eau au sein de matériaux compactés dépend de l'existence d'un gradient de température ou de charge hydraulique au sein du massif, ces transferts seront complexes dans le cas d'une galerie. Leur évaluation au sein des matériaux compactés non saturés peut être appréhendée en laboratoire par la courbe de conductivité hydraulique non saturée. Cependant, les méthodes classiques sont longues et complexes, particulièrement pour les matériaux gonflants. Ce projet se propose de développer une méthode en laboratoire permettant de déterminer cette courbe pour différents états de compactage en utilisant une méthode de mesure innovante et non intrusive : l'imagerie par résonance magnétique (IRM). La mise en place d'un banc d'hydratation permettra la réalisation d'essais pour différents états de compacité et différents teneurs en argile afin de prendre en compte l'hétérogénéité potentielle du massif. L'adaptation de la méthodologie permettra à terme de mesurer l'effet de l'application de sollicitations thermo-hydriques couplées sur les propriétés de transferts des massifs argileux compactés.

En tant que responsable de module :

GECKO : GEostructures, Couplage solaire hybride et stockAge Optimisé : Solution pour bâtiments à énergie positive.

Projet ANR 2011-2014 du programme Systèmes Energétiques Efficaces et Décarbonés (SEED)

Porteur : JB Bernard, ECOME

Partenaires : IFSTTAR, LEMTA, EPFL, LGCGE, BRGM

Dates : 01/11/2011-01/11/2014

Budget : 806k€

L'objectif du projet GECKO était de lever les verrous freinant le développement des pieux énergétiques en France en précisant le comportement et les conditions de mise en œuvre de ces systèmes tout en ouvrant la possibilité du couplage de ces systèmes avec des panneaux solaires hybrides. Deux axes de travail ont ainsi été définis : 1) le comportement des sols et de l'interface sol/pieux sous sollicitation thermique ; 2) optimisation technique et économique par couplage solaire hybride. Au sein de ce programme, j'ai assuré la responsabilité du module II qui visait à quantifier, à l'aide d'essais expérimentaux en laboratoire, la portance du sol sollicité

thermiquement par des pieux géothermiques. Dans ce contexte, nous avons développé des méthodologies adaptées à la thématique et acquis des résultats qui permettent d'améliorer la compréhension de l'impact des sollicitations thermiques sur les propriétés mécaniques des sols. En particulier, un montage expérimental de grande capacité, permettant la réalisation d'essai mini-pressiométriques en laboratoire sur des massifs homogènes thermorégulés, a été réalisé dans le cadre de la thèse de H. Eslami [T1]. Les résultats expérimentaux ont également fait l'objet de modélisations dans le cadre du post-doctorat de W. Arai [PD 1].

Publications associées : [RS 4, 6, RI 11-10, CI 10-14,17, CN 11, RN 3-4, O4]

En tant que participant :

PROJET LIXAR2 - Indicateurs de performance pour les géosynthétiques bentonitiques.

Programme ECOTEchnologies et Développement Durable, ANR-ADEME

Porteur : D. Guyonnet, BRGM

Partenaires : ADEME, INSA Lyon, Cemagref (INRAE)

Date : 2005-2008

Le projet LIXAR 1 (Interaction lixiviats-argiles), avait permis d'énoncer des précautions d'utilisation des géosynthétiques bentonitiques (GSB) en étanchéité de fond de site de stockage de déchets afin de mieux protéger le milieu. A ce titre des essais oedoperméamétriques de longue durée furent réalisés. Cependant, les Maîtres d'Ouvrage, Maîtres d'Œuvre et Bureaux d'Etude ont besoin d'outils de caractérisation opérationnels de courte durée, leur permettant de contrôler les produits afin notamment de vérifier la conformité entre les performances affichées par le fournisseur, et celles du produit livré/posé. L'objectif du programme LIXAR 2 était de vérifier l'adéquation d'un produit identifié pour remplir la fonction étanchéité en fond de casier à partir d'essais de caractérisation relativement rapides et peu coûteux, dont la corrélation avec les essais plus longs aura été établie. Dans ce cadre, à la fin de ma thèse et au début de mon post-doctorat au Cemagref, devenue depuis INRAE, j'ai réalisé une campagne expérimentale comprenant des essais rhéologiques et des essais au filtre-pressé que nous avons comparés aux résultats d'essais oedoperméamétriques de longue durée.

Publications associées : [RS 1, RI 4, CI 4, CN 5]

PROJET PRECODD Bioréacteurs

Programme ECOTEchnologies et Développement Durable, ANR-ADEME

Porteur : R. Moretto, EEDEMS

Partenaires : LIRIGM/LTHE, Cemagref (INRAE), INSA Lyon, BRGM, VEOLIA Propreté, Suez Environnement

Date : 30/11/2006 – 30/05/2009

La maîtrise des conditions optimales de l'activité biologique dans un massif de déchets en mode bioréacteur se heurte à plusieurs difficultés liées d'une part, à la gestion du flux de lixiviats au travers des déchets, et d'autre part, aux caractéristiques des lixiviats et des déchets. Dans ce cadre, un axe de recherche du projet Precodd Bioréacteur concerne la quantification de l'influence de la composition du lixiviat sur les transferts dans les matériaux d'étanchéité.

Pour répondre à cette problématique, à l'INRAE, au cours de mon post-doctorat, j'ai participé au développement et utilisé différents protocoles expérimentaux pour mesurer l'évolution des transferts advectifs lorsque la bentonite est en contact avec des lixiviats naturels ou artificiels. La

problématique des transferts par diffusion de composés organiques volatils (COV) aux travers des organes d'étanchéité a également été traitée. Ces méthodes ont permis d'identifier les fluides les plus agressifs et de quantifier la diffusion du dichlorométhane, du dichloroéthylène et du trichloroéthylène au travers de deux géosynthétiques bentonitiques (GSB) et d'une géomembrane. Publications associées : [RS 2 RI 5-8, CI 15-16, CN6-7, RN 2]

GeoStab : Solidification and stabilisation for sustainable management of problematic soils.

Projet ANR : Innovation technologique pour analyser, remédier ou réduire les risques environnementaux (DS0102)

Porteur: O. Cuisinier, LEMTA

Partenaires: Menard, Groupe Ginger-CEBTP, University of Exeter (UK), Simpleware (UK), Exeter Environmental Consulting Services (UK), Luleå University of Technology (Sweden), Ramböll (Sweden), University of Cassino and Southern Lazio (IT), Technital s.p.a.(IT)

Dates : 01/09/2014-30/08/2015

Budget : 47k€

La création de ce réseau de recherche regroupant des partenaires publics et privés s'est concrétisée grâce au soutien de l'ANR. L'objectif était de développer des solutions pour une meilleure utilisation des matières premières dans la réhabilitation de zones problématiques d'un point de vue géo-environnemental et/ou géotechnique. Les travaux ont abouti à la soumission de plusieurs projets afin de favoriser la protection et la gestion durable des ressources naturelles pour la construction. Par exemple, l'élaboration du projet Européen ITN (Innovative Training Networks) intitulé « Upgrading geomaterials : from waste to ressource » (UPGRADE), porté par O. Cuisinier, fut l'occasion de renforcer les liens avec les partenaires.

En ce qui me concerne, j'ai pu travailler en collaboration avec A. Sezer, professeur à l'université de Ege (Turquie). Nous avons à cette occasion, co-encadré une étudiante de Master en 2017 (A. BOZ) sur le thème de la durabilité des sédiments réutilisés en remblais.

GABI : European network for shallow geothermal energy applications in buildings and infrastructures

COST Action TU1405

Porteur : S. Burlon, IFSTTAR

Dates : 2015 - 2019

L'accroissement de la demande de sources d'énergie renouvelables a conduit à l'expansion des applications géothermiques à faible profondeur pour le chauffage et/ou le refroidissement des bâtiments. L'intégration d'échangeurs de chaleur dans les éléments de la structure qui sont en interface avec le sol, tels que les fondations, les tunnels et les parois moulées, est particulièrement intéressante en raison de la réduction des coûts inhérente à la combinaison d'un composant structurel requis avec la récolte de l'énergie géothermique. Les géostructures thermoactives présentent l'avantage supplémentaire de s'appuyer sur des ressources locales (le sol) et ne nécessitent donc pas d'investissements supplémentaires dans les infrastructures. En offrant une alternative aux combustibles fossiles et en réduisant les pics de demande du réseau, elles constituent également un outil intéressant pour l'indépendance énergétique et la production décentralisée, sans impact négatif sur l'environnement. Cependant, l'application à grande échelle de cette technologie durable est actuellement entravée par la grande hétérogénéité du développement d'un cadre réglementaire dans les pays européens. Ce projet a permis aux participants de partager leurs connaissances et leurs expériences au cours de séminaires de travail réguliers. Il a abouti à la rédaction d'états de l'art afin de définir des règles de bonnes pratiques

européennes pour les applications géothermiques, de promouvoir la sensibilisation et la confiance du public dans ces techniques, et de favoriser l'avancement des connaissances.

J'ai participé à la rédaction d'un article d'état de l'art concernant la caractérisation thermique des matériaux, publié dans la revue Energies [RI 12].

Publications associées : [RS 5, RI 12]

FAVL II : Détermination des propriétés hydromécaniques des argiles tégulines remaniées et des marnes de Brienne.

Projet ANDRA – Université de Lorraine

Porteur : F. Masroui et O. Cuisinier, LEMTA

Dates : 2015 - 2018

Budget : 201k€

Le projet FAVL II visait à apprécier le comportement thermo-hydromécanique à très long terme de la couverture des ouvrages qui seraient réalisés dans le cadre de la conception d'un stockage en surface de déchets nucléaires de faible activité à vie longue (FAVL). En effet, les différentes sollicitations climatiques sont susceptibles de faire évoluer les caractéristiques initiales de mise en place, et ainsi altérer progressivement le bon fonctionnement du stockage. Dans le cadre de ce projet, j'ai mené une campagne expérimentale d'essais en laboratoire qui ont permis de quantifier les conséquences de ces sollicitations sur les propriétés hydromécaniques des matériaux, notamment les caractéristiques de transfert.

Publication associée : [RS 8]

Geomaterials: from Waste to Resource GEORES

Program H2020-EU.1.3.3. - Stimulating innovation by means of cross-fertilisation of knowledge ITN

Porteur : A. Javadi, University of Exeter

Partenaires : Horizon Consulting Engineers Limited, Synopsys (Royaume Unis), Université de Lorraine, Ginger CEBTP (France), Università Degli Studi di Cassino (Italie), Lulea Tekniska Universitet, Ramboll Sverige AB, EcoLoop AB (Suède), Gronlands Naturinstitut (Groenland), Stiftelsen Norges Geotekniske Institutt (Norvège)

Dates : 01/03/2018 à 28/02/2022

Budget total : 963 k€, part UL : 274 k€

GeoRes vise à développer des solutions innovantes pour la réutilisation des géomatériaux, jusqu'ici considérés comme des déchets, par les industriels de la construction et de l'exploitation minière en Europe. Ces types de géomatériaux représentent la moitié du volume des déchets produits dans l'UE-27, ils présentent généralement des caractéristiques techniques médiocres qui freinent leur réutilisation directe sur les sites de construction et d'exploitation minière. Cependant, s'ils sont traités de manière adéquate, ils pourraient représenter une excellente ressource pour la construction, avec des économies d'argent significatives et une réduction de l'empreinte environnementale, contribuant ainsi à l'établissement d'une économie circulaire.

Dans le cadre de ce projet, des collaborations scientifiques se sont créées notamment, avec Bernardo Caicedo, professeur à l'Université Uniandes de Bogota (Colombie) que nous avons accueilli en mobilité dans notre laboratoire ainsi que Jaime Granados, dans le cadre de son doctorat. De façon réciproque, j'ai réalisé une mobilité scientifique de 1 mois en leur laboratoire en avril 2022. Les résultats obtenus au cours de cette période sont en cours d'exploitation.

III.4. Activités collectives et Rayonnement scientifique

Au cours de ces années, j'ai pu m'investir dans la vie scientifique sous différentes formes. Ces parties résume mes participations aux actions de sociétés savantes, à la relecture d'articles dans des revues et à la participation à des actions de vulgarisation et de dissémination de la science.

Participations à des comités de sélection

2019	60-MCF-1191 Metz
2019	60-MCF-1194 IUT LEMTA
2016	60-MCF-0765 École des Mines - Géoresources, Nancy
2016	60-MCF-0879 LEMTA-IUT

Actions de vulgarisation et de dissémination de la recherche

20 avril 2016	Présentation sur le thème des géostructures énergétiques au cours de la « Conférence des jeunes chercheurs » Université Populaire et Participative de Vandoeuvre (UP2V)
26 sept 2014	Animation d'un stand scientifique lors de la nuit des chercheurs (Metz)
19 avril 2013	Présentation sur le thème des Géostructures énergétiques au cours du challenge ECO-TECHNO (Nancy)

Conférences et séminaires invités

22 mars 2016	Temperature effect on the mechanical parameters of the soils. Séminaire invité, Zetas, Istanbul, Turquie
21 mai 2014	Effet de sollicitations thermiques sur les propriétés hydromécaniques des sols. Présentation dans le cadre des journées scientifiques et techniques du CFMS, Paris.
21-22 nov 2013	Couplages chimio-hydromécaniques dans les argiles en milieu fortement alcalin. Conférence invitée lors des Journées annuelles NEEDS - Milieux Poreux organisées par l'ANDRA, Paris.
12 mars 2013	Développement d'essais expérimentaux dédiés à l'étude des géostructures énergétiques. Séminaire invité, Université de Lausanne, Suisse.

Participation à des jurys de thèse

2020	Examinatrice de la thèse de S. Guihéneuf intitulée « Formulation et renforts de blocs en matériau terre pour une utilisation. » soutenue le 3 décembre 2020.
2016	Examinatrice de la thèse de B. Basmaji intitulée « Développement d'un modèle analytique d'interaction sol/structure pour l'étude du comportement mécanique des structures soumises à un mouvement de terrain. » soutenue le 15 décembre 2016.
2020	Co-directrice de la thèse de M. Lahoori intitulée « Comportement Thermo-Hydro-Mécanique (THM) des remblais de stockage énergétiques. » soutenue le 17 décembre 2020.
2016	Co-directrice de la thèse de A. Boukelia intitulée « Modélisation physique et numérique des géo-structures énergétiques. » soutenue le 12 décembre 2016.
2014	Co-directrice de la thèse de H. Eslami intitulée « Comportement Thermo-hydromécanique des sols au voisinage des géo-structures énergétiques. » soutenue le 28 novembre 2014.

Implication dans des associations et sociétés savantes

- 2013- auj. : Membre du Comité Français de Mécanique des Sols (CFMS)
- Membre du comité d'organisation des Journées Nationales Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur (JNGG), Nancy, 6-8 juillet 2016 (<https://jngg2016.sciencesconf.org/>), participation à la relecture des articles ainsi qu'à diverses tâches.
- 2014- 2021: Membre élu au conseil d'administration de l'Association Universitaire du Génie Civil (AUGC) – 2 mandats : participation aux conseils d'administration et administratrice du site web (www.augc.asso.fr) pour lequel j'ai participé à l'élaboration du cahier des charges, à l'appel d'offre et au suivi du développement.
- 2014- 2019: Membre du réseau GABI (European network for shallow geothermal energy applications in buildings and infrastructures) reconnu comme "European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research" (COST Action TU1405) par l'Union Européenne.
- 2015- 2017: Membre du réseau ROSE (Recycling of Secondary raw materials for a sustainable optimization of construction processes in civil Engineering) reconnu comme "European Innovation Partnership" par l'Union Européenne.

Relecture d'articles

Pour des congrès nationaux :

Journées Nationales Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur (JNGG 2016),
Rencontres Universitaires du Génie Civil (RUGC 2015, RUGC 2016, RUGC 2017,
RUGC 2018)

Pour des revues internationales :

Energies : 4657639 (2020), 925524 (2020), 1079310 (2021)
Case Studies in Thermal Engineering: 00509 (2021)
Bulletin of Engineering Geology and the Environment: 00545 (2020), 00439 (2021),
00701 (2021)
Applied Sciences: 754574 (2020)
Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (ZUSA): 00257 (2019), 00274 (2019)
Nuclear Engineering and Design: 00362 (2012)
Geotextile & Geomembrane: GG2259 (2011) GG2901 (2015), GG 3330 (2018)
Applied Rheology: AR909014037 (2009)

III.5. Production scientifique

Cette partie rassemble l'ensemble des publications auquel j'ai été associée. Elles sont classées par type de publications et de communications. De nombreuses publications ont été réalisées dans le cadre des doctorats et post-doctorats dont j'étais chargée de la codirection, leurs noms sont soulignés ci-dessous.

Revues Internationales [RI n]

[RI 17] Tang F, M. Lahoori, H. Nowamooz, S. Rosin-Paumier, F. Masrouri, A numerical study into effects of soil compaction and heat storage on thermal performance of a horizontal ground heat exchanger. *Renewable Energy* 172 (2021) 740-752 <doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.025>

[RI 16] Lahoori M, S. Rosin-Paumier, F. Masrouri. Effect of monotonic and cyclic temperature variations on mechanical behavior of a compacted soil. *Engineering Geology* 2021, 290, 106195. <doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106195> **Annexe 1**

[RI 15] Lahoori M, S. Rosin-Paumier, G. Stoltz, Y. Jannot. Thermal conductivity of nonwoven needle-punched geotextiles: effect of stress and moisture. *Geosynthetics International* 2021, 28/2, 186-194. <doi.org/10.1680/jgein.20.00034> <hal-02960889> **Annexe 5**

[RI 14] Lahoori M, Y. Jannot, S. Rosin-Paumier, A. Boukelia, F. Masrouri, Measurement of the thermal properties of compacted soil by a transfer function estimation method. *Applied Thermal Engineering* 2020, vol. 167, pp. 114795. <doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114795> **Annexe 4**

[RI 13] Boukelia A, S. Rosin-Paumier, H. Eslami, F. Masrouri, Effect of temperature and initial state of fine grained soils on variation of thermal parameters. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 2019, vol 23-9, pp. 1125-1138. <doi.org/10.1080/19648189.2017.1344144> **Annexe 3**

[RI 12] Vieira, J. Maranha, P. Christodoulides, M. Alberdi-Pagola, F. Loveridge, F. Nguyen, G. Florides, G. Radioti, F. Cecinato, I. Prodan, E. Ramalho, A. Georgiev, S. Rosin-Paumier, S. Lenart, S.E. Poulsen, G. Radioti, S. Javed, G V Lysebetten and D. Salciarini. Characterisation of Ground Thermal and Thermo-Mechanical Behaviour for Shallow Geothermal Energy Applications. *Energies*, MDPI, 2017, 10 (12), < doi.org/10.3390/en10122044 > <hal-01717735>

[RI 11] Eslami H., S. Rosin-Paumier, A. Abdallah, F. Masrouri. Pressuremeter test parameters of a compacted illitic soil under thermal cycling. *Acta Geotechnica*, Springer Verlag, 2017, 12 (5), pp.1105-1118. <doi.org/10.1007/s11440-017-0552-2> <hal-01717739> **Annexe 2**

[RI 10] Eslami H., S. Rosin-Paumier, A. Abdallah, F. Masrouri. Impact of temperature variation on penetration test parameters in compacted soils. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Taylor & Francis, 2013, 19 (5), pp.628 - 648. < doi.org/10.1080/19648189.2014.960952 > <hal-01913247>

[RI 9] Auvray R., S. Rosin-Paumier, A. Abdallah, F. Masrouri. Quantification of soft soil cracking during suction cycles by image processing. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Taylor & Francis, 2013, 18 (1), pp.11 - 32. < doi.org/10.1080/19648189.2013.840250 > <hal-01913250>

[RI 8] Rosin-Paumier S., N. Touze-Foltz. Hydraulic and chemical evolution of GCLs during filter press and oedopermeametric tests performed with real leachate. *Geotextiles and Geomembranes*, Elsevier, 2012, 33, pp.15 - 24. < doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.02.002 > <hal-01913253>

[RI 7] Paumier S., N. Touze-Foltz, L. Mazeas, A. Guenne, Quantification of volatile organic compounds diffusion for virgin geosynthetic clay liners and for a GCL after contact with a synthetic leachate. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137, 1039-1046 < doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000525 >.

[RI 6] Rosin-Paumier S., N. Touze-Foltz, A. Pantet. Impact of a synthetic leachate on permittivity of GCLs measured by filter press and oedopermeameter tests. *Geotextiles and Geomembranes*, Elsevier, 2011, 29 (3), pp.211 - 221. < doi.org/10.1016/j.geotexmem.2010.11.001 > <hal-01717750>

[RI 5] Touze-Foltz N, Rosin-Paumier S, Mazeas L, Guenne A, Diffusion of volatile organic compounds through an HDPE geomembrane, Geotechnical Special Publication, 2011, 1121-1130. < doi.org/10.1061/41165(397)115>

[RI 4] Rosin-Paumier S, N. Touze-Foltz, A. Pantet, P. Monnet, G. Didier, et al.. Swell index, oedopermeametric, filter press and rheometric tests for identifying the qualification of bentonites used in GCLs. Geosynthetics International, Thomas Telford, 2010, 17 (1), pp.1 - 11. <doi.org/10.1680/gein.2010.17.1.1> {hal-01913471}

[RI 3] Paumier S, A. Pantet, P. Monnet, N. Touze Foltz. Evaluation of the viscoelastoplastic properties of a clay material using a flow curve, Applied rheology 19:2, 2009, 23824, 1-11. < doi.org/10.1515/arh-2009-0008>

[RI 2] Rosin-Paumier S, A. Pantet, P. Monnet. Rheological Behavior of Smectite Dispersions: The Influence of Suspension Concentration and Exchangeable Cation. Advances in Materials Science and Engineering, Hindawi Publishing Corporation, 2008, p.856714. < doi.org/10.1155/2008/856714> {hal-01717780}

[RI 1] Paumier S, A. Pantet, P. Monnet. Evaluation of the organization of the homoionic smectite layers (Na⁺ or Ca²⁺) in diluted dispersions using granulometry, microscopy and rheometry. Advances in Colloid and Interface Science, Elsevier, 2008, 141/1-2: 66 - 75. < doi.org/10.1016/j.cis.2008.04.001> {hal-01913474}

OUVRAGE [O n]

[O 1] Paumier S, Pantet A, Monnet P, Organisation et rhéologie des suspensions de smectites. Editions Universitaires Européenne, 2010, 252p.

REVUES NATIONALES [RN n]

[RN 4] Rosin-Paumier S, Eslami H, Abdallah A, Masrouri F. Evolution des paramètres pressiométriques d'un massif argileux non saturé soumis à des variations monotones et cycliques de la température. Revue Française de Géotechnique 167/4, <doi.org/10.1051/geotech/2021016, 2021>

[RN 3] Eslami H, Rosin-Paumier S, Abdallah A, Masrouri F, Influence de la variation de température dans les pieux énergétiques sur la capacité portante des sols. Annales du BTP n°6, 2013.

[RN 2] Pirrion T, Ouvry J-F, Touze-Foltz N, Croissant D, Rosin- Paumier S, Performance d'un géosynthétique bentonitique dans une couverture d'installation de stockage de déchets après six ans en service. Sciences Eaux & Territoires n°08, 2012.

[RN 1] Paumier S, Pantet A, Monnet P, Microstructuration de suspensions de smectite en fonction de la saturation (Ca ou Na), apport de la rhéologie. African Journal of Science and Technology (AJST), 2007.

CONGRÉS INTERNATIONAUX [CI n]

[CI 19] Lahoori M, Rosin-Paumier S, Jannot Y, Boukelia A, Masrouri F, Thermal energy storage in embankments: investigation of the thermal properties of an unsaturated compacted soil. 2nd International Conference on Energy Geotechnics 2020, E3S Web of Conference 205, 07011, 6p. < doi.org/10.1051/e3sconf/202020507011>

[CI 18] Lahoori M, Rosin-Paumier S, Masrouri F, Thermo-hydro-mechanical behavior of an embankment thermal storage. Japanese Geotechnical Society Special Publication 9/9, 429-4346p, 2021 < doi.org/10.3208/jgssp.v09.cpeg057>

- [CI 17] Rosin-Paumier S, Eslami H, Masrouri F, In situ investigation of the impact of cyclic thermal variations impact on the mechanical properties of sandy soil. EGU2020: Sharing Geoscience Online, 4-8 mai 2020 < doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-5622>
- [CI 16] Rosin-Paumier S, Boukelia A, Eslami H, Masrouri F, Effect of temperature cyclic variation on pressuremeter parameters of compacted soils. 19th International Conference on soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Coex, Seoul, Korea, 17-22 sept. 2017.
- [CI 15] Boukelia A, Eslami H, Rosin-Paumier S, Masrouri F, Impact of temperature variation on pressuremeter test parameters in compacted soils. 1st International Conference on Energy Geotechnics ICEGT, Kiel, Allemagne, 29-31 aout 2016, 7p. Article publié dans Energy Geotechnics Wuttke, Bauer & Sanchez (Eds). Taylor & Francis Group, London, 2016, 699-705p.
- [CI 14] Eslami H, Rosin-Paumier S, Abdallah A, Masrouri F Impact of temperature variations on hydro-mechanical parameters of a sensitive soil. GEO-Chicago 2016, sustainability, energy and geoenvironment, 14-18 aout 2016, Chicago, Illinois, 10p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1061/9780784480137.007>
- [CI 13] Eslami H, Rosin-Paumier S, Abdallah A, Masrouri F Impact of temperature cyclic variations on bearing capacities of a sensitive soil. III European Conference on Unsaturated soils, Paris, France, septembre 2016,
- [CI 12] Eslami H, Rosin-Paumier S, Abdallah A, Masrouri F, Impact d'une sollicitation thermique cyclique sur les paramètres pressiométriques d'un sol fin compacté. Symposium International ISP7/PRESSIO 2015, African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 27 avril au 2 mai 2015, 8p.
- [CI 11] Araïro W, Eslami H, Abdallah A, Rosin-Paumier S, Masrouri F: Effect of the temperature variation on the pressuremeter test parameters of a compact illitic-soil. XVI^e European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 13 to 17 September 2015, Edinburgh, Scotland, 6p.
- [CI 10] Eslami H, Rosin-Paumier S, Abdallah A, Masrouri F: Temperature effect on the mechanical parameters of a clayey soil. UNSAT Congress Sydney Australia, 2-4 July 2014, 6p. Article publié dans Unsaturated Soils: Research & Applications Vol.1. Khalili, Russell et al. (eds) CRC Press, 2014, 815-822pp.
- [CI 9] Rosin-Paumier S, Leclerc S, Abdallah A, Stemmelen D: Determination of the unsaturated hydraulic conductivity of clayey samples using magnetic resonance imaging (MRI). UNSAT Congress Sydney Australia, 2-4 July 2014, 6p. Article publié dans Unsaturated Soils: Research & Applications Vol.2. Khalili, Russell et al. (eds) CRC Press, 2014, 1155-1162p.
- [CI 8] Auvray R, Rosin-Paumier S, Abdallah A, Masrouri F: Impact of the hygrometry on the swelling soil cracking Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013.
- [CI 7] Franchomme G, Rosin-Paumier S, Masrouri F: Evaluating the impact of thermal variations on the penetration test parameters. First Pan-American Conference on Unsaturated Soils UNSAT, Cartagenas de los Indias, Colombie, 20-22 Février 2013, 6p. Article publié dans Advances in Unsaturated soils. Caicedo, Murillo et al. (eds) A.A. Balkema Publishers CRC Press, 2013, 371-376p.
- [CI 6] Touze-Foltz N, Rosin-Paumier S, Mazéas L, Guenne A: Diffusion of Volatile Organic Compounds through an HDPE Geomembrane. Actes Geo-Frontiers: Advances in Geotechnical Engineering, Han J. et Alzamora, D.A. (editors), Dallas, Texas, 2011, 1121-1130.

[CI 5] Rosin-Paumier S, Touze-Foltz N: Chemical evolution of GCLs during oedopermeameter tests. 3rd International Symposium on Geosynthetic Clay Liners, Würzburg, Germany, 2010, 10 p.

[CI 4] Rosin-Paumier S, Touze-Foltz N, Pantet A: Quantification of the impact of a synthetic leachate on the structuration of bentonites used in GCLs using rheometrical tests. 3rd International Symposium on Geosynthetic Clay Liners, Würzburg, Germany, 2010, 10 p.

[CI 3] Paumier S, Pantet A, Monnet P: The contribution of rheometry to the smectite unit interaction issue: structuring knowledge and kinetics. AERC, 74th Annual European Rheology Conference, Naples, Italie, 2007.

[CI 2] Paumier S, Pantet A, Monnet P. Rheological behavior of smectite dispersions, the concentration and the saturation (Ca²⁺, Na⁺) influence. Bridging Clays, actes du 4^e Colloque du Groupe Français des Argiles et 43^e Réunion de la Clay Minerals Society, Oléron, France, 2006.

[CI 1] Paumier S, Pantet A, Monnet P : Effet de la nature du cation interfoliaire sur les propriétés rhéologiques de suspensions de smectite. Actes du 2^e Symposium Magrébin des Argiles, à Mekhnès, Maroc, 2006, 2 p.

Congrès Nationaux [CN n]

[CN 18] Lahoori M, Stoltz G, Rosin-Paumier S, Jannot Y : Evaluation des performances des géotextiles non-tissés-aiguilletés pour l'isolation thermique des géostructures énergétiques. Actes du 12^e Rencontres Géosynthétiques (RGS), Nancy, France, 11-13 mars 2019, 113-122p.< hal-02942596 >

[CN 17] Boukelia A, Rosin-Paumier S, Masrouri F : Effet de variation cyclique de la température sur les paramètres thermiques des sols compactés. 36^e Rencontres Universitaires de Génie Civil (RUGC), Saint Etienne, France, 19-22 juin 2018. Academic Journal of Civil Engineering, 36(1), 122-125. <https://doi.org/10.26168/ajce.36.1.30> (hal-01987940)

[CN 16] Boukelia A, Rosin-Paumier S, Eslami H : Influence de la variation cyclique de la température sur les paramètres pressiométriques d'un limon compacté. 35^e RUGC, Nantes, France, 21-24 mai 2017. Academic Journal of Civil Engineering, 35(1), 156-159. <https://doi.org/10.26168/ajce.35.1.38> (hal-02942608)

[CN 15] Boukelia A, Rosin-Paumier S, Eslami H, Masrouri F : Effet couplé des paramètres de compactage et de la température sur les propriétés thermiques des sols. 34^e RUGC, Liège, Belgique, 25-27 mai 2016. Academic Journal of Civil Engineering, 34(1), 293-300. <https://doi.org/10.26168/ajce.34.1.36> (hal-02942611)

[CN 14] Boukelia A, Eslami H, Rosin-Paumier S, Masrouri F, Leborgne T : Stockage de chaleur dans les sols compactés. Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Nancy, France, 6-8 juillet 2016.

[CN 13] Eslami H, Rosin-Paumier S, Abdallah A, Masrouri F : Influence de la variation de température sur les paramètres pressiométriques d'un sol compacté. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014 – Beauvais 8-10 juillet 2014.

[CN 12] Troupel H, Rosin-Paumier S, Masrouri F : Etude de la conductivité thermique d'un sol compacté. 32^e RUGC, Orléans, 4-6 juin 2014.

[CN 11] Rosin-Paumier S, Abdallah A, Cuisinier O, Masrouri F. Effet de sollicitations thermiques sur les propriétés hydromécaniques des sols : essais de laboratoire. Conférence Invitée, Journées techniques du CFMS, Paris, 21 mai 2014.

[CN 10] Rosin-Paumier S, Cuisinier O, Perrin J.C., Leclerc S, Kervern G, Abdallah A, Stemmelen D, Masrouri F. Couplages chémo-hydromécaniques dans les argiles en milieu fortement alcalin. Conférence Invitée, Journées annuelles NEEDS-MILIEUX POREUX, Paris, 21-22 novembre 2013.

[CN 9] Rosin-Paumier S, Leclerc S, Stemmelen D : Utilisation d'un IRM pour quantifier l'évolution du séchage d'éprouvettes de matériaux argileux. 38^e journées du GFHN, Poitiers, 18-21 novembre 2013.

[CN 8] Eslami H, Rosin-Paumier S, Abdallah A, Masrouri F, Influence de la variation de température dans les pieux énergétiques sur la capacité portante des sols. 31^e Rencontres de l'AUGC, E.N.S. Cachan, 29 au 31 mai 2013.

[CN 7] Pirrion T, Touze-Foltz N, Croissant D, Rosin-Paumier S, Ouvry JF : Performance d'un GSB dans une couverture d'installation de stockage de déchets après six ans de mise en service, 8^e Rencontres Géosynthétiques, Tours, France, Mars 2011, 339-348p.

[CN 6] Touze-Foltz N, Rosin-Paumier S, Mazéas L: Diffusion of volatile organic compounds through an HDPE geomembrane. Rencontre Géosynthétiques, Tours, France, 2011.

[CN 5] Paumier S, Touze-Foltz N, Pantet A, Guyonnet D, Norotte V, Didier G : Utilisation de méthodes hydrauliques et mécaniques pour différencier les types de bentonites. Rencontre Géosynthétiques, Nantes, France, 2009, 10 p.

[CN 4] Paumier S, Monnet P, Pantet A : Etude des propriétés viscoélastiques de suspensions de smectite homoioniques à bi-ioniques (Ca²⁺, Na⁺) : influence de la concentration (2-100 g/l). Actes du 18^e congrès français de mécanique Grenoble, France, Aout 2007, 6 p.

[CN 3] Paumier S., Monnet P. et Pantet A : Rhéologie de suspensions de smectite: impact de la saturation (Ca²⁺, Na⁺). Actes du 41^e colloque annuel du groupe français de rhéologie, Cherbourg, France, 2006, 39-42.

[CN 2] Paumier S, Pantet A, Monnet P. Rôle de la cristalochimie sur les propriétés rhéologiques de suspensions de smectites. 3^e colloque du Groupe Français des Argiles, Paris, France. Bulletin du GFA N°2, 2005. Poster

[CN 1] Paumier S, Pantet A, Monnet P : Caractérisation rhéologique de suspensions de smectites sodiques à calciques : Application de plans d'expériences à l'optimisation de la saturation. Réunion annuelle du Groupe Français des Argiles, Paris, France. Bulletin du GFA N°3, 2005.

Participation à des rapports Scientifiques [RS n]

[RS 10] Javadi A. GeoRes – Geomaterials from Waste to Resource - Mid-term seminar, Nancy, 13 février 2020

[RS 9] Cuisinier O, Rosin-Paumier S, Menaceur H, Kaddouri Z, Masrouri F. Détermination des propriétés hydromécaniques des argiles tégulines et des marnes de Brienne – Projet FAVL - Rapport final FRPOLET150001, avril 2018, 57p.

[RS 8] Cuisinier O. Projet GeoStab « Solidification and stabilisation for sustainable management of problematic soils » - Rapport final, janvier 2017, 12p.

[RS 7] Boukelia A, Rosin-Paumier S, Masrouri F. Projet Stockage géothermique, rapport sur la faisabilité de stockage thermique au sein d'ouvrages en sol compacté, MS.FM.DTP.RPRE.15.028.A, 2015, 40p.

[RS 6] Bernard JB, S. Rosin-Paumier, S. Burlon, C. Maragna, F. Masrouri, H. Mroueh, X. Rachez, A. Abdallah, M. Suryatriyastuti. H. Eslami, E. Jahangir. Rapport de final du projet GECKO :

GEostructures, Couplage solaire hybride et stockAge d'énergie Optimisé : Solution pour bâtiments à énergie positive. Projet ANR-11-SEED-0013, 2015, 150p.

[RS 5] Burlon, S. Memorandum of Understanding for the implementation of a European Concerted Research Action designated as COST Action TU1405: European network for shallow geothermal energy applications in buildings and infrastructures (GABI), 2014.

[RS 4] Bernard JB, S. Rosin-Paumier, S. Burlon, C. Maragna, F. Masrouri, H. Mroueh, X. Rachez, A. Abdallah, M. Suryatriyastuti. H. Eslami, E. Jahangir. Rapport de mi-parcours du projet GECKO : GEostructures, Couplage solaire hybride et stockAge d'énergie Optimisé : Solution pour bâtiments à énergie positive. Projet ANR-11-SEED-0013, 2013,150p.

[RS 3] S. Rosin-Paumier, C. Fontaine, S. Leclerc, D. Proust, F. Masrouri, D. Stemmelen. Effet d'une contrainte thermique modérée sur les propriétés hydromécaniques et minéralogiques des argiles et des argilites. Rapport final FORPRO II – Action 2011 – XVIII, 2013, 33p.

[RS 2] Moretto R. Projet BIOREACTEUR du Programme ECotechnologies et Développement Durable de l'ANR (PRECODD 2006). Rapport intermédiaire à mi-parcours, 2008, 159p.

[RS 1] Guyonnet D., Norotte V., Touze-Foltz N., Didier G., Pothier C., Pantet A. Projet LIXAR2 - Indicateurs de performance pour les géosynthétiques bentonitiques. Rapport d'avancement 2 - BRGM/RP.55153.FR, 2006, 96p.

IV. Listes des figures et des tableaux du Volume I

Figure I. 1 : Répartition des enseignements et des responsabilités administratives (2020-2021).	16
Figure I. 2 : Illustration d'un projet pluri-disciplinaire réalisé avec les étudiants de la licence professionnelle Eau, Ressource et Infrastructures.	17
Figure I. 3 : Illustration de la rénovation de la plateforme d'essai de mécanique des sols, géotechnique.	18
Figure I. 4 : Représentation schématique des missions en lien avec la responsabilité des études.	20
Figure I. 5 : Synopsis du déroulement des projets de recherche de 4 ^e année à l'ESITC	21
Figure I. 6 : Exemple de niveaux de compétence à atteindre dans chaque bloc pour le parcours Bureaux d'études Conceptions	22
Figure I. 7 : Illustration des couplages thermo-hydrromécaniques dans les sols.	27
Figure I. 8 : Exemples de situations dans lesquels les sols, naturels ou anthropiques sont soumis à des sollicitations thermo-hydrromécaniques.	28
Figure I. 9 : Schéma du dispositif expérimental et exemple de traitement d'images.	29
Figure I. 10 : Surface de l'éprouvette à différents stades : a) état initial b) après la 1 ^{er} séchage c) après la 1 ^{ère} réhumidification d) après le 2 nd séchage e) après la 2 nd réhumidification f) après le 3 ^e séchage f) après la 3 ^e réhumidification.	30
Figure I. 11: Evolution des paramètres mesurés en fonction de $\Delta H/H_0$. a) Les déformations radiales b) CIF*.	31
Figure I. 12 : a) Eprouvettes d'argile téguline et b) programme des sollicitations thermo-hydrriques appliquées.	32
Figure I. 13 : a) Perméamètre à paroi flexible et b) conductivités hydrauliques obtenues après plusieurs cycles de séchage/humidification.	32
Figure I. 14 : a) Aimant supra conducteur permettant la réalisation d'imagerie par résonance magnétique nucléaire. b) Echantillon confiné dans une cellule d'essai. c) Image 2D d'une bentonite, portée à deux teneurs en eau différentes, obtenue par la méthode du Single Point Imaging.	33
Figure I. 15 : a) Evolution de la teneur en eau au sein d'une éprouvette d'argilite au cours de l'application d'une hygrométrie de 33% pendant 143h selon l'application de b) la courbe de calibration.	34
Figure I. 16: Conductivité hydraulique non saturée en fonction de la succion pour l'argilite de Bure [M2]. ..	35
Tableau I. 1 : Parcours professionnel.	11
Tableau I. 2 : Liste des co-encadrements réalisés et publications associées.	12
Tableau I. 3 : Synopsis du déroulement des projets tutorés en seconde année de DUT GC-CD	19

VOLUME II :

Comportement thermo-hydromécanique des sols, application aux géostructures énergétiques

Table des matières du Volume II

I. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUES	56
II. COMPORTEMENT THERMO-HYDROMECHANIQUE DES SOLS FINS	60
II.1. IMPACT D'UNE MODIFICATION DE TEMPERATURE SUR LES PARTICULES CONSTITUTIVES DU SOL.....	61
II.2. COMPORTEMENT THERMO-HYDROMECHANIQUE DES SOLS SATURES	62
II.3. COMPORTEMENT THERMO-HYDROMECHANIQUE DES SOLS NON-SATURES.....	68
II.4. EXEMPLE DE L'ETUDE DU COMPORTEMENT THERMO-HYDROMECHANIQUE DU LIMON DE PLAISIR.....	76
II.5. CONCLUSION	89
III. IMPACT DE VARIATIONS THERMIQUES CYCLIQUES SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES PIEUX ENERGETIQUES.	90
III.1. CONTEXTE : LES PIEUX ENERGETIQUES.....	90
III.2. PRESENTATION DES METHODES EXPERIMENTALES	91
III.3. CARACTERISATION DU MATERIAU ILLITIQUE.....	95
III.4. EVOLUTION DES PARAMETRES PENETROMETRIQUES D'EPROUVETTES SOUMISES A DES VARIATIONS MONOTONES DE LA TEMPERATURE	98
III.5. EVOLUTION DES PARAMETRES PRESSIOMETRIQUES D'EPROUVETTES SOUMISES A DES VARIATIONS MONOTONES DE LA TEMPERATURE	102
III.6. ÉTUDE IN SITU DE L'IMPACT DE VARIATIONS THERMIQUES CYCLIQUES SUR LES PROPRIETES MECANIQUES D'UN SOL SABLEUX	110
IV. PERFORMANCE THERMIQUE ET MECANIQUE D'UN SOL COMPACTE POUR LE STOCKAGE DE CHALEUR	116
IV.1. CONTEXTE : LE STOCKAGE DE CHALEUR DANS LES SOLS.....	116
IV.2. METHODES	120
IV.3. CHOIX DU MATERIAU, DE SON ETAT DE COMPACTAGE ET SA CARACTERISATION	124
IV.4. ÉVALUATION DE L'IMPACT DES VARIATIONS DE TEMPERATURE SUR LES PROPRIETES THERMIQUES ET HYDROMECHANIQUES DU MATERIAU.....	128
IV.5. DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE DE SUIVI IN SITU DES PROPRIETES THERMIQUES DU STOCKAGE	136
IV.6. EVALUATION DE LA PERFORMANCE THERMIQUE D'UN SOL COMPACTE POUR LE STOCKAGE DE CHALEUR	140
IV.7. UTILISATION DES GEOSYNTHETIQUES POUR L'ISOLATION THERMIQUE DES GEOSTRUCTURES ENERGETIQUES	147
IV.8. MODELISATION THERMO-HYDRIQUE D'UN REMLAI GEOTHERMIQUE	151

IV.9. CONCLUSION DE LA PARTIE STOCKAGE EN SOL COMPACTE	157
V. CONCLUSION DE LA PARTIE BILAN	160
VI : PROJET SCIENTIFIQUE	162
VI.1. CARACTERISATION COUPLEE THERMO-HYDROMECHANIQUE DES SOLS FINS NON SATURES	163
VI.2. CARACTERISATION POST-RUPTURE DES SOLS FINS COMPACTES	164
VI.3. CHANGEMENT D'ECHELLE : PRISE EN COMPTE DES ALEAS ENVIRONNEMENTAUX	167
VI.4. MODELISATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE DE SOLS FINS COMPACTES SOUMIS A DES SOLLECITATIONS THERMO-HYDRIQUES	168
VI.5. CONCLUSION DU PROJET	169
VII. CONCLUSION GENERALE	170
VIII. LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX DU VOLUME II	172
IX. BIBLIOGRAPHIE	178
ANNEXES : FICHES SYNTHETIQUES CONCERNANT LES ESSAIS ET DE LABORATOIRE ET LES MATERIAUX ETUDIES	186

I. Contexte et problématiques

Les modifications actuelles du climat s'accompagnent de la multiplication d'épisodes de pluies et de sécheresse (Pfeiderer et al. 2019) pouvant affecter la stabilité des ouvrages. De plus, l'allongement de la durée, et de l'intensité des canicules, contraint de nombreux foyers et entreprises à climatiser leurs locaux, augmentant leurs besoins en énergie. Ces nouveaux besoins s'ajoutent à une demande en énergie en constante augmentation du fait de la croissance démographique et de la digitalisation de la société (domotique, besoins numériques, robotisation des industries). Les sources modernes d'énergie se doivent de préserver le milieu naturel, déjà fortement sollicité et de ne pas recourir aux énergies dites « fossiles » sous peine d'aggraver le dérèglement climatique en partie à l'origine de ces nouveaux besoins (LOI n° 2009-967). Une solution pourrait être apportée par le développement de sources locales d'apport énergétique, et par l'interconnexion des types d'énergie, afin de capter et de stocker les surproductions (Kim et al. 2020).

En France, la directive 2009/28/CE avait fixé un objectif de 23 % d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie en 2020. Malgré la diversification des sources (Figure II. 1), notamment de l'éolien, des pompes à chaleur et des biocarburants, cet objectif n'a pas été atteint. En effet, la production primaire d'énergies renouvelables, qui correspond à l'ensemble des énergies renouvelables primaires en France s'élève à 322 TWh en 2020. Le solde net disponible, après retrait de l'énergie consommée pour produire cette énergie est de 307 TWh soit 19,1% de la consommation finale brute d'énergie. Cet objectif ambitieux a été porté à 33 % à l'horizon 2030 par la loi relative à l'énergie et au climat de 2019, il ne sera réalisable qu'à condition de la poursuite du développement de l'ensemble des leviers de production.

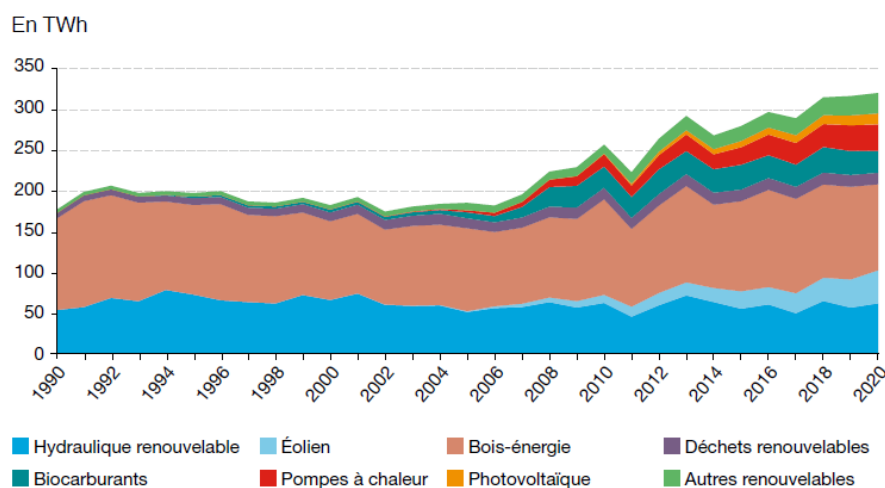


Figure II. 1 : Evolution de la production primaire d'énergies renouvelables par filière (Phan et al. 2021)

En ce qui concerne la production de chaleur, son augmentation s'appuiera principalement sur la filière biomasse (par exemple la fabrication de biogaz, ou l'utilisation de biocarburant) et l'utilisation de pompes à chaleur (Tableau II. 1). Ces pompes produisent de la chaleur en puisant des calories dans l'air (aérothermie) ou dans le sol (géothermie dite de « basse énergie »). Actuellement, le parc de pompes à chaleur est principalement représenté par des aérothermes, mais les pompes à chaleur géothermiques présentent un fort potentiel de développement.

Tableau II. 1 : Objectifs en matière de chaleur renouvelable dans le cadre de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE 2018-2028) (Phan et al. 2021).

	Réalisé (TWh)			Objectifs (TWh)	
	2018	2019	2020	2023	2028
La chaleur et le froid renouvelables et de récupération					
Biomasse	112	113	106	145	157 à 169
Pompes à chaleur y compris PAC géothermiques	28	32	33	39,6	44 à 52
Géothermie profonde	2	2	2	2,9	4 à 5,2
Solaire thermique	1,19	1,20	1,21	1,75	1,85 à 2,5
Quantité de chaleur renouvelable et de récupération livrée par les réseaux de chaleur	13,9	14,6	nd	24	31 à 36

La géothermie de basse énergie (moins de 100°C) produit de l'eau chaude pour le chauffage des locaux, soit en utilisant de l'eau chaude (50-90°C) présente dans les aquifères profonds (1 à 2 km), soit en tirant partie de la stabilité de la température du sol superficiel. L'exploitation de la faible différence de température entre l'atmosphère et le sol est rendu possible depuis les années 1950 grâce au développement des pompes à chaleur géothermiques (Fish et al. 1998, Xu et al. 2014, Bourne-Webb et al. 2016). Leur mode de fonctionnement consiste à rehausser, grâce à la compression et à la détente d'un fluide frigorigène, la température d'un fluide à des valeurs comprises entre 35° et 65°C qui sont exploitables par les émetteurs de chaleur présents dans les bâtiments. Les pompes à chaleur sont réversibles, ce qui présente l'intérêt de répondre aux besoins de chauffage et de rafraîchissement. Cependant, en fonction des conditions climatiques, les besoins en chaleur et en rafraîchissement peuvent être déséquilibrés, des solutions de recharge de la ressource doivent alors être mises en place.

Afin d'augmenter la capacité de production de ces systèmes et d'en garantir la durabilité énergétique, des méthodes de stockage de chaleur ou de fraîcheur se sont développées au cours des dernières décennies (Figure II. 2) (voir par exemple Nielsen 2003). Elles consistent à collecter l'énergie lorsqu'elle est disponible et à la stocker plusieurs mois afin de l'utiliser lorsque les besoins s'expriment, généralement au cours de la saison opposée (Cruickshank et Baldwin, 2016). Ces méthodes peuvent être associées à des sources de production intermittentes telles que des panneaux solaires thermiques afin de stocker l'énergie produite.

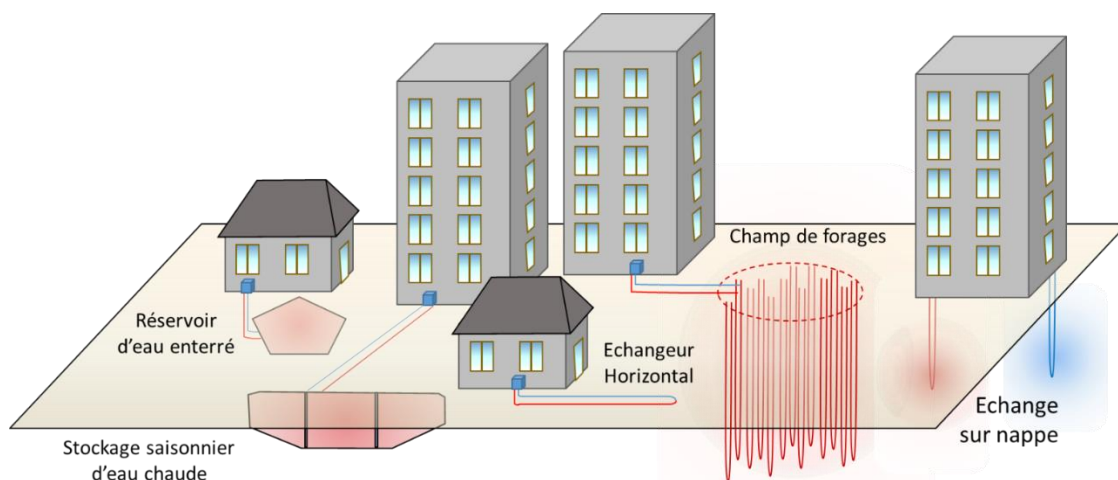


Figure II. 2 : Illustration des principales méthodes de stockage saisonnier de chaleur dans le sol.

Xu et al. (2014) référencent de nombreuses installations en milieu naturel notamment des champs de sondes (BTES, Borehole Thermal Energy Storage) qui font preuve d'une bonne efficacité à répondre aux besoins (voir également Sibbit et al. 2012). Cependant, ces systèmes requièrent la mobilisation de grands volumes de matériaux et leur efficacité peut être réduite par des pertes vers l'atmosphère ou en lien avec l'écoulement de nappes d'eau souterraines. Les recherches en vue de leur développement se concentrent désormais sur l'amélioration du transfert de chaleur afin d'augmenter le rendement des pompes à chaleur, le raffinement des modèles numériques à utiliser dans la conception et la réduction des coûts d'installation (Bourne-Webb et al. 2016). C'est sur ce dernier point que se concentrera la suite de ce document en explorant les possibilités d'intégration des tubes échangeurs de chaleurs à des structures d'ingénierie en contact avec le sol afin d'assurer l'échange thermique.

Les géostructures énergétiques sont des ouvrages de Génie Civil qui intègrent un circuit d'échangeurs de chaleur dans lequel circule un fluide caloporteur permettant un échange thermique avec le terrain (Figure II. 3) (Brandl, 2006). Il peut s'agir de murs de soutènement (Sterpi et al., 2017), de revêtements de tunnel (Zhang et al., 2013, Barla et Di Donna, 2018) ou de pieux énergétiques (Pahud et al., 1999, Moel et al., 2010, Di Donna et Laloui, 2015). Ces systèmes utilisent le sol comme une source de chauffage ou de refroidissement pour les bâtiments au même titre que les autres sources géothermiques de basse profondeur (Fromentin et al. 1999, Laloui et al. 2003, Brandl 2006, Bourne-Webb et al. 2016, Loveridge et al. 2017).

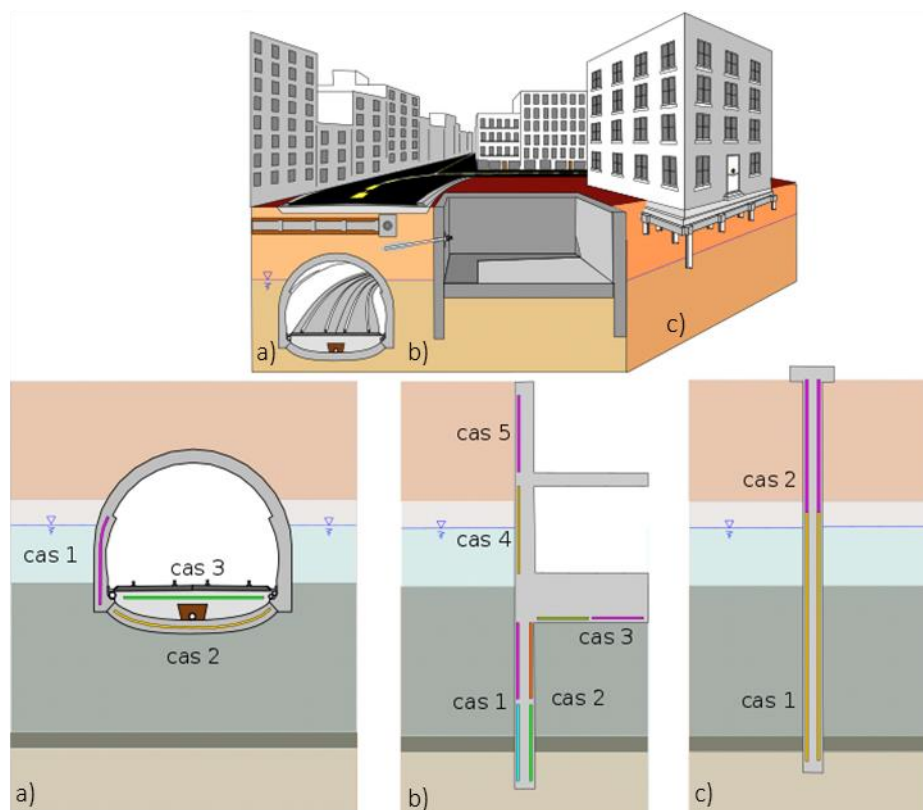


Figure II. 3: Insertion en milieu urbain de différentes géostructures énergétiques : a) parois de tunnels, b) murs de soutènements et c) pieux (modifié de Delerabee et al., 2020).

Les géostructures énergétiques sont généralement dimensionnées pour capter de la chaleur dans le sol, mais elles peuvent également être utilisées pour en injecter. En hiver, le procédé, couplé à une pompe à chaleur, permet de chauffer les bâtiments voisins tandis qu'en été, il permet de les rafraîchir en utilisant le sous-sol comme une source de fraîcheur naturelle à disposition (systèmes passifs appelés free-cooling). L'Autriche fut l'un des pays précurseurs au développement de cette technologie. Dans leur lignée, la Suisse présente également des constructions

d'envergures, tel que l'aéroport de Zürich qui est équipé de 440 pieux dont 300 géothermiques de 0,9 à 1,5 m de diamètre (Pahud et al., 1999). Malgré une performance énergétique limitée en comparaison avec des forages purement géothermiques, du fait de leur plus faible ratio longueur sur diamètre (Abuel-Naga et al. 2015), de nombreuses réalisations se sont concrétisées (Moel et al., 2010) (Figure II. 4).

Les premières normes pour la conception des pieux énergétiques furent éditées au Royaume-Uni par l'association GSHPA en 2012 (Nicholson 2012). Ces documents décrivent les aspects techniques relatifs à la mise en place des échangeurs au sein des pieux et au calcul de leur efficacité énergétique. La prise en compte de l'impact des variations cycliques de la température sur les propriétés mécaniques des sols environnants repose sur des essais effectués sur des sols argileux. L'utilisation de ces normes pour l'installation d'ouvrages dans d'autres conditions géologiques est soumise à précautions. De plus, certaines simplifications, notamment en ce qui concerne le comportement à l'interface sol-pieu est encore en cours d'étude (Abuel-Naga et al. 2015). En effet, les frottements à l'interface sol-pieux qui participent à la fonction de portance pourraient être affectés par les cycles successifs de contraction/dilatation du pieu au cours de l'application des cycles de chauffage/refroidissement (Nguyen et al. 2017).

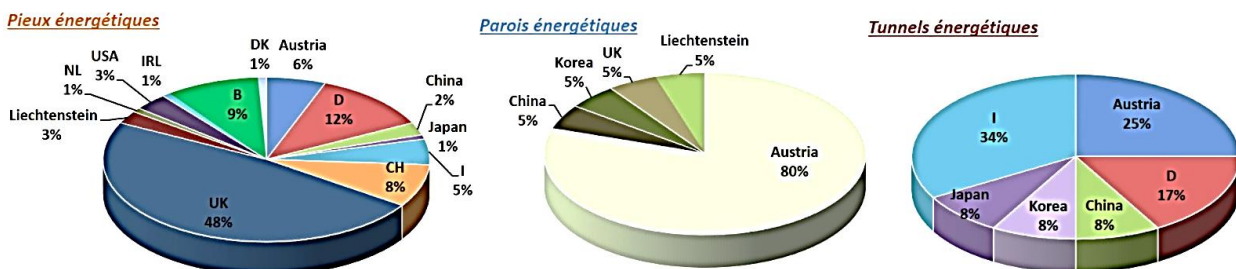


Figure II. 4 : Diffusion des géostructures énergétiques dans différents pays (Di Donna, 2019).

Afin d'évaluer la durabilité mécanique et énergétique des géostructures énergétiques sur le long terme, une compréhension approfondie des phénomènes thermo-hydrromécaniques couplés en œuvre dans les sols est nécessaire. Ainsi, trois objectifs principaux sont traités dans ce document :

1. Améliorer la compréhension du comportement hydromécanique des sols soumis à des sollicitations thermiques cycliques.
2. Mesurer et analyser l'évolution des propriétés thermomécaniques des sols à proximité des structures thermoactives afin d'accompagner le développement des géostructures énergétiques en s'assurant de leur stabilité ;
3. Évaluer la faisabilité d'un stockage en sol compacté en calculant son efficacité énergétique à court et à long terme et en évaluant sa stabilité mécanique malgré l'application des sollicitations thermiques cycliques internes (échangeurs de chaleur) et externes (climatiques).

Chacun de ces objectifs est développé dans les parties suivantes. La partie II comprend une synthèse des études portant sur le comportement thermo-hydrromécanique des sols saturés ou non saturés lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations thermiques cycliques. Une attention particulière sera portée au couplage entre les paramètres hydriques, thermiques et mécaniques du sol. Puis un exemple d'étude thermo-hydrromécanique d'un limon compacté sera proposé.

En partie III, les problématiques en lien avec les fondations thermoactives seront présentées ainsi que les principaux résultats obtenus sur ce thème. L'impact des variations cycliques de la température sur les propriétés des sols au voisinage des pieux énergétiques est évalué ainsi que ses conséquences sur les fonctions de portances des structures associées. Cette problématique a été étudiée dans le cadre du projet ANR GECKO (GEostructures, Couplage solaire hybride et

stockage d'énergie Optimisé : Solution pour bâtiments à énergie positive – 2012-2015) (Bernard et al. 2015) et a fait l'objet d'une thèse (Eslami, 2014). A ce titre, de nombreux essais ont été réalisés à différentes échelles d'investigation puis, les résultats de ces essais ont été utilisés pour calibrer une loi constitutive bilinéaire dans un cadre thermomécanique (post-doctorat Araïro, 2015). Des essais in situ ont également été réalisés à proximité de pieux énergétiques de taille réelle avant et après application de cycles de chauffage-refroidissement.

La partie IV présente les résultats obtenus en lien avec le développement de solutions de stockage d'énergie dans des remblais ou des massifs de sol compacté sous forme de chaleur sensible (modification de la température sans changement d'état). Deux thèses ont été soutenues sur cette thématique (Boukelia, 2016 et Lahoori, 2020) dans le cadre d'un programme de recherche soutenu par Bouygues TP et la région Grand Est. Tout d'abord, un état de compactage optimal pour le stockage inter-saisonnier a été identifié, puis, une méthode a été développée afin de suivre l'évolution des propriétés thermiques du sol compacté au cours des cycles successifs. Par la suite, une étude numérique a été réalisée en collaboration avec l'INSA de Strasbourg afin d'évaluer l'efficacité énergétique du système. L'usage de géosynthétiques pour limiter les pertes de chaleur au cours des intersaisons a été étudiée en collaboration avec l'INRAE. Enfin, une modélisation thermo-hydrigue, aux éléments finis, de l'évolution des températures au sein du stockage est proposée afin d'évaluer la faisabilité énergétique du système et d'envisager sa réalisation.

II. Comportement thermo-hydrigue des sols fins

Les sols sont des matériaux polyphasiques, dont les composants sont solides, liquides et gazeux. Les propriétés des composants (minéralogie des grains, viscosité du liquide) ainsi que leurs interactions (frottement, cohésion) confèrent au sol structuré une capacité de résistance propre. Par exemple, la masse volumique du matériau et la rugosité de ses constituants solides va conditionner les frottements aux interfaces entre les grains et sa cohésion sera fonction de la présence d'eau et de sa composition minéralogique (présence d'argiles). Sous l'action de forces externes ou interne au massif de sol, les composants du sol subissent des contraintes. Lorsqu'elles dépassent la limite d'élasticité du sol, elles engendrent des déplacements permanents à l'échelle particulaire (déformation plastique) qui peut aboutir à une déformation du massif dans son ensemble. Ainsi, la structure d'un sol à un instant donné résulte d'une succession d'événements.

L'eau, présente dans les interstices, a un rôle important dans la vitesse de déformation du sol car sa mobilité et ses changements d'états ont un impact sur les propriétés mécaniques du matériau. Ainsi, lors du séchage d'un matériau, la succion qui se développe engendre un retrait volumique du matériau qui modifie sa structure, le matériau résultant est alors plus rigide. Au contraire, lors d'une humidification, un gonflement peut apparaître et la plasticité du sol augmente. Lorsque l'eau occupe l'intégralité des interstices (état saturé), elle développe une capacité de portance qui s'ajoute à celle du squelette solide. Cependant, cette capacité est transitoire puisque la surpression ainsi occasionnée peut se dissiper par drainage. La vitesse de déplacement de l'eau (conductivité hydraulique) au sein du réseau poreux influencera la vitesse de consolidation du matériau, les matériaux sont dits sous-consolidés au cours de cette période transitoire.

Ainsi l'intensité de la déformation d'un sol sous l'action d'une contrainte nouvelle sera fonction des propriétés de ses composants, de l'histoire des contraintes auquel il a été exposé et des possibilités de drainage de l'eau interstitielle. Lors d'une modification de température, différents niveaux de structurations seront impactés depuis l'échelle particulaire jusqu'à l'échelle du massif. La partie II.1

permettra de mettre en évidence l'impact d'une modification de température sur les particules constitutives du sol. La partie II.2 s'intéressera au comportement thermo-hydrromécanique (THM) des sols saturés tandis que la partie II.3 focalisera sur le comportement THM des sols non saturés. Enfin, la partie II.4 proposera un exemple de caractérisation THM d'un limon compacté.

II.1. Impact d'une modification de température sur les particules constitutives du sol

Les variations de température provoquent une dilation ou une rétractation volumique des grains et de l'eau qui s'accompagne d'une évolution de sa viscosité. Les sols y seront plus ou moins sensibles en fonction, du coefficient d'expansion thermique de leurs composants, de la taille des pores et de leur état de saturation.

Le coefficient de dilatation thermique est une constante physique caractérisant la variation de volume en fonction de la variation de température :

$$\Delta V = 3a \cdot \Delta T \quad \text{Équation 3}$$

Où ΔV est la variation de volume (m^3), a est le coefficient de dilatation linéaire ($^{\circ}C^{-1}$ ou K^{-1}) et $\Delta T = T - T_0$ la variation de température (K ou $^{\circ}C$).

Selon Dysli (1991), le coefficient de dilatation thermique des constituants des sols (α_s) sont relativement proches : $11 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ pour le quartz, $4,3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ pour les plagioclases, $5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ pour l'orthose et $7 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ pour les micas. Concernant les matériaux fins, Sultan et al. (2002) utilisent une valeur moyenne de $10^{-5} K^{-1}$ pour une argile naturelle (argile de Boom).

Le coefficient de dilatation thermique de l'eau (α_w) est nettement plus important que celui des solides. Sultan et al. (2002) évoquent un rapport de 17 entre les deux coefficients ($\alpha_s = 10^{-5}$ et $\alpha_w = 1,7 \cdot 10^{-4} ^{\circ}C^{-1}$, respectivement). Dysli (1991) donne des valeurs de α_w plus importantes et dépendantes de la température entre $5,4 \cdot 10^{-4} K^{-1}$ à $0^{\circ}C$ et $6,6 \cdot 10^{-4} K^{-1}$ à $20^{\circ}C$. Cette valeur augmente encore dans le cas où l'eau est confinée (Derjaguin et al. 1986). Xu et al. (2009) ont réalisé des essais dilatométriques pour quantifier l'expansion thermique des molécules d'eau incluses dans les pores nanométriques d'un verre de silice poreux (Vycor) pour des températures de 10 à $40^{\circ}C$. Les résultats montrent que α_w augmente avec la température et avec la diminution de la taille de pores pour atteindre par exemple $5,5 \cdot 10^{-3} ^{\circ}C^{-1}$ pour de l'eau à $40^{\circ}C$ contenue dans des pores de l'ordre de 3 nm. Ainsi, le coefficient α_w de l'eau dans les pores est plus élevé que pour une eau libre. Les auteurs expliquent cette différence par l'augmentation de la densité de l'eau à proximité des parois des pores : un fluide plus dense présente une expansion thermique plus importante.

Lors d'une augmentation de température, les composants solides et l'eau contenue dans les pores se dilatent ce qui aura tendance à diminuer la porosité du sol et à augmenter le degré de saturation. Dans le cas des matériaux saturés non drainés, la pression interstitielle augmentera. Si le drainage de cette surpression est possible, elle se dissipera progressivement.

La dilation de l'eau s'accompagne d'une diminution de sa viscosité. La relation empirique de Hillel (1980) permet de calculer la viscosité (μ) d'une eau libre à une température (T) donnée :

$$\mu(T) = -0.00046575 \ln(T) + 0.00239138 \quad \text{Équation 4}$$

Ainsi, la viscosité de l'eau libre diminue de 1,32 mPa.s à $10^{\circ}C$ à 0,6 mPa.s à $40^{\circ}C$. La viscosité de l'eau chaude confinée sera encore plus faible compte tenu de sa dilatation prononcée comme expliqué plus tôt.

La faible viscosité de l'eau facilite sa mobilité dans le réseau poreux. Ainsi, une augmentation de la conductivité hydraulique des matériaux saturés est généralement constatée dans le cas d'une augmentation de la température des matériaux. D'autres propriétés en lien avec la mobilité de l'eau (fluage, consolidation) pourront, par conséquent être, elles aussi, impactées.

La modification du volume des éléments constitutifs du matériau à l'échelle microscopique, a des effets complexes et contradictoires sur les propriétés mécaniques du sol. D'une part, la diminution de la viscosité de l'eau interstitielle devrait induire une diminution de la résistance au cisaillement, tandis que, d'autre part, la dilatation des constituants solide devrait se traduire par une augmentation des contacts entre les particules et donc une augmentation de la résistance au cisaillement (Tang 2005). Ainsi, lors d'une modification de température, la stabilité des ouvrages dépendra de la combinaison de plusieurs phénomènes qui modifient de façon antagonistes la résistance au cisaillement du sol. Les études disponibles dans la bibliographie relatent donc :

- une diminution de la résistance au cisaillement avec l'augmentation de la température (Mitchell 1964, Hueckel et Baldi 1990, De Bruyn et Thimus 1996, Wiebe et al. 1998) lorsque l'effet de la diminution de la viscosité est prédominant
- une augmentation de la résistance au cisaillement avec l'augmentation de la température (Houston et al. 1985, Kuntiwattanakul et al. 1995, Tanaka et al. 1996, Cekerevac et Laloui 2004) lorsque la dilatation des grains est prédominante.

L'évolution de la résistance au cisaillement vis-à-vis d'une variation de la température sera fonction de la minéralogie des composants solides, du volume et de la géométrie du réseau poreux, du degré de saturation, des possibilités de drainage et de l'amplitude de la variation de température.

II.2. Comportement thermo-hydrromécanique des sols saturés

La partie II.1 montre qu'une variation de la température conduit à une modification du volume des composants solides et liquides du sol. Cependant, en fonction de son histoire mécanique, ces modifications à l'échelle particulaire auront des conséquences différentes. Dans cette partie, les différences de comportements THM entre les matériaux à différents états de consolidation seront explicitées (II.2.1). Puis, l'effet de la succession de cycles de chauffage-refroidissement sera développé (II.2.2) avant de conclure sur les aspects qui font actuellement consensus dans la bibliographie (II.2.3).

II.2.1. Effet de l'état de consolidation sur le comportement THM des sols

De nombreuses études montrent que les matériaux normalement consolidés se contractent lors du chauffage et qu'une partie significative de cette déformation est irréversible (Hueckel et al. 1998, Di Donna et Laloui 2013, Shetty et al. 2019) (Figure II. 5). A l'inverse, les matériaux fortement surconsolidés se dilatent pendant le chauffage et cette déformation est en majeure partie récupérée pendant le refroidissement (Baldi et al. 1988). Les sols intermédiaires, légèrement surconsolidés, présentent une dilatation initiale puis une contraction en fin de chauffage, suivie d'une contraction au cours du refroidissement (Figure II. 5) (Baldi et al. 1988).

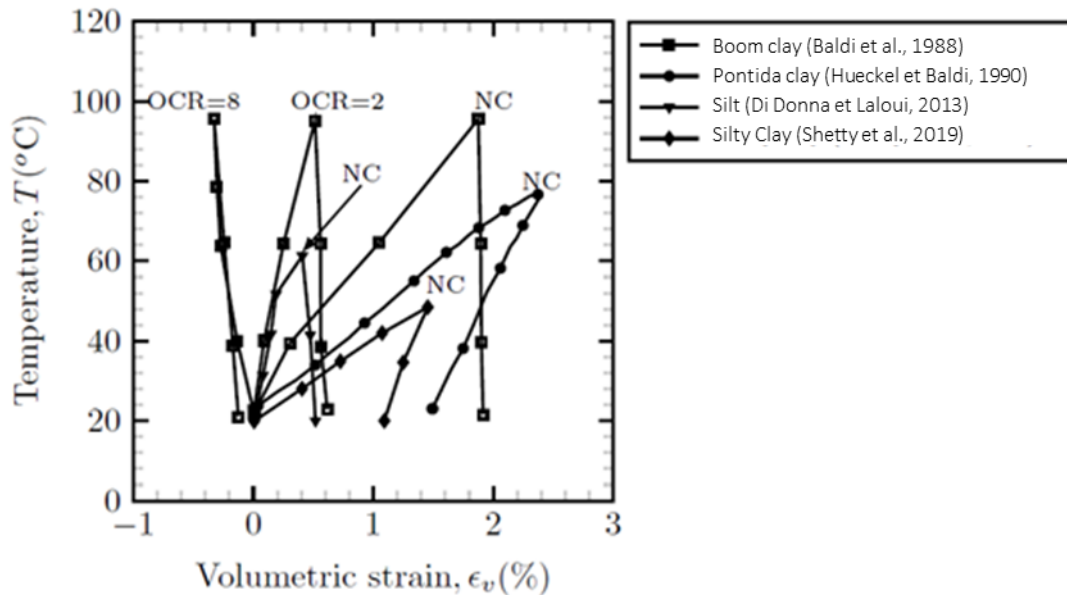


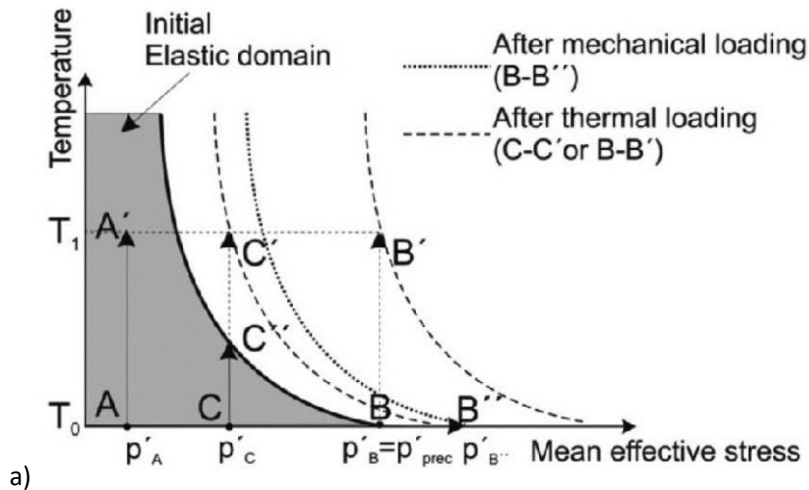
Figure II. 5 : Déformations volumiques mesurées lors d'un cycle de chauffage refroidissement pour différents sols à différents états de consolidation (OCR).

Laloui et Di Dona (2013) représentent la variation de la limite élastique dans un plan représentant la contrainte effective moyenne en fonction de la température pour schématiser ces évolutions (Figure II. 6) avec la contrainte effective moyenne définie comme suit :

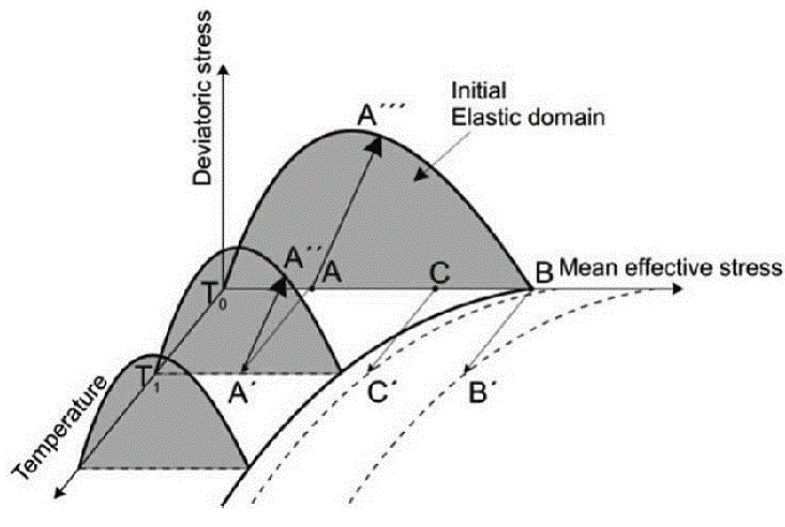
$$p' = \frac{\sigma'_v + 2 \times \sigma'_h}{3} \quad \text{Équation 5}$$

En Figure II. 6a, le domaine grisé correspond au domaine élastique, il est limité par la valeur de la contrainte de préconsolidation obtenue à chaque température. La contrainte de préconsolidation (p'_{prec}) diminue avec l'augmentation de la température, cela signifie qu'un matériau soumis à une augmentation de température atteindra sa limite élastique sous des contraintes plus faibles qu'un matériau similaire à plus faible température. Ce phénomène est nommé « thermal softening ».

Le point A en Figure II. 6 représente un matériau surconsolidé (p'_A inférieur à p'_{prec}) à une température initiale (T_0) soumis à un chauffage dans des conditions drainées et sous une contrainte effective moyenne constante p'_A . Dans ces conditions, la contrainte thermomécanique que subit l'échantillon, le long du chemin A à A', lui permet de rester à l'intérieur du domaine élastique (cas d'un OCR supérieur à 3). Dans ce domaine, la déformation élastique se traduit par une dilatation du matériau.



a)



b)

Figure II. 6 : a) Cadre théorique schématisé de l'évolution de la limite entre le domaine élastique en grisé et le domaine pseudo-élastique des sols chauffés (Laloui et Di Dona 2013) dans le plan contrainte effective moyenne-température et b) son extension en trois dimensions en considérant la contrainte déviatorique.

Si l'on considère un matériau normalement consolidé (point B) le chauffage induit une déformation élastoplastique dès que la température augmente car son état de contrainte se trouve à la frontière entre les deux domaines (chemin B-B'). En conséquence, la limite du domaine élastique se décale vers des contraintes plus élevées : le domaine élastique est désormais plus important. Ainsi, le chauffage d'un matériau NC engendre un écrouissage durcissant, le matériau résultant, plus dense, présente une limite élasto-plastique plus élevée.

Un matériau légèrement surconsolidé (point C) aura tout d'abord un comportement élastique (chemin C-C'') puis élastoplastique après avoir dépassé la limite du domaine élastique (chemin C''-C'). Ainsi, tant que la contrainte appliquée reste inférieure à la limite élastique, le matériau se dilate mais lorsque la limite élastique est franchie, un écrouissage durcissant se produit et conduit à une diminution du volume de l'éprouvette.

Les travaux de Vega (2012) précisent la limite entre le comportement dilatant et contractant en suivant le volume d'éprouvettes de limon de Bonny, compactées à un indice des vides initial de 0,51, au cours de l'application de cycles de chauffage-refroidissement. Les résultats montrent que le rapport de la déformation volumique par l'évolution de température appliquée diminue en fonction de l'OCR (Figure II. 7a). Le comportement contractant, observé aux OCR inférieurs à 2, laisse place à un comportement dilatant aux OCR les plus importants. Les données de Uchaipichat

et Khalili (2009) pour un limon saturé, montrent un comportement similaire mais la limite entre le comportement contractant et dilatant apparaît à un OCR de 4.

Afin de considérer un état de contrainte anisotropique, Laloui et Di Donna (2013) étendent leur modèle à l'état de contraintes triaxiales en introduisant une troisième variable, le déviateur (q) qui correspond à la différence entre la contrainte axiale (σ_1) et la contrainte radiale (σ_3). Ainsi, en Figure II. 6b, l'axe correspondant au déviateur q est ajouté à la représentation plane (plan p' - T) pour former un espace tridimensionnel. Cette représentation reflète la contraction du domaine élastique lorsque la température augmente. En conséquence, si un matériau surconsolidé est cisailé à une température élevée (chemin A'-A''), il atteindra la limite du domaine élastique pour une contrainte déviatorique plus faible en comparaison avec la température initiale.

II.2.2. Effet de cycles successifs chauffage/refroidissement

Lors de l'application de cycles successifs, les résultats obtenus par Vega (2013) sur des éprouvettes avec des OCR inférieurs à 2 montrent une accentuation de l'écroissage durcissant avec l'augmentation du nombre de cycles. Un comportement similaire a été observé par Di Donna (2014) sur des éprouvettes normalement consolidées (Figure II. 7b). Lors de la réalisation de cycles successifs de chauffage-refroidissement, le premier cycle occasionne des déformations irréversibles importantes tandis que les cycles suivants produisent des déformations irréversibles supplémentaires de moins en moins importantes au fur et à mesure des cycles, les auteurs évoquent un phénomène d'accommodation. D'autres exemples seront présentés en partie II.4.3.

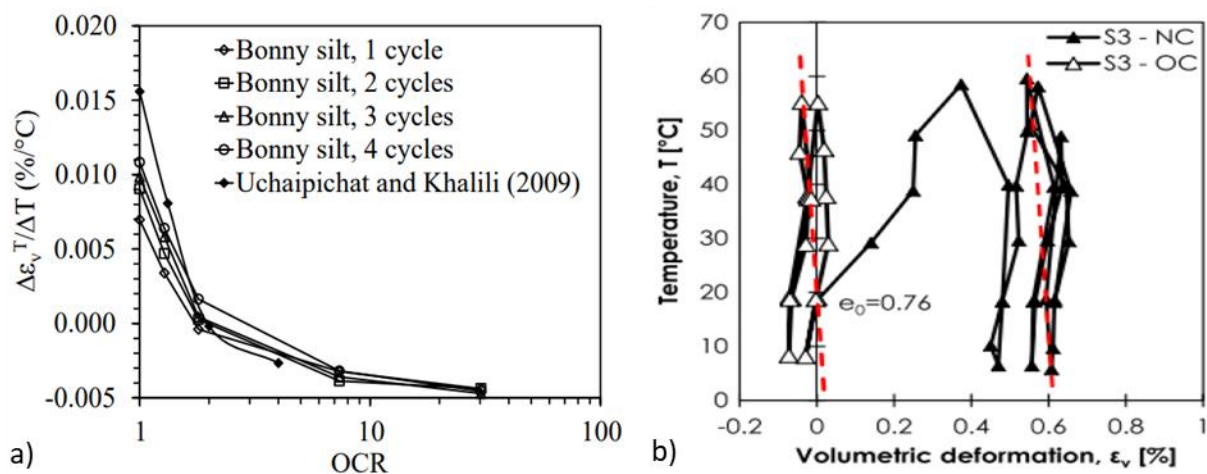


Figure II. 7 : Déformation volumétrique d'éprouvettes de sols soumises à des cycles de chauffage-refroidissement, essais œdométriques thermo-régulés réalisés sur a) le limon de Bonny (McCartney et al. 2014), b) un sol silto-argileux (Di Donna 2014).

Di Donna et Laloui (2015) proposent un modèle couplé pour les sols soumis à un chargement thermomécanique représenté en Figure II. 8a et b. La Figure II. 8a représente ce modèle dans l'espace ε_{vp} , q , p' et montre l'influence de l'augmentation de la température ($T_0 < T_1 < T_2$) sur la diminution de la surface de charge (domaine élastique). Cette figure montre également qu'un écroissage durcissant se met en place avec l'augmentation de la densité du sol. La Figure II. 8b représente le modèle dans l'espace T , q , p' (cohérent avec la Figure II. 6b). La taille du domaine élastique diminue avec l'augmentation de la température (thermal softening). La réponse globale du sol sous une charge thermomécanique est une combinaison de ces deux effets couplés.

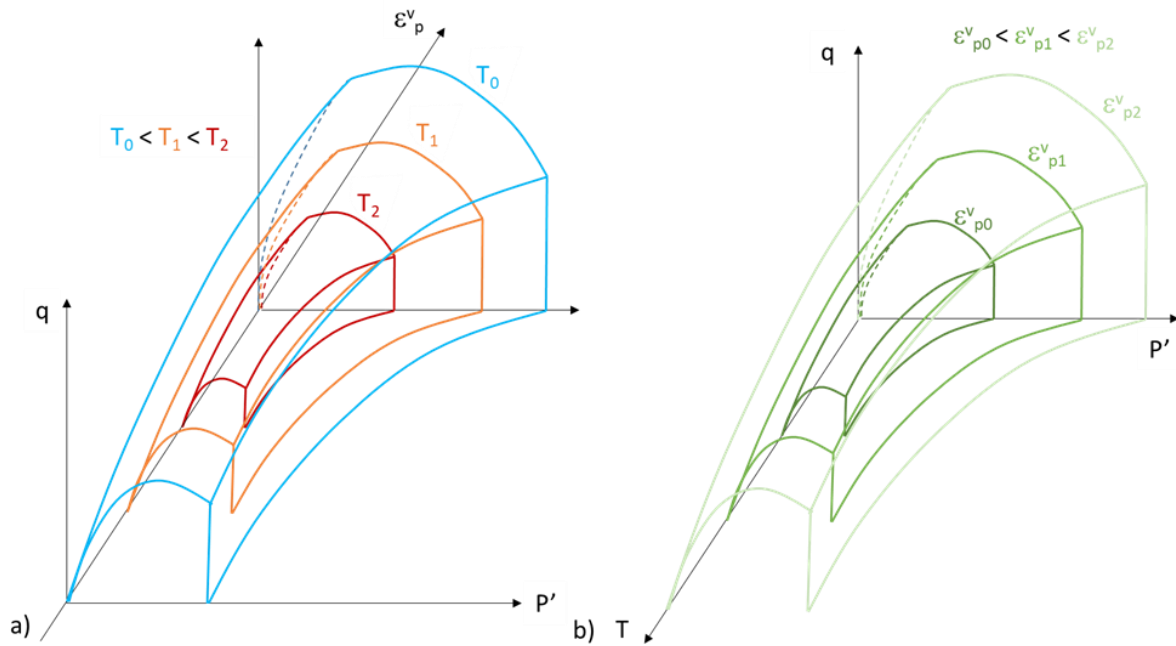


Figure II. 8 : Représentation graphique a) de l'écroissage durcissant qui se produit lors de la contraction d'une éprouvette à différentes températures et b) de la contraction du domaine élastique lors de l'application d'une augmentation de température pour différents états initiaux (modifié de Di Donna et Laloui, 2015).

Par ailleurs, avec ce modèle, les auteurs étudient le phénomène d'accommodation, c'est-à-dire l'accumulation de déformations plastiques au cours des cycles de chauffage-refroidissement successifs effectués entre des températures maximales et minimales constantes jusqu'à stabilisation. Pour cela, un paramètre r_{iso} est introduit afin de réinitialiser la limite d'élasticité à chaque fois qu'une déformation plastique a lieu.

$$r_{iso} = r_{iso}^{cyc} + \frac{p'}{p_c} \quad \text{Équation 6}$$

Où r_{iso}^{cyc} est un paramètre du matériau qui décrit sa capacité à accumuler les déformations plastiques lors de cycles de chauffage/refroidissement successifs. La surface de charge est définie selon ce paramètre :

$$f_{iso} = p' - p_c r_{iso} \quad \text{Équation 7}$$

Ainsi, lors d'une phase de chauffage, r_{iso} reste constant tant que la surface de charge réinitialisée n'est pas atteinte. Les déformations plastiques ne débuteront que lorsqu'une température, appelée \tilde{T} est atteinte. Cycle après cycle, \tilde{T} augmente et finit par égaler T_{max} . A partir de cet instant, les cycles suivants n'occasionneront plus de déformation plastique d'origine thermique supplémentaire.

Ainsi, la Figure II. 9 représente la réponse du modèle lors de l'application successive d'un chauffage-refroidissement-chauffage à une éprouvette surconsolidée soumise à une contrainte effective p' constante. Lors du premier chauffage, la réponse est tout d'abord une dilatation thermoélastique puisque la contrainte initiale est inférieure à la contrainte de préconsolidation (Figure II. 9a). Mais, dans le même temps, la limite élastique se décale vers la gauche. Ainsi, à une température T_1 , la limite élastique est atteinte et une contraction plastique (écroissage durcissant) se produit si le chauffage se poursuit jusqu'à la température T_2 (Figure II. 9b). Lors du refroidissement du matériau ($T_3=T_0$), une contraction thermoélastique se produit puisque l'état de contrainte appliqué reste dans le domaine élastique du matériau écroui (Figure II. 9c). Lors du chauffage suivant, le domaine

élastique se contracte à nouveau et une nouvelle déformation plastique ne sera observée que si la limite du domaine élastique est dépassée (Figure II. 9d).

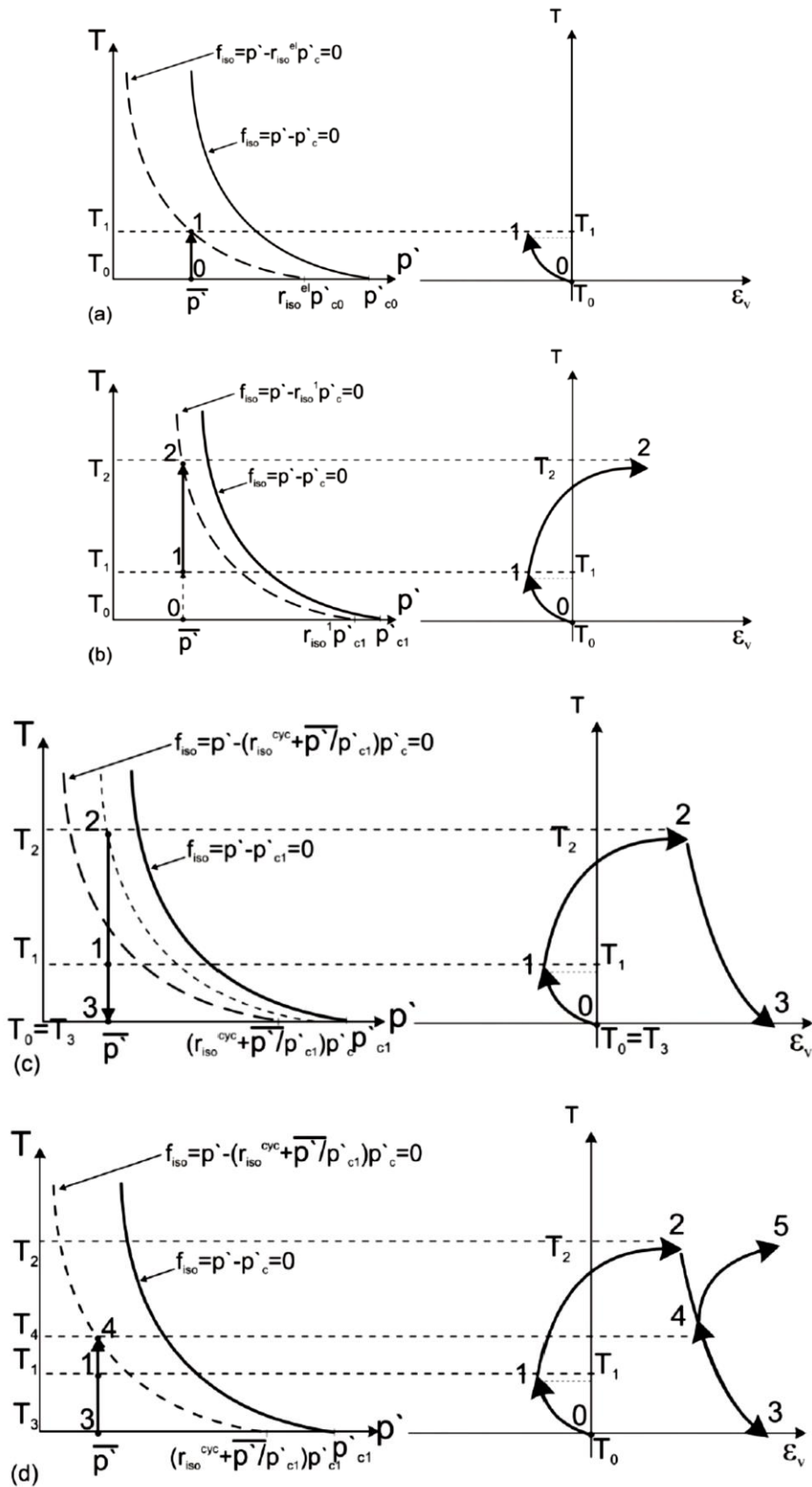


Figure II. 9 : Modélisation ACMEG-T du comportement volumétrique d'un sol surconsolidé soumis à une succession de chauffage, refroidissement puis réchauffage sous une contrainte constante (Di Donna, 2014).

II.2.3. Conclusion

Les conséquences d'une variation de température sur le volume du sol sont donc liées aux paramètres constitutifs vus précédemment : la minéralogie, l'état de saturation, les capacités de drainage ; mais également de son état de consolidation. Si la contrainte appliquée lors du chauffage est inférieure à la contrainte de préconsolidation (état surconsolidé), le volume du matériau augmente en cohérence avec la dilation thermique des constituants. Cette augmentation de volume s'accompagne d'une diminution de l'étendue du domaine élastique du matériau illustrée dans la bibliographie (thermal-softening). Lorsque la contrainte mécanique appliquée est proche ou égale à la contrainte de préconsolidation (matériau faiblement surconsolidé ou normalement consolidé), la contrainte thermique se superpose à la contrainte mécanique, sa structure évolue et son volume global diminue. Le matériau ainsi contracté est mécaniquement plus compétent (écrouissage durcissant). Cette réorganisation est facilitée par la faible viscosité de l'eau qui facilite le déplacement des grains. Cependant, comme tout phénomène de consolidation, sa durée est fonction de la conductivité hydraulique du matériau et la longueur du chemin de drainage, elle est donc dépendante du temps.

Un exemple de l'effet de variations monotones puis cycliques de la température sur les propriétés mécaniques d'un limon compacté et saturé sera développé en partie II.4.

II.3. Comportement thermo-hydrromécanique des sols non-saturés

II.3.1. Succion développée dans les sols non saturés

Les sols non saturés présentent des caractéristiques particulières en lien avec la présence d'air dans les pores. La capacité des sols non saturés à attirer et retenir l'eau est quantifiée par la détermination des courbes de rétention d'eau qui représentent l'évolution de la succion en fonction de la teneur en eau du matériau (Figure II. 10a). La succion correspond à la quantité de travail par unité de volume d'eau pure, nécessaire pour transporter de façon réversible, isotherme, à altitude constante et à la pression atmosphérique, une quantité infinitésimale d'eau depuis un état d'eau pure loin du sol, à celui d'eau interstitielle dans le sol. Les succions sont donc très faibles à proximité de la teneur en eau de saturation. En revanche, elles peuvent atteindre des valeurs très importantes (plusieurs MPa) à proximité de l'état sec. Les valeurs sont particulièrement élevées pour les matériaux argileux puisque la charge négative des feuillets conduit à une attraction accrue d'une partie de l'eau interstitielle, on parle d'eau liée. La teneur en argile et la microstructuration des matériaux (densité, tailles et distribution des pores) influencent l'importance de l'hystérèse entre les chemins de séchage et de remouillage. En effet, lors du séchage d'un matériau, l'eau contenue dans les pores les plus volumineux et les plus accessibles sera évaporée avant la mobilisation de l'eau contenue dans les pores de petites tailles. Le phénomène inverse se produira au cours du chemin de réhumidification.

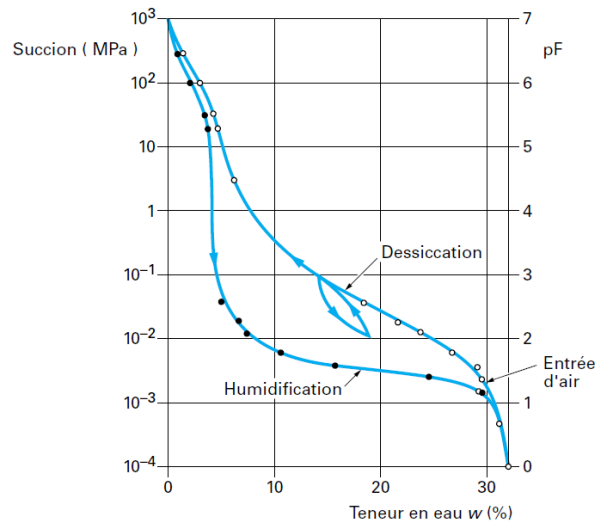


Figure II. 10 : a) Courbe de rétention d'un sable argileux par Delage et Cui (2000).

II.3.2. Caractérisation THM des sols non saturés

La caractérisation en laboratoire des matériaux non saturés nécessite un appareillage pouvant maintenir l'état de saturation au cours de l'application de la charge et des variations de température. La Figure II. 11 représente l'évolution du volume de l'éprouvette sous chargement isotrope ou œdométrique en fonction de la pression effective appliquée ($p - u_a$) pour deux états de saturation différents. A l'état saturé ($s=0$), la contrainte de préconsolidation du sol (point 3, p^*_0) est plus faible qu'à un état non saturé (point 1, p_0) et la pente plastique est plus pentue (λ_0 est supérieur à λ_s). La position relative des deux courbes induit qu'une réhumidification d'un sol non saturé s'accompagne d'un gonflement si la contrainte appliquée est inférieure à p^*_0 ou d'un effondrement sous de fortes contraintes.

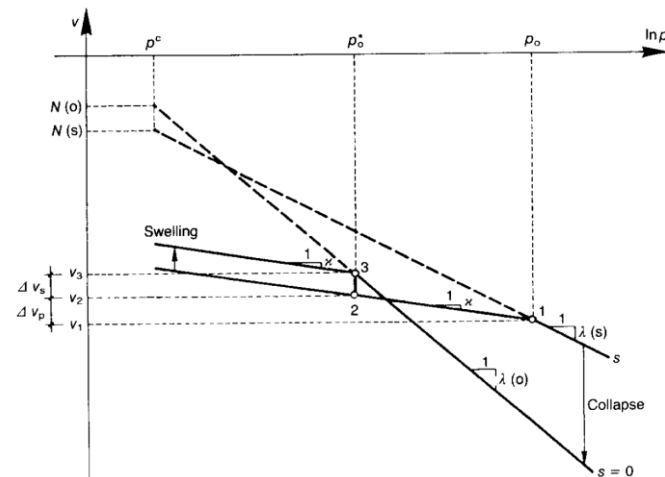


Figure II. 11 : Courbe de compression pour un sol saturé et un sol non saturé (Alonso et al. 1990)

Pour modéliser ce comportement hydromécanique, le modèle élasto-plastique de Alonso et al. (1990) propose deux surfaces de charge dans le plan ($s, p - u_a$) dans le cas d'un chargement isotrope ou œdométrique : la surface *SI* (Suction Increase) représente la limite de plastification due à l'augmentation de la suction et la surface *LC* (Loading Collapse) représente la limite de plastification due à l'augmentation de la contrainte (Figure II. 12). Ce modèle est étendu à l'état de contraintes triaxiales en cohérence avec le modèle de Cam - Clay modifié à l'état saturé (plan p - q).

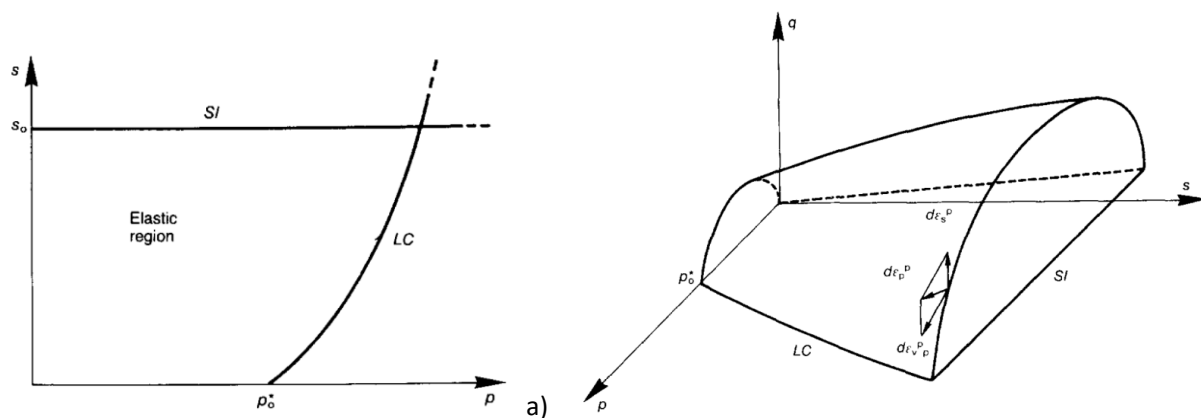
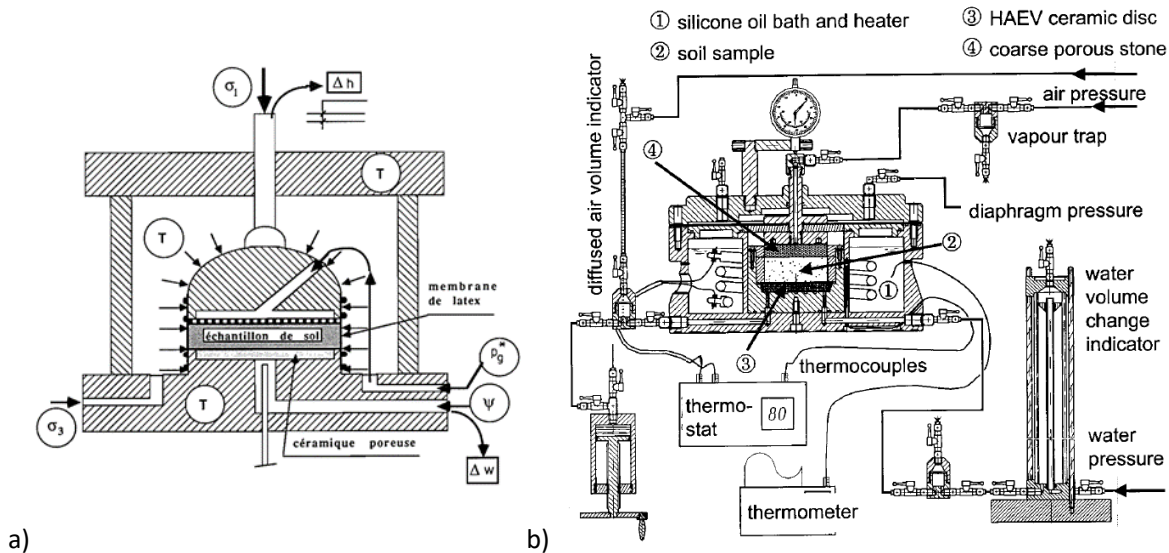


Figure II. 12 : a) Surface de charge dans le plan $(p-s)$, b) vue tridimensionnelle du modèle de Alonso et al. (1990).

II.3.3. Caractérisation THM des matériaux en laboratoire

Les premiers prototypes de cellules d'essais mécaniques permettant un contrôle des températures et des succions apparaissent dans les années 1990. La cellule de Saix et Jouanna (1990) a permis de réaliser des essais de consolidation thermique sur des éprouvettes de 7 cm de diamètre et 1,5 cm de hauteur (Saix, 1991) avec une incertitude sur la mesure de la teneur en eau de 1 à 1,5%. (Figure II. 13a). Le montage expérimental développé par Romero et al. (1995) à l'Université technique de Catalogne (Espagne) et largement utilisé ensuite (Romero et al. 2001, Romero et al. 2003) est présenté en Figure II. 13b. Il permet d'appliquer à des éprouvettes de 5 cm de diamètre pour 1 cm de haut, des succions jusqu'à 0,45 MPa et des températures de 22 à 80°C. Le contrôle de la succion est réalisé selon la méthode de la translation d'axe. Pour cela, la pression atmosphérique environnant l'échantillon est artificiellement augmentée tandis que la partie basse de l'éprouvette reste en contact avec de l'eau via une céramique poreuse. Un dispositif de mesures des échanges d'eau au travers de la céramique est mis en place pour suivre l'évolution de la teneur en eau de l'éprouvette. La cellule est plongée dans un bain d'huile thermostaté pour le contrôle de la température. Cet équipement permet d'appliquer des paliers de chargement en maîtrisant de façon indépendante, la charge verticale, la succion et la température. Cependant, la méthode de translation d'axe reste complexe à maîtriser, surtout à proximité de l'état de saturation pour lequel la phase gazeuse peut devenir discontinue (Romero et al. 2003). Une attention particulière est également nécessaire pour éviter l'apparition d'un gradient de teneur en eau dans l'épaisseur de l'échantillon du fait de déperditions d'humidité et ce malgré la faible épaisseur de l'échantillon (1 cm).



a) Figure II. 13 : a) Cellule triaxiale thermique développée par Saix et Jouanna (1990), b) Montage expérimental permettant la réalisation d'essai mécanique à température et succion contrôlées (Romero et al. 1995, reproduit par Romero et al. 2001).

D'autres solutions sont possibles pour maîtriser la succion dans l'échantillon. En 2007, à l'Institut Navier de Paris, Tang et al. ont développé une cellule d'essai adaptée à des éprouvettes de 8 cm de diamètre pour 1cm de haut, là encore principalement dédiée aux sols gonflants (Figure II. 14a). La régulation de la succion est assurée par la présence de solutions salines sursaturées placées dans une chambre sous l'éprouvette (technique de contrôle par phase vapeur, Delage, 2000). L'ensemble est placé dans un bain thermo-régulé. Cette méthode permet de couvrir une large gamme de succions à conditions de connaître les succions imposées par les solutions salines en fonction de la température. Par exemple, trois succions ont pu être testées par Cui et al. (2011) avec cet appareillage : 9 MPa (KNO_3 à 25°C et K_2SO_4 à 60°C) ; 39 MPa ($NaCl$ à 25°C et 60°C) et 110 MPa (K_2CO_3 à 25°C et $MgNO_3$ à 60°C). L'équipe a également développé une cellule similaire permettant de réguler la succion via la circulation d'un flux d'air humide dans la partie inférieure de la cellule (technique de contrôle osmotique, Tang et al. 2007). Un contrôleur pression-volume applique une pression de confinement et permet de déduire l'évolution du volume de l'éprouvette mais sans mesure directe. Uchaipichat (2005) propose une revue très complète des différents appareillages développés pour réaliser des essais thermo-hydomécanique couplés.

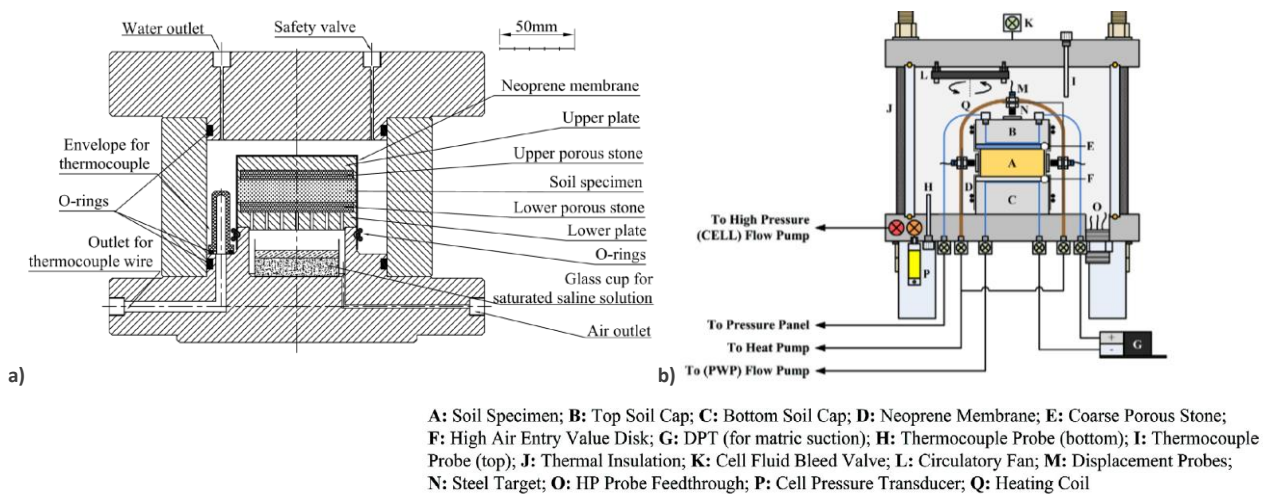


Figure II. 14 : a) Cellule d'essais isotropiques avec contrôle de la succion et de la température (Tang et al. 2007). B) cellule pour essais isotropes thermostérés (Coccia et McCartney, 2016).

Toutefois, dans ces études, la géométrie de l'échantillon, parfaitement adaptée aux matériaux argileux, peu poreux, n'est pas recommandée pour l'étude de matériaux plus perméables tels que les limons. En effet, étant donné la taille des pores rencontrés dans les sols compactés, une épaisseur d'au moins deux centimètres est recommandée. La cellule de Coccia et McCartney (2016) permet de réaliser des essais sur des éprouvettes de 7,1 cm de diamètre et 2,5 cm de haut, comparables aux éprouvettes œdométriques (Figure II. 14b). La succion matricielle est contrôlée par la méthode de la translation d'axe. Préalablement aux essais, l'échantillon est placé sous vide d'air afin de désaérer le sol et d'assurer une bonne étanchéité de la membrane néoprène périphérique. Des capteurs de déformations axiaux mais aussi radiaux, placés autour de l'éprouvette, permettent de rendre compte de l'évolution du volume de l'éprouvette. La cellule est ensuite emplie d'huile et la pression est appliquée à l'aide d'une pompe (jusqu'à 10 MPa maximum). La circulation d'un fluide thermo-régulé dans un tube de cuivre de 6,3 mm de diamètre placé autour de l'éprouvette permet de modifier la température de l'échantillon via une pompe à chaleur en maîtrisant la vitesse de variation de la température (généralement 0,3°C/h). Coccia et McCartney (2016) ont notamment utilisé cette cellule pour la caractérisation du limon de Bonny prélevé dans la province de Yuma à la frontière entre le Kansas et le Colorado à des températures de 20 à 70°C, des succions de matricielles de 10 à 40 kPa et des contraintes totales de 0 à 1 MPa.

En 2009, Uchaipicha et Khalili présentent une cellule d'essai permettant de réaliser des essais triaxiaux à des températures de 25 à 60°C et des succions de 0 à 300 kPa (Figure II. 15). La méthode de la translation d'axe est utilisée pour le contrôle de la succion et un élément chauffant associé à un agitateur permet de réguler la température de l'eau baignant l'échantillon. Pour éviter les pertes d'eau lors du chauffage, un contrôleur d'humidité est installé entre la cellule et le régulateur de pression d'air. L'ensemble est régulé à la même température que la cellule. Les déformations de l'éprouvette sont suivies par analyse d'image. L'article présentant les résultats obtenus avec cette méthode (Uchaipicha et Khalili, 2009) fait figure de référence avec 132 citations en revue en 2021. Afin de poursuivre nos travaux sur le comportement THM couplé des sols compactés, une géométrie comparable à celle utilisée par Uchapichat et Khalili (2009) pourrait être envisagées. L'utilisation de ces méthodes ont permis d'améliorer considérablement la compréhension du comportement THM des sols non saturés. La partie III.3.4 résume les principaux résultats obtenus.

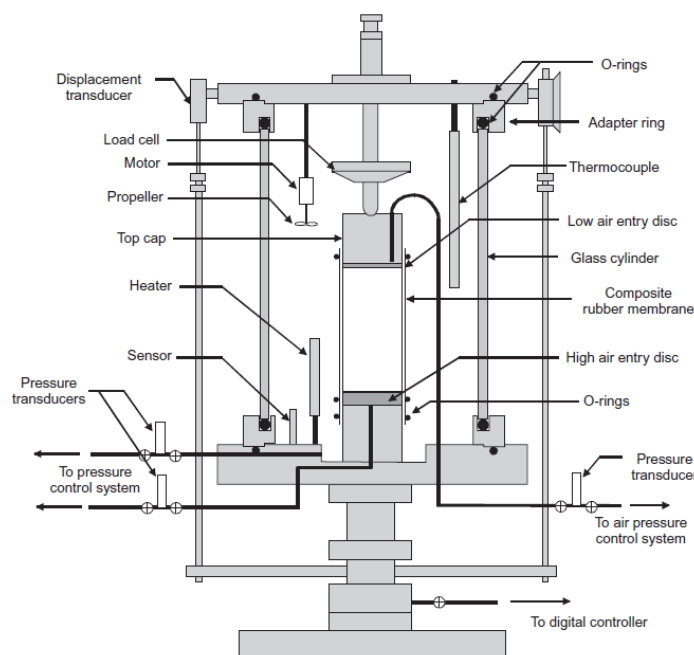


Figure II. 15 : Cellule de Bishop-Wesley modifiée par Uchapichat et Khalili (2009).

II.3.4. Effet d'un changement de température sur le comportement hydromécanique des sols non saturés

Lors d'une augmentation de température, la dilatation des grains conduit à une légère diminution du volume des pores, tandis que l'eau dilatée occupe un volume plus important. Ainsi, lors d'une augmentation de la température, le degré de saturation du sol augmente légèrement. McCartney et al. (2014) évoquent alors un degré de saturation apparent. Le comportement mécanique du sol en sera donc affecté dans le sens d'une diminution de la succion et la saturation est atteinte à une teneur en eau plus faible lorsque le sol est chauffé. Cette évolution peut expliquer la légère translation de la courbe de rétention lors d'une augmentation de température (voir par exemple la Figure II. 16 de Romero et al. 2003).

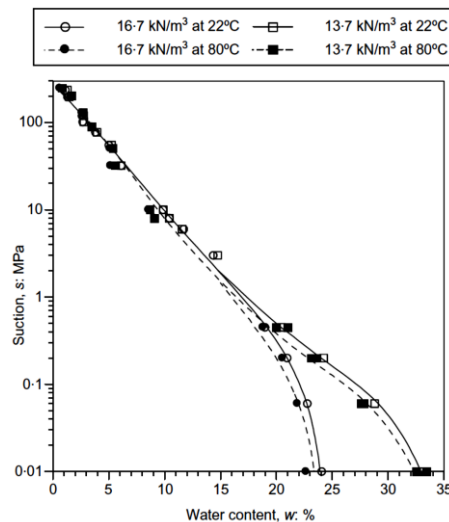


Figure II. 16 : Courbes de rétention d'eau obtenues en humidification par Romero et al. (2003) sur de l'argile de Boom compactée à deux poids volumiques différents et deux températures.

Wiebe et al. (1998) ont réalisé une série d'essais triaxiaux sur des éprouvettes composées d'un mélange de sable et de bentonite à différents degrés de saturation (50 à 100%) et à 3 températures (26, 65 et 100°C). L'augmentation du degré de saturation apparent peut expliquer la très faible variation de la résistance au cisaillement pour des états proches de la saturation ($S_r = 98\%$) lorsque la température évolue de 26° à 100°C (Figure II. 17a). Aux états de saturation plus faibles, la résistance au cisaillement augmente en comparaison avec l'état saturé et ce, quelle que soit la température appliquée. Cependant, en comparant les contraintes déviatoriques à la rupture (q_f) obtenues à des états de contraintes équivalents et à des degrés de saturation identiques, il est intéressant de noter que q_f 65°C est inférieure à q_f 26°C et que cette tendance se confirme à 100°C. L'augmentation de la température conduit donc à une diminution de la résistance au cisaillement pour les degrés de saturation les plus faibles (80 et 50 %) qui doit être prise en compte pour le dimensionnement des géostructures réalisées dans des sols susceptibles de subir des variations de température.

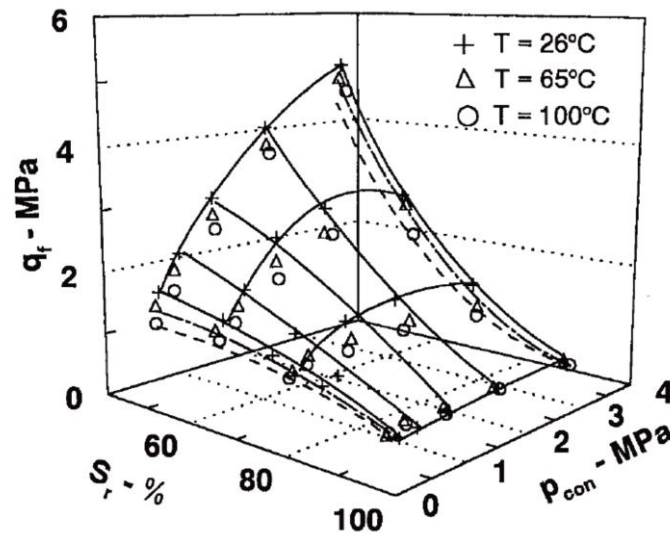


Figure II. 17 : a) Surfaces limites établies par Wiebe et al. (1998) rassemblant les résultats d'essais de compression triaxiale (contrainte de confinement P_{con} et contrainte déviatorique au pic q_f) réalisés sur un mélange sable-bentonite à différentes températures (T) et différents états de saturation (S_r).

D'autres propriétés mécaniques sont impactées lors d'une variation de température, de façon différente en fonction de leur état de saturation comme l'attestent les résultats des essais triaxiaux réalisés par Uchaipichat et Khalili (2009) sur des éprouvettes de limon compactés. Comme expliqué en partie II.2, à l'état saturé, la contrainte de préconsolidation (p'_{prec}) diminue légèrement lors d'une augmentation de température. Ainsi, sur la Figure II. 18a, lorsque la succion matricielle est nulle (état saturé), p'_{prec} à 25°C est supérieure à la valeur à 40°C, elle-même supérieure à la valeur à 60°C. Pour des états proches de la saturation, la contrainte de consolidation n'est pas affectée. En revanche, pour des succions plus importantes, au-delà du point d'entrée d'air, une nette augmentation de la contrainte de préconsolidation est mesurée (Figure II. 18a). Sous 300 kPa de succion matricielle, les différences entre les p'_{prec} sont plus marquées qu'à l'état saturé.

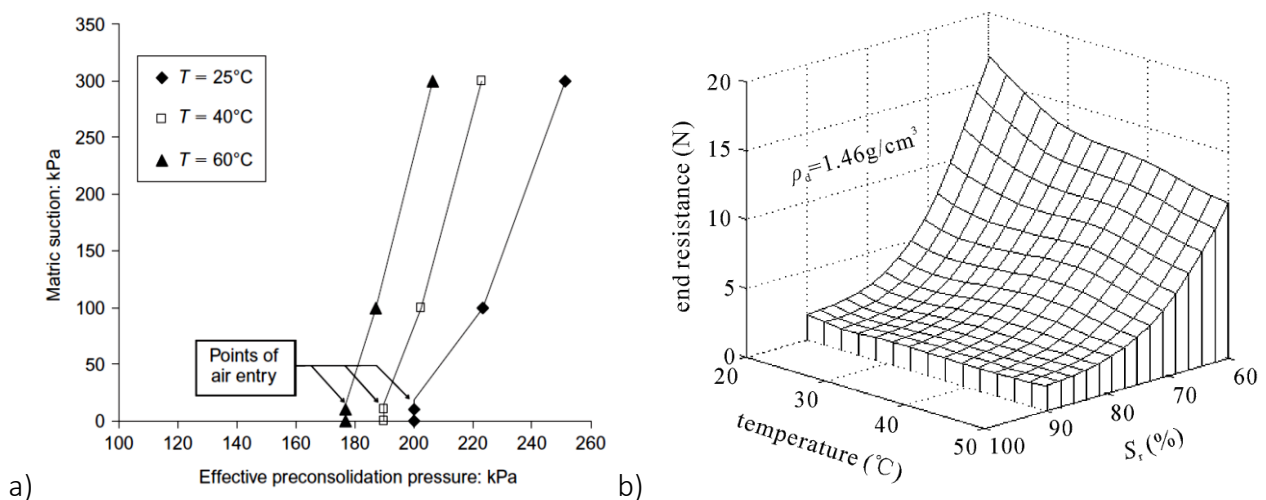


Figure II. 18 : a) Evolution de la contrainte de préconsolidation d'éprouvettes de limon compactées en fonction de la succion matricielle à différentes températures obtenues par Uchaipichat et Khalili (2009) à l'aide de cellules triaxiales modifiées. b) Surface tridimensionnelle des valeurs de résistance ultimes obtenues par Gu et al. (2014) à l'aide d'essai mini-pénétrométriques thermo-régulés.

Gu et al. (2014), ont réalisés des essais micro-pénétrométriques sur des matériaux argileux surconsolidés à différentes températures (Figure II. 18b). Ils obtiennent également une forme plate de leur courbe à des états proches de la saturation (S_r supérieur à 90%). A ces états proches de la saturation, l'augmentation de température de 20 à 50°C ne semble pas modifier la résistance en pointe obtenue. En revanche, aux plus faibles degrés de saturation, par exemple à 60%, la résistance en pointe diminue de 17 N à 20°C à 12 N à 50°C. Ainsi, pour ce degré de saturation, l'augmentation de la température du matériau diminue significativement la résistance en pointe.

Romero et al. (2003) ont également observé une augmentation de l'indice de compression (C_c) aux températures les plus importantes (80°C) lors de la réalisation d'essais de compressibilité à l'œdomètre thermo-régulé sur des éprouvettes d'argile compactées non saturées (jusqu'à 0,45MPa de succion) à deux densités différentes (Figure II. 19). Des phénomènes à l'échelle microscopiques sont évoqués pour l'expliquer : la diminution de la viscosité de l'eau induirait une diminution de la tension superficielle de l'eau présente dans les pores entre les particules solides ce qui faciliterait la déformation du matériau (Coccia et McCartney 2016). Ce même phénomène expliquerait également la diminution du frottement lors de l'insertion d'une pointe dans le matériau (Gu et al. 2014).

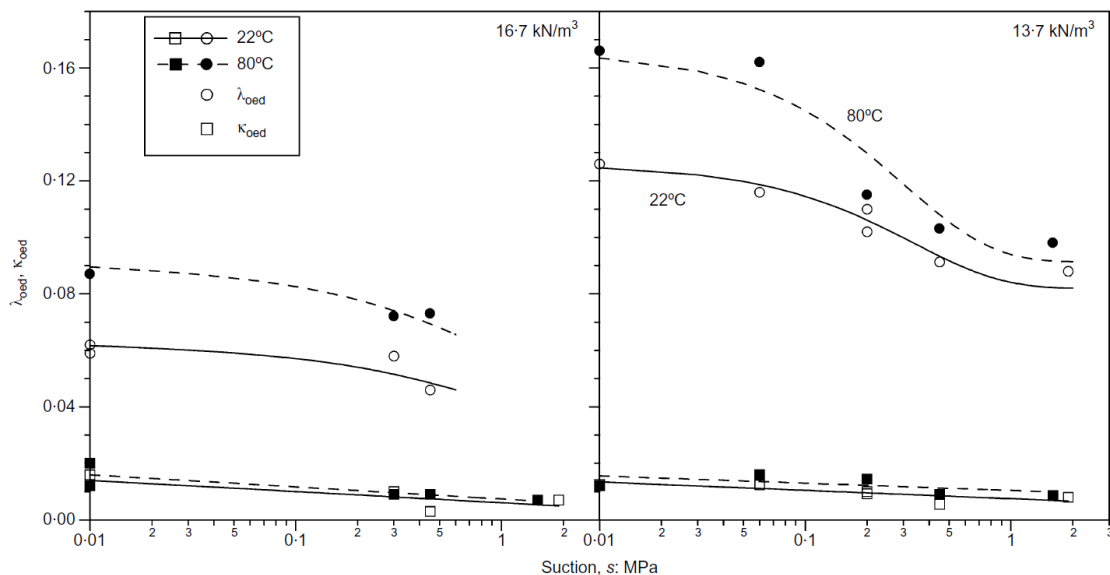


Figure II. 19 : Variation en fonction de la température du coefficient $\kappa_{\text{œd}}$ caractérisant la déformation élastique pré-seuil d'un essai œdométrique et $\lambda_{\text{œd}}$ caractérisant la déformation plastique post-seuil pour des essais de compressibilité réalisés sous différentes succions et deux températures (Romero et al. 2003). Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes préparées à deux densité ($\gamma_d = 16,7$ et $13,7 \text{ kN/m}^3$)

II.3.6. Conclusion

Les résultats disponibles dans la bibliographie posent les bases de la compréhension du comportement thermo-hydrromécanique des sols non saturés dans l'intervalle de température de 20° à 60°C mais de nombreux aspects comme la réversibilité des déformations lors de l'application des cycles thermo-hydrriques nécessitent la poursuite des études. De plus, le refroidissement des matériaux à des températures inférieures à 20 °C sont très peu investiguées. Actuellement, seules quelques équipes de recherche sont équipées de dispositifs expérimentaux permettant ces mesures à l'échelle de l'éprouvette (Romero et al. 2001, Tang et al. 2007, Uchapichat et Khalili 2009, Coccia et McCartney 2016). L'équipement de notre plateforme expérimentale en ce sens sera proposé dans le chapitre V dédié au projet scientifique.

II.4. Exemple de l'étude du comportement thermo-hydomécanique du limon de Plaisir

Au cours de la thèse de Mojdeh Lahoori (Lahoori, 2020), une campagne expérimentale a été mise en œuvre afin de caractériser l'effet de variations monotones puis cycliques de la température sur les propriétés mécaniques d'un limon compacté et saturé qui sera étudié en partie IV comme support potentiel de stockage de chaleur. Après la présentation de la préparation et de la caractérisation de ce limon en partie II.4.1. Les protocoles expérimentaux des essais œdométriques thermo-régulés et des essais de cisaillement thermo-régulés mis en œuvre dans l'intervalle de température de 1° à 50°C sont présentés en partie II.4.2. L'évolution du comportement volumétrique des éprouvettes lors de l'application des variations de température est développé en partie II.4.3, puis les évolutions des paramètres de compressibilité (II.4.4) et de cisaillement (II.4.5) sont présentées avant de conclure sur une discussion (II.4.6).

II.4.1. Préparation et caractérisation du limon de Plaisir

Le matériau d'étude est un limon de la région parisienne prélevé à Plaisir. Une quantité importante de matériau sec, fin (< 2 mm) et d'une bonne reproductibilité était nécessaire pour réaliser l'ensemble du programme d'essai envisagé sur ce matériau. Ainsi, 3,7 tonnes du matériau sec, référencé LP (limon de Plaisir), ont été préparé par séchage, broyage, tamisage puis quartage sur la Plateforme STEVAL de l'Université de Lorraine (Boukelia, 2016).

La distribution de la taille des grains du limon de Plaisir est évaluée par sédimentométrie (AFNOR, 1992) et par tamisage par voie humide. Le matériau est constitué de 41% de particules infra-80 µm et 20% de particules infra-2 µm (Figure II. 20a).

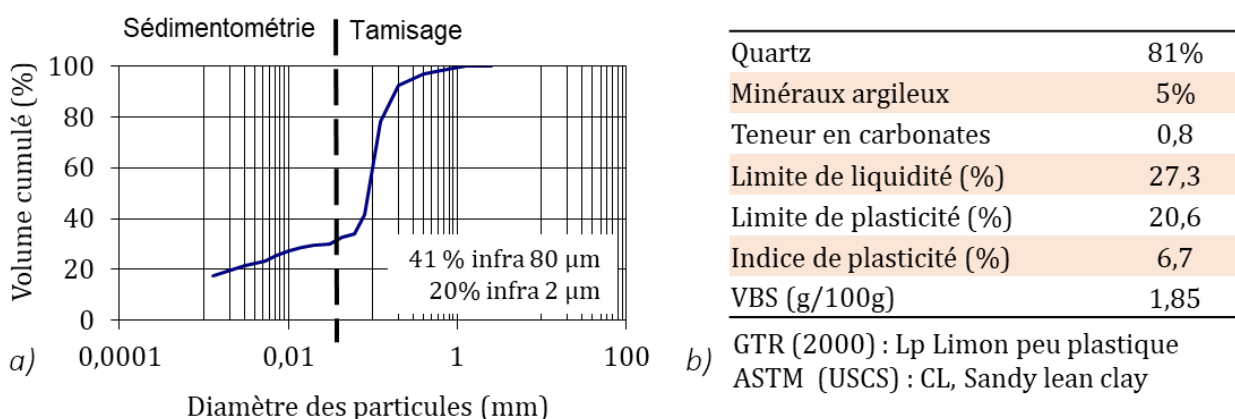


Figure II. 20 : a) Analyse granulométrique du matériau PL quarté et b) caractéristiques physico-chimiques.

Les résultats de la caractérisation physico-chimique du matériau sont présentés en Figure II. 20b. Ils comprennent les limites d'Atterberg (AFNOR, 1993), la surface spécifique (AFNOR, 1999) et la teneur en carbonate (AFNOR, 1996) (Figure II. 20b). Ces résultats permettent de classer ce matériau en tant que Limon Lp selon le GTR (2000) et comme un « Sandy Lean Clay » (CL) selon la normalisation américaine ASTM (USCS, 2017).

La caractérisation minéralogique du matériau brut a été réalisée par Diffraction de Rayons X. Le diffractomètre utilisé par Claude Fontaine (laboratoire Ic²mP, Université de Poitiers) est un PANalytical Xpert Pro équipé d'une source au cuivre ($\lambda_{CuK\alpha} = 1,541838 \text{ \AA}$) et monté en configuration θ/θ Bragg-Brentano (fentes antidivergence $1/4^\circ 2\theta$ et anti-diffusion $1/2^\circ 2\theta$) avec un système de

fentes de Soller (0,04 rd), et un filtre Ni. Le détecteur Xccelerator, de type détecteur solide, permet une acquisition simultanée sur un secteur angulaire de $2^{\circ}2\theta$. Les conditions analytiques sont : 40 kV, 40 mA. Le domaine angulaire appliqué est de 2,5 à $65^{\circ}2\theta$ pour les poudres avec un temps de comptage de 90s/ $2^{\circ}2\theta$. Pour les préparations orientées, le domaine est restreint, de 2,5 à $30^{\circ}2\theta$ avec un temps de comptage de 60s/ $2^{\circ}2\theta$.

Le matériau, préalablement broyé et tamisé à 50 μm , est disposé sur un support de façon à obtenir une poudre dans laquelle les cristallites diffractants sont désorientées. L'analyse des résultats montre que le cortège détritique est essentiellement quartzeux accompagné de feldspath potassique en petite quantité (Figure II. 21). Deux types de carbonates ont été détectés, de la calcite et de la dolomite ainsi que deux phases argileuses.

L'analyse des lames orientées montre que l'assemblage des minéraux argileux est relativement varié (Figure II. 22). Il contient un mélange d'illite et dans une moindre mesure des interstratifiés illite-smectite. Par ailleurs, après glycolation, le déplacement de la réflexion (001) de la smectite vers 17 \AA permet de mettre en évidence la présence d'une petite quantité de chlorite. De la kaolinite est détectée ainsi que de la goéthite à l'état de traces. L'analyse quantitative permet d'évaluer que le matériau est constitué à 81% de quartz, 5% de calcite, 7% de dolomite, 3% de feldspath et 5% de minéraux argileux de type illite et dans une moindre mesure de kaolinite.

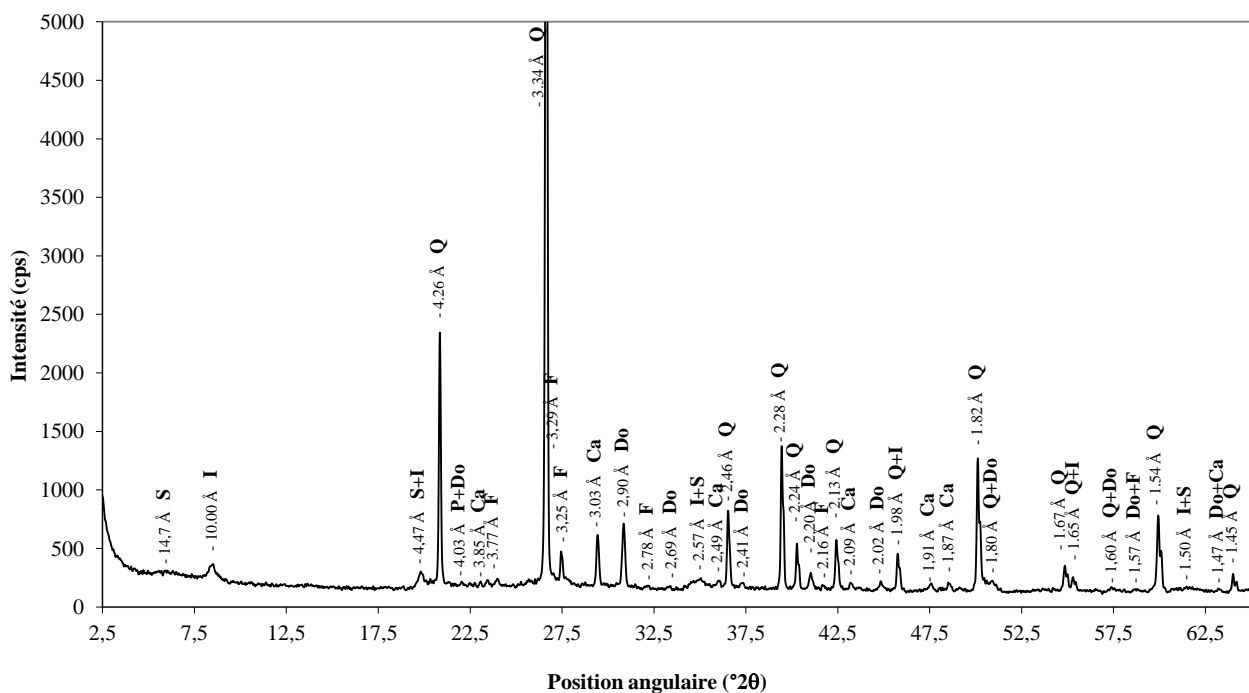


Figure II. 21 : Diffractogramme mode poudre de limonite de Plaisir (Ca : Calcite ; Do : Dolomite ; F : Feldspath potassique ; I : Illite ; Q : Quartz ; Sm : Smectite).

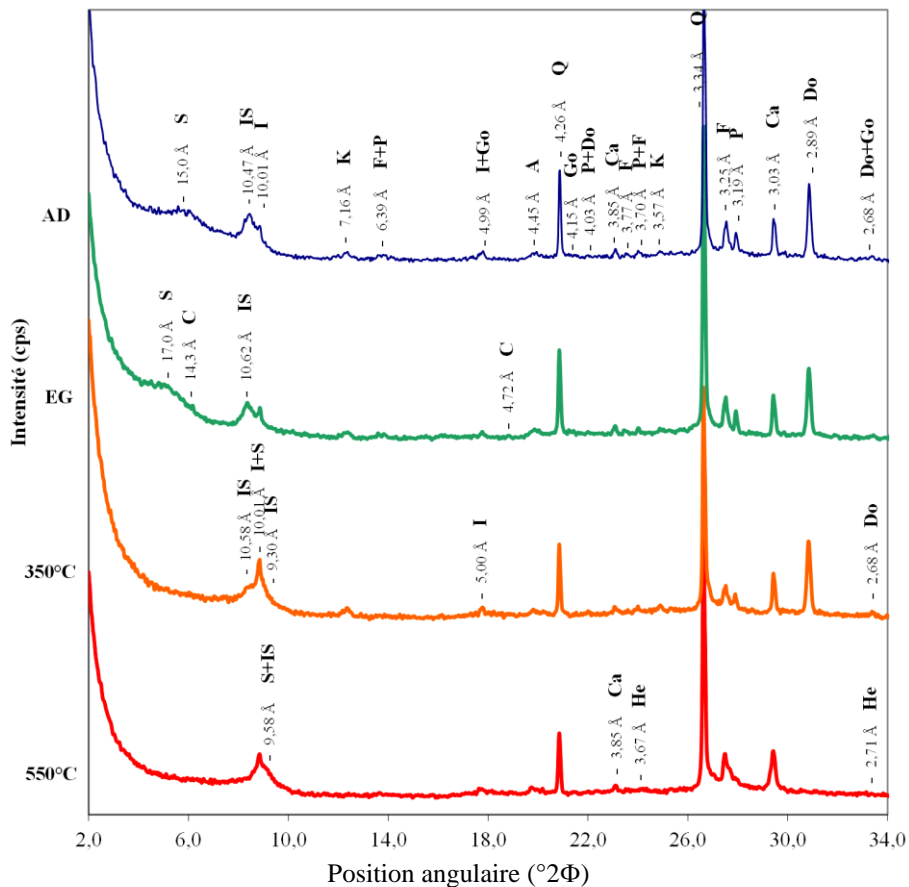


Figure II. 22 : Diffractogrammes des minéraux argileux de limon de Plaisir sur préparations orientées, séchée à l'air (AD), glycolée (EG) puis chauffée à 350°C et 500°C. (Ar : Minéraux argileux; C : chlorite; Ca : Calcite ; Do : Dolomite ; F : feldspath potassique; Go : Goethite ; He : Hématite ; I : Illite; IS : Interstratifié type illite-smectite ; P : Plagioclase; Q : Quartz; S : Smectite).

II.4.2. Essais de caractérisation géotechnique thermo-régulés

Cette partie décrit les instrumentations mises en œuvre afin de réaliser des essais œdométriques et de cisaillement dans des conditions thermo-régulées. Le mode de régulation de la température et la calibration en température des paramètres obtenus sont décrits pour chaque essai.

II.4.2.1. Essais œdométriques thermorégulés

Afin de déterminer les paramètres de consolidation et de compressibilité d'éprouvettes saturées soumises à des variations de température, des essais de chargement sont réalisés dans un œdomètre thermo-régulé (Figure II. 23). L'éprouvette est compactée dans une cellule cylindrique en acier inoxydable de 70 mm de diamètre et un piston est utilisé pour appliquer une contrainte verticale (bati Wille®). La déformation verticale de l'éprouvette est mesurée à l'aide d'un capteur analogique (LVDT : transformateur différentiel linéaire variable) d'une précision de 10^{-5} m. Pour imposer la température désirée, un thermorégulateur (Huber®) fait circuler un fluide caloporteur (eau glycolée) dans une spirale placée dans le corps de la cellule, autour de l'éprouvette (Figure II. 24b). Un thermocouple de type K, placé dans la partie inférieure de la cellule œdométrique permet de mesurer la température de l'éprouvette et de réguler le fonctionnement du thermorégulateur. Le système comprend également une cellule de mesure de la pression de l'eau interstitielle à la base de la cellule. Pour minimiser les pertes thermiques, la cellule est recouverte d'une enveloppe garnie de polystyrène. De plus, afin de maintenir un état de saturation constant pendant les essais,

une circulation d'eau continue traverse l'éprouvette au cours des essais. Préalablement aux essais, une calibration en température est réalisée (Figure II. 24c).

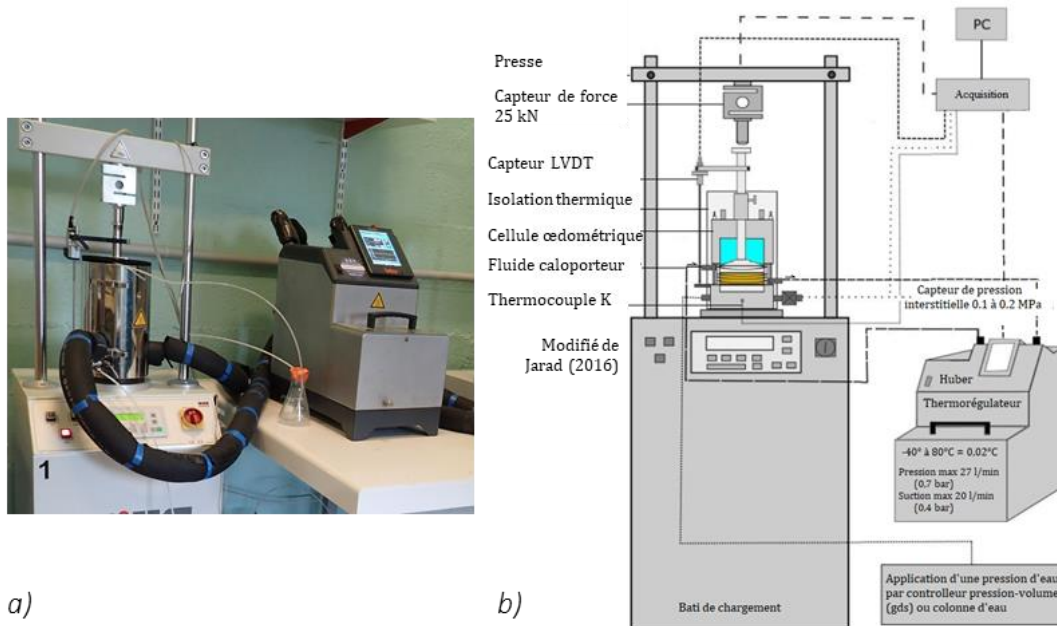


Figure II. 23 : a) photographie du banc œdométrique thermo-régulé et b) schématisation du banc d'essai œdométriques thermorégulés (modifié de Jarad, 2016)

L'essai consiste à appliquer des paliers de contrainte successifs à une éprouvette en suivant l'évolution de l'épaisseur en continu. Le calcul de l'indice des vides à la fin de chaque palier permet de tracer la courbe de compressibilité $e = f(\log \sigma')$ qui fait apparaître un premier palier de faible déformation. Puis, au-delà d'un seuil appelé la contrainte de préconsolidation (σ'_p), de plus fortes déformations sont enregistrées (pente C_c). Le déchargement de l'éprouvette permet de déterminer l'indice de décompression (C_s). Les modifications de température peuvent être appliquées à l'ensemble de l'essai, où seulement au cours d'un palier choisi. Il peut s'agir d'un chauffage, d'un refroidissement ou de plusieurs cycles. L'ordre d'application des sollicitations, c'est-à-dire si la contrainte mécanique est appliquée préalablement ou postérieurement à la modification de la température, peut avoir une influence sur les résultats obtenus.

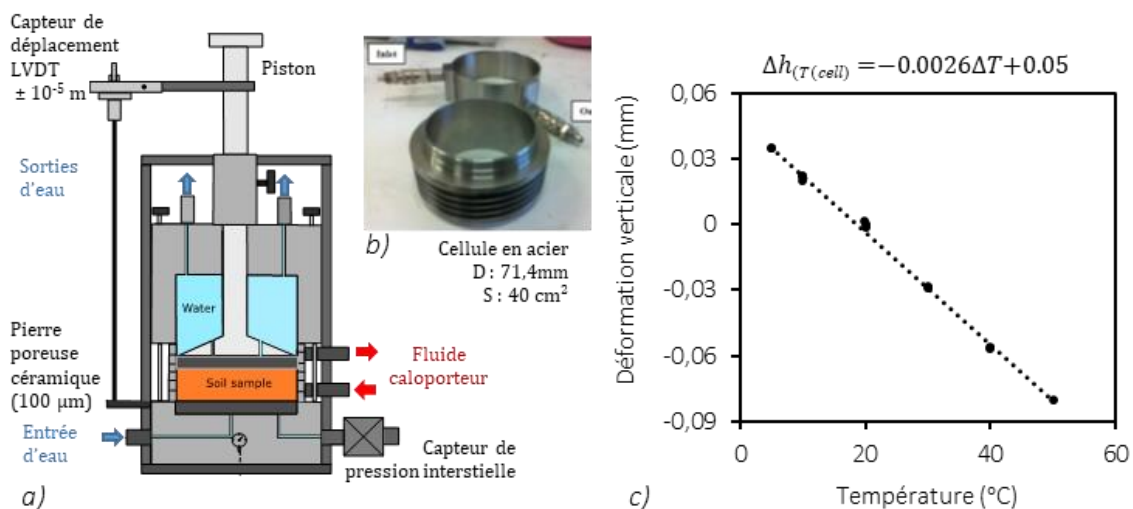


Figure II. 24 : a-b) détail de fonctionnement de la cellule œdométrique et c) courbe de calibration en température de la cellule d'essai.

II.4.2.2. Essais de cisaillement direct thermorégulés

Afin de déterminer la cohésion (c) et l'angle de frottement interne (φ) d'éprouvettes saturées soumises à des variations de température, des essais de cisaillement direct thermorégulés sont réalisés (Figure II. 25a). La température est régulée tout au long de l'essai grâce à la circulation d'un fluide caloporteur (eau glycolée) sous la partie inférieure de la cellule (thermorégulateur Huber®, Figure II. 25). Une force normale est appliquée puis, au cours de l'application de la force de cisaillement (bati Wille®), la variation de la hauteur (Δh) et le déplacement latéral (Δl) sont mesurés par des capteurs analogiques LVDT (Figure II. 26a, b). Préalablement aux essais, une calibration en température est réalisée (Figure II. 26c).

L'évolution de la contrainte de cisaillement (τ) est mesurée au cours de l'application des déplacements horizontaux. La valeur au pic ou à une valeur de déformation donnée est retenue pour chaque essai. A une température donnée, la réalisation d'essais sous différentes contraintes normales (σ) permet de tracer la droite de Mohr-Coulomb puis de déterminer les paramètres de cisaillement, c , la cohésion et φ , l'angle de frottement interne :

$$\tau = \sigma \cdot \tan \varphi + c$$

Équation 8

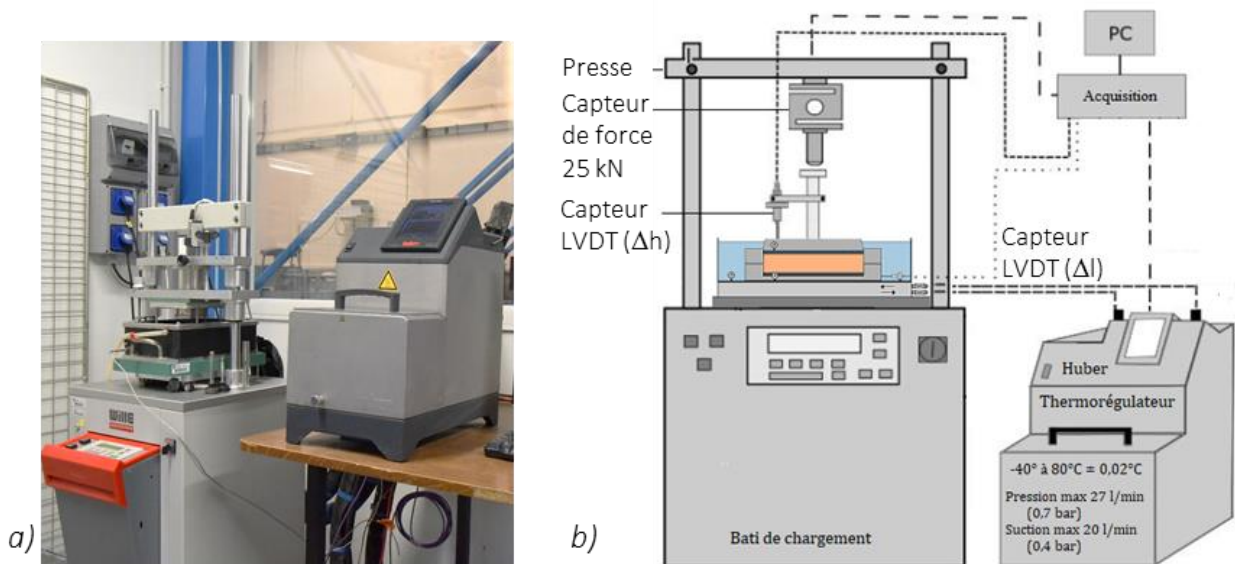


Figure II. 25 : a) Photographie et b) schématisation du banc d'essai de cisaillement thermorégulés

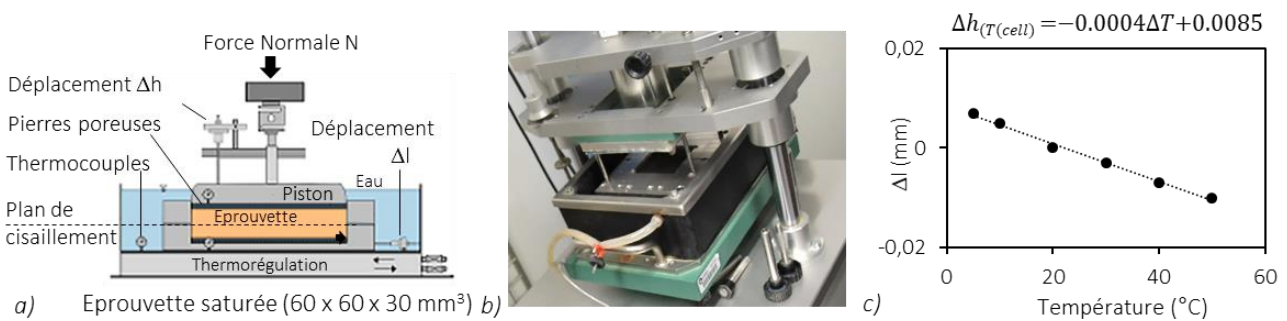


Figure II. 26 : a-b) Schéma et photographie de la cellule d'essai et c) courbe de calibration en température.

II.4.3. Effet de l'application de cycles successifs de chauffage-refroidissement sur les caractéristiques mécaniques d'une éprouvette de sol compacté

Des essais œdométriques et de cisaillement direct sous différentes températures contrôlées ont été réalisés pour étudier l'effet d'une variation cyclique de la température sur le comportement volumétrique d'éprouvettes de limon compacté. Puis, l'évolution des paramètres de compressibilité est présentée ainsi que les paramètres de cisaillement.

II.4.3.1. Caractéristiques des essais réalisés

L'essai 1 (Tableau II. 2) est un essai œdométrique standard à 20 °C, l'éprouvette a été chargée en appliquant des incréments de contrainte verticale successifs de 9 à 1600 kPa, puis déchargée jusqu'à 100 kPa. La durée de 24 heures par palier, préconisée par l'ASTM (2011), a été suffisante pour atteindre la fin de la consolidation. Pour les essais 2 et 3, les éprouvettes sont saturées puis leur température est portée respectivement à 5°C et 50°C à une vitesse de 5 °C/h préalablement à l'essai de chargement. La faible vitesse de variation de la température permet d'éviter l'augmentation de la pression interstitielle due à la variation de température (Cekerevac et Laloui, 2004, Shetty et al., 2019).

L'application des cycles thermiques est réalisée sur des éprouvettes ayant subi différents chemins de chargement pour atteindre des degrés de consolidation différents. Pour l'essai 4, la contrainte de préconsolidation est supposée identique à l'essai 1 (75kPa). Ainsi lors de l'application des cycles entre 5 et 50°C sous 9kPa, le rapport de surconsolidation (OCR, Over Consolidation Ratio) est évalué à 8. Les contraintes verticales pour les essais 5 et 6 sont portées à respectivement 170 et 400 kPa, ces éprouvettes sont normalement consolidées lors de l'application des cycles. Enfin l'éprouvette 7 a subi un chemin de chargement complet, identique à l'essai 1 avant l'application des cycles. Cet historique de chargement amène l'éprouvette à un OCR de 16.

Tableau II. 2 : Paramètres des essais œdométriques thermorégulés.

Essai	T°C initiale	Chemin de contrainte (kPa)	OCR atteint	Chemin thermique
1	20	9-1600-100		monotone
2	5	9-1600-100		monotone
3	50	9-1600-100		monotone
4	20	9	8	cycles 5-50
5	20	9-170	1	cycles 5-50
6	20	9-400	1	cycles 20-50
7	20	9-1600-100	16	cycles 20-50

II.4.3.2. Courbes de compressibilité obtenues lors d'une variation monotone de la température

Les courbes de compressibilité obtenues pour les essais 1, 2 et 3 sont représentée en Figure II. 27a. Les indices des vides initiaux de toutes les éprouvettes sont identiques après saturation indiquant une bonne reproductibilité du protocole de préparation des éprouvettes. Les variations des indices des vides lors du refroidissement ou du chauffage sont négligeables. Les premières parties des courbes sont superposées, indiquant que le coefficient C_s caractéristique de la déformation élastique du matériau n'est pas affecté par le changement de température. En revanche l'inflexion de la courbe évolue. La contrainte de préconsolidation σ_p' évaluée par la méthode de Casagrande (Casagrande, 1936) atteint 80, 75, et 65 kPa à respectivement 5°, 20° et 50°C (Tableau II. 3). Ces résultats montrent la contraction du domaine élastique avec l'augmentation de la température, autrement dit, la plastification commence sous des contraintes plus faible (thermal softening). La

Figure II. 27b représente l'évolution de la contrainte de préconsolidation en fonction de la température.

Les pentes C_c sont également affectées, elles augmentent légèrement avec l'augmentation de la température, ce qui signifie que la déformation plastique enregistrée pour un incrément de contrainte donné est plus importante aux températures les plus élevées. Ainsi, l'indice des vides obtenu à la fin du dernier palier, sous 1600 kPa, est plus faible à 50°C qu'à 20°C ou 5°C.

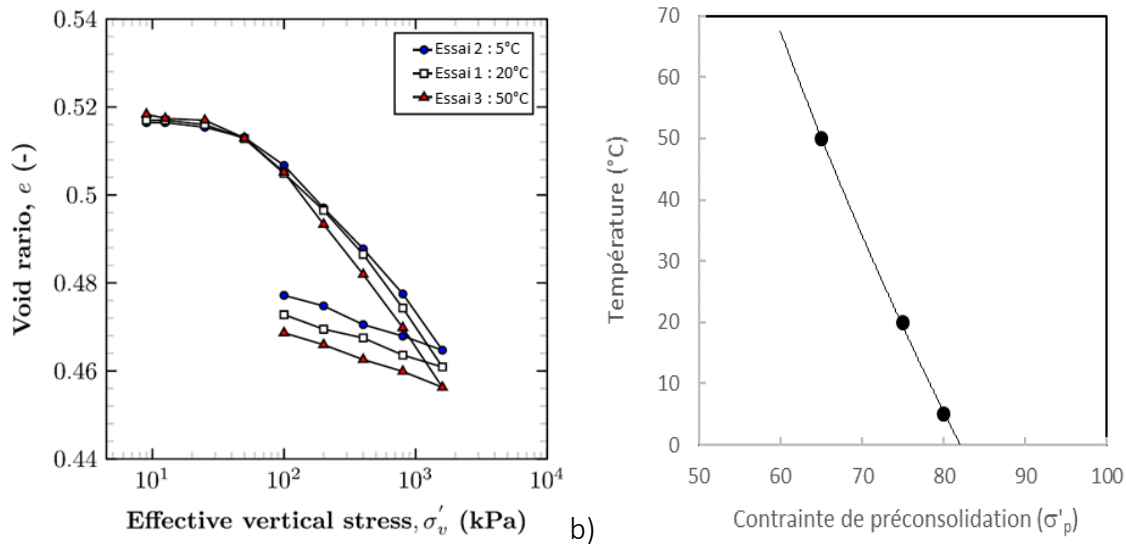


Figure II. 27 : a) Courbes de compressibilités obtenues à trois températures différentes : 20°C (Essai 1), 5°C (Essai 2) et 50°C (Essai 3) et b) Evolution de la contrainte de préconsolidation en fonction de la température.

Tableau II. 3 : Paramètres de compressibilité et b) Courbes de compressibilités obtenues à trois températures différentes : 20°C (Essai 1), 5°C (Essai 2) et 50°C (Essai 3).

Essai	T°C initiale	$e_{initial}$	C_c	C_s	σ'_p (kPa)
1	20	0,517	0,037	0,01	75
2	5	0,516	0,035	0,01	80
3	50	0,518	0,04	0,013	65

Conformément à cette diminution de l'indice des vides, la perméabilité intrinsèque des éprouvettes soumises à 1600 kPa est plus faible à 50°C qu'à 20° ou 5°C (Figure II. 28a). Cependant, la conductivité hydraulique dépend du poids volumique de l'eau et de sa viscosité (Equation 9). Ainsi, malgré la diminution de la taille du réseau poreux, une augmentation de la conductivité hydraulique (k_{ws}) mesurée en fonction de la température (5°C, 20°C et 50°C, voir Figure II. 28b). La diminution de la viscosité de l'eau interstitielle avec l'augmentation de la température facilite sa mobilité dans les pores.

$$k_{ws} = k_p \left(\frac{\gamma_w}{\eta_d} \right) \quad \text{Équation 9}$$

Où k_{ws} est la conductivité hydraulique ($m \cdot s^{-1}$), k_p est la perméabilité intrinsèque (m^2), γ_w est le poids volumique de l'eau (kN/m^3) et η_d est la viscosité dynamique de l'eau ($kPa \cdot s$).

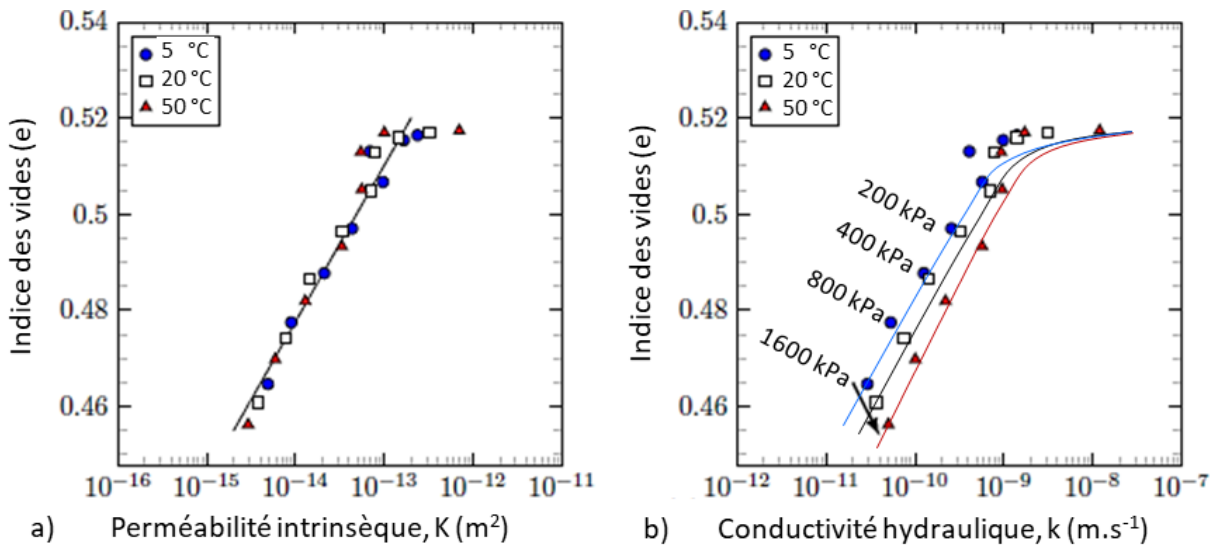


Figure II. 28: Essais 1, 2, 3 : évolution de a) la perméabilité intrinsèque et b) la conductivité hydraulique en fonction de l'indice des vides à différentes températures (°C).

II.4.3.3. Comportement volumétrique d'éprouvettes soumises à des variations cycliques de la température.

Lors du premier chauffage de l'éprouvette surconsolidée, l'augmentation de volume visible sur le résultat de l'essai 7 (Figure II. 29) est caractéristique de la dilatation thermique des éprouvettes, en cohérence avec la bibliographie (par exemple Hueckel et al. 1998 ou Di Donna 2014). Lors du refroidissement à 20 °C, le volume initial n'est pas totalement récupéré ce qui indique que la dilatation des grains s'accompagne d'une réorganisation de la structure. Lors des cycles suivants entre 20 et 50 °C, les cycles de dilatation-rétraction sont réversibles et superposés. Cette évolution reflète l'expansion élastique des constituants du matériau lors du chauffage et sa contraction lors du refroidissement. Il est cependant intéressant de noter que les chemins de chauffage et de refroidissement ne se superposent pas : un phénomène d'hystérèse est observé.

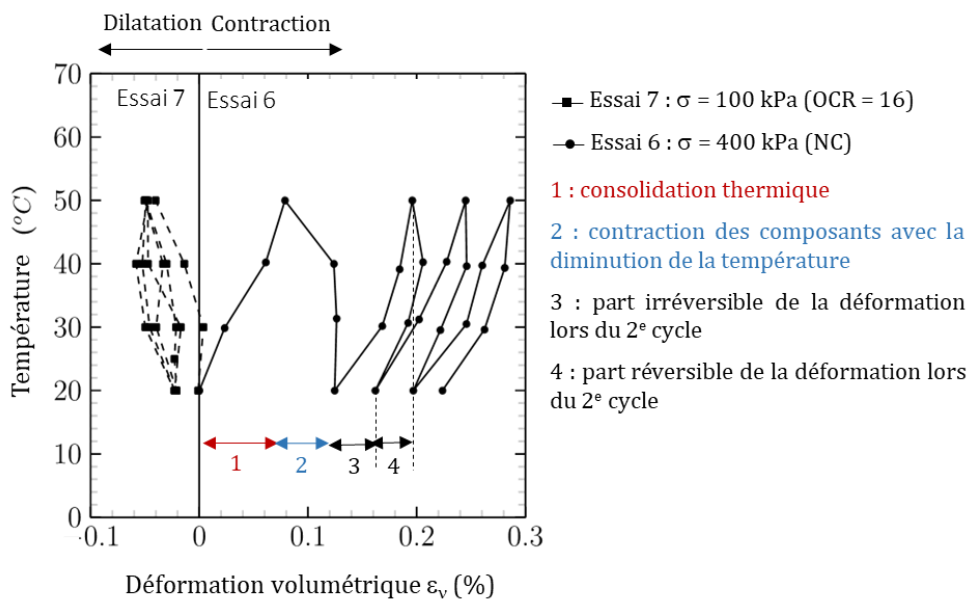


Figure II. 29: Déformation volumétrique pendant les cycles thermiques 20°-50°C sous 400 kPa (essai 6, OCR=1) et 100 kPa (essai 7, OCR=16)

Cette hystérèse peut s'expliquer par le temps mis par la pression interstitielle à s'équilibrer. En effet, pour les matériaux présentant une faible conductivité hydraulique, la dilatation des composants avec l'augmentation de la température conduit à une augmentation de la pression interstitielle qui se dissipe par drainage. Dans le cas des matériaux à faible perméabilité, tels que les matériaux argileux, une surpression liée à la dilatation de l'eau interstitielle peut se produire ainsi que dans les cas où les matériaux drainés seraient chauffés trop rapidement en regard de leur perméabilité (Coccia et Mc Cartney, 2016). La conductivité hydraulique de notre limon compacté étant faible, 10^{-9} m.s^{-1} sous 100 kPa, ($e=0,51$, Figure II. 28b), une surpression est susceptible d'apparaître et le temps de sa dissipation pourrait expliquer l'hystérèse mesurée.

L'éprouvette normalement consolidée, essai 6 (Figure II. 29), se contracte lors de l'augmentation de la température. Cette évolution est cohérente avec la contraction du domaine élastique des matériaux lorsqu'ils sont chauffés. Les grains se réorganisent sous l'effet combiné du chargement mécanique et thermique ce qui aboutit à une diminution de l'indice des vides.

Coccia et McCartney (2016) expliquent physiquement ce phénomène, qu'ils nomment la compression thermique secondaire (Figure II. 30a), par la diminution des résistances entre les grains du fait de l'augmentation de l'énergie cinétique. D'un point de vue rhéologique, l'eau interstitielle chaude donc moins visqueuse est plus mobile à forte température, ce qui accélère la vitesse de consolidation des matériaux (voir par exemple, Towhata et al. 1993, Figure II. 30b). De plus, ce fluide, moins visqueux, oppose moins de résistance à la mobilité des grains qui glissent les uns par rapports aux autres. Ce processus s'entretient jusqu'à ce que suffisamment de nouveaux liens soient créés pour soutenir la contrainte thermomécanique, les déformations obtenues par ce phénomène sont irréversibles.

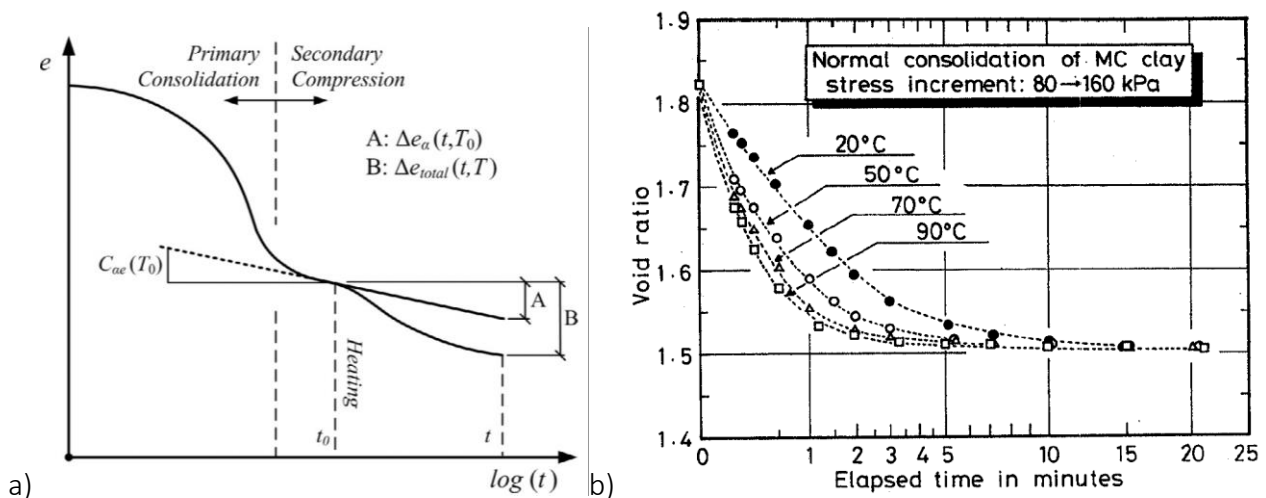


Figure II. 30 : a) Représentation schématique de la courbe de consolidation lors de l'application d'une contrainte mécanique puis thermomécanique (Coccia et McCartney, 2016). b) Effet de la température sur le taux de consolidation d'une argile normalement consolidée (Towhata et al. 1993).

Ensuite, lors du retour à 20°C (essai 6, Figure II. 29), ce qui constitue un refroidissement, les composants se contractent : les grains, plus denses, gagnent en élasticité et l'eau, plus visqueuse, est moins mobile. Cette déformation s'ajoute donc à la déformation précédente et le volume global du matériau diminue légèrement. Cependant, cette diminution de volume peut être plus importante que la résultante de la contraction thermique de ses constituants. En effet, si l'on reprend le postulat de Terzaghi, la contrainte totale appliquée au matériau est reprise en partie par l'eau sous la forme d'une pression interstitielle (u) et par le squelette solide (contrainte effective σ'). Lorsque la température diminue, la diminution de volume des solides et de l'eau

conduit à une diminution sensible de la pression interstitielle. Ainsi, la contrainte totale appliquée sera reprise de façon plus importante par le squelette solide. Si le matériau est surconsolidé, la surcharge sera reprise en suivant le coefficient C_s , mais si le sol est normalement consolidé, alors la surcharge sera reprise en suivant le coefficient C_c (impact plus important). Ainsi, sur la Figure II. 29, une contraction importante de l'éprouvette est mesurée lors du premier refroidissement à 20°C (Etape 2). Le matériau conservera ce nouvel arrangement pour les cycles suivants puisqu'il s'agit de la contrainte la plus importante auquel l'éprouvette a été soumise.

En suivant ce raisonnement, au cours des cycles suivants, une déformation volumique purement élastique devrait se mettre en place : une contraction lors des périodes de chauffage et une dilatation au cours des périodes de refroidissement. Cependant, au cours de nos essais, une part significative de déformation irréversible est conservée au cours du 2nd et du 3^e cycles (Figure II. 29, Etape 3 et 4).

Si l'on reprend le modèle conceptuel de Laloui et Di Donna (2013) discuté en Figure II. 6, le chemin parcouru est $A - A'$. Cependant, lors de nos essais, une rampe de température est appliquée (5°C/h), la température finale de 50°C n'est pas maintenue au cours d'un palier. Compte tenu du fait que la compression secondaire nécessite du temps, seule la compression primaire et une partie de la compression secondaire totale se déroule au cours du premier chauffage dans notre cas. Au cours des cycles suivants, s'accumulent la déformation primaire élastique (notée 3 en Figure II. 29) et une fraction supplémentaire de la déformation secondaire plastique (notée 4 en Figure II. 29). Le phénomène d'accommodation n'apparaîtra qu'à l'approche de la valeur finale de la déformation secondaire plastique.

Lors des essais 4 et 5, représentés en Figure II. 31, le refroidissement atteint 5°C, une température plus faible que la température initiale (20°C). Lors du refroidissement de 20° à 5° C sur l'essai 5, une légère expansion est enregistrée en comparaison avec la valeur à 20°C. Cette déformation se développe uniquement dans cet intervalle de température et semble du même ordre de grandeur que les déformations mesurées pour l'essai 4 réalisé sur sol surconsolidé. Cette légère dilatation relative pourrait être un artéfact comparable à un rebond post-chargement mécanique puisque le refroidissement correspond à une diminution de la contrainte thermique. Des modifications en lien avec l'augmentation de la viscosité de l'eau interstitielle pourraient également être avancées.

Pour répondre à ces questions, il serait nécessaire d'appliquer un protocole expérimental permettant de calculer les cinétiques de chaque phénomène. Par exemple, la mesure de la variation volumique d'une éprouvette surconsolidée soumise à une variation de la température selon une vitesse très faible (1° C/h voir moins) permettrait d'obtenir le coefficient d'expansion élastique des matériaux sans accumuler de déformation plastique. L'application d'une rampe de variation de la température puis le maintien de la température de consigne jusqu'à stabilisation des déformations devrait permettre d'atteindre un comportement totalement réversible lors des cycles suivants et selon le coefficient d'expansion élastique, similaire aux éprouvettes de densité similaires.

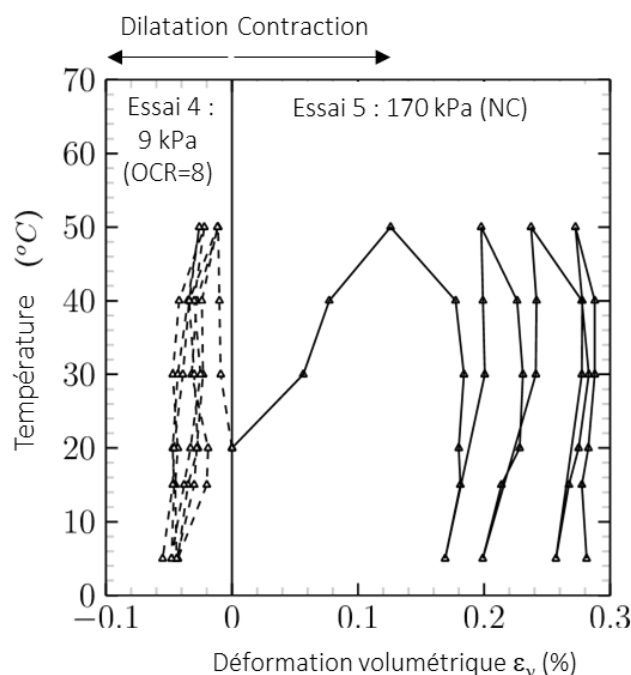


Figure II. 31 : Déformation volumétrique pendant les cycles thermiques 5°-50°C sous 9kPa (essai 4, OCR =8) et 170 kPa (essai 5, OCR =1).

II.4.3.4. Paramètres de compressibilité d'éprouvettes soumises à des variations cycliques de la température

L'évolution du comportement mécanique des éprouvettes due aux cycles est également visible sur la courbe de compressibilité. A la suite de l'application des cycles sur l'éprouvette de l'essai 4 (Figure II. 31), un essai de compressibilité a été réalisé (Figure II. 32a). La dilatation de l'éprouvette lors de l'application des cycles est bien visible avec une augmentation relative de l'indice des vides. L'ensemble de la courbe est impacté par cette évolution puisque l'on observe une translation de la courbe en comparaison avec l'essai de référence (Essai 1). Cela n'a cependant pas d'incidence sur les valeurs de σ'_p et C_c puisque l'écart à la courbe de référence reste constant tout au long de l'essai. Dans le cas de l'essai 3, l'application des cycles sous 170kPa se traduit, comme attendu, par une diminution de l'indice des vides (Figure II. 32b). La comparaison de l'état obtenu avec la courbe de référence permet de définir que cet état correspond à un chargement de 210 kPa à 20°C. Ainsi, l'application de 4 cycles 1°-50°C conduit à une consolidation thermique équivalente à une surcharge de 40 kPa, soit plus de 20% de la charge verticale. Lors du palier de chargement suivant, l'état est superposé à la courbe de référence.

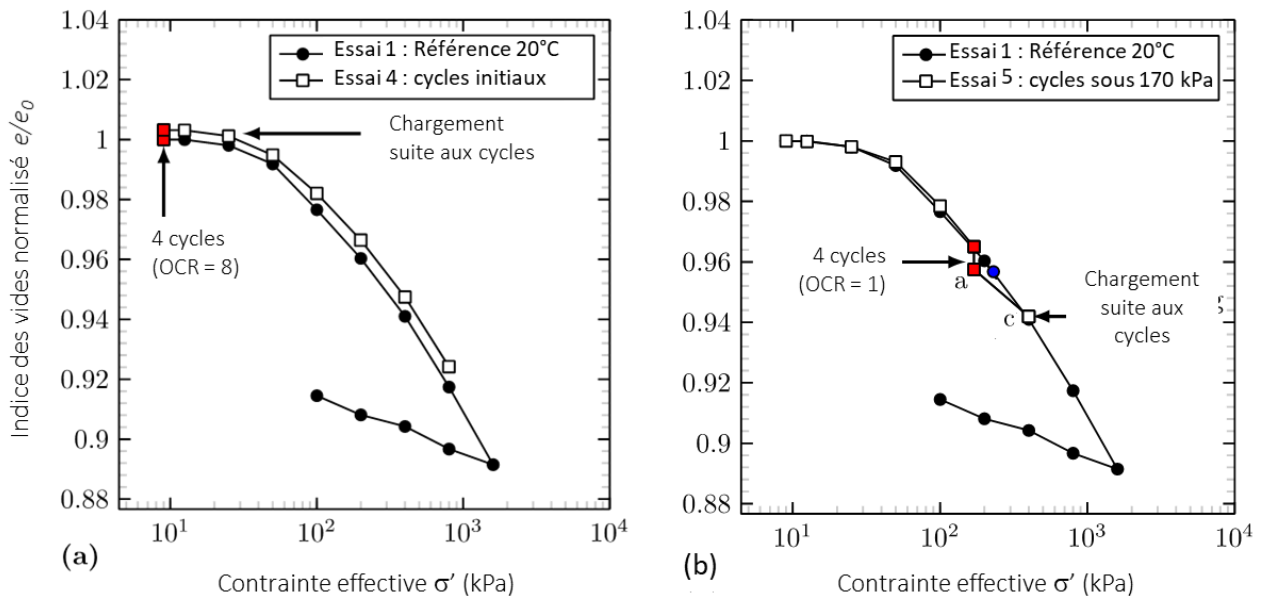


Figure II. 32 : Suivi de la compressibilité d'éprouvette de limon compacté après l'application de variation cyclique de la température (4 cycles 5°-50°C) a) à l'état initial ; b) sous 170 kPa.

II.4.3.5. Paramètres de cisaillement d'éprouvettes soumises à des variations cycliques de la température

En Mécanique des Sols, l'essai de cisaillement direct permet de caractériser la résistance au cisaillement des matériaux en appliquant une contrainte normale et en ajoutant ensuite une contrainte tangentielle. Des essais ont été réalisés à différentes températures à une vitesse de 0,02 mm.min⁻¹ sous 3 contraintes différentes (50, 100 et 200 kPa) (Figure II. 33). Les résultats, en cohérence avec la bibliographie, ne révèlent pas de variation significative des paramètres de cisaillement (cohésion c et angle de frottement ϕ) pour le limon compacté lors de modifications de température dans l'intervalle 5°- 50°C (Figure II. 33). Un léger effet du refroidissement semble s'initier sous 200 kPa de contrainte normale mais des essais sous des contraintes verticales plus importantes seraient nécessaires pour confirmer cette tendance.

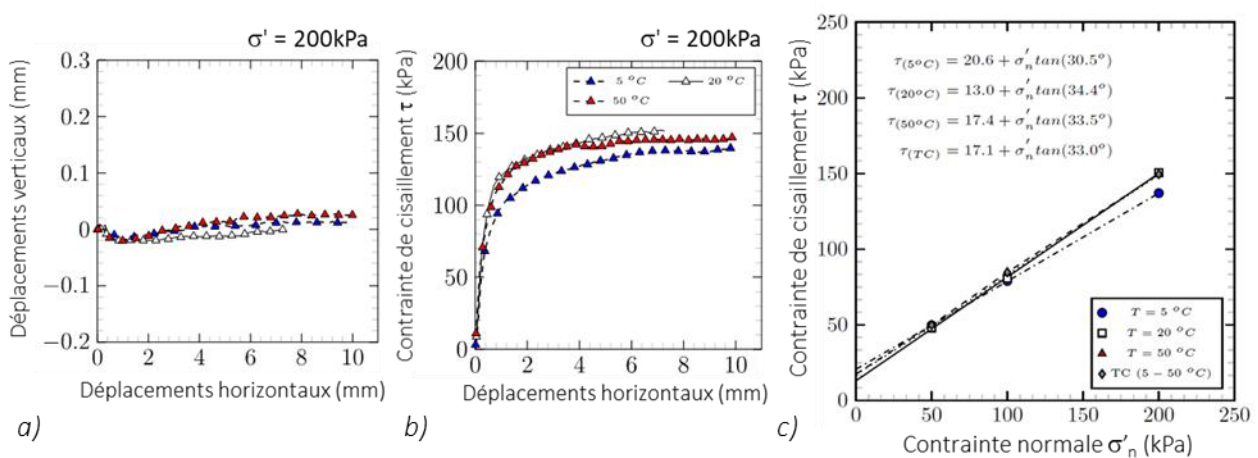


Figure II. 33: Exemples de résultats d'essais de cisaillement réalisés à 5, 20 et 50°C a) et b) sous une contrainte normale de 200 kPa et c) courbe intrinsèque obtenues à 5, 20, 50 °C et après des cycles 5-50°C.

II.4.4. Synthèse des résultats obtenus sur le limon compacté

La réalisation d'essais œdométriques thermorégulés permet de quantifier l'effet d'une variation de température sur les propriétés hydriques et mécaniques des sols. Les mesures des contraintes de préconsolidation à différentes températures montrent une contraction du domaine d'élasticité du sol lors d'une augmentation de température et inversement lors d'une diminution de température. L'indice de compression (C_c) augmente légèrement avec l'augmentation de la température, ce qui signifie que la déformation plastique enregistrée pour un incrément de contrainte donné est plus importante aux températures les plus élevées. L'indice de gonflement (C_g) n'est lui, pas modifié. Les paramètres de cisaillement ne semblent pas modifiés par les variations de températures dans l'intervalle de contrainte investigué.

L'ensemble des informations disponibles sur le comportement thermomécanique d'un sol normalement consolidé amène à la représentation schématique proposée en Figure II. 34. Sur cette figure, la surface de charge d'un sol est représentée dans le plan $[q - p']$ à la température initiale T_0 . A l'état initial, A_{T_0} , le sol est soumis à une contrainte p'_A et une contrainte déviatorique q_A . Lors de l'augmentation de la température jusqu'à T_1 , le domaine élastique diminue (thermal softening, chemin 1). L'état de contrainte (q_A ; p'_A) devient alors supérieur à la limite élastique, ce qui engendre une déformation volumique plastique. Un écrouissage lié à la contrainte thermomécanique se produit (chemin 2). Lors de la diminution de la température, le sol ainsi réorganisé présentera un domaine élastique plus étendu qu'à l'état initial (chemin 3).

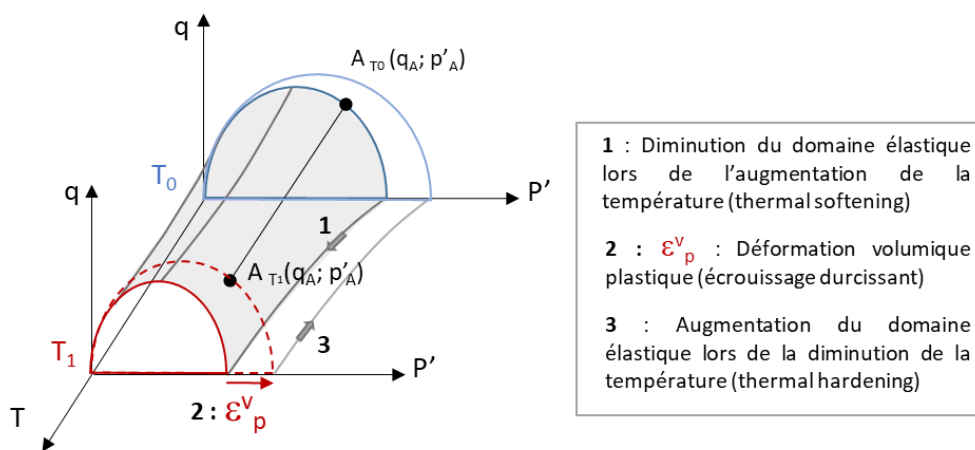


Figure II. 34 : Représentation de l'évolution de la surface de charge au cours d'un cycle de chauffage-refroidissement entre deux températures (T_0 et T_1).

Selon ce scénario, lors des cycles suivants, les déformations devraient être purement élastiques tant que l'intervalle de température T_0 à T_1 n'est pas modifié. Cependant, en fonction des caractéristiques du matériau, la déformation volumique plastique qui se produit à T_1 (chemin 2) peut nécessiter un temps important. Ainsi, si le palier à T_1 n'est pas suffisamment long pour atteindre 100% de la déformation plastique attendue, seule une fraction de cette déformation sera réalisée lors du 1^{er} cycle. Lors du second cycle une fraction supplémentaire sera réalisée et ainsi de suite jusqu'à atteindre 100% de la déformation plastique. Cette interprétation est cohérente avec le modèle ACMEG-T tel que décrit par Di Donna et Laloui (2015) puisque le phénomène d'accommodation y est limité par une température équivalente \tilde{T} . \tilde{T} est comprise entre T_0 et T_1 et se rapproche, au fur et à mesure des cycles de T_1 jusqu'à atteindre une égalité qui marque la fin du phénomène d'accommodation.

Afin de poursuivre ces travaux, des essais sous des contraintes plus importantes seraient nécessaires pour confirmer une tendance à l'augmentation de la cohésion aux faibles températures. Lors de la réalisation de cycles successifs de chauffage-refroidissement, les évolutions volumétriques sont complexes, et dépendent des caractéristiques thermomécaniques de la contrainte appliquée. En plus de la connaissance de l'état de consolidation, des contraintes appliquées et de l'amplitude de la variation de la température ; la vitesse de variation de la température et la durée de chaque palier du cycle permettront ou non d'atteindre un équilibre au cours de chaque palier. Si l'équilibre n'est pas atteint au cours du premier palier, la déformation se poursuivra au cours des cycles suivants.

II.5. Conclusion

La modification de la température du sol a des effets dès l'échelle particulaire avec une évolution du volume des particules solides et des particules d'eau. Ces modifications ont des effets complexes et contradictoires à l'échelle macroscopique sur les propriétés hydriques et mécaniques des sols. Pour prévoir le comportement hydromécanique d'un sol sous l'effet d'une variation de température, les facteurs à prendre en compte sont :

- la nature minéralogique du matériau et notamment sa teneur en argile qui influe sur son comportement mécanique (fluage) et hydrique (conductivité hydraulique) ;
- l'historique des chemins de contrainte appliqués (état de compactage, état de consolidation) à l'origine de la distribution de la taille des pores et des caractéristiques élasto-plastiques du matériau;
- l'état de drainage du matériau qui entrainera ou non le développement de surpressions interstitielles lors des modifications de température.

A l'état surconsolidé, une augmentation de température conduira à une augmentation du volume du matériau, en cohérence avec la dilatation thermique des constituants. Cela s'accompagnera d'une diminution de l'étendue du domaine élastique lors de la déformation du matériau (thermal-softening). A l'état faiblement surconsolidé ou normalement consolidé, la contrainte thermique s'ajoute à la contrainte mécanique. Cette contrainte thermomécanique, supérieure aux contraintes précédemment expérimentées par le matériau (contrainte de préconsolidation), conduit à une réorganisation de la structure qui voit son volume global diminuer. Ce matériau, plus dense, est mécaniquement plus compétent (écrouissage durcissant). Cette réorganisation est facilitée par la faible viscosité de l'eau mais comme tout phénomène de consolidation, sa durée est fonction de la conductivité hydraulique du matériau et la longueur du chemin de drainage, elle est donc dépendante du temps.

Concernant l'étude des matériaux non saturés, les résultats disponibles dans la bibliographie explorent l'intervalle de température de 20° à 60°C mais de nombreux aspects comme la réversibilité des déformations lors de l'application des cycles thermo-hydriques sont encore peu documentés tout comme l'effet du refroidissement des matériaux à des températures inférieures à 20 °C. La réalisation d'essais en conditions non saturées en laboratoire permet d'identifier d'éventuelles situations critiques de fonctionnement des géostructures énergétiques et de développer des solutions nouvelles dans le domaine du stockage de l'énergie. C'est cette ambition qui a guidé les recherches scientifiques développées dans les prochaines parties.

III. Impact de variations thermiques cycliques sur le comportement mécanique des pieux énergétiques.

III.1. Contexte : les pieux énergétiques

Les pieux sont des fondations profondes dimensionnées pour reporter en profondeur les charges de l'ouvrage. La capacité portante d'un pieu résulte de la combinaison de la résistance en pointe (Q_p) et du frottement latéral (Q_f) à l'interface sol-pieu (Figure II. 35a). Lorsque tout ou partie de ces structures portantes sont adaptées en pieux énergétiques (Figure II. 35b), l'échange de chaleur entre la structure et le sol entraîne une modification de la température du sol. Ainsi, de 12 °C en moyenne (voir par exemple les mesures en région parisienne de Martin, 2013), l'intervalle de température peut atteindre de 4 à 30°C selon Peron et al. (2011).

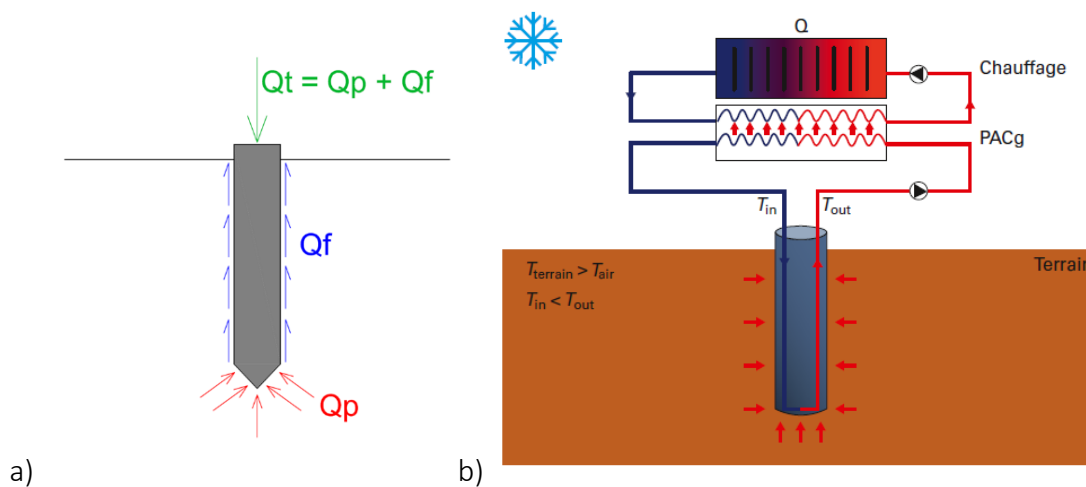


Figure II. 35 : a) Force portante d'un pieu; b) Schéma de principe du fonctionnement d'une géostructure thermique en hivers (Deleraillée et al. 2020).

L'évolution de la température pourrait avoir des effets complexes et contradictoires sur la capacité portante. Comme présenté en partie II, l'échauffement du sol induit des sollicitations thermo-hydomécaniques couplées qui impactent le sol selon sa nature et son état initial (teneur en eau, densité, état de consolidation). Les études portant sur l'effet de la température sur les propriétés mécaniques des matériaux sont généralement conduites sur des matériaux saturés et à teneur en eau constante. Pourtant, l'état de saturation d'un sol a un impact sur la susceptibilité de ses paramètres hydromécaniques lors de l'application de variations de températures. Quelques études traitent de cette problématique mais sur des intervalles de température qui ne couvrent que partiellement la gamme de variation induite par les géostructures énergétiques puisque le refroidissement et la problématique de la multiplicité des cycles de chauffage-refroidissement du matériau restent peu documentés (Uchaipichat et Khalili 2009, Romero et al. 2003, Coccia et McCartney 2016). Ces préoccupations furent au centre des recherches que nous avons développées sur le thème des géostructures énergétiques, elles sont présentées en détail dans les prochaines parties.

Le projet ANR GECKO (GEostructures, Couplage solaire hybride et stockAge d'énergie Optimisé : Solution pour bâtiments à énergie positive, 2015) auquel nous avons activement participé, avait pour objectif d'augmenter l'efficacité des pieux énergétiques en les couplant avec des panneaux solaires hybrides. Dans l'esprit de l'interconnectivité des solutions, l'idée était de connecter le

circuit géothermique aux panneaux solaires ce qui permet d'envisager le rechargement du potentiel géothermique du sol afin de conserver année après année des températures optimales dans le milieu.

Dans le cadre de ce projet, en partenariat avec ECOME, l'IFSTTAR, le CEREMA, et le LGCGE, nous avons participé à la réalisation d'expérimentations en laboratoire, en modèle réduit et in situ associées à des modélisations numériques afin d'étudier le comportement des sols, l'interaction entre les sols et les pieux, et l'interaction entre les pieux et la structure du bâtiment en fonction des variations de la température.

Les problématiques scientifiques identifiées et traitées par notre équipe sur ce thème sont :

- accompagner le développement des géostructures énergétiques en évaluant leur impact sur le sol de fondation des ouvrages ;
- développer des essais de laboratoire adaptés aux gammes de variation de températures propres aux géostructures énergétiques ;
- améliorer la compréhension du comportement mécanique des matériaux non saturés soumis à des sollicitations thermiques cycliques.

Publications associées : [RI 10] [O2] [CI 10,7] [CN 8, 11] [M 1] [T 1] [PD 1]

Thèse et post-doctorat associés : Hossein Eslami [T1] et Wahib Arairoy [PD1]

Afin de répondre à ces problématiques, des méthodes d'étude en laboratoire ont été développées et sont présentées en partie III.2. Plusieurs exigences ont été retenues :

- la cohérence avec les essais généralement réalisés in situ, i.e. les essais pressiométriques ou pénétrométriques, puisque ces essais permettent de définir la capacité portante des sols qui peut être modifiée lors d'une variation de température ;
- la caractérisation des matériaux non saturés soumis à des variations de température, les moins documentés dans la bibliographie ;
- le respect d'un intervalle de température cohérent avec l'utilisation des géostructures énergétiques i.e. de 1° à 50 °C.

Le matériau d'étude est présenté en partie III.3. Les principaux résultats obtenus en laboratoire sont présentés en parties III.4 et III.5 incluant une partie modélisation. Enfin, les résultats d'essais in situ sont présentés en partie III.6 avant de conclure sur ce thème en partie III.7.

III.2. Présentation des méthodes expérimentales

III.2.1. Essais mini-pénétrométriques

L'essai au pénétromètre statique est une méthode classique de dimensionnement des pieux (Afnor, 1996b). La simulation de cet essai à l'aide d'un mini-pénétromètre développé au laboratoire, permet de réaliser des essais en enfoncement sur des éprouvettes de taille décimétrique (Eslami et al. 2017). Grâce à un système de traction-compression d'une précision de ± 1 N, une aiguille est enfoncée à la vitesse constante de 30 mm/min (Tableau II. 4a). La profondeur maximale d'investigation est de 100 mm. En simultanément, la force nécessaire à l'enfoncement de l'aiguille est mesurée par l'intermédiaire d'un capteur de force.

Deux différentes géométries d'aiguille en acier, nommées P1 et P2, sont utilisées pour quantifier séparément la résistance en pointe et le frottement latéral (Tableau II. 4). Le diamètre de la tige de P1 est de 10 mm et celui de P2 est de 12 mm. Les pointes des aiguilles sont identiques avec un angle de 60°, une hauteur de 10,4 mm (L_p) et un diamètre de 12 mm (R_p).

Tableau II. 4 : Caractéristiques des deux différentes aiguilles P1 et P2.

Matériel :	P1	P2
Diamètre Tige (mm)	10	12
Hauteur (mm)	10,4	10,4
Angle pointe (°)	60	60
Diamètre pointe (mm)	12	12

Pour la préparation des éprouvettes, le matériau brut est tout d'abord porté à la teneur en eau souhaitée puis laissé 24h dans un sac hermétique à 20°C pour une bonne homogénéisation de la teneur en eau, et enfin compacté de manière dynamique en 6 couches/ 28 coups par couche dans un moule CBR. Trois essais sont réalisés dans chaque éprouvette (Figure II. 36a). Pour limiter les effets de bord et l'influence entre les essais, les points sont positionnés sur un cercle concentrique au moule CBR mais de rayon deux fois plus petit. Les trois points d'essai sont situés par rapport au centre du moule par rotation d'angle 120°. Ce choix est basé sur l'étude de l'influence de la distance à la paroi du moule menée par Raboudi (1986). Trois vitesses de pénétration ont été testées : 1, 30 et 90 mm/min. La vitesse de pénétration détermine la durée de l'essai, qui doit être réduite au minimum pour éviter les variations de teneur en eau et de température. Des essais préliminaires ont montré qu'au-delà de 30 mm/min, la vitesse de pénétration de la sonde n'a pas d'incidence sur les paramètres mesurés, cette vitesse a donc été retenue pour l'ensemble des essais.

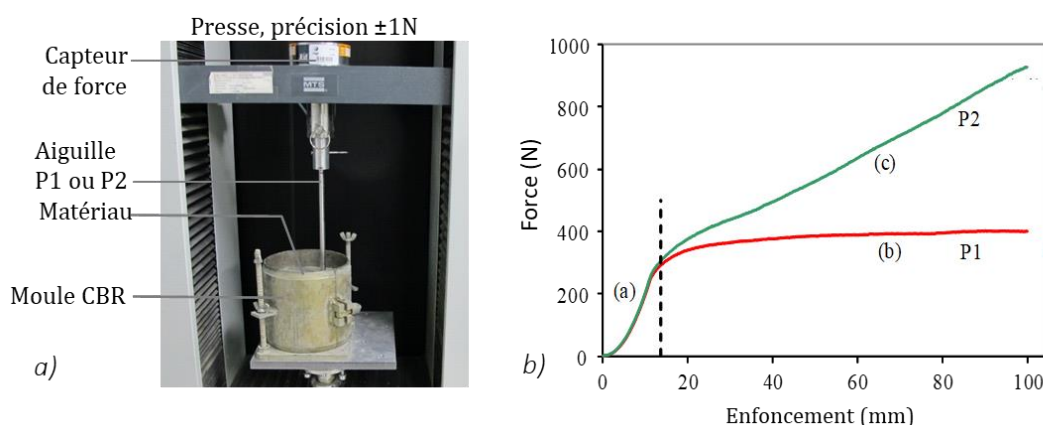


Figure II. 36 : a) Dispositif expérimental de l'essai pénétrométrique à l'aiguille ; b) Force en pointe et force totale en fonction de l'enfoncement des sondes P1 et P2.

Pour chaque aiguille, l'évolution de la force en fonction de la profondeur est présentée dans la Figure II. 36b. Dans la première partie de la courbe (a), la pointe de l'aiguille pénètre dans le sol. Comme les angles et les diamètres des sommets coniques sont identiques pour les deux aiguilles, cette partie de l'essai est similaire. La partie (b) est spécifique à P1 ; comme le frottement n'existe pas, la variation de résistance est constante pour un sol homogène, ce qui permet de calculer la force en pointe (Q_p). La partie (c) est spécifique à P2; la force augmente à mesure que l'aiguille pénètre dans le sol à cause des frottements sur le corps de l'aiguille, ce qui permet de calculer la force totale pour l'aiguille P2 (Q_t). La contrainte en pointe (q_p) a été calculée en divisant la force obtenue dans la partie linéaire (b) de P1 par la section de la pointe (Equation 7). Pour obtenir la contrainte de frottement (q_f), on divise la différence entre les forces obtenues avec P1 et P2 par la surface latérale de l'aiguille (Equation 8).

$$q_p = Q_p / (\pi R_p^2)$$

Équation 10

$$q_f = (Q_t - Q_p) / (2 \pi R_p (L - L_p))$$

Équation 11

Où L est la profondeur d'enfoncement. La profondeur maximale d'enfoncement est de 100mm.

III.3.1. Essais mini-pressiométriques

Les essais pressiométriques consistent à insérer une sonde gonflante dans les sols et à mesurer sa déformation lors de l'application de paliers de pression successifs. Ces essais sont largement utilisés pour la reconnaissance géotechnique en France car ils peuvent être réalisés sur une large gamme de sols et fournissent, dans les conditions de l'essai, le module pressiométrique de Ménard (E_M), permettant de quantifier la déformabilité du sol ; la pression de fluage (P_f) correspondant à la fin du domaine pseudo-élastique et la pression limite (P_l) indiquant la résistance mécanique. Afin de s'approcher des conditions réelles d'utilisation, des essais mini-pressiométriques ont été réalisés sur des éprouvettes de 800 mm de haut et de 600 mm de diamètre, compactées dans une cuve en inox en couches successives et soumises à des variations de température grâce à des tubes en inox soudés aux parois externes de la cuve et reliés à un thermorégulateur (Vulcatherm®, Figure II. 37). L'utilisation d'un mélange d'eau et de mono-éthylène (ASCAGEL® MEC) permet d'atteindre des températures de 1° à 40°C (voir les spécifications en Tableau II.5). Des gaines isolantes sont placées sur les tubes afin de limiter la condensation d'eau et de réduire les échanges thermiques avec l'atmosphère. Des plaques de polystyrène extrudé de 40 mm d'épaisseur renforcent l'isolation thermique de l'ensemble.

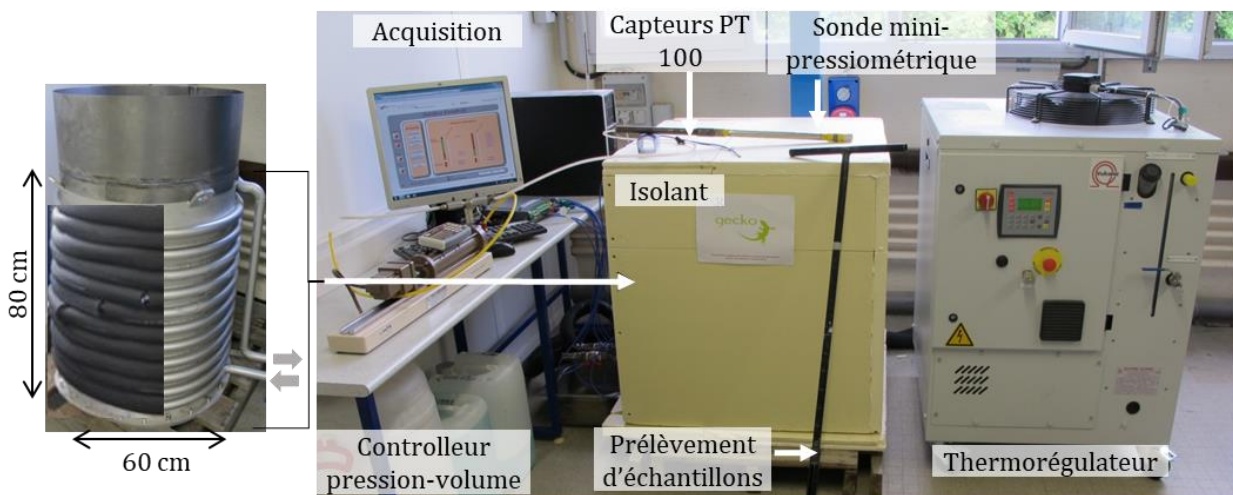


Figure II. 37 : Cuve en modèle réduit et instrumentation associée

Tableau II. 5 : Spécifications techniques du thermorégulateur Vulcatherm®

Fluide caloporteur	Eau + MEG à 55%
Températures limites de sortie fluide	-20 à 90 °C
Puissance de chauffage	6 kW (+5/-10%)
Puissance de refroidissement	Au débit nominal, avec une température d'air de condensation à 32°C maxi et sortie d'eau glycolée à 0° C : 6 kW (+5/-10%). (3,8 kW à -10°C)
Température ambiante admissible	15 à 32 °C
Débit nominal	0,9 m ³ /h
Débit maximal	1,8 m ³ /h

Les essais sont réalisés avec une sonde mini-pressiométrique de 380 mm de longueur et 28 mm de diamètre, spécialement conçue pour des essais de laboratoire et calibrée en prenant en compte l'effet de la température (Eslami, 2014). Six essais sont réalisés dans chaque massif afin de limiter les effets de bords et l'influence entre les essais (Figure II. 38a). Les points d'essai sont régulièrement répartis sur un cercle concentrique à la cuve de rayon deux fois plus petit, c'est-à-dire à 150 mm du bord de la cuve par rotation d'angle 60°.

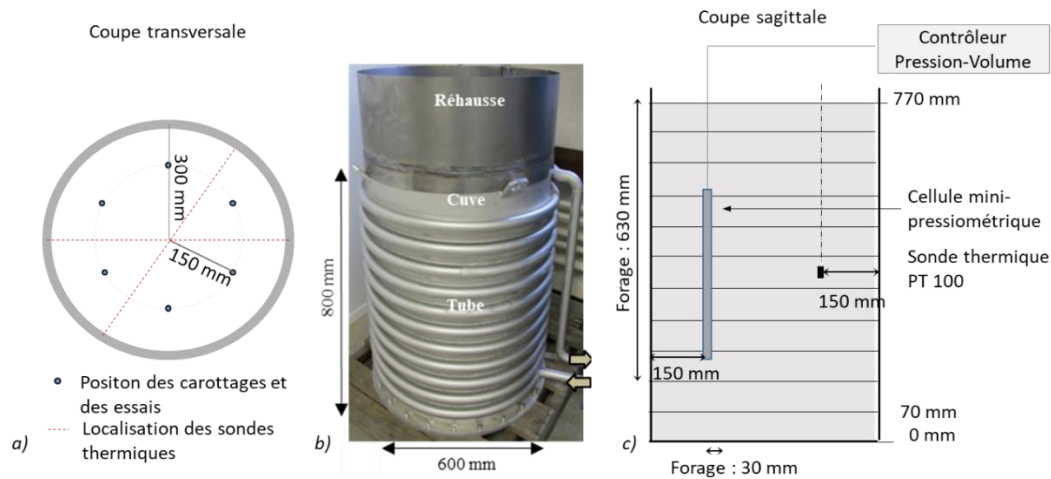


Figure II. 38 : Position des sondes thermiques et des essais pressiométriques dans le massif compacté : a) coupe transversale, b) vue générale de la cuve, c) coupe sagittale.

Préalablement à chaque essai, un forage de 30 mm de diamètre est réalisé et permet d'échantillonner le sol jusqu'à une profondeur de 630 mm. La carotte est découpée en échantillons de 50 à 100 mm de long qui permettent d'évaluer la répartition de la teneur en eau et de la densité du matériau en fonction de la profondeur. La sonde mini-pressiométrique est insérée dans le forage de façon à ce que le centre soit positionné à 400 mm de profondeur, au milieu de la cuve (Figure II. 38c). L'essai consiste à imposer des paliers successifs de pression par incréments de 25 kPa à l'aide d'un contrôleur pression/volume (GDS®) (Tableau II. 6). Le temps pour atteindre la pression visée est inférieur à 60 s. Le volume est mesuré à 30s et 60s pour chaque incrément de la pression appliquée. Les résultats sont corrigés afin de prendre en compte l'effet d'amortissement lié à la résistance propre de la membrane. De plus, afin de calibrer l'effet de la température sur la résistance de la membrane, des essais d'étalonnage de la sonde ont été réalisés en chambre climatique (Figure II. 39a). L'essai est arrêté lorsque le volume de la cellule atteint sa capacité d'expansion limite (140.10^3 mm^3).

Tableau II. 6 : Spécifications techniques du contrôleur pression/volume : modèle standard type 2 GDS Instruments®.

Gamme de pression	0-3000 kPa
Capacité de volume (nominale)	200 cm ³
Résolution de mesure de pression	1 kPa
Résolution de mesure de volume	1 mm ³
Précision de mesure de pression	≤0,15 % × 3000 kPa : 4,5 kPa
Précision de mesure de volume	≤0,25 % Volume mesurée ± 30 mm ³
Contrôles en boucle fermée	régulation à ± 1 kPa et à ± 1 mm ³

La courbe pressiométrique comprend trois phases (Figure II. 39b): (I) la mise en contact de la paroi de la sonde avec le sol, (II) une augmentation linéaire du volume (paramètre m_i) caractéristique du domaine de pseudo-élasticité du sol, et (III) une augmentation plus importante du volume indiquant que le sol a atteint un état plastique. Les résultats sont traités selon la norme NF P94-110-1 (AFNOR, 2000). Le module pressiométrique E_M est calculé à partir de la pente m_i calculée en phase II. La pression de fluage, P_f , correspond à la limite entre les phases II et III de la courbe tandis que la pression limite est définie par interpolation graphique de la courbe de fluage (Figure II. 39b) conformément à la norme (AFNOR 2000).

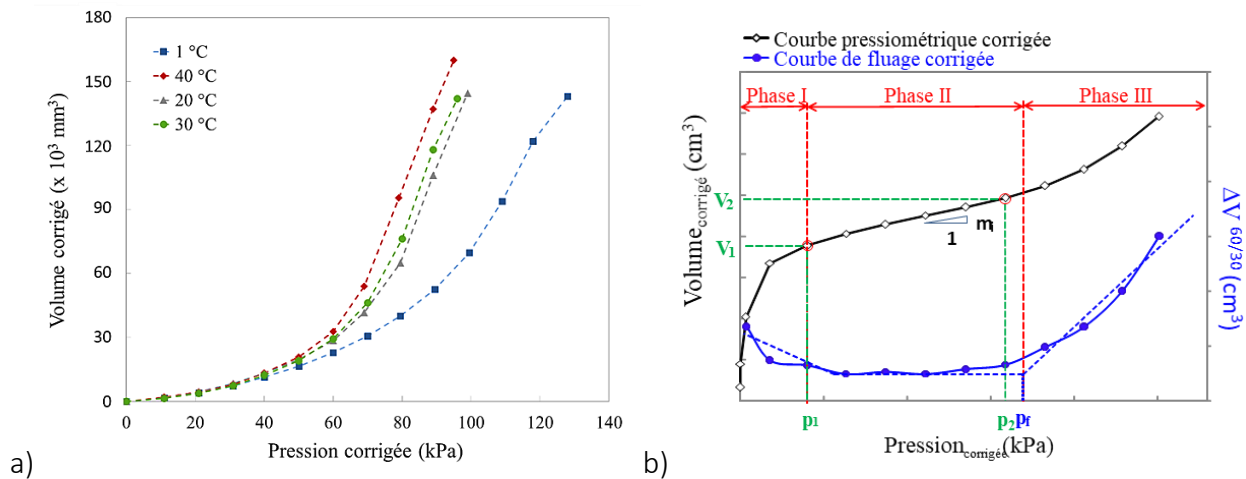


Figure II. 39 : a) Courbes de calibration de la sonde pressiométrique en fonction de la température ; b) Détermination des paramètres mécaniques à partir des courbes pressiométriques.

La pression limite P_l est la pression mesurée ou extrapolée pour un volume injecté équivalent à deux fois le volume initial de la cavité. Dans notre cas, un forage a été réalisé préalablement à l'essai, ainsi la pression limite P_l est la pression lorsque le volume atteint V_l , avec :

$$V_l = V_s + 2 V_1 \quad \text{Équation 12}$$

Où V_s (mm^3) est le volume initial de la sonde et V_1 (mm^3) correspond au volume de la sonde au début de la phase pseudo-élastique.

Après chaque essai pressiométrique dans le massif, le forage est refermé par du matériau similaire à celui utilisé pour remplir la cuve. Une série d'essais préliminaires a permis de vérifier la répétabilité des essais et d'estimer l'incertitude de chacun des paramètres déterminés : E_M : $\pm 10\%$, P_f : $\pm 5\%$, P_l : $\pm 5\%$ (Eslami, 2014).

III.3. Caractérisation du matériau illitique

L'illite est une argile non gonflante présente en proportions variables dans de nombreux sols. Selon la bibliographie (Tanaka et al. 1996, Graham et al. 2001), l'illite est un matériau dont les propriétés sont susceptibles d'évoluer avec la température. Le matériau utilisé, nommé Arginotech®, est un produit commercialisé provenant de l'est de l'Allemagne, deux tonnes de matériaux ont été reçues. Les analyses en diffraction de rayon X, réalisées par Claude Fontaine (IC2MP, Poitiers) dans les mêmes conditions que celles décrites en partie II.1, montrent que ce matériau est principalement constitué d'illite, de calcite et de quartz et dans une moindre mesure de kaolinite (Figure II. 40). L'étude des minéraux argileux (Figure II. 41) confirme la nette dominance de l'illite associée à la kaolinite. L'étude semi-quantitative évalue à 54% la part de minéraux argileux (composés à 80% d'illite et à 20% de kaolinite) 30% de calcite, 14% de quartz et 2% de feldspath potassique (Figure II. 42).

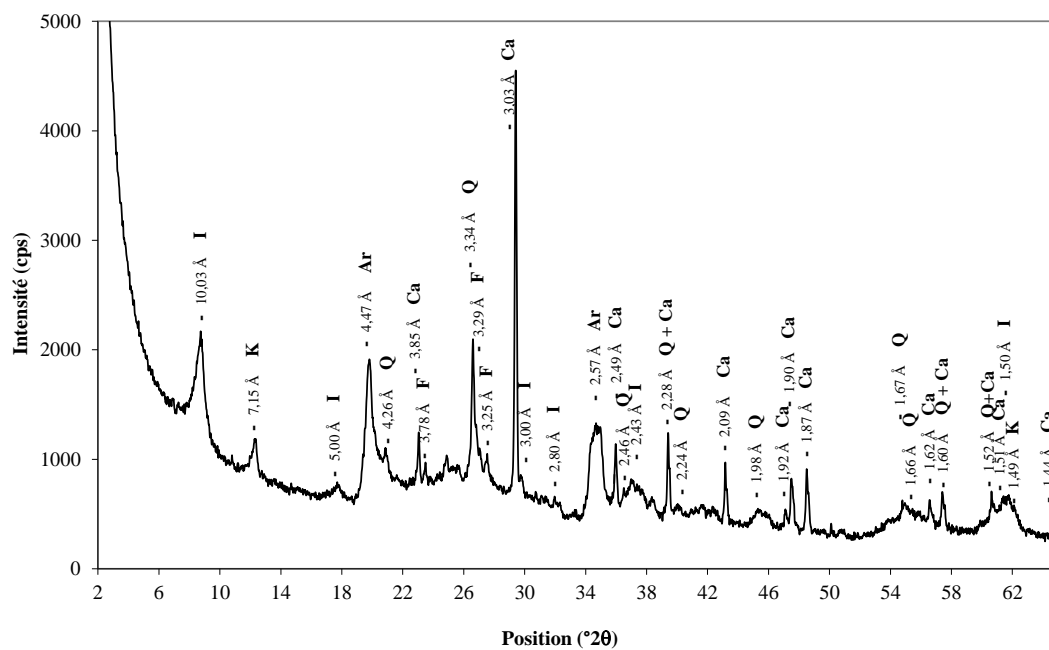


Figure II. 40 : Diffractogramme aux rayons X en mode poudre du matériau illitique (Ar : Minéraux argileux; Ca : Calcite; F : Feldspath potassique; I : Illite; K : Kaolinite; Q : Quartz).

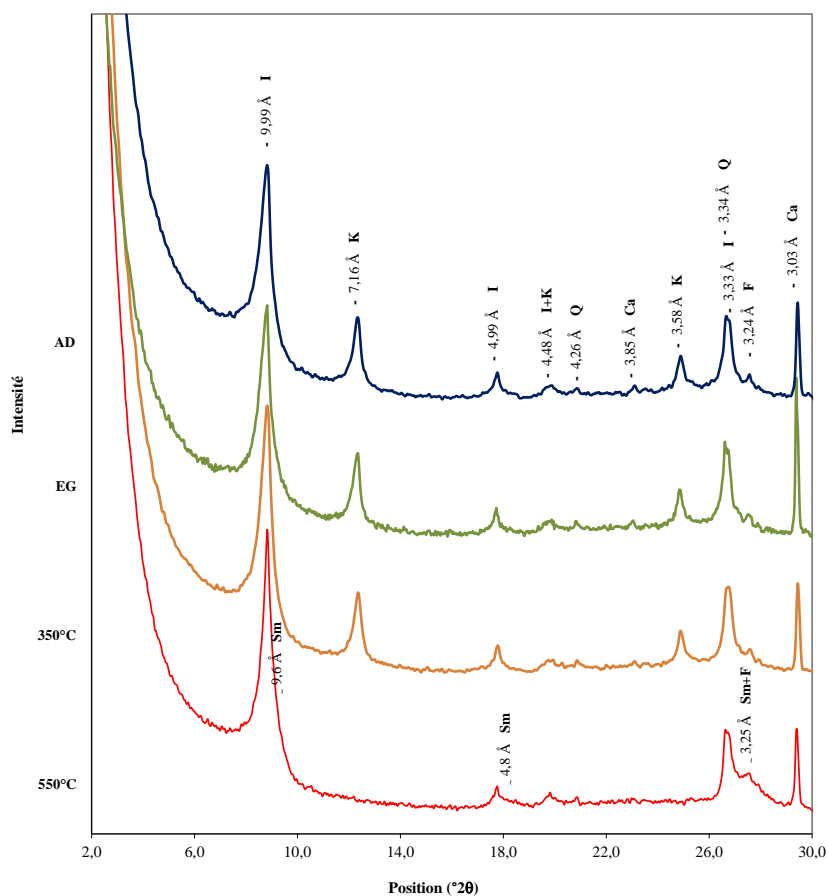


Figure II. 41 : Diffractogrammes aux rayons X des minéraux argileux du matériau illitique sur préparations orientées, séchée à l'air (AD), glycolée (EG) puis chauffée à 350°C et 500°C (Ca : Calcite; F : Feldspath potassique; I : Illite; K : Kaolinite, Q : Quartz; Sm : Smectite).

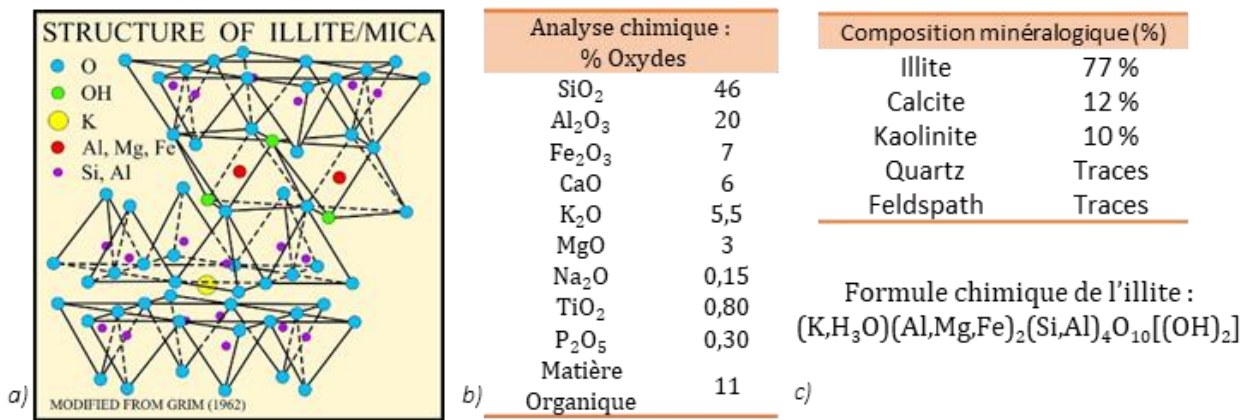


Figure II. 42 : a) Structure cristallographique de l'illite (USGS 2001), b) analyse chimique du matériau illitique et c) composition minéralogique.

La distribution de la taille des grains du matériau illitique est réalisée par granulométrie laser (Mastersizer 2000[®]) (AFNOR, 2009). Le matériau est constitué de 85% des particules infra-2 µm (classe des argiles), les 15% restant ayant un diamètre inférieur à 20 µm (classe des limons) (Figure II. 43a). Les résultats de la caractérisation physico-chimique du matériau sont présentés en Figure II. 43b. La limite de liquidité du matériau est de 65% et la limite de plasticité de 34%. L'indice de plasticité du matériau est donc de 31% (AFNOR 1993). La courbe de compactage Proctor normal (Figure II. 44a) permet de déterminer une teneur en eau optimale de 31,3% et une masse volumique sèche maximale de 1,43 Mg/m³ (AFNOR, 1999b). Ces résultats permettent de classer ce matériau A3 selon le GTR (2000) et MH selon la normalisation américaine ASTM (USCS, 2017).

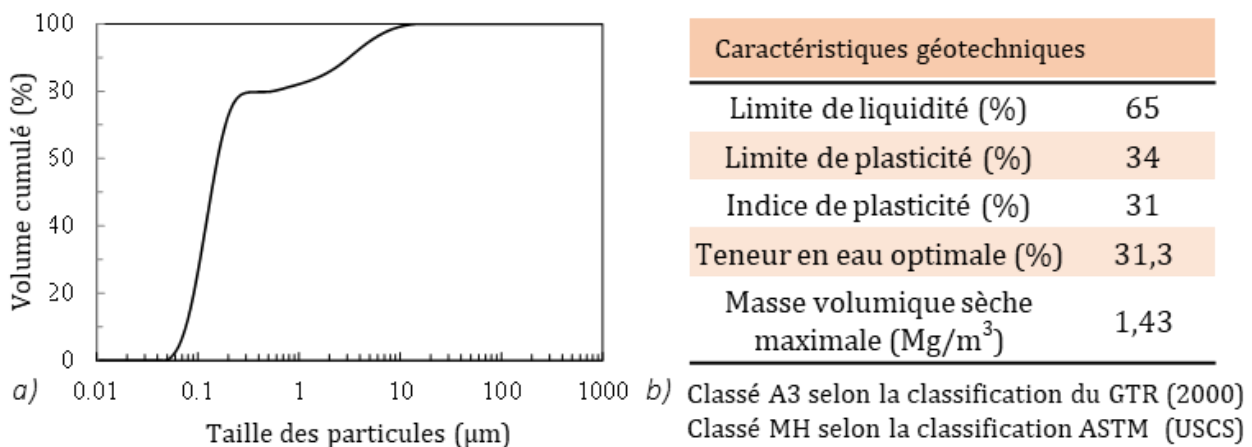


Figure II. 43 : a) Courbe granulométrique b) caractéristiques géotechniques du matériau illitique.

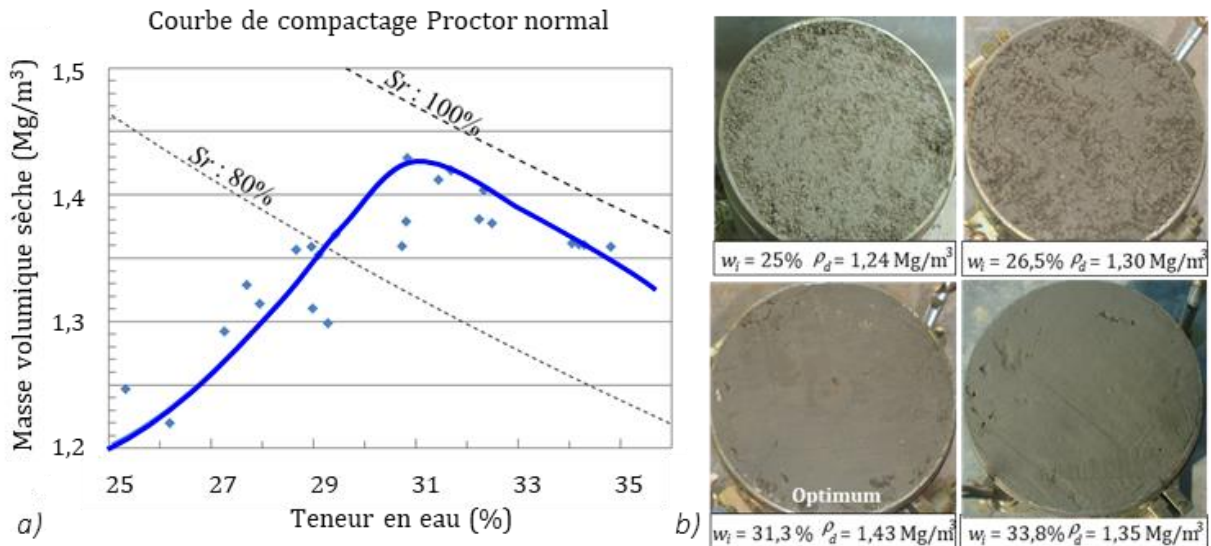


Figure II. 44 : a) Courbe de compactage Proctor normal et b) aspect des éprouvettes à différents états de compactage.

III.4. Evolution des paramètres pénétrométriques d'éprouvettes soumises à des variations monotones de la température

III.4.1. Présentation de la campagne expérimentale

Des essais mini-pénétrométriques sont réalisés à différents états de compaction afin d'identifier les états dans lesquels les sols compactés sont les plus sensibles à la température. L'objectif de ces expérimentations était de quantifier l'évolution de la résistance en pointe, ainsi que du frottement latéral lors de l'application de variations monotones de la température. Franchomme et al. (2013) ont réalisé des essais sur un mélange sable/kaolinite, quelques essais avaient été réalisés à différentes températures, aucun impact n'avait été détecté. Par la suite, des essais sur l'illite compactée ont été réalisés un grand nombre de points à 4 températures différentes (1, 20, 40 et 70 °C). Les éprouvettes d'illite sont préparées à des teneurs en eau initiales variant entre 23 et 35% et la masse volumique sèche obtenue est de 1,22 à 1,43 Mg/m³ (Tableau II. 7 et Figure II. 45). Pour cela, le matériau illitique est tout d'abord porté à une teneur en eau souhaitée puis laissé 24h dans un sac hermétique à 20°C pour une bonne homogénéisation de la teneur en eau. Le matériau humide est ensuite compacté de manière dynamique en 6 couches dans un moule de 152 mm de haut et 152 mm de diamètre (28 coups par couche).

Tableau II. 7 : Teneur en eau et masse volumique sèche des éprouvettes.

Eprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9
w (%)	25,2	25,8	27,9	28,9	29,8	30,4	31,9	32,7	34,2
ρ_d (Mg/m ³)	1,25	1,22	1,33	1,35	1,38	1,43	1,41	1,38	1,36

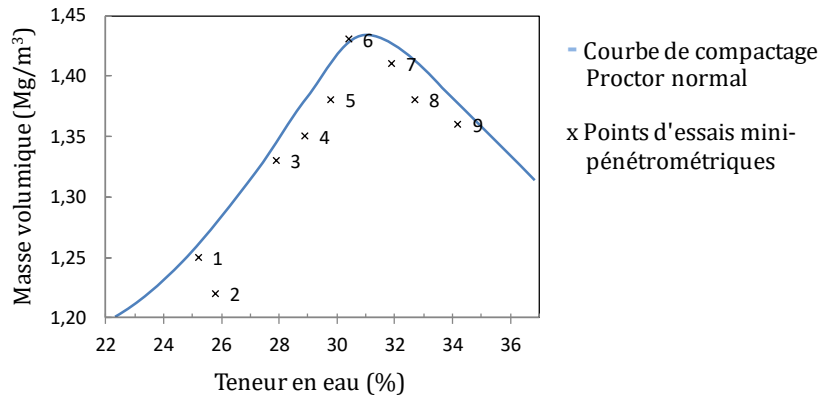


Figure II. 45 : Etat de compactage des éprouvettes en comparaison avec la courbe de compactage Proctor normal

III.4.2. Effet de l'état de compactage sur les paramètres mécaniques (20°C)

Les forces de pénétration des deux pointes sont mesurées pour chaque éprouvette. Les courbes obtenues avec l'aiguille P1 (Figure II. 46a) atteignent un plateau dès les premiers centimètres d'enfoncement, ce qui indique que les échantillons préparés sont homogènes. Les essais 5 et 8 sont menés sur des éprouvettes de même masse volumique sèche (1,38 Mg/m³) mais à des teneurs en eau différentes (respectivement 29,8 et 32,7 %). La diminution de Q_p d'environ 190 N est liée aux modifications structurales du fait de l'augmentation de la teneur en eau, les échantillons étant placés de part et d'autre de l'optimum de compactage.

La Figure II. 46b présente les forces de pénétration totales mesurées à l'aide de la pointe P2. Sur chaque courbe, une augmentation linéaire de la force est observée à mesure que l'aiguille pénètre le matériau, un frottement s'établit sur le fut de l'aiguille et s'ajoute aux contraintes en pointe. L'écart entre les résultats obtenus avec la pointe P1 et la pointe P2 permettent de calculer la force de frottement.

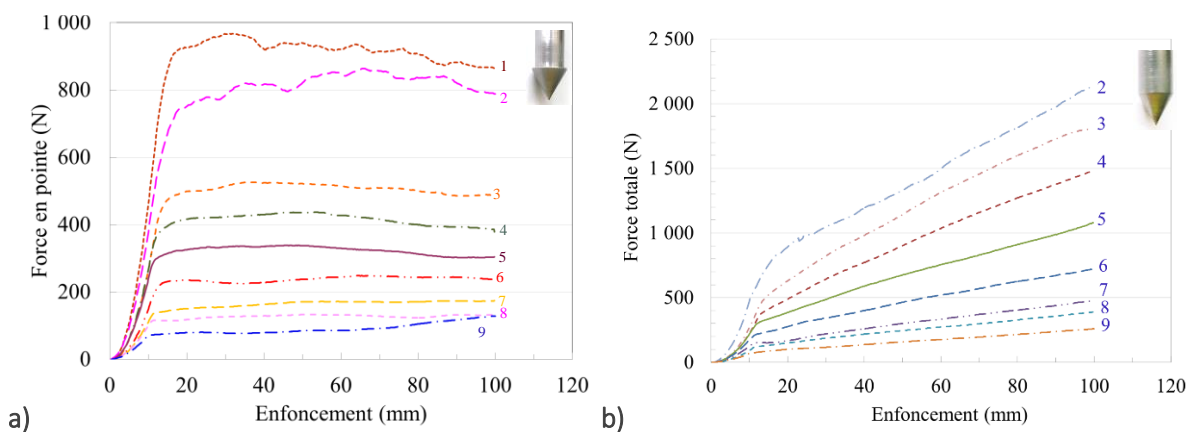


Figure II. 46 : Force d'enfoncement de l'aiguille P1 (a) et de l'aiguille P2 (b) en fonction de la profondeur pour des éprouvettes d'illite compactées à différentes teneurs en eau et masses volumiques sèches.

Pour chaque essai réalisé, les contraintes en pointe moyennes sont calculées pour des enfoncements de 50 à 100 mm avec la pointe P1. L'évolution en fonction des paramètres initiaux est présentée sur la Figure II. 47. Les valeurs maximales de contrainte en pointe sont obtenues pour

les matériaux les plus secs ($q_c = 11\ 000\ \text{kPa}$) ce qui est cohérent avec la forte succion à ces états de compactage, et elles diminuent à l'approche de l'optimum ($2\ 000\ \text{kPa}$). Du côté humide de l'optimum, la contrainte en pointe évolue faiblement pour atteindre des valeurs d'environ $1000\ \text{kPa}$.

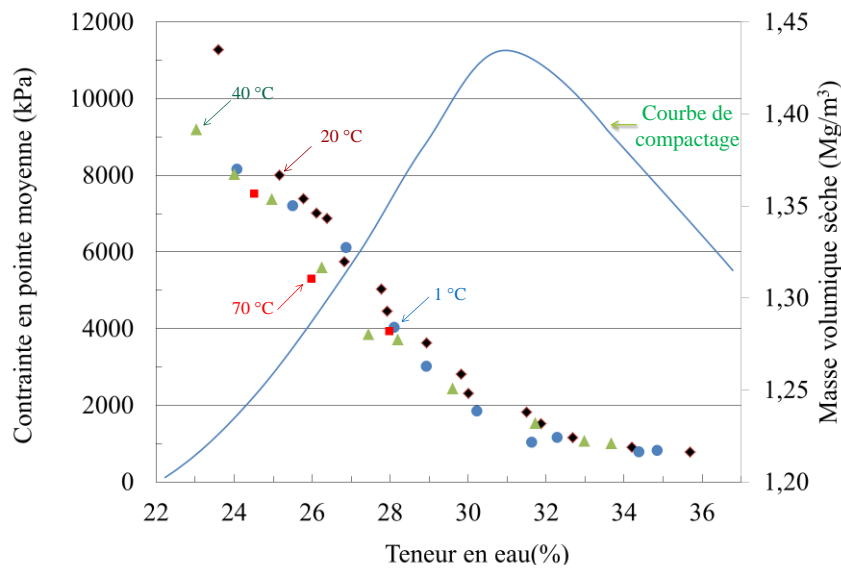


Figure II. 47 : Contrainte en pointe moyenne à 1, 20, 40 et 70°C à différentes teneurs en eau et masses volumiques sèches pour l'illite.

Les contraintes de frottement latéral sont calculées à partir des forces de frottement. Pour chaque essai réalisé, leur évolution est présentée en fonction des paramètres initiaux en Figure II. 48. Cette figure permet d'observer l'existence d'un maximum de contraintes de frottement latéral du côté sec de l'optimum de compactage. Cette évolution est cohérente avec les études de Marques et al. (2004) sur le module de cisailment normalisé. Du côté humide de l'optimum, les contraintes diminuent de façon monotone à mesure que l'on s'éloigne de l'optimum.

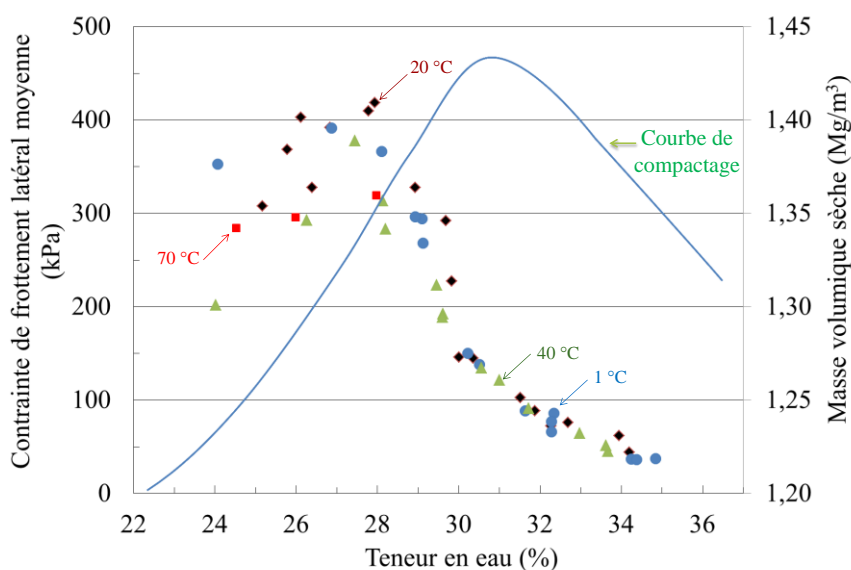


Figure II. 48 : Contrainte de frottement latéral moyenne à 1, 20, 40 et 70°C à différentes teneurs en eau et masses volumiques sèches pour l'illite

III.4.3. Influence de variations monotones de la température sur les paramètres mécaniques

D'autres séries d'essais ont été réalisées après refroidissement des éprouvettes à 1°C ou réchauffement à 40 ou 70 °C. Les résultats sont comparés aux résultats des essais à 20 °C dans les Figure II. 47 et Figure II. 48. Les évolutions à 1, 40 et 70 °C suivent les mêmes tendances que les essais à 20°C avec notamment une contrainte de frottement latéral qui atteint un maximum pour des valeurs de teneur en eau relativement faibles.

La contrainte en pointe et le frottement latéral sont peu affectés par les variations de température pour les éprouvettes préparées du côté humide de l'optimum. En revanche pour les éprouvettes préparées à des masses volumiques sèches et des teneurs en eau caractéristiques du côté sec de l'optimum, c'est-à-dire à des degrés de saturation plus faibles, l'augmentation de la température provoque une diminution sensible de la contrainte de frottement latéral. La contrainte en pointe évolue faiblement avec l'augmentation de la température mais sans atteindre des valeurs réellement significatives.

Ces résultats sont cohérents avec ceux de Wiebe et al. (1998), Uchaipichat et Khalili (2009) ou encore Gu et al. (2014) évoqués en partie discussion de la partie II. Leurs résultats montrent que la résistance au cisaillement de matériaux non saturés diminue avec l'augmentation de la température et que l'effet de la température est plus marqué quand le degré de saturation est faible (Figure II. 18), ce qui correspond à nos résultats du côté sec de l'optimum. Cette diminution de la résistance peut s'expliquer par la diminution de la succion puisque la dilation de l'eau dans les pores augmente le degré de saturation des éprouvettes (McCartney, 2016). La diminution des contraintes mesurées avec la température peut également s'expliquer par la diminution de la viscosité de l'eau avec l'augmentation de la température qui facilite les glissements entre les grains et entre le sol et l'aiguille, ce qui diminuerait les contraintes mesurées (Gu et al. 2014).

III.4.4. Apport de la campagne expérimentale à la thématique des pieux énergétiques

L'essai au pénétromètre à aiguille permet d'obtenir, en laboratoire, des paramètres proches de ceux utilisés pour le calcul de portance des pieux de fondation. Cet essai rapide et peu onéreux a permis d'étudier l'influence de la variation de la température sur des éprouvettes préparées à différents états initiaux (teneur en eau et densité sèche). Les résultats montrent que l'essai mini-pénétrométrique est un essai répétable, reproductible et efficace pour aborder les phénomènes complexes induits par l'utilisation de pieux énergétiques.

Pour les éprouvettes de matériau illitique, préparées à des états initiaux correspondants au côté humide de l'optimum, les évolutions des contraintes en pointe et de frottement latérales sont faibles, aucun impact de la température n'est détecté. Ces résultats iraient dans le sens d'une innocuité des variations thermiques induites par des pieux géothermiques sur les capacités de portance des matériaux à forte teneur en eau. En revanche, du côté sec de l'optimum, les paramètres évoluent fortement en fonction des conditions initiales. Une légère diminution de la contrainte de frottement latérale est observée pour des variations de 20 à 40°C qui se confirme à plus forte température (70°C).

La prise en compte de ces évolutions dans les calculs permettra d'évaluer leur impact sur les efforts admissibles des pieux géothermiques réalisés dans des matériaux sensibles à la température tels que les illites. L'évolution de ce paramètre est particulièrement importante pour les pieux qui fonctionnent principalement en frottement.

III.5. Evolution des paramètres pressiométriques d'éprouvettes soumises à des variations monotones de la température

III.5.1. Présentation de la campagne expérimentale

Plusieurs massifs tests ont été préparés dans la cuve d'essais décrite en partie III.3.1 afin de définir le nombre et l'épaisseur de chaque couche de matériau permettant d'atteindre une bonne reproductibilité (Eslami, 2014). Le protocole final consiste à humidifier le matériau illitique jusqu'à atteindre une teneur en eau de 31,3%. Le matériau humide est stocké dans des fûts étanches pour une durée minimale de 5 jours afin d'assurer une bonne homogénéisation puis compacté dans la cuve au moyen d'un compacteur pneumatique. Une plaque métallique, de diamètre légèrement inférieur à celui de la cuve, permet de répartir l'énergie de compactage. Le massif est compacté en 11 couches de 70 mm d'épaisseur, la masse volumique sèche visée est de $\rho_d = 1,29 \text{ Mg/m}^3$, soit 90% de la masse volumique sèche maximale. Sept sondes thermiques (PT100) sont introduites dans le massif au fur et à mesure du compactage afin de suivre l'évolution de la température du massif, notamment au cours de l'application des sollicitations thermiques appliquées par le thermorégulateur.

Dans ce chapitre, les résultats obtenus sur 4 massifs d'essais, comprenant chacun six essais mini-pressiométriques sont présentés. Un cycle de chauffage-refroidissement (20-40-20°C) a été appliqué au 1^{er} massif, un cycle de refroidissement-chauffage (20-1-20°C) a été appliqué au 2^{ème} massif et plusieurs cycles de chauffage-refroidissement entre 1 et 40°C ont été appliqués au 3^{ème} et 4^{ème} massif. Les mesures de température attestent que les massifs initiaux étaient toujours à 20°C à l'état initial et que l'équilibre thermique était atteint ($\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) avant chaque essai, soit en moyenne après un palier de 65 heures. Les essais effectués sont numérotés « Tn », où « T » est la température lors de l'essai (c'est-à-dire 1, 20 ou 40 °C) et « n » un indice qui s'incrémente pour chaque nouvel essai effectué à la même température.

III.5.2. Effet d'un cycle de chauffage ou de refroidissement sur les paramètres mécaniques d'un sol compacté

La température du **premier massif** est successivement portée à 20, 40 °C puis de nouveau à 20 °C. Les valeurs de la teneur en eau et de la masse volumique sèche obtenues à la fin de chaque palier sont moyennées et tracées (Figure II. 49). Les teneurs en eau sont toutes comprises entre 29,5% et 32%. Les masses volumiques sèches évoluent de 1,22 à 1,42 Mg/m³ et ce malgré le compactage du massif en 11 couches. Toutefois, les différents forages montrent les mêmes évolutions avec la profondeur, ainsi, le massif peut être considéré comme étant homogène dans le plan horizontal ce qui garantit que les essais sont réalisés dans des conditions similaires. La masse volumique sèche moyenne, dans la zone de réalisation de l'essai (de 200 à 580 mm de profondeur) est de $1,32 \pm 0,05 \text{ Mg/m}^3$. Un problème d'acquisition des données n'a pas permis l'exploitation de l'essai 20a. Les résultats des cinq autres essais sont présentés dans la Figure II. 49c et d. Ils permettent de déterminer les modules pressiométriques (E_M), les pressions de fluage (P_f), et les pressions limites (P_l) pour chaque essai (Tableau II. 8).

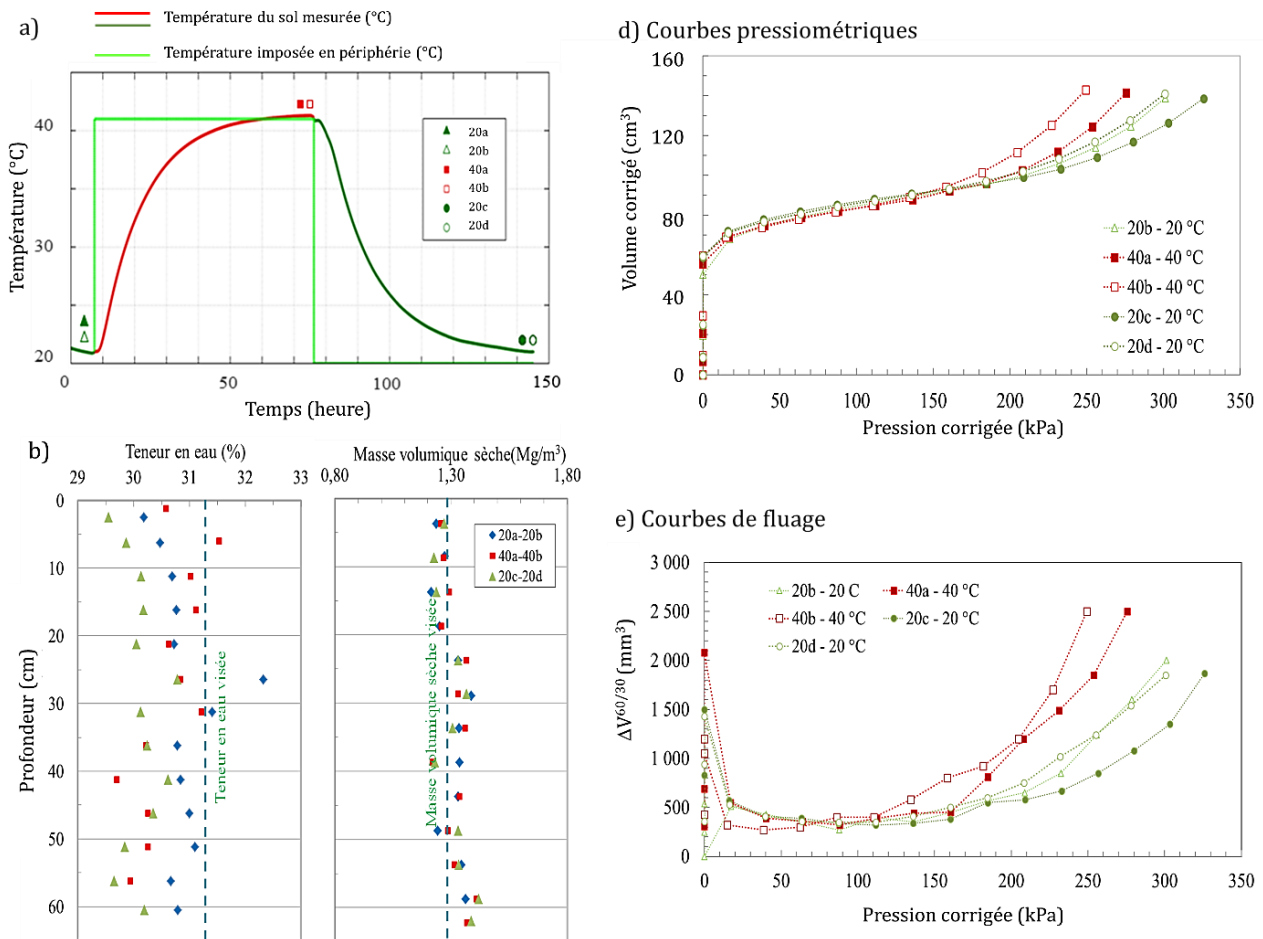


Figure II. 49 : Paramètres du premier massif : a) Evolution de la température au sein du massif à mi-hauteur et à 150 mm du bord de la cuve, b) Profils moyens de la teneur en eau et de la masse volumique sèche, c) Courbes pressiométriques et d) Courbes de fluage.

Les résultats montrent une variation inférieure à l'incertitude de E_M avec la température, tandis que les valeurs de P_f et P_i diminuent lors du chauffage à 40 °C. La diminution de P_f confirme la contraction du domaine de pseudo-élasticité de ce sol avec l'augmentation de la température. Les courbes acquises à 20°C en fin d'essai (20c et d) sont proches de la courbe initiale (20a) malgré le réchauffement à 40°C. Ainsi, malgré une évolution de ses propriétés à 40°C, le matériau semble avoir récupéré des propriétés similaires à ses propriétés initiales lorsque la température revient à 20°C.

Tableau II. 8. Paramètres pressiométriques obtenus lors des essais sur le premier massif (20-40-20 °C).

Essai	T (°C)	Cycle	w (%)	ρ_d (Mg.m ⁻³)	Sr (%)	P_f (kPa)	P_i (kPa)	E_M (kPa)
20b	20	0	31,0	1,31	78,9	194	355	3,54
40a	40	1	30,1	1,31	76,6	166	321	4,16
40b	40	1	30,4	1,31	77,4	165	288	3,25
20c	20	1	31,1	1,31	79,1	197	379	4,54
20d	20	1	31,1	1,32	80,3	178	352	3,89

Le **second massif** est compacté puis successivement porté à 20°, 1° puis à nouveau à 20°C, deux essais pressiométriques sont réalisés à la fin de chaque palier. Les teneurs en eau, mesurées avant chaque essai, sont comprises entre 31% et 32,9% et les masses volumiques sèches varient de 1,21 à 1,36 Mg/m³. La masse volumique sèche moyenne, dans la zone de réalisation de l'essai (de 200 à 580 mm de profondeur) est de 1,28 ± 0,05 Mg/m³.

Les courbes pressiométriques sont présentées sur la Figure II. 50 et les paramètres calculés en Tableau II. 9. Lors d'un refroidissement à 1 °C, la variation de E_M reste inférieure à l'incertitude, mais une augmentation des valeurs de P_f et P_i de respectivement 20% et 10% est observée. Ainsi, le domaine pseudo-élastique est plus étendu dans le cas d'un essai à 1 °C que dans le cas d'un essai à 20 °C traduisant un durcissement du matériau. Ce comportement mécanique, inverse à celui observé lors d'un réchauffement de 20° à 40° est cohérent avec les résultats précédents. Les paramètres mesurés pour les essais finaux à 20°C (20h et 20g) sont légèrement décalés par rapport aux résultats initiaux (20e et 20f) ce qui suggère une réversibilité seulement partielle de l'impact de la sollicitation thermique. Autrement dit, le matériau a conservé une trace de son passage à 1°C.

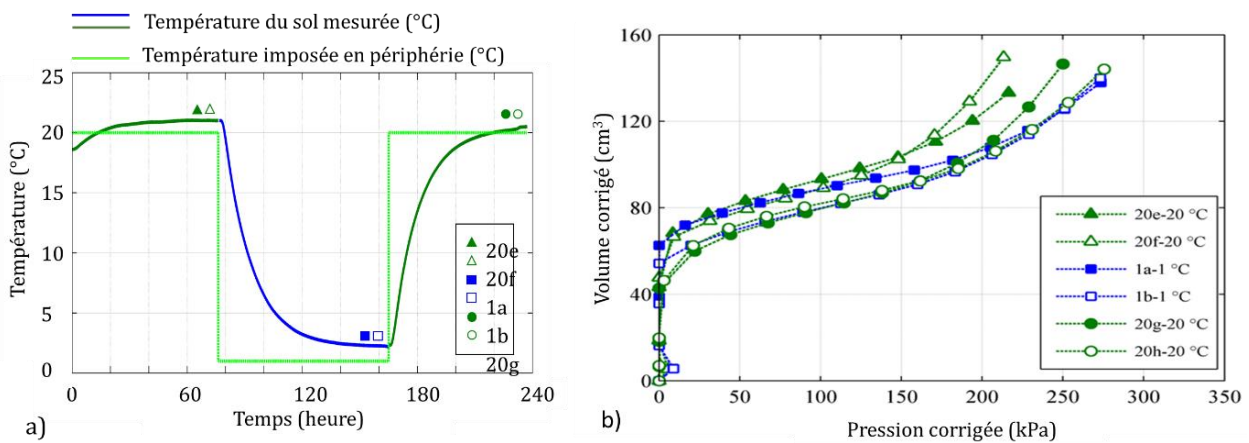


Figure II. 50 : Second massif : a) Evolution de la température au sein du massif à mi-hauteur et à 150 mm du bord de la cuve, b) Courbes pressiométriques.

Les résultats obtenus sur les deux premiers massifs montrent que les variations de températures ont un impact sur l'élasticité du matériau compacté. En effet le refroidissement entraîne un durcissement du matériau, augmentant ainsi sa résistance, tandis que le réchauffement diminue les capacités portantes du massif qui pourrait donc tasser sous son propre poids. De plus, lors de l'utilisation des pieux énergétiques, de nombreux cycles successifs seront appliqués, leur effet cumulé doit être vérifié.

Tableau II. 9 : Paramètres pressiométriques obtenus lors des essais du 2^{ème} massif (20-1-20 °C).

Essai	T (°C)	Cycle	w (%)	ρ_d (Mg.m ⁻³)	Sr (%)	P_f (kPa)	P_i (kPa)	E_M (kPa)
20e	20	0	31,8	1,34	84,6	132	305	2,47
20f	20	0	32,0	1,26	75,6	133	246	2,28
1a	1	1	32,2	1,29	79,5	181	339	3,4
1b	1	1	31,8	1,27	76,3	163	330	2,68
20g	20	1	32,1	1,27	77,0	157	286	2,36
20h	20	1	31,6	1,24	72,5	162	323	2,97

En plus de l'évolution des paramètres mécaniques, des variations de volumes pourraient apparaître, notamment sous le poids de la construction. Ces variations volumiques ne sont pas mesurées dans notre dispositif expérimental, il pourrait être adapté en ce sens par l'ajout de capteurs de déformation sur les flancs de la cuve d'essai avec probablement des incertitudes importantes du fait du volume du massif. Des essais sur des éprouvettes soumises à des contraintes triaxiales seraient probablement plus indiquées.

III.5.3. Effet de cycles successifs de chauffage-refroidissement sur les paramètres mécaniques d'un sol compacté

Les 2nd et 3^e massifs ont été préparés à une température initiale de 20°C puis successivement portés à 1°C puis 40°C (trois cycles). Pour ces massifs, comme les précédents, les variations des teneurs en eau et des densités sèches mesurées par carottage sont inférieures à 1%. Les essais mini-pressiométriques pour le 3^{ème} massif (Figure II. 51a) sont réalisés à l'état initial, à 20°C (20i) puis au cours du premier (1c et 40c) et du dernier cycle (1d, 40d et 1e). Pour le 4^{ème} massif (Figure II. 51b), les essais sont réalisés systématiquement à chaque palier à 1 °C (1f ; 1g et 1h) et 40 °C (40e ; 40f et 40g) mais la valeur à 20°C n'a pas été acquise. La comparaison globale des courbes pressiométriques obtenues (Figure II. 52) confirme une diminution de l'étendue du domaine pseudo-élastique lors des paliers à 40°C (thermal softening) et une augmentation lors des paliers à 1°C (thermal hardening).

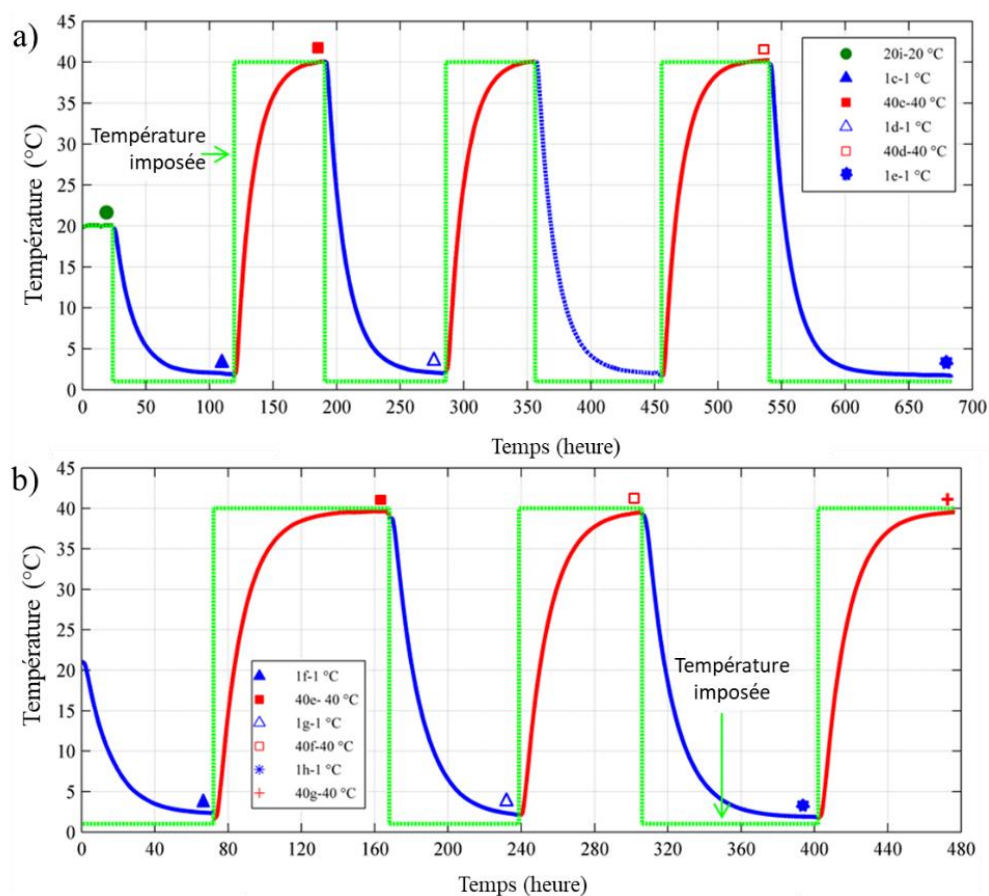


Figure II. 51. Evolution des températures au sein des 3^{ème} et 4^{ème} massifs (a et b) à 150 mm du bord de la cuve et chronologie des essais réalisés.

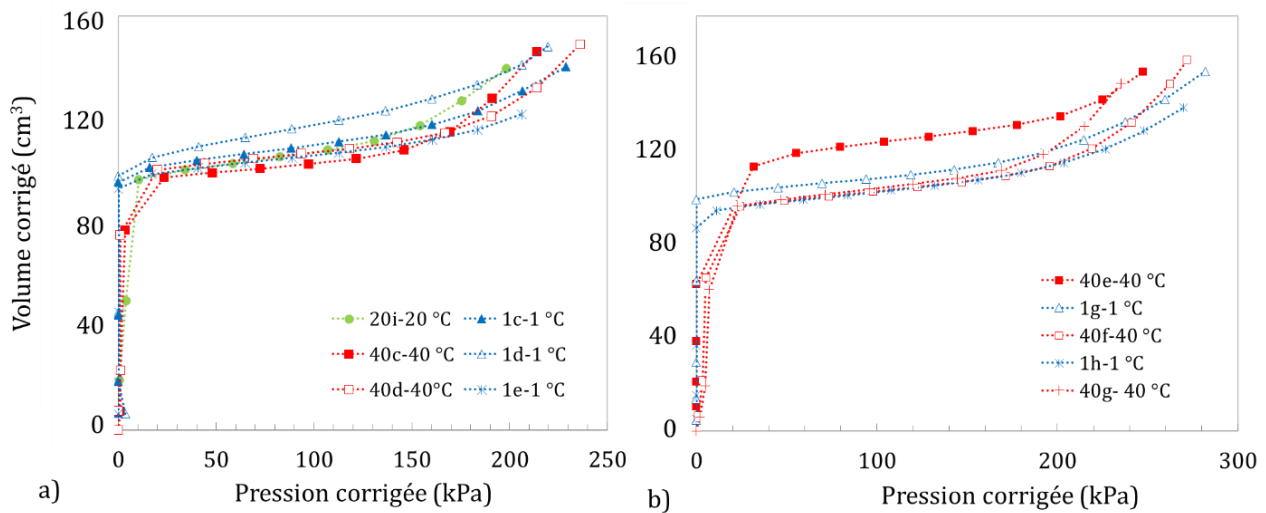


Figure II. 52. Courbes pressiométriques obtenues a) dans le 3^{ème} massif et b) dans le 4^{ème} massif.

Les paramètres pressiométriques, calculés pour chaque étape sont donnés en Tableau II. 10 et Tableau II. 11 puis représentés graphiquement en Figure II. 53. Les évolutions des deux massifs sont comparables l'une avec l'autre. Au cours du premier refroidissement, la pression de fluage P_f augmente sensiblement (+ 30%) pour atteindre une valeur qui peut être considérée comme stable au-delà de cette première sollicitation puisque les évolutions suivantes ne dépassent pas le domaine d'incertitude de 5% pour ce paramètre (Figure II. 53a, b).

Tableau II. 10 : Paramètres pressiométriques obtenus dans le 3^{ème} massif.

Essai	T (°C)	w (%)	ρ_d (Mg.m ⁻³)	Sr (%)	P_f (kPa)	P_l (kPa)	E_M (kPa)
20i	20	31,4	1,25	73,1	103	240	5,51
1c	1	31,4	1,26	74,2	124	303	5,73
40c	40	32,1	1,25	74,7	125	236	7,68
1d	1	31,7	1,25	73,8	123	337	4,16
40d	40	31,5	1,28	76,7	143	270	6,85
1e	1	31,6	1,24	72,5	133	310	5,66

Tableau II. 11: Paramètres pressiométriques obtenus dans le 4^{ème} massif.

Essai	T (°C)	w (%)	ρ_d (Mg.m ⁻³)	Sr (%)	P_f (kPa)	P_l (kPa)	E_M (kPa)
40e	40	31,2	1,3	78,2	174	305	6,24
1g	1	31,5	1,24	72,2	170	357	6,97
40f	40	31,2	1,28	75,9	170	307	6,18
1h	1	31,0	1,24	71,1	160	344	6,16
40g	40	31,1	1,25	72,4	153	276	5,76

L'évolution de la pression limite P_l est nettement plus prononcée, toutes les valeurs mesurées à 40°C sont inférieures à celles mesurées à 1°C. Cette évolution, réversible, est vérifiée à chaque palier, le taux de variation est estimé à 1,5 kPa/°C dans la plage de température étudiée (1-40 °C) (Figure II. 53c, d). La pression limite est un paramètre dimensionnant pour les fondations des bâtiments. Une diminution de la valeur de P_l , comme c'est le cas à 40°C se traduit par une diminution de la contrainte de rupture sous chargement vertical. Son évolution doit donc être prise en compte dans les calculs en considérant les situations les plus contraignantes, c'est-à-dire à 40°C.

L'incertitude sur la détermination expérimentale des modules pressiométriques E_M est généralement plus élevée que celle sur la résistance du fait que le module cumule les incertitudes des deux paramètres mesurés (la force et la déformation) et qu'il est sensible au choix de sa plage de détermination. Cela s'est confirmé lors des essais de répétabilité qui ont montré une incertitude du module pressiométrique E_M de 10%, une valeur nettement supérieure aux incertitudes sur les autres paramètres (5%). Ainsi, les valeurs mesurées présentent une plus grande variabilité et sont plus difficiles à interpréter (Figure II. 53e, f).

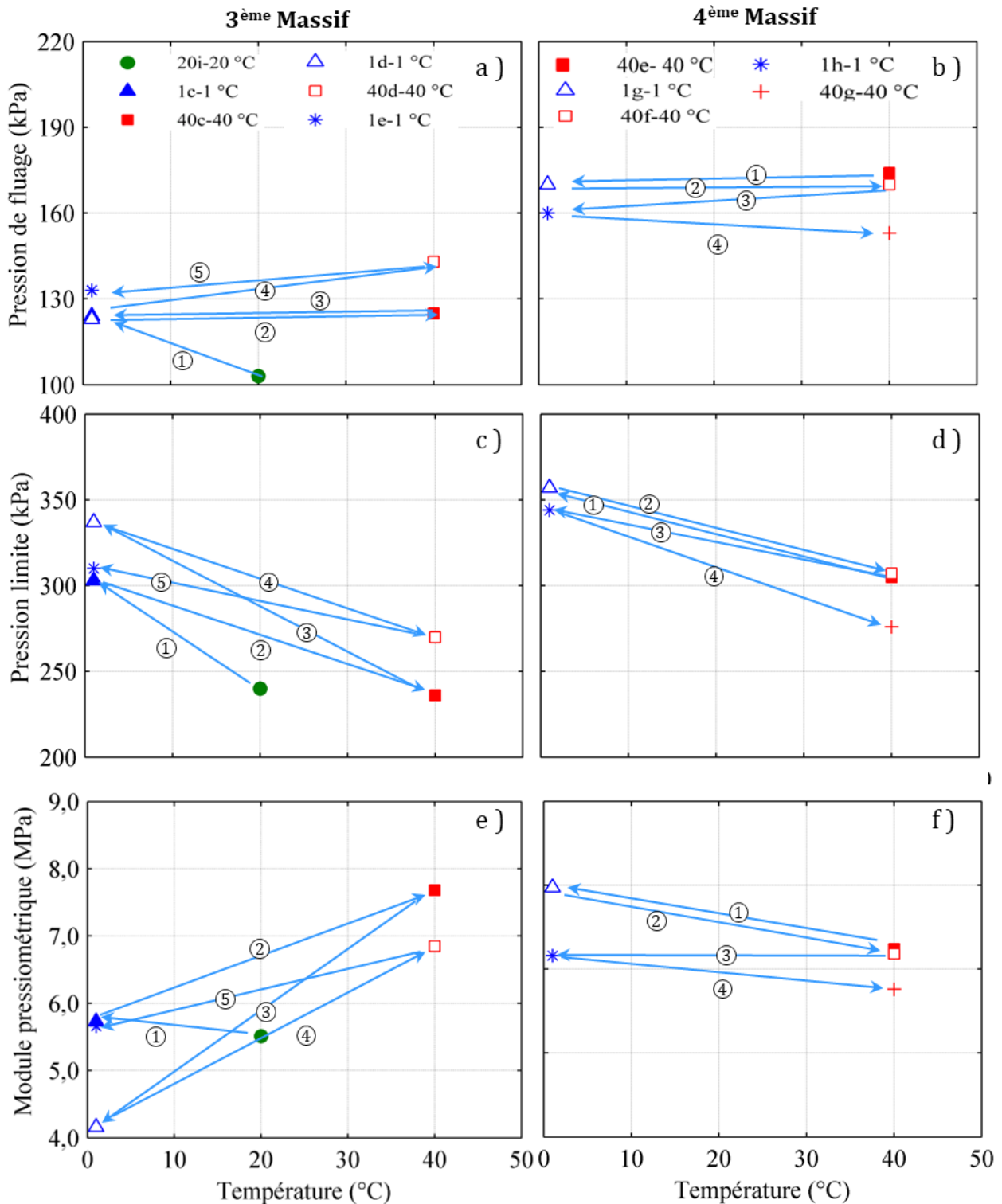


Figure II. 53 : Variation de la pression de fluage (P_f) (a-b), de la pression limite (P_l) (c-d) et du module pressiométrique (E_M) (e-f) pour chaque palier du 3^{ème} et du 4^{ème} massif.

III.5.4. Modélisation numérique

Plusieurs modèles numériques ont été développés afin d'estimer les déformations induites par des variations de température (Bourne-Webb et al. 2009 ; Laloui et al. 2003 ; Knellwolf et al. 2011). Ces méthodes peuvent être classées en deux familles : (1) les modèles tridimensionnels aux éléments finis avec mise en place des éléments d'interface pour caractériser les interactions sol/pieu, et (2) les modèles 1D avec une approche en différences finies.

Actuellement, l'utilisation des méthodes aux éléments finis 3D en ingénierie reste limitée puisque ces modèles nécessitent un grand nombre de paramètres et de nombreux essais pour calibrer ces paramètres. Par conséquent, le développement d'outils pratiques, numériques, fondés sur des théories simplifiées peuvent constituer une base intéressante pour la conception des pieux énergétiques. Arai et al. (2015) ont caractérisé le comportement mécanique du sol à l'aide de la méthode de transfert de charge de Frank et Zhao (1982). Le modèle bilinéaire dépend de quatre paramètres : le module tangent initial E_0 , le module tangent final E_c , le coefficient de Poisson ν et la déformation limite $\epsilon_{v \text{ limit}}$ pour le changement du module. La relation entre la déformation ϵ et l'effort de contrainte σ est donnée par les équations suivantes (Figure II. 54a):

$$\begin{cases} \text{Si } \epsilon < \epsilon_{v \text{ limit}} : \sigma = E_0 \epsilon \\ \text{Si } \epsilon > \epsilon_{v \text{ limit}} : \sigma = E_0 \epsilon_{v \text{ limit}} + E_c (\epsilon - \epsilon_{v \text{ limit}}) \end{cases} \quad \text{Équation 13}$$

Le module tangent initial E_0 est calculé en fonction de la moyenne des modules de Ménard E_M issus des essais pressiométriques pour chaque température. Seules les parties pseudo-élastique et plastique des courbes pressiométriques ont été considérées. Le module E_0 est donné par la relation suivante :

$$E_0 = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{\alpha(1-\nu)} E_M \quad \text{Équation 14}$$

Avec α le coefficient rhéologique du matériau et ν le coefficient de Poisson.

Le coefficient rhéologique dépend du rapport de la pression limite P_l sur le module pressiométrique E_M . Dans le cas de l'illite compactée, pour des valeurs de E_M/P_l allant de 7 à 12, α est fixé à 0,5 (Ménard 1975). Dans un premier temps, l'effet de la température sur l'état hydrique est négligé, la simulation est réalisée dans un cadre de calcul thermomécanique.

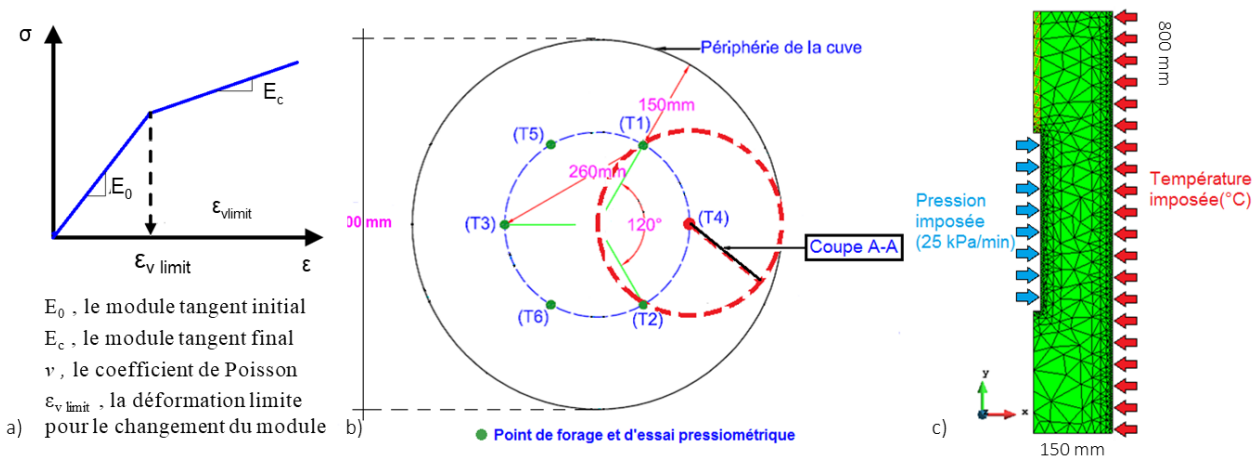


Figure II. 54 : a) Variation du module en fonction de la déformation volumique selon le modèle de Frank et Zao (1982), b) Géométrie de la cuve vue en plan, c) Conditions aux limites.

Pour chaque cuve, les valeurs des paramètres mécaniques sont résumées dans le Tableau II. 12. Le module plastique E_c final est ajusté par rapport aux résultats expérimentaux tandis que la déformation limite $\varepsilon_{v\text{limit}}$ est assimilée à la variation de volume qui correspond au point de fluage sur la courbe pressiométrique. Le coefficient de Poisson ν est considéré constant ($\nu = 0,3$). Les simulations numériques des variations volumiques en fonction de la pression appliquée sont comparées aux résultats expérimentaux en Figure II. 55a et b. Le modèle est capable de reproduire correctement la variation volumique en fonction de la pression appliquée à différentes températures.

Tableau II. 12 : Paramètres mécaniques utilisés pour la simulation des essais pressiométriques en fonction de la température (C1 et C2).

Cuves	T (°C)	E_M (MPa)	E_0 (MPa)	$\varepsilon_{v\text{limit}}$	ν	E_c (MPa)
C1	20	3,716	5,521	0,00335	0,3	0,3
	40	3,231	4,8	0,00218		
C2	20	2,405	3,57	0,003	0,3	0,3
	1	2,650	3,94	0,0035		

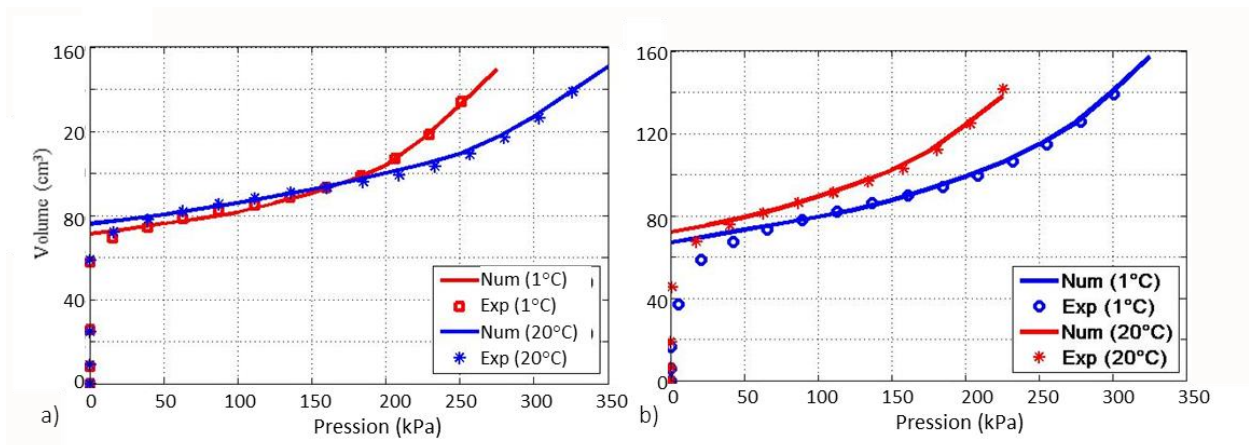


Figure II. 55 : Exemples de confrontation numérique et expérimentale de la déformation volumique en fonction de la pression appliquée a) 1^{er} massif à 20°C et à 40°C, b) 2nd massif à 20°C et 1°C.

La Figure II. 56 donne la variation de $\varepsilon_{v\text{limit}}$ et de P_I en fonction de la température. Les résultats obtenus pour ces deux paramètres varient de façon analogue en fonction de la température. D'après ces résultats, une relation linéaire entre la température T et la déformation limite $\varepsilon_{v\text{limit}}$ peut être proposée pour le matériau illitique étudié :

$$\varepsilon_{v\text{limit}} = -3,41 \cdot 10^{-5} T + 3,697 \cdot 10^{-3} \quad \text{Équation 15}$$

La modélisation des résultats pressiométriques rend possible leur utilisation dans des codes de calcul tels que le Code-Bright pour prendre en compte l'effet de la variation de la température sur le comportement mécanique des géostructures énergétiques.

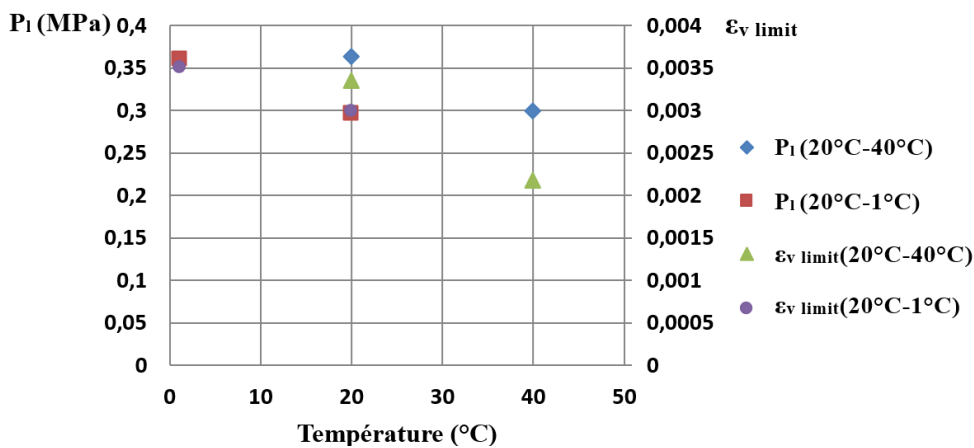


Figure II. 56 : Variation de la pression limite P_l et de la déformation limite ϵ_v limit en fonction de la température.

III.6. Étude in situ de l'impact de variations thermiques cycliques sur les propriétés mécaniques d'un sol sableux

Un site expérimental in situ, situé dans le nord de la France, à Coudekerque-Branche près de Dunkerque a été étudié de manière intensive dans le cadre du projet ANR GECKO (Figure II. 57a,b). Le sol est principalement composé de sable sous une couche de limons de trois mètres d'épaisseur. La nappe phréatique se trouve à 1,6 m de profondeur. Szymkiewicz et al. (2015) ont réalisé un essai pressiométrique Ménard ainsi qu'un carottage pour évaluer la pression limite, la teneur en eau, la distribution granulométrique, la densité, l'angle de frottement et la cohésion du sol jusqu'à 15 mètres de profondeur (Figure II. 57c).

Le Tableau II. 13 reprend les paramètres pressiométriques acquis sur site à des profondeurs de 3 et 4 mètres. À ces profondeurs, les diamètres des particules sont compris entre 0,1 et 0,3 mm. Trois pieux géothermiques de 12 m de long et 0,52 m de diamètre, espacés de 2,5 m ont été réalisés sur le site expérimental en juillet 2013 (Figure II. 58). Quatre cycles de chauffage-refroidissement dans la gamme de 5 à 40°C ont été appliqués pendant 5 mois à l'aide d'un thermorégulateur de mai 2014 à septembre 2014 (Figure II. 59). Les variations de température résultantes ont été mesurées à l'aide de fibres optiques placées à l'intérieur de chaque pieu.

Tableau II. 13: Paramètres pressiométriques mesurés à 3 et 4 m de profondeur selon l'essai sur site.

Profondeur (m)	E_p (MPa)	P_l (kPa)	P_f (kPa)
3 m	2,8	550	200
4 m	5,1	1070	600

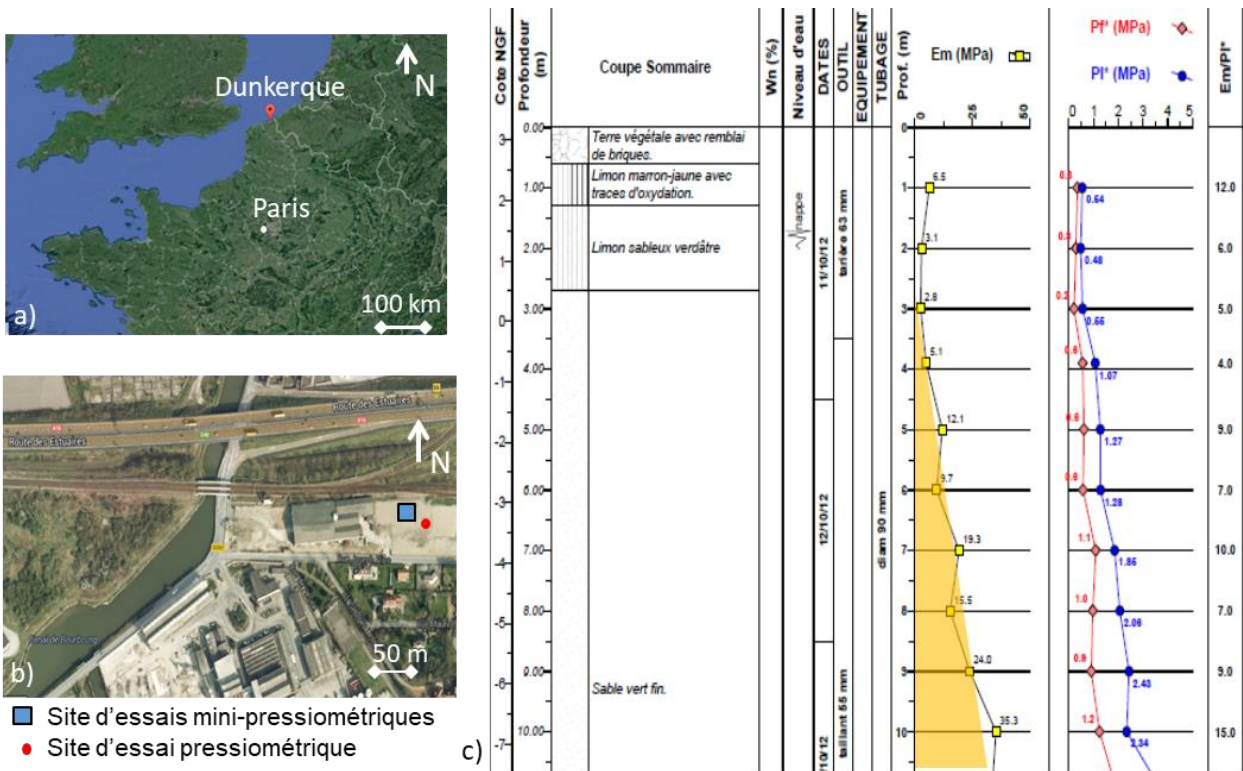
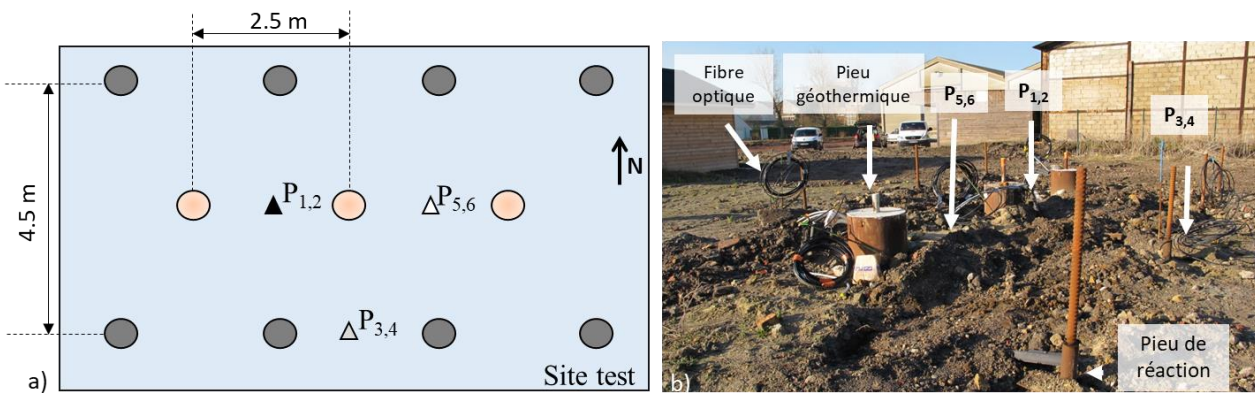


Figure II. 57 : a-b) Localisation du site d'essai (modifié de Google Earth) ; c) Extrait du résultat de l'essai pressiométrique réalisé sur site (Szymkiewicz et al. 2015)



- Pieu géothermique de 0.52 m de diamètre
 - Pieux de réaction
- Essais mini-pressiométriques réalisés à 3 et 4 m de profondeur :
- ▲▲ P_{1,2,3,4} avant l'application des cycles de variation de la température (5 mars 2014)
 - △ P_{5,6} après l'application des cycles de variation de la température (29 octobre 2014)

Figure II. 58 : a) Plan de localisation des pieux géothermiques et des essais mini-pressiométriques réalisés ; b) Photographie du site instrumenté.

Dans cette étude, des six essais mini-pressiométriques ont été réalisés à 3 et 4 m de profondeur avant (P1 à P4, le 5 mars 2014) et après (P5 et P6, le 29 octobre 2014) l'application de la variation cyclique de la température (Rosin-Paumier et al. 2020). Les essais, ont été réalisés aux emplacements indiqués en Figure II. 58 à deux profondeurs différentes. Les essais P1, P3 et P5 ont été réalisés à une profondeur de 3 m tandis que les essais P2, P4 et P6 ont été réalisés à 4m de

profondeur. Les essais P1, P2, P5 et P6 ont été positionnés à proximité du pieu géothermique (à 1,25 m de la source de chaleur), tandis que les essais P3 et P4 ont été positionnés à une distance plus importante des pieux (2,25m). Les caractéristiques de chaque essai sont résumées en Tableau II. 14.

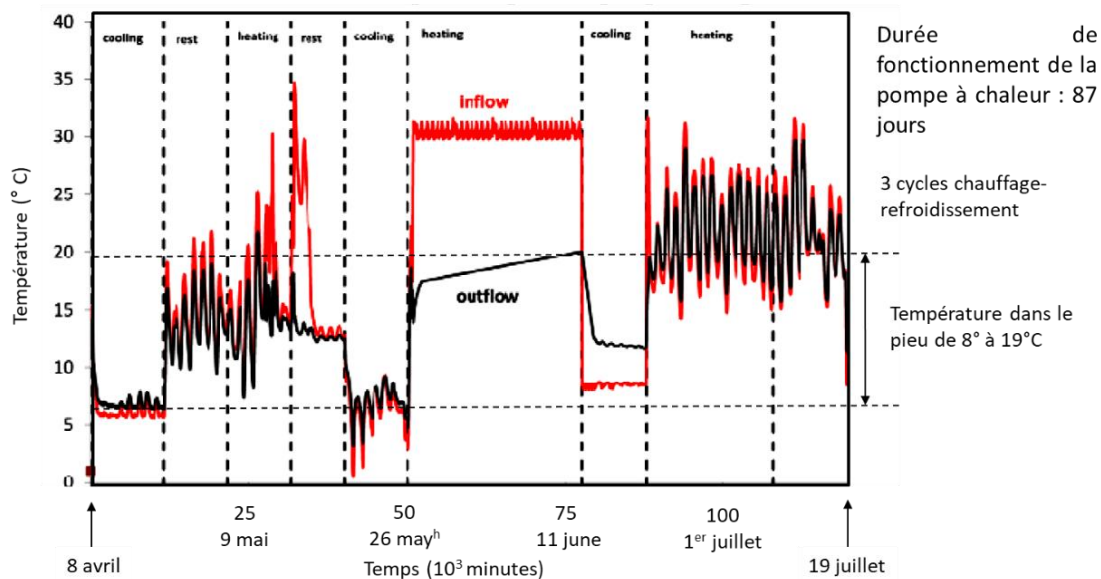


Figure II. 59 : Température du fluide caloporteur entrant et sortant des pieux géothermiques au cours de la période de fonctionnement de la pompe à chaleur (Rapport ANR GECKO, Bernard et al. 2015).

La variation verticale de la lithologie apparaît clairement en comparant les courbes pressiométriques obtenues à une profondeur de 3 m (P1 et P3) avec celles obtenues à une profondeur de 4m (P2 et P4) (Figure II. 60). Les premiers tests se réfèrent à la partie supérieure de la couche lithologique des sables verts fins qui tend à se densifier en fonction de la profondeur (Figure II. 57c). Les paramètres pressiométriques (Tableau II. 13) et mini-pressiométriques (Tableau II. 14) calculés sont comparables, ce qui tend à montrer une bonne concordance entre les deux méthodes pour ce type de sols superficiels. Une faible variation latérale de faciès à 3m est détectée à la comparaison des essais P1 et P3 tandis que le massif semble homogène à 4m de profondeur (essais P2 et P4).

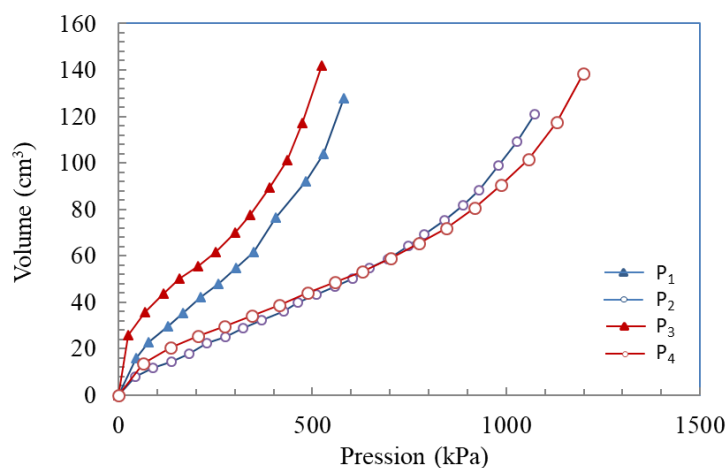


Figure II. 60 : Courbes mini-pressiométriques obtenues lors des essais P1, P2, P3 et P4 réalisés avant l'application des cycles de variation de la température.

Tableau II. 14 : Résultats des essais mini-pressiométriques réalisés sur site.

Essai	Date	Distance au pieu	Profondeur	Paramètres mini-pressiométriques		
				E_p (MPa)	P_l (kPa)	P_f (kPa)
P ₁	5 mars 2014	1,25 m	3 m	3,24	573	340
P ₂	5 mars 2014	1,25 m	4 m	5,95	1241	720
P ₃	5 mars 2014	2,25 m	3 m	2,93	625	360
P ₄	5 mars 2014	2,25 m	4 m	5,02	1106	610
P ₅	29 octobre 2014	1,25 m	3m	3,68	726	400
P ₆	29 octobre 2014	1,25 m	4m	5,57	1122	920

Trois cycles de chauffage-refroidissement dans la gamme de 5 à 40°C ont été appliqués pendant 5 mois à l'aide d'un thermorégulateur (de mai 2014 à septembre 2014). Les variations de températures du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de l'ensemble des pieux, sont représentés en Figure II. 59. Maragna et al. (dans Bernard et al. 2015) ont pu déterminer la variation de la température du premier et du second pieu géothermique (placé au centre du site d'essai) à l'aide des fibres optiques. La Figure II. 61 montre que la température atteint un maximum de 16°C après 15 jours de chauffage, soit une augmentation de la température du sol environnant de seulement 1,5°C au contact du premier pieu, et de 3°C au contact du second pieu qui bénéficie de la proximité des deux autres pieux géothermiques. La température usuelle du sol est retrouvée deux jours après l'arrêt du cycle de chauffage (12 juin, Figure II. 61). La température du sol reste proche des 13°C malgré la faible température du fluide entrant (environ 6°C selon la Figure II. 59). Du fait de la circulation active de la nappe d'eau souterraine dans cet horizon sableux.

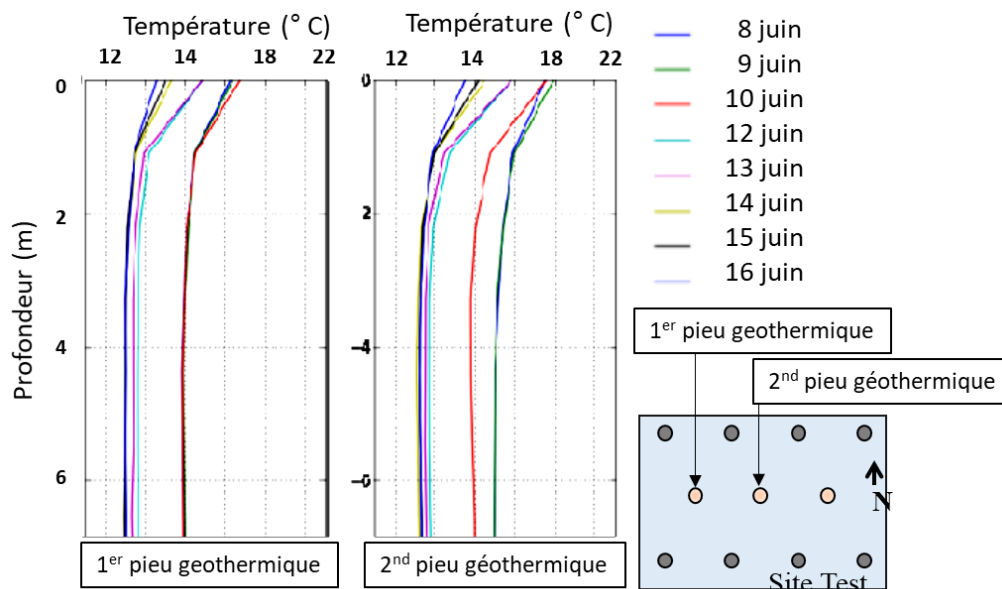
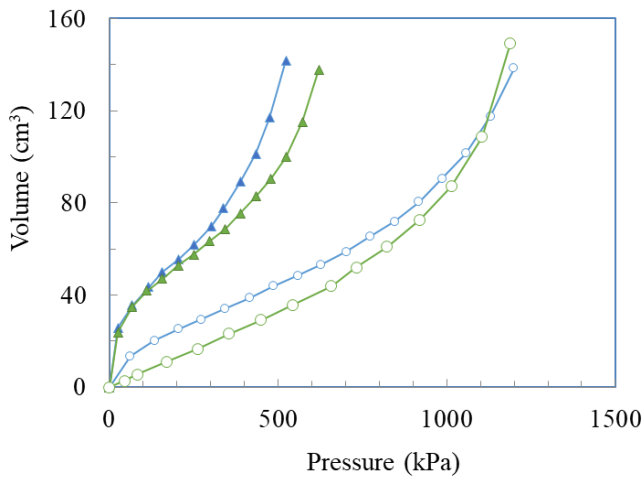


Figure II. 61 : Températures mesurées dans le 1^{er} et le 2nd pieu géothermique à l'aide de fibres optiques.

Les essais P5 et P6 ont été réalisés après la sollicitation thermique des pieux. En accord avec la faible amplitude de variation de température des pieux, la différence entre les courbes initiales et finales sont faibles (Figure II. 62). Cependant, la comparaison des paramètres pressiométriques calculés à une profondeur de 3 m (P1 et P5), montre une augmentation sensible du module pressiométrique, de la pression limite et de la pression de fluage.



	ΔE_p	ΔP_l	ΔP_f
3 m	+ 14 %	+ 27 %	+ 18 %
4 m	- 6 %	- 10 %	+ 28 %

Figure II. 62 : Comparaison des courbes pressiométriques obtenues avant et après application de cycles variations de température.

Cette augmentation est cohérente avec les résultats obtenus précédemment en laboratoire et les résultats de l'essai de chargement des pieux réalisé au cours du projet (Szymkiewicz et al. 2015). En effet, l'initiation des courbes de chargement avant et après application des cycles sont superposées, ce qui indique un comportement élastique peu affecté par les variations de température (Figure II. 63a). Une nette différence est en revanche mesurée pour ce qui concerne le début de plastification du sol qui apparaît sous une charge plus importante après l'application des variations de température. Cette rigidification peut être liée à une densification du sol à l'interface sol-pieu ou à une évolution des propriétés mécaniques du sol environnant. Les résultats des essais mini-pressiométriques, présentés dans un repère contrainte-déformation en Figure II. 63b confirment que les caractéristiques mécaniques du sols ont évolués dans le sens d'une augmentation de la résistance du sol.

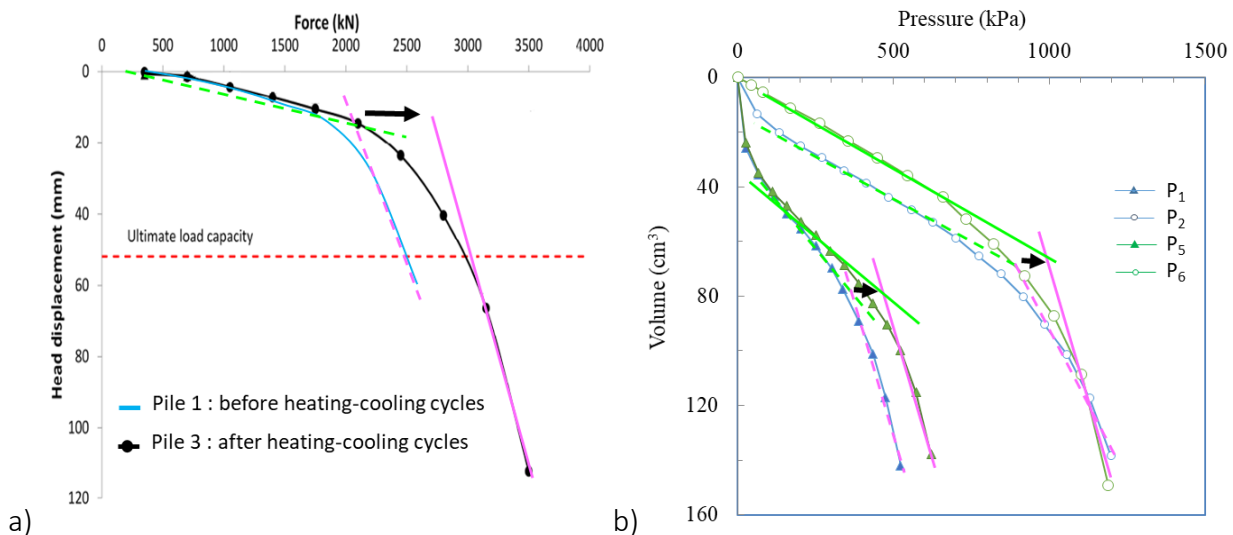


Figure II. 63 : a) Essai de chargement de pieu in situ (Szymkiewicz et al. 2015) avant et après application des cycles de chauffage-refroidissement aux pieux géothermiques. b) résultats des essais mini-pressiométriques.

III.7. Conclusion

Les protocoles expérimentaux mis en place ont permis de quantifier l'effet de multiples cycles de chauffage-refroidissement (1-40 °C) sur les paramètres mécaniques d'un sol argileux compacté sélectionné pour sa sensibilité aux variations de température (matériau illitique).

L'essai au pénétromètre à aiguille permet d'obtenir, en laboratoire, des paramètres proches de ceux utilisés pour le calcul de portance des pieux de fondation. Cet essai rapide et peu onéreux a permis d'étudier l'influence de la variation de la température sur des éprouvettes préparées à différents états initiaux (teneur en eau et densité sèche).

Pour les éprouvettes de matériau illitique, préparées avec des états initiaux correspondants au côté humide de l'optimum, les évolutions des contraintes en pointe et de frottement latéral sont faibles, aucun impact de la température n'est détecté. Ces résultats iraient dans le sens d'une innocuité des variations thermiques induites par des pieux géothermiques sur les capacités de portance des matériaux à forte teneur en eau. En revanche, du côté sec de l'optimum, les paramètres évoluent fortement en fonction des conditions initiales. Une légère diminution de la contrainte de frottement latéral est observée pour des variations de 20 à 40°C qui se confirme à plus forte température (70°C). La prise en compte de ces évolutions dans les calculs permettra d'évaluer leur impact sur les efforts admissibles des pieux géothermiques réalisés dans des matériaux sensibles à la température tels que les illites.

La réalisation d'essais mini-pressiométriques en cuve d'essai a montré que lors de l'application de 3 cycles thermiques, l'effet du premier cycle est plus important que celui des cycles suivants. Lors d'un refroidissement (20-1-20), un léger durcissement est mesuré et cette évolution semble n'être qu'en partie réversible. Ainsi, le premier refroidissement occasionne une restructuration du matériau qui lui permet d'atteindre un nouvel équilibre susceptible de supporter des contraintes plus importantes. Par conséquent, lors de l'application du second refroidissement, le matériau est moins déformable, l'effet de la variation de la température est donc moins prononcé. Avec la répétition des cycles, la pression de fluage P_f atteint une valeur d'équilibre indépendante de la température. La pression limite P_l diminue légèrement lorsque la température augmente avec un taux d'évolution de 1,5 kPa/°C. Cette évolution s'avère totalement réversible dans la plage de température étudiée (1-40 °C) et se répète à chaque cycle.

Ces observations sont cohérentes avec la bibliographie qui décrit une diminution de l'étendue du domaine élastique des sols non saturés avec l'augmentation de la température (thermal softening) (Uchaipichat et Khalili 2009, Gu et al. 2014). Un modèle bilinéaire simple est proposé pour prendre en compte l'effet des sollicitations thermiques sur les paramètres pressiométriques. La loi de comportement mécanique a été calibrée avec les résultats des essais mini-pressiométriques réalisés à l'échelle du laboratoire pour introduire l'effet de ces sollicitations thermiques sur les paramètres pressiométriques. L'adaptation du modèle bilinéaire pourrait permettre de prendre en compte les sollicitations thermiques cycliques induites tout au long de la vie des pieux énergétiques.

IV. Performance thermique et mécanique d'un sol compacté pour le stockage de chaleur

IV.1. Contexte : le stockage de chaleur dans les sols

L'essor de l'utilisation de l'énergie solaire se heurte à un problème de stockage d'énergie entre les périodes propices à la production d'énergie (été) et les périodes où les besoins énergétiques sont importants (hiver) (Gombert, 2015). Dans ce contexte, le stockage de l'énergie solaire excédentaire est un sujet actuel d'intérêt. Le stockage de l'énergie thermique est possible sous différentes modalités dont de nombreux exemples d'études et de réalisations récentes sont répertoriés par Xu et al. (2014) :

- sous la forme de chaleur latente avec l'utilisation du principe de changement de phase d'un matériau ;
- sous la forme de chaleur thermo-chimique grâce au principe de sorption ou désorption ;
- sous la forme de chaleur sensible qui consiste à élever la température du matériau sans changer son état (Pinel et al., 2011, Giordano et al., 2016).

Le matériau le plus utilisé pour stocker la chaleur sensible est l'eau car sa capacité thermique est importante. Dans la plupart des cas, le stockage de chaleur nécessite la construction de réservoirs pour y stocker de l'eau ce qui est relativement onéreux. Le sous-sol peut également être un milieu adapté au stockage de chaleur sensible en grande quantité étant données ses bonnes propriétés d'emmagasinement.

Les caractéristiques thermiques du réservoir jouent un rôle important pour le confinement de la chaleur dans la zone du stockage (Delaleux et al. 2012 ; Givoni 1977 ; Giordano et al. 2016). Les paramètres thermiques qui gouvernent le transfert de chaleur dans le sol sont : la conductivité thermique (λ) qui caractérise l'habilité du sol à conduire de la chaleur sous un gradient de température ; la capacité thermique volumétrique (C) qui représente la capacité du sol à emmagasiner la chaleur et la diffusivité thermique (α) qui caractérise le rayon d'influence autour de la source de chaleur. Ainsi, un matériau avec une capacité thermique élevée stocke mieux la chaleur et les échanges de chaleur entre les géostructures énergétiques et le sol sont plus efficace lorsque la conductivité thermique est élevée. Cependant, plus la conductivité thermique est importante, plus la diffusivité du terrain est grande et plus le risque de déperdition de la chaleur autour de la zone du stockage est important. Un compromis entre la capacité thermique et la conductivité thermique doit être trouvé afin d'obtenir un matériau permettant à la fois un bon confinement de la chaleur et un bon échange de celle-ci avec les géostructures énergétiques.

Les roches, les minéraux et l'eau souterraine ont une bonne capacité de stockage d'énergie et leur faible conductivité thermique implique une diffusion d'énergie lente avec des pertes thermiques modérées. D'après Giordano et al. (2016), le stockage de 10 GJ de chaleur sensible nécessite un volume de 34 m³ d'eau. Pour stocker la même quantité d'énergie dans un milieu poreux saturé, le volume nécessaire est de 43 m³ soit 25% de plus que le volume d'eau équivalent (Figure II. 64) mais cette différence n'est pas un obstacle au développement de cette technologie.

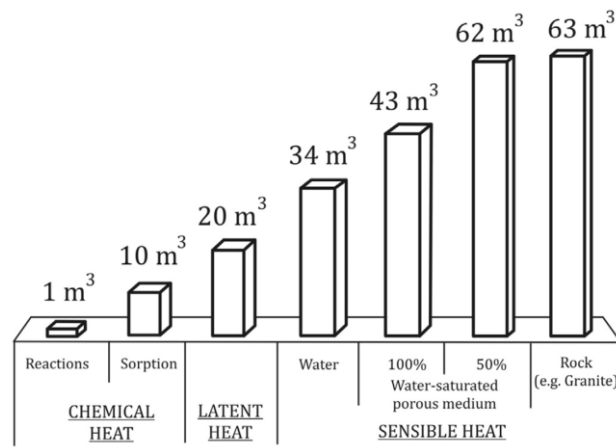


Figure II. 64: Volume nécessaire au stockage de 10 GJ de chaleur sensible selon différents mécanismes ($\Delta T = 70^\circ\text{C}$) (Giordano et al. 2016 selon Hadorn, 2008)

La technique de stockage de la chaleur sensible dans le sol par l'intermédiaire de forages est d'ores et déjà largement utilisée (Gao et al. 2015, Viera et al. 2017) (Figure II. 65), elle consiste à enterrer des boucles d'échangeurs de chaleur dans le sol (Andersen et Li 2015 ; Gabriellsson et al. 1997). Les échangeurs sont souvent installés verticalement (Giordano et al. 2016) pour limiter la surface de terrain engagée (Hesaraki et al. 2015 ; Chapuis et Bernier 2009), ils sont forés à une profondeur suffisante pour que la température soit constante conduisant à une bonne efficacité du système. Cependant, l'installation des systèmes verticaux peut se révéler coûteuse en raison des frais de forage (Hesaraki et al., 2015).

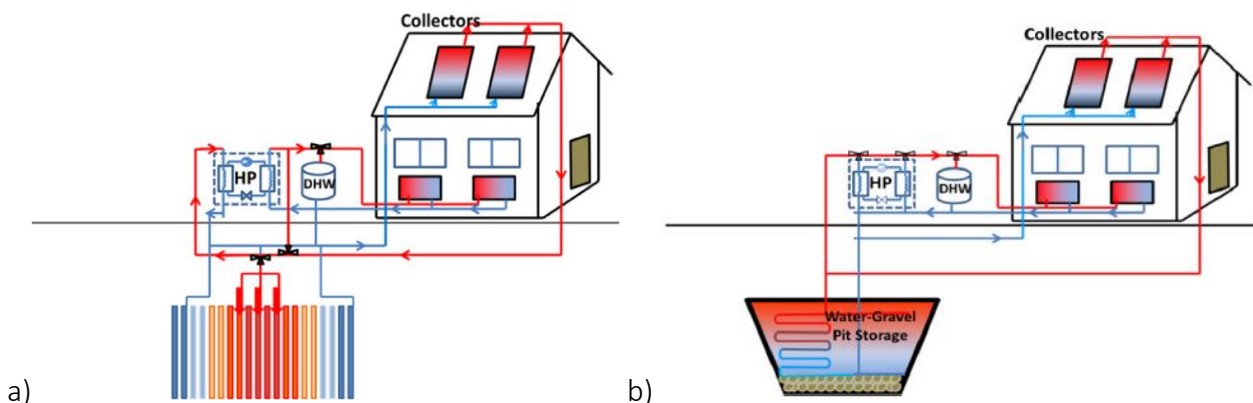


Figure II. 65 : Exemple de stockage de chaleur: a) en sol naturel via un champ de forage, b) en fosse comblée par du gravier saturé (Hesaraki et al., 2015) .

En comparaison, les installations horizontales sont moins onéreuses car elles nécessitent la mise en place de boucles horizontales dans des tranchées de seulement 1 à 2 m de profondeur. L'efficacité énergétique du système dépend de la profondeur de l'installation de l'échangeur (Beier et Holloway 2015, Habibi et Hakkaki-Fard 2018). Lorsque les échangeurs sont placés dans les couches superficielles du sol, à des profondeurs de 60 à 120 cm, l'énergie captée est alors influencée par les conditions climatiques (soleil, pluie, vent) il est donc souvent qualifié de capteur géosolaire (Cuny, 2017). Cette méthode dite « de surface » s'adapte très bien aux besoins énergétiques d'une maison individuelle (quelques dizaines de kW) ou d'un écoquartier (quelques centaines de kW). L'avantage de ce système est son faible coût de construction par rapport au captage vertical. Cependant, ses performances énergétiques sont très variables en fonction des conditions climatiques. La mise en place des échangeurs à des profondeurs intermédiaires, favorisant le stockage et limitant les coûts pourrait constituer une bonne alternative.

Elminshawy et al. (2017) ont montré que la performance thermique du système horizontal dépend également de l'état de compactage du sol (teneur en eau et densité). En augmentant la densité, les points de contact entre les particules augmentent ce qui améliore les transferts de chaleur par conduction (Penner et al. 1975 ; Abu-Hammed et Reeder 2000). Hurtado et al. (2012) ont utilisé un modèle analytique pour étudier la capacité du sol compacté à stocker l'énergie thermique. Selon leurs résultats, l'utilisation d'un sol dense augmenterait la performance énergétique de 10%. Malgré ces résultats, l'utilisation de sols compactés reste peu développée. Seuls quelques rares expérimentations sont présentées dans la bibliographie (Jradi et al. 2017).

Un remblai est un ouvrage constitué de sol compacté en couches superposées. Il est généralement utilisé dans des projets routiers ou ferroviaires, une plateforme constituée de sol compacté peut également être mise en œuvre à la base d'un immeuble. Dans un remblai, l'insertion de tubes échangeurs de chaleur est simple car réalisé au fur et à mesure de la construction de l'ouvrage (Le Borgne et al. 2016). Ce mode de stockage de chaleur pourrait s'adapter sous différentes configurations (Figure II. 66). Dans ces conditions, aucun processus de forage ou d'excavation n'est nécessaire, et aucun sol naturel n'est directement engagé. En outre, le processus de compactage du remblai peut être adapté pour améliorer les paramètres thermiques du sol, c'est-à-dire la conductivité thermique (λ), la capacité thermique (C) et la diffusivité thermique ($\alpha=\lambda/C$), afin d'augmenter l'efficacité du stockage thermique dans le remblai.

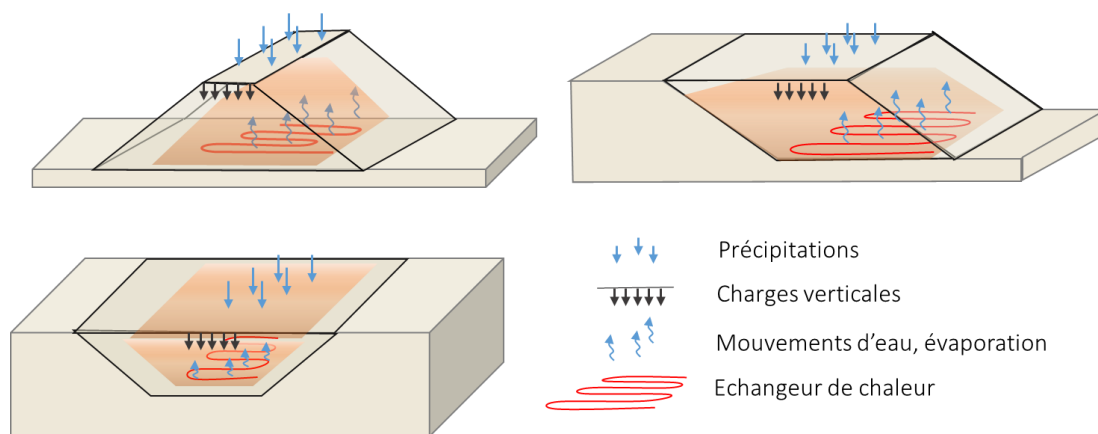


Figure II. 66 : Géométrie envisageable pour des stockage de chaleur en sol compacté

Le stockage d'énergie peut être classé en stockage à court terme et stockage à long terme en fonction des différentes durées de stockage. L'utilisation de la chaleur excédentaire collectée en été pour compenser l'insuffisance de l'approvisionnement en chaleur pendant l'hiver correspond au concept de stockage saisonnier de l'énergie thermique, également appelé stockage de chaleur à long terme (Xu et al. 2014). Dès 1998, Fisch et al. avaient répertorié treize systèmes de chauffage solaire à grande échelle existants et quatorze prévus en Europe pour des applications de stockage à court terme (diurne) et à long terme (saisonnier) et ont comparé leurs rapports coûts-avantages. Les résultats ont montré que le modèle de stockage saisonnier pouvait satisfaire 50 à 70 % de la demande annuelle de chaleur, alors que le modèle diurne ne pouvait en satisfaire que 10 à 20 %. Ainsi, le stockage saisonnier serait plus rentable économiquement et écologiquement. Mais cette pratique peine à se développer du fait des nombreux challenges comme celui de maîtriser les pertes de chaleur durant la période post-stockage, c'est-à-dire en automne dans le cas d'un stockage saisonnier (Fantucci et al. 2015).

En 1983, Benet al. ont mis au point un prototype d'installation de stockage de chaleur en sol non saturé de 3 m d'épaisseur (Saix, 1991). Le massif, Figure II. 67a, a été recouvert d'un film de polyane qui autorise les transferts de chaleur et élimine les transferts d'eau liquide (pluie) et les transferts

en phase vapeur à la surface du massif. A la base du massif, le sol est maintenu à saturation via une infiltration d'eau à proximité des échangeurs. Après avoir attendu un délai de 2 mois nécessaire pour atteindre un état d'équilibre, la température de la zone saturée a pu être portée de la température ambiante à 60°C en 60 jours afin de simuler un stockage de chaleur.

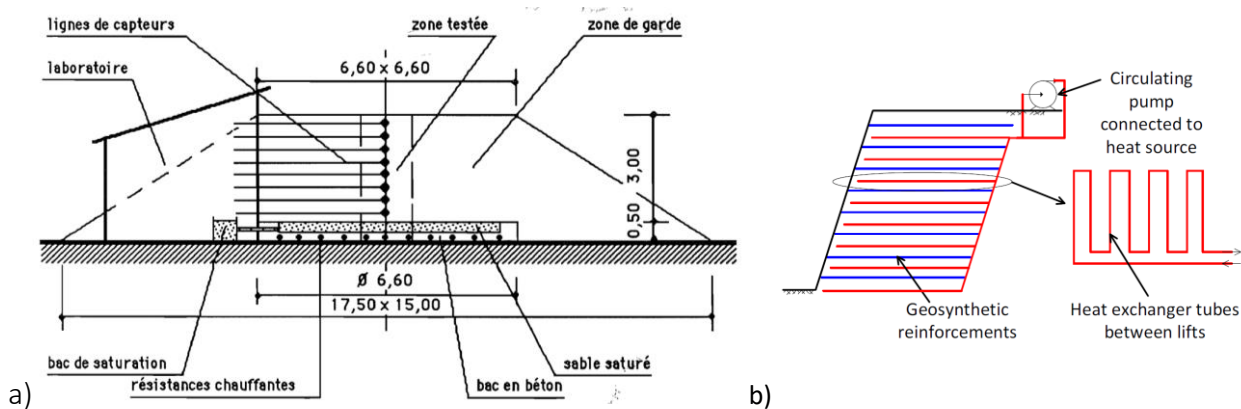


Figure II. 67 : a) Coupe longitudinale de l'aire d'essai de Benet et al. (1983), rapporté par Saix (1991), b) Mur de soutènement thermoactif (McCartney et al. 2014)

La gestion de l'humidité au sein de ces structures est une problématique importante tant sur le plan de l'efficacité énergétique que sur le plan de la stabilité mécanique. En effet, l'installation de tubes échangeurs de chaleur dans le sol entraînera des variations de température du sol environnant. Ces variations cycliques de température pourraient affecter les propriétés thermo-hydro-mécaniques (THM) des sols. Par conséquent, ces variations doivent être prises en compte pour prédire correctement le comportement de ces systèmes à long terme, et assurer leur durabilité. Par exemple, pour la conception d'un mur de soutènement thermoactif, McCartney et al. (2014) envisagent l'installation d'échangeurs géothermiques sur les géocomposites de renforcement afin de garantir la stabilité du système (Figure II. 67b).

Les problématiques scientifiques identifiées et traitées par notre équipe sur ce thème sont :

- optimiser l'état de compactage du sol support pour le stockage de la chaleur ;
- évaluer l'efficacité thermique du stockage à court et à long terme ;
- intégrer l'effet des sollicitations climatiques cycliques sur l'équilibre thermique du stockage ;
- évaluer la stabilité mécanique du remblai sous sollicitation cyclique.

Publications associées : [R13-16, O5, CI16, 18-19, CN 14-18, RS7]

Thèses associées : Ahmed Boukelia [T2] et Mojdeh Lahoori [T3]

Dans ce chapitre, après une brève présentation des méthodes utilisées (partie IV.2), le protocole ayant permis de choisir et de définir l'état de compactage optimum du matériau est présenté (partie IV.3). La partie IV.4 est dédiée à l'évaluation de l'impact des variations de température sur les propriétés thermiques et hydromécaniques du matériau choisi à son état de compactage optimum. Les parties suivantes sont dédiées à l'étude de faisabilité du système. La partie IV.5 présente une méthode de suivi des propriétés thermiques du stockage. En partie IV.6, la performance thermique d'un sol compacté utilisé pour le stockage de chaleur est calculée à l'aide d'une modélisation numérique et comparé à un dispositif sans stockage afin d'évaluer l'apport énergétique attendu. Pour faire face aux pertes de chaleur à l'interface sol-atmosphère, l'utilisation d'un géosynthétique pour l'isolation thermique est envisagée en partie IV.7. Enfin, en partie IV.8, une modélisation aux éléments finis sera utilisée afin de simuler l'évolution thermo-hydrigue d'un

remblai utilisé pour le stockage de chaleur. Ce modèle pourrait à terme permettre d'évaluer la stabilité mécanique du remblai sous sollicitation cyclique.

IV.2. Méthodes

IV.2.1. Méthode de mesure des propriétés thermiques

Les propriétés thermiques des éprouvettes sont mesurées à l'aide d'un conductimètre thermique KD2 Pro Decagon© (Figure II. 68a). Deux sondes sont utilisées : une double sonde nommée SH1 et une sonde simple nommée TR1. La sonde SH1 est composée de deux tiges de 30 mm de longueur et de 1,3 mm de diamètre espacées de 6 mm. L'une des tiges porte l'élément de chauffe et la seconde porte l'élément de mesure de la température. Cette sonde permet de mesurer les conductivités thermiques (λ) allant de 0,1 à 2 W.m⁻¹.K⁻¹, les capacités thermiques volumiques (C) allant de 0,5 à 4 MJ.m⁻³.K⁻¹ et les diffusivités thermiques (α) allant de 0,1 à 1 mm².s⁻¹. La sonde TR1 (2,4 mm de diamètre et 100 mm de longueur) est utilisée pour mesurer les conductivités thermiques lorsqu'elles sont supérieures à 2 W.m⁻¹.K⁻¹. Les précisions des sondes en fonction des intervalles de mesures sont résumées dans en Figure II. 68b.

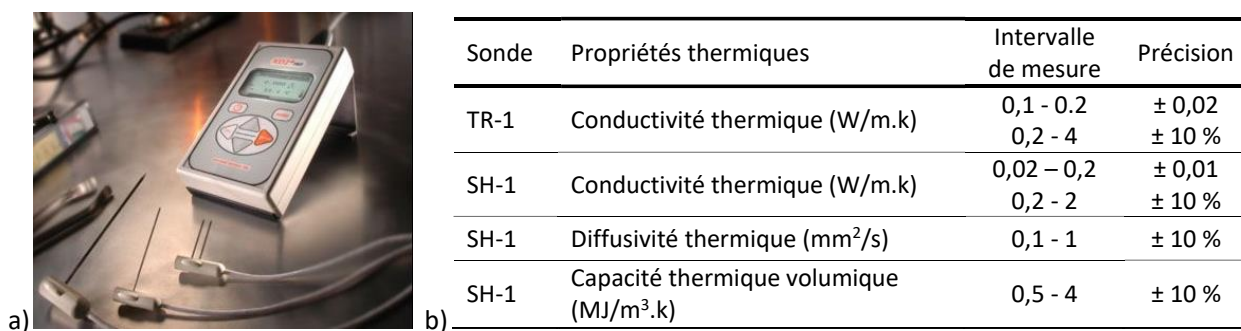


Figure II. 68 : a) Conductimètre thermique KD2 Pro et sondes thermiques associées ; b) Intervalle des mesure et précision des sondes

La méthode de la plaque chaude centrée est une méthode en régime permanent. Elle consiste à insérer un mince élément chauffant plan entre le sol et un matériau de référence de conductivité thermique connue (Figure II. 69). La température de l'élément chauffant est contrôlée par une alimentation stabilisée pour la maintenir à 23 °C. La puissance appliquée est de 1747 W. Les échantillons de sol sont compactés statiquement dans un moule dédié en une seule couche (0,01 x 0,01 x 0,002 m³). L'ensemble est inséré entre deux plaques en aluminium maintenues à une température constante (T₀ = 15 °C) et placé dans une chambre climatique à température contrôlée (T_a = 23 °C) (Figure II. 69). Ce dispositif a également été utilisé pour la mesure de la conductivité thermique des géosynthétiques.

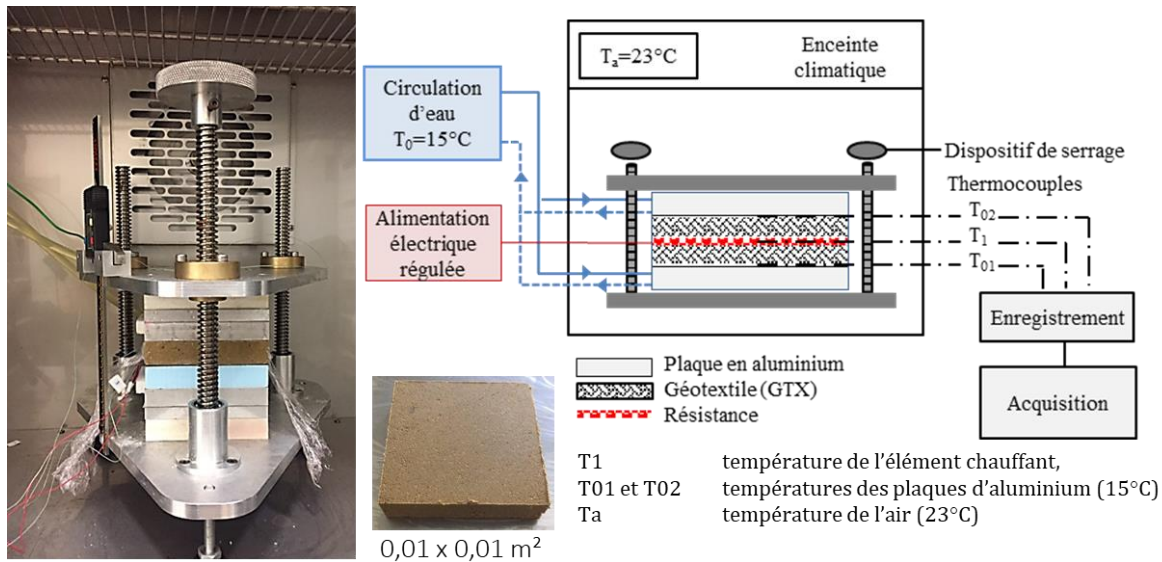


Figure II. 69: Schéma du dispositif de plaque chauffante centrée ; où T_1 est la température de l'élément chauffant, T_{01} et T_{02} sont les températures des plaques d'aluminium et T_a est la température de l'air.

IV.2.2. Méthode de détermination de la courbe de rétention

La capacité de rétention d'eau d'un sol est définie à partir des courbes de rétention obtenues par différents procédés faisant intervenir la mesure de la succion. Elle peut être déterminée par séchage en partant d'un sol initialement saturé ou par humidification à partir d'un sol initialement sec. Afin de déterminer la relation entre le degré de saturation et la succion, le matériau est préparé à la teneur en eau visée puis conservé dans un sac hermétique pendant 24 h pour l'homogénéiser. Ensuite, plusieurs pastilles cylindriques de 35 mm de diamètres et 6 mm d'épaisseur sont préparées par compactage statique à l'aide d'une presse.

Plusieurs méthodes d'imposition de la succion peuvent être utilisées.

Pour appliquer des succions inférieures à 8 MPa, la méthode osmotique consiste à placer les pastilles dans des membrane semi-perméable puis à les plonger dans des solutions de Polyéthylène Glycol (PEG). La succion imposée (kPa) est onze fois plus élevée que la concentration massique de PEG (g/g) (Delage et Cui 2008). Le poids de l'éprouvettes est mesuré au cours du temps jusqu'à atteindre l'équilibre.

La méthode d'imposition par phase vapeur permet d'obtenir des succions variant de quelques MPa à 1000 MPa. Elle consiste à confiner les pastilles dans des dessiccateurs dans lesquels l'humidité relative est contrôlée par des solutions salines (Figure II. 70a). Un transfert d'eau s'établit entre l'échantillon et l'air humide par phase vapeur jusqu'à atteindre l'équilibre. L'humidité relative dépend du type de sel utilisé et de sa concentration (Figure II. 70b). Cette méthode est basée sur la loi de Kelvin :

$$s = u_a - u_w = \frac{RT}{gM} \ln h_r \quad \text{Équation 16}$$

Où : u_a est la pression de l'air, u_w est la pression de l'eau, M est la masse molaire de l'eau, g est l'accélération due à la gravité, R est la constante molaire des gaz, T est la température thermodynamique et h_r est l'humidité relative.

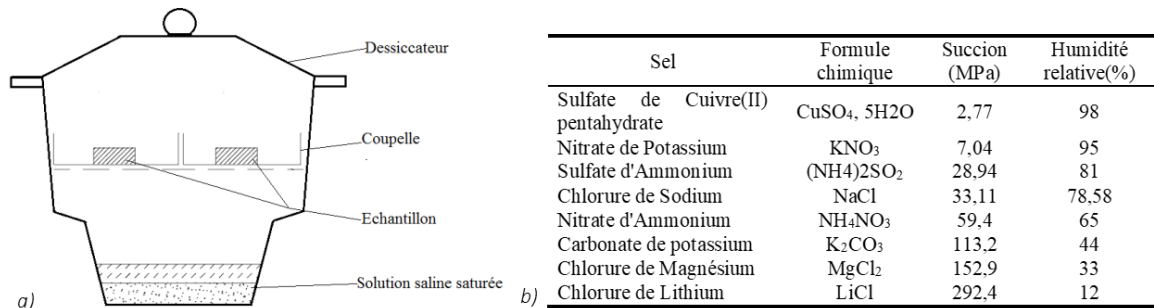


Figure II. 70 : a) Schéma de principe d'imposition de la succion par phase vapeur ; b) Relation entre l'humidité relative et la succion imposée en fonction de la nature du sel

Il est également possible d'utiliser une chambre climatique (sur notre plateforme, une enceinte SECASI technologies : SH600 R©) pour appliquer différentes humidités relatives afin d'atteindre des succions importantes. Une fois l'équilibre pondéral atteint, les succions totales sont mesurées avec un potentiomètre (WP4C water potential meter, Decagon Devices, Inc.) dans la gamme de 0 à 300 MPa et à des températures de 15 à 40 °C (Figure II. 71). Dans cette étude, toutes les mesures ont été effectuées à 20°C. Le potentiomètre mesure l'humidité du sol non saturé par mesure de la température au point de rosée de l'atmosphère considérée ; ensuite la succion est obtenue par la loi de Kelvin.

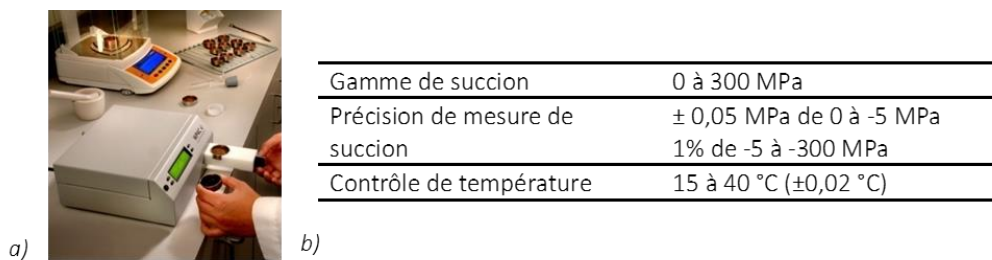


Figure II. 71 : a) Mesure de la succion avec le potentiomètre ; b) Spécifications techniques du potentiomètre (Dewpoint PotentialMeter WP4C®).

La courbe de rétention représentant l'évolution de la teneur en eau en fonction de la succion obtenue permet d'obtenir les paramètres du modèle de Van-Genuchten (1980) m et n nécessaires aux futures modélisations :

$$w = w_r + \frac{(w_{sat} - w_r)}{(1 + (\alpha s)^n)^m} \quad \text{Équation 17}$$

Où w , w_{sat} et w_r sont les teneurs en eau respectivement à la succion s , à l'état saturé et à l'état sec (résiduelle); α est le paramètre du modèle lié à la pression d'entrée d'air; m et n sont les constantes du modèle avec $m=1-1/n$.

IV.2.3. Méthode de mesure des conductivités hydrauliques saturées et non saturées

La conductivité hydraulique à l'état saturé est mesurée à 20 °C sur des éprouvettes d'élanement 2 (70 mm de haut et 35 mm de diamètre) placées dans des cellules triaxiales. Une pression périphérique de confinement de 50 kPa est appliquée à l'aide de contrôleurs de pression (CPV, marque GDS) tandis qu'une pression hydraulique de 30 kPa est appliquée à la base de l'éprouvette afin de la saturer. Une contre-pression est appliquée en sortie d'éprouvette afin de conserver un gradient hydraulique constant de 28 kPa au cours de l'essai. Les pressions sont progressivement

augmentées jusqu'à atteindre respectivement 140 et 120 kPa afin d'atteindre un coefficient de Skempton (valeur B) supérieur à 95%, assurant une saturation complète de l'éprouvette. Ces pressions sont conservées pendant une semaine et la valeur B est vérifiée avant les mesures. Afin de calculer la conductivité hydraulique, les volumes d'eau injectés et drainés à la base et au sommet de l'éprouvette sont mesurés puis la loi de Darcy est appliquée pour évaluer k_{sat} .

Les mesures de conductivité hydraulique à l'état non saturé sont réalisées avec la méthode des profils instantanés (Wind, 1966). Pour cela, 10 pastilles de 20 mm de hauteur et 50 mm de diamètre sont compactées et empilées. Des papiers filtre sont placés entre les pastilles afin de suivre l'évolution de la succion tout au long de l'essai. La colonne ainsi formée est enveloppée dans un film plastique, seule la partie supérieure est exposée à l'évaporation dans une pièce maintenue à 20 °C. Le poids total de la colonne et le poids de chaque papier filtre sont mesurés régulièrement tout au long des 2 mois d'essai.

A chaque profondeur, le flux d'évaporation (ou vitesse de drainage) et le gradient hydraulique sont calculés à partir des profils de teneur en eau et de succion obtenus. Puis la conductivité hydraulique non saturée est calculée à l'aide de l'équation :

$$k_u = \frac{v}{\frac{d\Psi}{dz} \pm 1} \quad \text{Équation 18}$$

Où v est le flux d'évaporation (mm/heure) et $d\Psi/dz$ est le gradient hydraulique (cm/cm).

L'équation combinée de van Genuchten (1980) et Mualem (1976) est utilisée pour modéliser les résultats :

$$k = K \cdot (S_e)^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad \text{avec} \quad S_e = \frac{w - w_r}{w_{sat} - w_r} \quad \text{Équation 19}$$

Où K est la conductivité hydraulique saturée ($m \cdot s^{-1}$), S_e est la saturation relative du sol et m est la constante du modèle de van Genuchten.

IV.2.4. Méthode de mesure de résistance mécanique des éprouvettes

Pour les **essais de résistance à la compression simple**, le matériau est préparé à la teneur en eau visée et conservé dans des sacs hermétiques pendant 24h pour les homogénéiser. Des éprouvettes cylindriques de 35 mm de diamètre et de 70 mm de hauteur sont préparées par compactage statique avec double pistonnage à la masse volumique visée, puis isolées avec du papier aluminium et placées dans des boîtes hermétiques afin de limiter la variation de la teneur en eau. Les essais de compression sont réalisés à 20°C avec une vitesse de 1,05 mm/min (ASTM -1999). L'évolution de la force est acquise par un capteur de force de 10 kN ($\pm 0,004$ kN). Lorsque la force diminue avec l'augmentation de la déformation, la résistance maximale de l'éprouvette (R_c) est dépassée et l'essai est arrêté. Ce type d'essai a également été utilisé afin de mesurer l'évolution de l'épaisseur des géosynthétiques en fonction de la contrainte verticale imposée.

Des **essais de portance** sont réalisés selon la norme NF P94-078 (AFNOR, 1997) pour déterminer l'indice de portance immédiat (IPI) des éprouvettes. Pour cela l'éprouvette est compactée dans un moule CBR (152 mm de hauteur et 152 mm de diamètre) en trois couches avec une énergie Proctor normal. L'essai consiste à mesurer la force appliquée sur un piston cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante (1,27 mm/min) dans une éprouvette de matériau étudié. L'évolution des forces est acquise par un capteur de 100 kN ($\pm 2,417$ kN). Par définition, l'IPI est la valeur maximale entre

l'effort de pénétration du piston à 2,5 mm rapporté à 13,35 kN et l'effort de pénétration à 5 mm rapporté à 19,93 kN.

IV.3. Choix du matériau, de son état de compactage et sa caractérisation

Les propriétés thermiques des sols évoluent en fonction de son état de compactage. Dans cette partie, cinq matériaux candidats ont été testés et comparés. Le matériau d'étude doit présenter des propriétés thermiques favorables au stockage de chaleur et des propriétés mécaniques suffisantes pour atteindre un indice de portance immédiat de 7, valeur retenue par les terrassiers pour la plupart des sols compactés. Dans les parties suivantes, les matériaux candidats sont présentés (IV.3.1), leurs propriétés thermiques mesurées (IV.3.2) et les caractéristiques hydromécaniques sont complétées pour le matériau retenu (IV.3.3).

IV.3.1. Choix du matériau

Les cinq matériaux étudiés sont : un matériau illitique, un limon, un mélange sable-matériau illitique (50-50) et deux mélanges sable-limon (50-50) (Boukelia et al. 2019). Le Tableau II. 15 résume la minéralogie des matériaux utilisés. Le matériau illitique (I), nommé Arginotech®, provient de l'est de l'Allemagne, sa caractérisation complète est présentée en partie III.3. Les limons nommés, limon de Plaisir (LP, présenté en partie II.1), limon de Jossigny (LJ) et limon de Xeuilley (LX) proviennent du bassin parisien.

Tableau II. 15 : Caractéristiques minéralogiques des matériaux.

Matériau	Ref.	Quartz	Calcium/carbonate	Feldspath	Minéraux argileux
Matériau illitique	I	traces	12% calcite	Traces	77% Illite 10% Kaolinite
Limon de Plaisir	LP	81%	5% calcite 7% Dolomite	3%	5%
Limon de Jossigny	LJ	98%	Traces	1%	1%
Limon de Xeuilley	LX	83%	2%	3%	11%
Sable d'Hostun	S	97,4%	Traces		

Les caractéristiques des matériaux comprenant, la distribution de la taille des particules solides, les limites d'Atterberg (AFNOR, 1993), la surface spécifique (AFNOR, 1999a), la teneur en carbonate (AFNOR, 1996) sont résumées dans le Tableau II. 16. La distribution de la taille des grains de l'illite est déterminée à l'aide d'un granulomètre laser Mastersizer 2000© (Eslami, 2014 ; AFNOR, 2009). La distribution de la taille des grains du limon de Plaisir est réalisée par sédimentométrie (AFNOR 1992) et par tamisage par voie humide sur le limon initialement broyé et tamisé à 2mm (voir partie II.1). Pour les limons de Xeuilley et de Jossigny, la distribution de la taille des grains est issue de la bibliographie (Fleureau et al. 1993, Blanck et al. 2011).

Les courbes de compactage Proctor normal sont réalisées pour chaque matériau (Figure II. 72). Les masses volumiques maximales des limons JL et XL et du matériau illitique I sont respectivement de 1,75 - 1,66 et 1,42 Mg/m³. Le mélange avec 50 % de sable a permis une translation des courbes de compactage des sols vers les densités plus élevées, pour atteindre, 1,89 – 1,88 et 1,73 Mg.m⁻³ pour S+JL – S+XL et S+I respectivement. Le limon PL a une masse volumique sèche maximale de 1,81 Mg.m⁻³. A partir des résultats d'identification et selon le GTR (2000), I et LJ sont des matériaux plastiques de classe respectivement, A3 et A2, tandis que LP et LX sont des matériaux peu plastiques de classe A1 et A2.

Tableau II. 16 : Caractéristiques des matériaux : I (Eslami, 2014), LP (Boukelia, 2017), LJ (Fleureau et al. 1993) et LX (Blanck et al., 2011).

Propriétés	I	LP	LJ	LX
Distribution de la taille des grains				
Passant à 80 μm	100	41	80	95
Passant à 2 μm	85	20	28	25
Limites d'Atterberg				
Limite de plasticité (%)	34	20,6	16 – 19	28
Limite de liquidité (%)	65	27,3	37	37
Indice de plasticité	31	6,7	18 – 21	9
Surface spécifique				
VBS (g/100g)	5,41	1,85	-	3,1

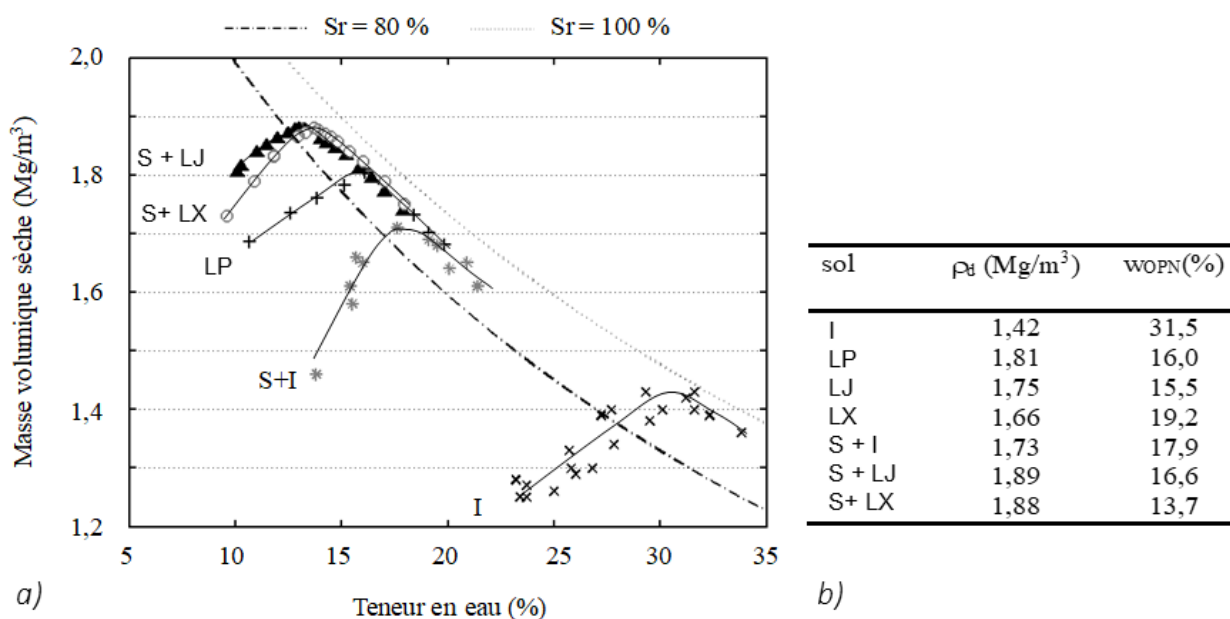


Figure II. 72 : a) Courbes de compactage (Proctor normal) des matériaux I, LP, S+I, S+LJ et S+LX et b) ρ_{dmax} et w_{OPN} des matériaux compactés à l'Optimum Proctor normal.

Des mesures au conductimètre thermique sont réalisées sur les éprouvettes préparées en différents points de la courbe Proctor normal afin d'évaluer l'évolution des propriétés thermiques en fonction des états de compactage des éprouvettes. Les résultats, Figure II. 73, montrent que la conductivité thermique des matériaux augmente du côté sec de la courbe de compactage jusqu'à atteindre un maximum à proximité de l'optimum. Cette observation est cohérente avec la littérature (Ekwe et al. 2006). En effet, l'éprouvette est composée de solide, d'air et d'eau qui ont chacun une conductivité thermique différente. La phase solide présente la conductivité thermique la plus élevée puis l'eau et enfin l'air avec la conductivité thermique la plus faible. Ainsi, pour les matériaux les plus secs et avec une faible masse volumique sèche, la part d'air est importante, la conductivité thermique est donc très faible. Plus l'état de compactage se rapproche de l'optimum Proctor, plus la part d'air diminue au profit des phases solides et liquides, plus conductrices, la conductivité thermique augmente alors fortement. De plus avec l'augmentation de la masse volumique, les contacts entre les particules sont plus nombreux ce qui augmente la conductivité thermique de l'ensemble. À des degrés de saturation de 90-95%, la valeur maximale de λ est atteinte du côté humide de la courbe de compactage.

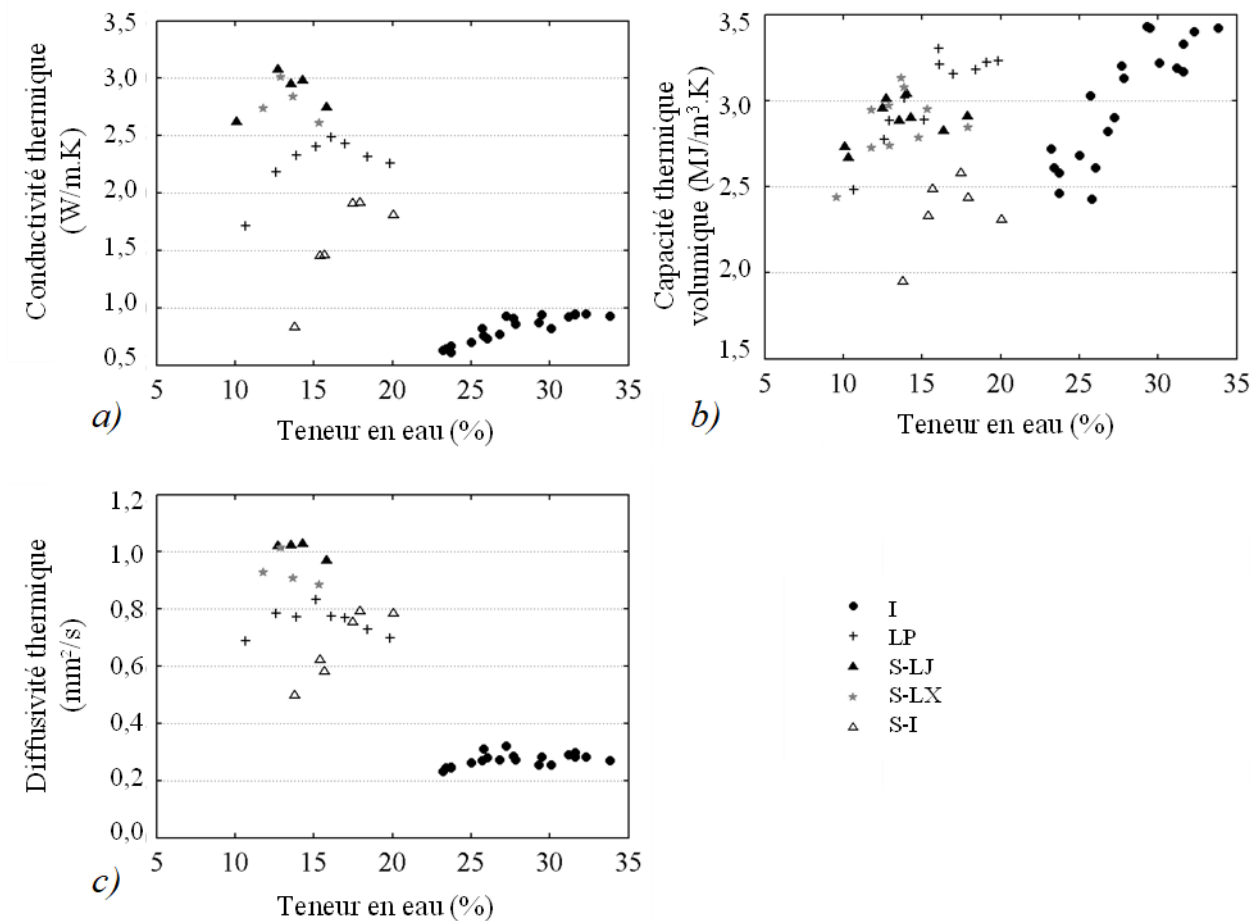


Figure II. 73. Evolution des paramètres thermiques le long des courbes de compactage Proctor normal des matériaux I, LP, S-LJ, S-LX et S-I.

En dépassant l'optimum, les évolutions divergent en fonction de la minéralogie du matériau. Les matériaux siliceux (S-I, LP, S-LJ et S-LX) voient leur conductivité thermique diminuer tandis que, pour les matériaux silicatés (I), λ reste quasiment à son niveau maximal. Ces évolutions sont cohérentes avec les propriétés physiques des matériaux étudiés. Du côté humide de la courbe de compactage, la teneur en eau augmente tandis que la densité diminue. Comme le degré de saturation reste quasiment identique sur cette partie de la courbe, tout se passe comme si les molécules d'eau prenaient la place des grains solides. Or, la conductivité thermique de l'eau λ_{eau} ($0,61 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) est inférieure à celle du quartz λ_{quartz} ($7,7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) (Brigaud et Vasseur 1989), la conductivité des éprouvettes siliceuses diminue donc rapidement. En revanche, pour les éprouvettes silicatées, du fait de la faible différence de conductivité thermique entre l'eau et l'illite ($\lambda_{\text{illite}} = 1,9 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), la conductivité thermique des éprouvettes reste proches de la valeur à l'optimum.

La capacité thermique volumique des matériaux augmente du côté sec de la courbe de compactage pour atteindre un maximum à proximité de l'optimum Proctor normal. Du côté humide, les valeurs restent élevées ou diminuent faiblement : la diminution de la masse volumique sèche est compensée par l'augmentation de la teneur en eau permettant de limiter la variation de la capacité thermique volumique. Contrairement à la conductivité thermique, la capacité thermique de ces sols apparaît moins sensible aux variations de la densité et de la teneur en eau. En comparant avec l'eau pure qui a une capacité thermique de $4,2 \text{ MJ/m}^3\text{K}$, les résultats obtenus montrent que les matériaux compactés étudiés ont une bonne aptitude à stocker de la chaleur. Par exemple, la capacité thermique du limon de Plaisir PL atteint $3,25 \text{ MJ/m}^3\text{K}$ soit 77% de la capacité thermique de l'eau. Cette valeur est cohérente avec la bibliographie (Figure II. 64) (Gabrielsson et al. 1997 et Giordano et al. 2016).

La diffusivité thermique étant directement reliée à la conductivité thermique, elle suit le même type de variation que la conductivité thermique. Elle augmente du côté sec de la courbe de compactage et diminue après avoir atteint une valeur maximale aux alentours de l'optimum Proctor. Les mélanges S+LJ et S+LX ont une diffusivité plus importante que les autres matériaux étudiés. Pour la suite de l'étude, le limon de Plaisir, qui présente les capacités thermiques les plus importantes a été sélectionné.

IV.3.2. Optimisation de l'état de compactage du limon de Plaisir

Les conditions initiales de remplissage sont choisies en cherchant un compromis entre la résistance mécanique et la performance thermique du matériau. Pour obtenir une bonne résistance du sol permettant de supporter la circulation des engins sur chantier, l'indice de portance immédiat (IPI) minimal de 7 doit être respecté. Les essais de portance réalisés selon la norme NF P94-078 (AFNOR, 1997) montrent que cette valeur est obtenue pour une teneur en eau inférieure ou égale à 16,3% (Figure II. 74).

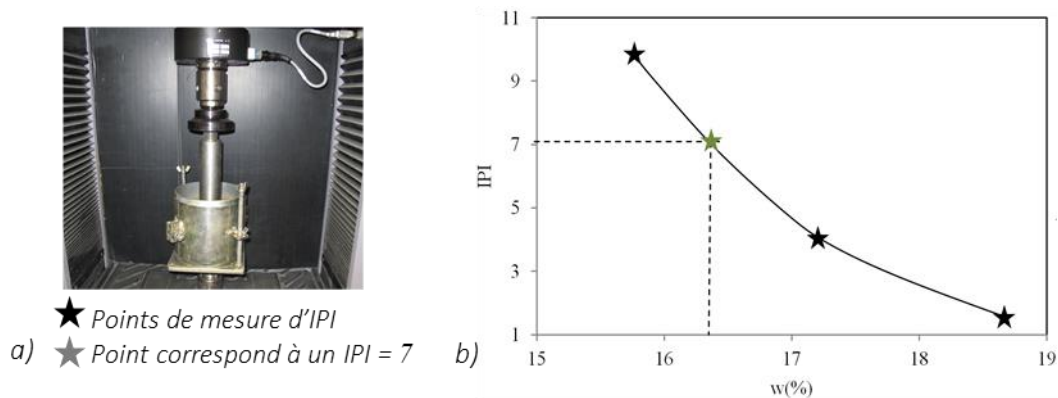


Figure II. 74 : a) Essai de poinçonnement, b) Variation de l'IPI sur les points de la courbe Proctor du limon LP.

Pour obtenir une bonne performance de stockage thermique, le matériau doit avoir une capacité thermique élevée et une conductivité thermique optimale favorisant les échanges thermiques entre le massif du stockage et le circuit géothermique. L'évolution des paramètres thermiques du limon de Plaisir en fonction des paramètres de compactage a montré que la capacité thermique augmente du côté sec de la courbe de compactage et atteint un palier en dépassant l'optimum Proctor. La conductivité thermique augmente du côté sec de la courbe de compactage et atteint un maximum à l'optimum, puis diminue du côté humide.

En se basant sur les paramètres mécaniques et thermiques du limon, **une teneur en eau de 16,3 % et une masse volumique sèche de $1,80 \text{ Mg.m}^{-3}$** sont choisis pour le remplissage de la cuve. A cet état de compactage, les paramètres thermiques attendus sont une conductivité thermique λ de $2,4 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et une capacité thermique C de $3,2 \text{ MJ.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$.

IV.3.3. Caractérisation hydromécanique du limon de Plaisir compacté à l'état optimal pour le stockage de chaleur

Dans cette partie, la courbe de rétention, la conductivité hydraulique saturée et non saturée sont définis ainsi que les paramètres de compressibilité de ce matériau à l'état de compactage choisi. Afin d'obtenir **la courbe de rétention d'eau**, la méthode osmotique a été utilisée pour appliquer des succions inférieures à 8 MPa et une chambre climatique (SECASI technologies : SH600 R©) pour atteindre des succions plus importantes. Les succions totales sont mesurées avec un

potentiomètre. La courbe de rétention obtenue (Figure II. 75a) est modélisée selon le modèle de Van-Genuchten (1980). Les paramètres obtenus sont α : 0,0134 m^{-1} et n : 1,52.

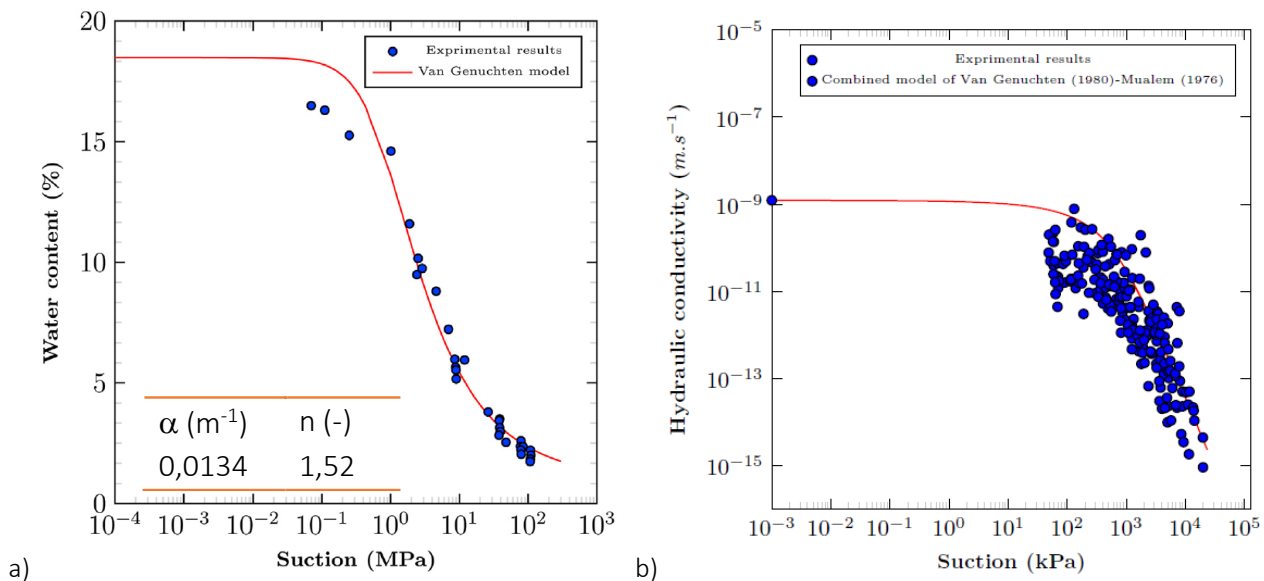


Figure II. 75 a) Courbe de rétention obtenue sur le matériau LP par mesure de succion à l'aide du potentiomètre Decagon WP4C, et paramètres du modèle utilisé. b) Courbe de conductivité hydraulique non saturée pour le limon de Plaisir compacté.

La conductivité hydraulique à l'état saturé est mesurée à 20 °C sur des éprouvettes préparées à l'état de compactage souhaité puis saturées dans des cellules triaxiales. Les valeurs obtenues sont de l'ordre de 10^{-9} à 10^{-8} m/s. La courbe de conductivité hydraulique non saturée, obtenue par la méthode de Wind, est présentée en Figure II. 75b. L'équation combinée de van Genuchten et Mualem (1976) a été utilisée pour modéliser les résultats. L'ensemble des paramètres hydromécanique du matériau compacté sont résumées en Tableau II. 17 .

Tableau II. 17 : Propriétés hydromécaniques du limon de Plaisir compacté

	K ($m.s^{-1}$)	l (-)	α (m^{-1})	n (-)	w_r (%)	x_s (-)	γ_s ($Mg.m^{-3}$)
Limon de Plaisir compacté	1.10^{-9}	0,5	0,0134	1,52	1	0,62	2,57

IV.4. Évaluation de l'impact des variations de température sur les propriétés thermiques et hydromécaniques du matériau

L'effet des variations de températures sur les propriétés hydriques, mécaniques et thermiques du limon de Plaisir compacté a été évalué au moyen de différents essais (Boukelia, 2016). Les résultats d'essais de compressions simples réalisés sur des éprouvettes subissant des variations cycliques de la température sont présentés en partie IV.4.1. Puis l'effet de ces cycles thermiques sur les propriétés thermiques sera mesuré en partie IV.4.2. Enfin, des essais pressiométriques, similaires à ceux réalisés sur le matériau illitique en partie III.4. sont réalisés. Les résultats obtenus sur les deux matériaux seront comparés.

IV.4.1. Effet des cycles de température sur la résistance au cisaillement des éprouvettes

Des essais de résistance à la compression simple ont été réalisés sur des éprouvette de limon de Plaisir à deux teneurs en eau différentes de 16,3% (optimum Proctor) et 15 % (côté sec de l'OPN) compactées à la masse volumique de $1,79 \text{ Mg.m}^{-3}$ (99 % de OPN). Les résultats obtenus sur 22 éprouvettes (points bleus, Figure) à 20°C montrent que pour des éprouvettes préparées à la même densité initiale, la résistance à la compression du limon diminue de 37 % pour une augmentation de la teneur en eau de 1,65 % du fait de la diminution de la succion de sol. Si on considère que la variation de la résistance à la compression avec la teneur en eau est linéaire, la résistance des éprouvettes à 15,5% avant application des cycles thermiques serait de 140 kPa (Figure II. 76b).

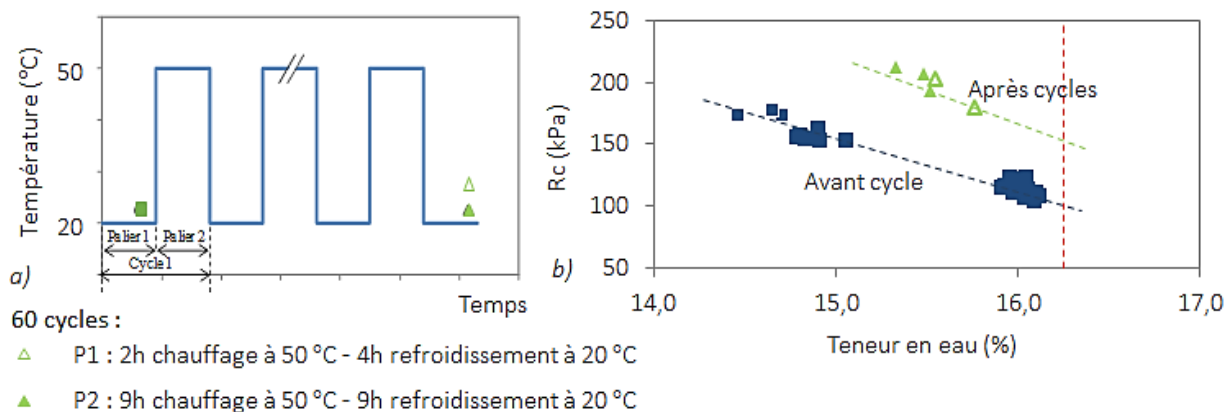


Figure II. 76: a) Programmes thermiques appliqués aux éprouvettes du limon de Plaisir ; b) Résistance à la compression en fonction de la teneur en eau de compactage et de la température.

D'autres éprouvettes sont préparées à des teneurs en eau intermédiaires de $16,3 \pm 0,2$ % emballées pour limiter la déperdition d'humidité puis placées en enceinte climatique. Les programmes thermiques P1 et P2 consistent en l'application de 60 cycles de chauffage-refroidissement dans l'intervalle 20°C et 50°C (Figure II. 76a). Après l'application des cycles thermiques, les résultats montrent que la résistance à la compression des éprouvettes pour une teneur en eau de 15,5% est de 200 kPa soit 60 kPa de plus qu'à l'état initial. Cette valeur est nettement supérieure à l'effet de la variation de la teneur en eau comme l'atteste les résultats précédents. Cela signifie que le matériau s'est rigidifié sous l'effet des variations cycliques de la température.

Tableau II. 18 : Etat de compactage des éprouvettes et résultats des essais de compression simple après les cycles thermiques.

Programme	N°	W_{initiale} (%)	W_{finale} (%)	ρ_d (Mg.m^{-3})	R_c (kPa)
P1	1		15,32	1,78	213
	2	16,3	15,48	1,78	207
	3		15,51	1,78	193
P2	4		15,55	1,80	203
	5	16,3	15,76	1,80	179

IV.4.2. Effet des cycles de température sur les propriétés thermiques du limon de Plaisir

Pour évaluer l'effet de l'augmentation de la température et de cycles thermiques sur les propriétés thermiques du limon de Plaisir, des éprouvettes sont isolées dans des boîtes hermétiques, pour conserver une teneur en eau constante, puis placées en enceinte climatique. Les sollicitations thermiques sont appliquées selon les programmes P1 et P2 (Figure II. 76a). Trois mesures de propriétés thermiques sont effectuées à différents stades du programme thermique : à l'état initial à 20°C (M1), à 50°C (M2) puis après l'application des cycles et retour à 20°C (M3).

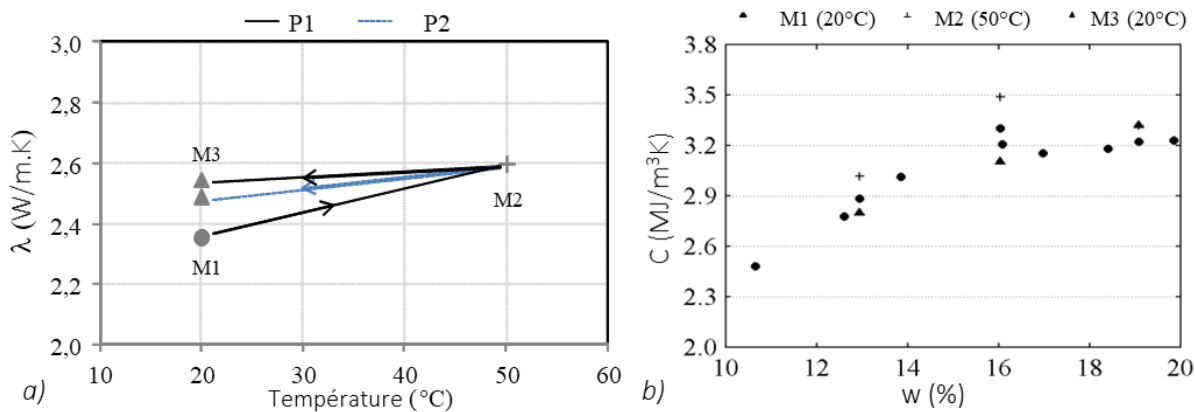


Figure II. 77 : Effet de chauffage et des cycles thermiques sur les propriétés thermiques du limon de Plaisir (P1, P2) : a) conductivité thermique, b) capacité thermique.

Les résultats montrent qu'à 50°C, la conductivité thermique des éprouvettes augmente (Figure II. 77). Cette évolution est cohérente avec la dilatation des composants qui entraîne une augmentation des contacts entre les particules et le degré de saturation, et augmente la conductivité thermique des éprouvettes. De plus, dans un sol non saturé, la vapeur d'eau participe au transfert de chaleur en se déplaçant dans le réseau poreux. Lorsque l'air est chaud, il peut atteindre des degrés d'humidité plus importants ce qui augmente encore sa participation au transfert thermique.

Les mesures de la conductivité thermique après 60 cycles dans les deux programmes P1 et P2 montrent que la conductivité thermique λ_{PL} à 20 °C mesurée en M3 est inférieure à λ_{PL} à 50 °C mesurée en M2 mais, elle est légèrement supérieure à la conductivité thermique λ_{PL} à 20 °C mesurée au début des cycles (M1) et ce, malgré la diminution de la teneur en eau des éprouvettes lors de l'application des cycles. Cette différence est cohérente avec l'augmentation de la résistance à la compression des éprouvettes. Un changement de la structure du sol après les cycles thermiques s'est produit augmentant sa conductivité thermique et sa résistance au cisaillement.

IV.4.3. Effet des cycles de température sur les paramètres pressiométriques du limon de Plaisir

Le limon de Plaisir est compacté dans la cuve d'essai, décrite en partie III.3.1., à la teneur en eau et masse volumique visée selon la méthodologie de remplissage vérifiée et validée (Eslami 2014). Deux programmes thermiques ont été appliqués sur deux cuves préparées dans les mêmes conditions (Tableau II. 19). Le programme P4 consiste en 3 cycles de chauffage-refroidissement entre 20 et 50°C en laissant le temps nécessaire à l'établissement du régime permanent (durée totale : 1 semaine). Le programme P5 consiste en paliers de 24h de chauffage et 24h de refroidissement entre 20 et 50°C pendant 12 cycles (durée totale de 24 jours). Dans ce programme, le régime permanent n'est pas recherché.

Tableau II. 19: Programme d'essai dans la cuve

Programme	Palier 1		Palier 2		Nb cycles
	T°C	Temps	T°C	Temps	
P4	20	Jusqu'à l'établissement	50	Jusqu'à l'établissement	3
P5	20	24 h	50	24 h	12

Les profils de densités et de teneurs en eau mesurés avant et après l'application des cycles thermiques dans les deux programmes thermiques (P4 et P5) sont représentés en Figure II. 78. Ils montrent une homogénéité des valeurs sur la hauteur de la cuve. Les teneurs en eau et les masses volumiques sèches moyennes obtenues dans les programmes P4 et P5 sont de $w = 16,26 \pm 0,2 \%$ et $16,22 \pm 0,2 \%$ et $\rho_d = 1,71 \pm 0,04$ et $1,72 \pm 0,03 \text{ Mg.m}^{-3}$, respectivement. La teneur en eau visée de $16,3 \%$ est atteinte à $\pm 0,2$ et l'isolation hydrique mise en place a été efficace puisque la teneur en eau est conservée après l'application des cycles thermiques. L'homogénéité des profils de la masse volumique sèche obtenus montre l'efficacité de la méthode de compactage utilisée pour le remplissage de la cuve.

L'évolution de la température au sein de la cuve est suivie continuellement en 7 points différents (sondes S2 à S8, Figure II. 79). Les profils de température enregistrés en continu permettent d'apprécier l'évolution de la température dans l'espace et dans le temps. La Figure II. 79 présente le profil de la température enregistré au centre de la cuve (sonde S5) pendant les 12 cycles de chauffage – refroidissement. Les résultats montrent que la température du massif atteint l'équilibre après 24h de chauffage ou de refroidissement. La température de consigne pour le cas d'un chauffage (50°C) est atteinte dans différents endroits de la cuve sauf dans la partie inférieure (S2). Dans cette partie, la cuve est posée directement sur la plaque d'isolation en polystyrène, des déperditions de chaleur le long de cette surface ont pu empêcher le sol d'atteindre la température de consigne.

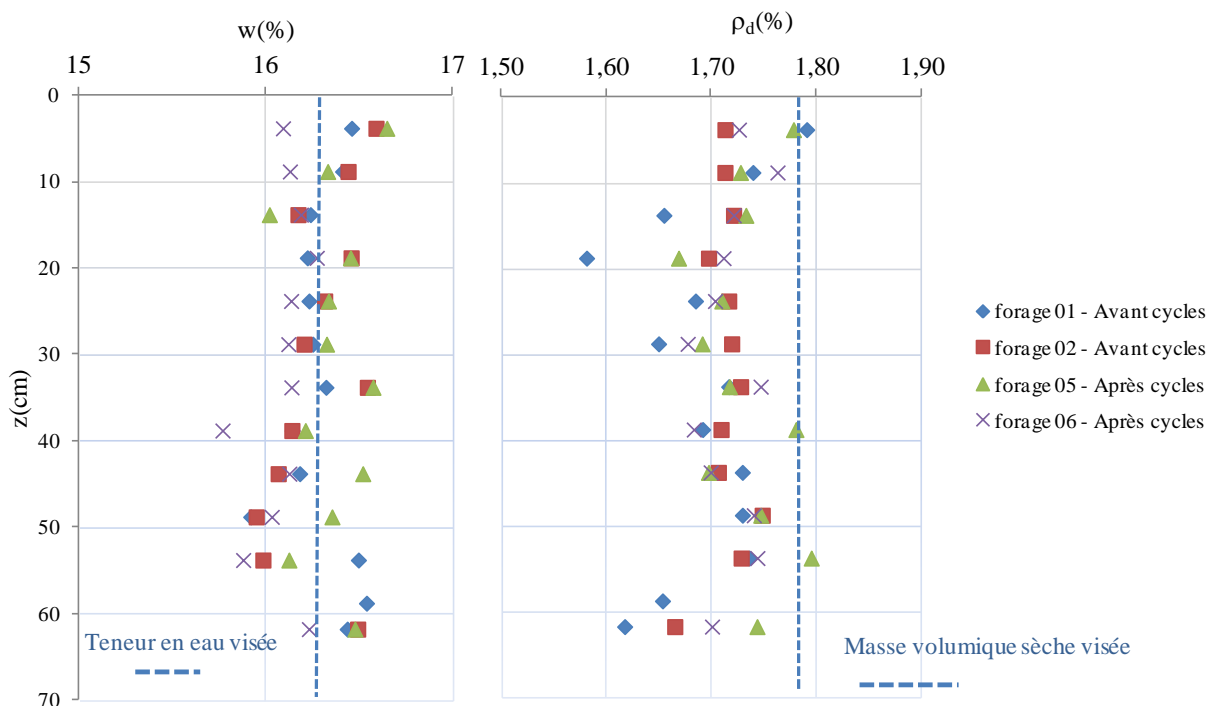


Figure II. 78 : Teneurs en eau et masse volumiques sèches visées et mesurées Programme P4.

La vitesse de variation de la température est importante en s'approchant des bords de la cuve (S3 et S7) et elle diminue vers le centre de la cuve (S2, S5 et S8) en cohérence avec la proximité du tube périphérique de circulation du fluide caloporteur (annexe 4). Les profils de chauffage et de

refroidissement du 1^{er} et du dernier cycle sont très similaires, ce qui indique que les paramètres thermiques sont pas ou peu modifiés par l'application des 12 cycles thermiques d'une amplitude de 30°C dans la cuve.

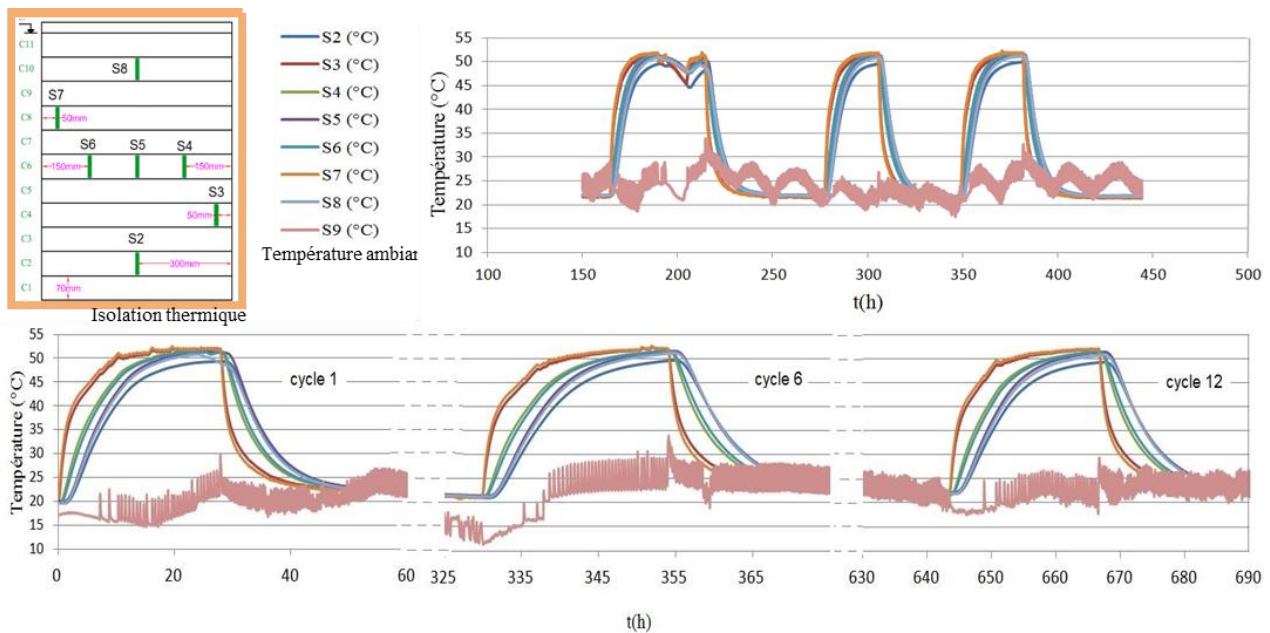


Figure II. 79 : a) Positionnement des sondes S2 à S8 en différents points de la cuve, la sonde S9 mesurant la température de la salle d'essai. b) Profils de température enregistrés au cours du programme et c) du programme P5 pour le premier, le 6e et le dernier cycle.

Six essais mini-préssiométriques sont effectués dans chaque cuve pour chaque programme. Deux essais sont réalisés à 20°C, deux essais à la fin du premier chauffage à 50°C et deux essais à 20°C après application des cycles de chauffage-refroidissement. Les courbes pressiométriques, Figure II. 80, montrent la variation du volume de la cellule pressiométrique en fonction de la pression appliquée. Le Tableau II. 20 résume les résultats des essais mini-préssiométriques réalisés pour les deux programmes d'essais (P4 et P5).

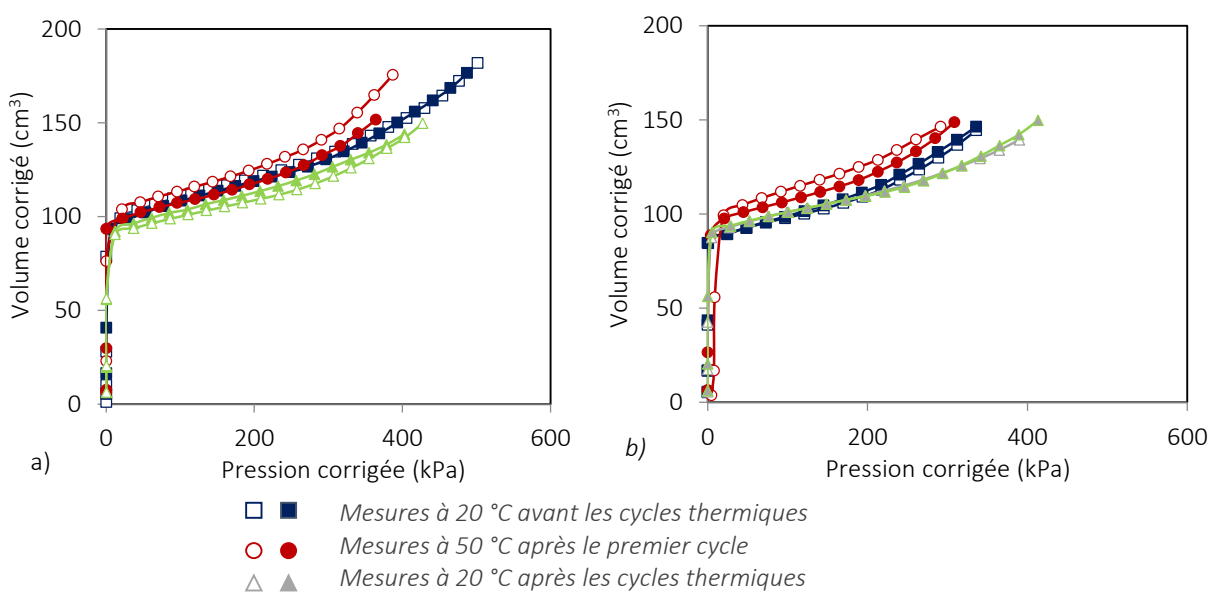


Figure II. 80: Courbes pressiométriques : a) programme P4, b) programme P5.

Tableau II. 20: Récapitulatif des paramètres pressiométriques pour les programmes P4 et P5.

Programme	N° d'essai	1	2	1	2	1	2
	T (°C)	20°C	20°C	50°C	50°C	20°C-Après cycles	20°C-Après cycles
P4	E_M (kPa)	5389	5178	4897	5457	5635	5858
	P_l (kPa)	657	591	517	480	648	535
	P_f (kPa)	278	280	220	218	270	250
P5	E_M (kPa)	4728	4098	4089	4600	5613	5778
	P_l (kPa)	455	480	467	450	622	518
	P_f (kPa)	180	170	200	195	295	270

Les résultats mini-pressiométriques montrent une bonne reproductibilité des essais, ce qui confirme l'homogénéité du massif. Les variations du module pressiométrique, de la pression limite et de la pression du fluage en fonction de la température et des cycles thermiques sont représentées en Figure II. 81.

Dans le programme P4 : en appliquant un ΔT de 30 °C, la pression limite P_l a diminué de 20% et la pression du fluage P_f de 21%. Les mesures de la pression limite et de la pression de fluage après 3 cycles de chauffage-refroidissement ont montré que ces deux évolutions sont réversibles. La variation de module pressiométrique E_M sous l'effet des trois cycles thermiques appliqués n'est pas clairement constatée dans ce programme.

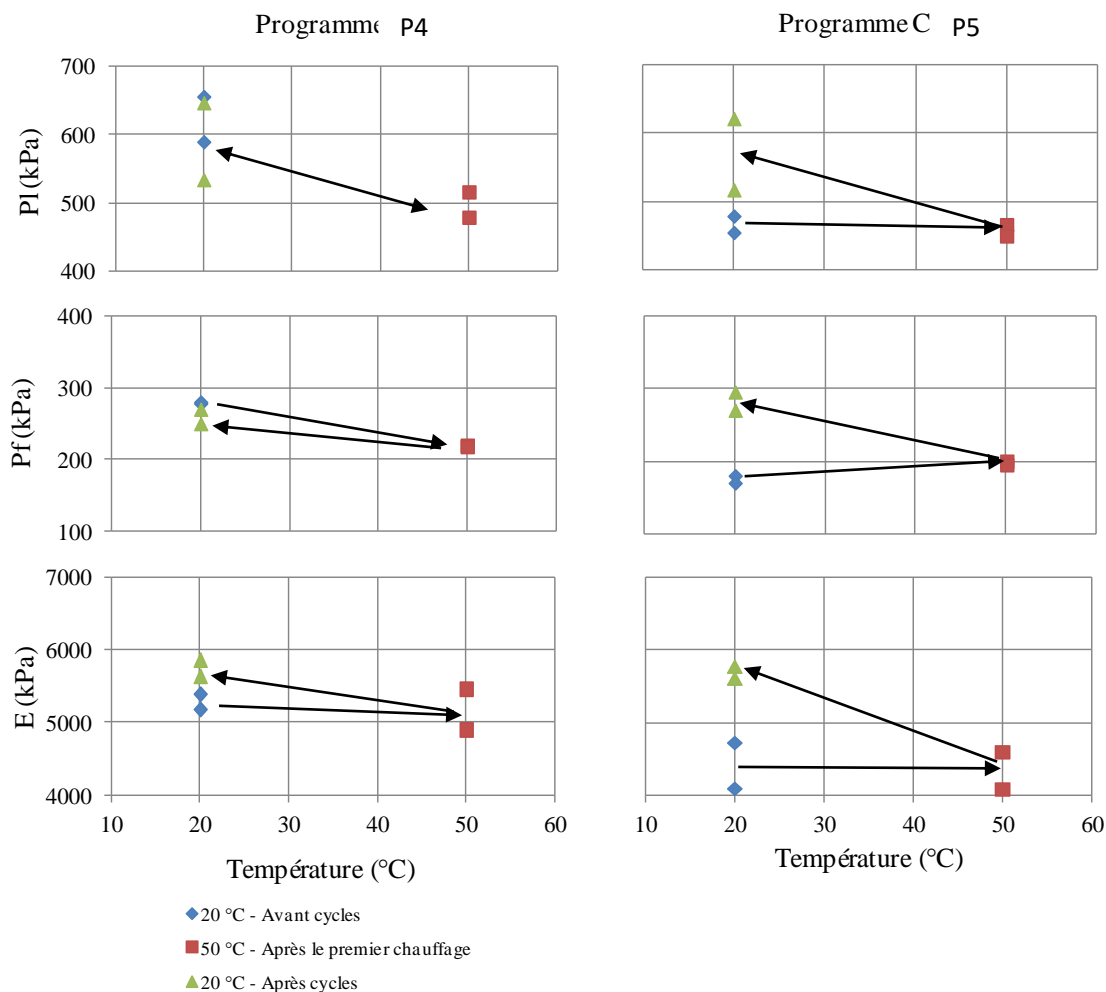


Figure II. 81 : Variation de la pression limite (P_l), de la pression du fluage (P_f) et du module pressiométrique (E_M) pour le programme P4 et le programme P5.

Dans le programme P5, la pression limite a diminué de 20% et la pression de fluage de 30%. Une diminution de 23% du module pressiométrique E est observée dans ce programme. Les résultats montrent que le chauffage du matériau de 20 à 50 °C réduit la partie pseudo-élastique du sol, cette évolution est cohérente avec les résultats de Wiebe et al. (1998) et McCartney et al. (2016).

Au contraire, lors du refroidissement de 50° à 20°C, une réversibilité est observée. Pour le programme P4, qui ne compte que 3 cycles, les résultats finaux sont proches des résultats initiaux mais pour le programme P5, qui compte 12 cycles, les paramètres ont nettement augmenté. La partie pseudo-élastique du sol augmente après l'application de multiples cycles thermiques. Cela signifie que la succession des cycles thermiques a provoqué un écrouissage durcissant du matériau. Ce résultat rejoint les conclusions obtenues lors des essais de résistance à la compression simple (partie IV.4.1).

IV.4.4. Discussion

Le Tableau II. 21 résume les paramètres de remplissage, les températures maximales et minimales et le nombre de cycles appliqués lors de la réalisation de campagnes expérimentales comparables sur le limon de Plaisir et le matériau illitique. Les résultats des essais montrent que les paramètres pressiométriques du matériau illitique sont inférieurs à ceux du limon de Plaisir :

- P_f matériau illitique = 70 % du P_f limon de Plaisir;
- P_l matériau illitique = 57 % du P_l limon de Plaisir;
- E_M matériau illitique = 67 % du E_M limon de Plaisir.

Tableau II. 21 : Paramètres initiaux et sollicitations thermiques dans les deux sols

Sol	w (%)	ρ_d (Mg/m ³)	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)	Nb cycles
Matériau illitique	30,50±0,5	1,31±0,01	20	40	1
Limon de Plaisir - P4	16,26±0,2	1,71±0,04	20	50	3
Limon de Plaisir - P5	16,22±0,2	1,72±0,03	20	50	12

Afin de comparer l'effet de la température et des cycles thermiques sur les paramètres pressiométriques, les valeurs sont normalisées par rapport aux valeurs mesurées à 20 °C avant les cycles thermiques : $P_f(20)$, $P_l(20)$ et $E_M(20)$ selon les équations suivantes :

$$E_{n.M} = \frac{E_M(T)}{E_M(20)} \quad P_{n.f} = \frac{P_f(T)}{P_f(20)} \quad P_{n.l} = \frac{P_l(T)}{P_l(20)} \quad \text{Équation 20}$$

Les paramètres pressiométriques normalisés sont résumés dans le Tableau II. 22. La pression de fluage P_f et les pressions limites P_l des deux sols diminuent avec l'augmentation de la température (thermal softening). Après 1 à 3 cycles de chauffage et refroidissement, les évolutions sont quasiment réversibles. Une relation linéaire peut être établie, malgré la différence de minéralogie et des états initiaux, afin de déterminer les valeurs des paramètres pressiométriques en fonction de la température :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_f(T) = P_f(20) \times (-0,0072 \times T + 1,1431) \\ P_l(T) = P_l(20) \times (-0,0068 \times T + 1,1335) \end{array} \right. \quad \text{Équations 21}$$

Tableau II. 22 : Valeurs normalisées des paramètres pressiométriques de l'illite et du limon de Plaisir

Sol	T (°C)	Cycle	$P_{n,f}$	$P_{n,l}$	$E_{n,M}$
matériau Illitique	20	0	1,00	1,00	1,00
matériau Illitique	40	1	0,85	0,86	1,05
matériau Illitique	20	1	0,97	1,03	1,19
Limon - P4	20	0	1,00	1,00	1,00
Limon - P4	50	1	0,78	0,80	0,98
Limon - P4	20	3	0,93	0,95	1,09
Limon - P5	20	0	1	1	1
Limon - P5	50	1	1,13	0,98	0,98
Limon - P5	20	12	1,61	1,22	1,29

Cependant, lors de l'application de multiples cycles thermiques, les paramètres pressiométriques du limon de Plaisir augmentent nettement. Le matériau a subi un écouvissage durcissant qui est confirmé par les conclusions sur la résistance à la compression simple et les mesures de conductivité thermique après 60 cycles chauffage-refroidissement.

Les résultats d'essais mécaniques sur des matériaux non saturés réalisés avant et après l'application de multiples cycles chauffage-refroidissement sont rares dans la bibliographie. Gu et al. (2014) ont réalisés des essais micro-pénétrométriques dans des conditions similaires aux nôtres, c'est-à-dire en contrôlant la température mais en laissant la succion s'établir à sa valeur naturelle dans le sol. Leurs résultats, présentés en Figure II. 82, montrent une diminution des résistances lors du premier chauffage à 50°C mais des valeurs de contraintes en pointes systématiquement supérieures à la valeur initiale pour tous les paliers suivants avec une tendance à l'augmentation progressive de la résistance mécanique cycle après cycle.

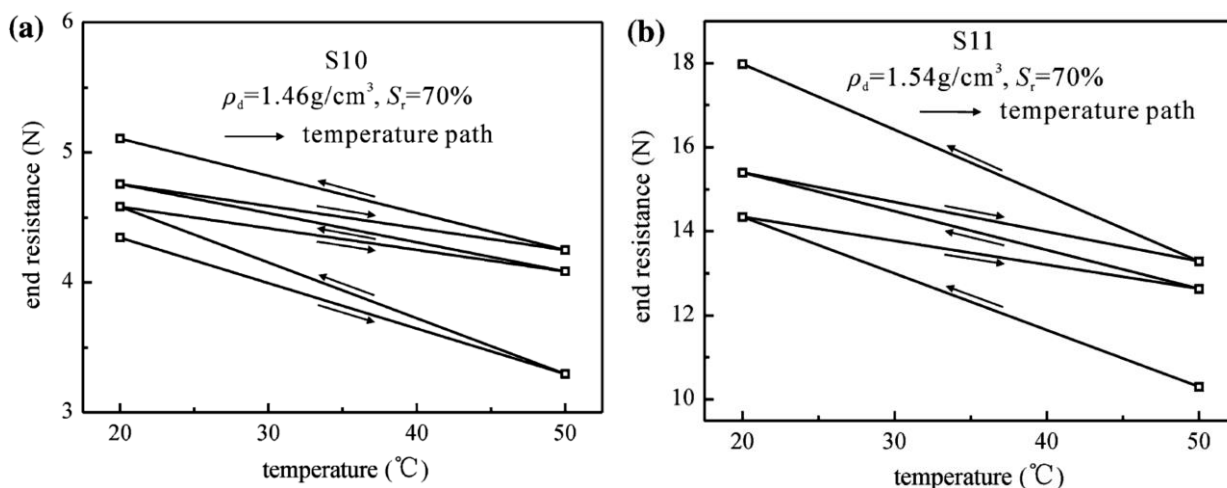


Figure II. 82 : Effet de la successions de cycles de chauffage refroidissement sur la résistance en pointe (à 300 mm de profondeur) obtenu lors d'essais micro-pénétrométriques sur des argiles surconsolidées à deux masses volumiques sèches différentes (Gu et al. 2014).

Du point de vue de la stabilité mécanique du futur stockage, la situation la plus défavorable est lors du premier chauffage du fait de la diminution de l'étendue du domaine élastique. Les paramètres obtenus à la température maximale envisagée doivent donc être retenus pour le dimensionnement. Les résultats obtenus sur un massif sans contrôle de succion devront être confirmés lors de futures expérimentations, a fortiori lorsque de nombreux cycles de chauffage-refroidissement sont appliqués. De plus, une attention particulière devra être portée aux variations

volumiques, non mesurées ici, qu'il serait nécessaire d'anticiper pour éviter d'éventuels désordres à proximité du stockage.

Globalement, ces résultats sont plutôt rassurants et vont dans le sens d'une augmentation de la stabilité de l'ensemble. Les prochaines parties focalisent sur l'efficacité énergétique du futur stockage, pour cela trois principaux axes de recherche sont développés :

- suivre l'évolution des propriétés thermiques du massif ;
- modéliser les échanges thermiques avec l'atmosphère pour garantir l'efficacité thermique ;
- proposer des solutions pour maîtriser les pertes de chaleur à l'interface sol-atmosphère.

Chacun de ces aspects est fortement pluridisciplinaire, des collaborations avec des spécialistes des domaines concernés ont donc été mises en place afin de traiter au mieux ces problématiques.

IV.5. Développement d'une méthode de suivi in situ des propriétés thermiques du stockage

Les propriétés thermiques du sol dépendent de ses propriétés physiques et hydromécaniques, telles que la composition minérale, le degré de saturation et la densité sèche (Penner et al. 1975, Abu-Hamdeh et Reeder 2000, Ekwue et al 2006). Dans un sol non saturé les couplages entre ces propriétés complexifient l'évaluation des propriétés thermiques de ces sols (Jahangir et al. 2018). En effet, dans les matériaux multiphasiques tels que les sols, la chaleur est transférée à la fois par conduction, via les particules solides, mais également par convection, à cause de la mobilité des phases gazeuses et liquides. De plus, la plupart des méthodes de mesure et d'estimation des propriétés thermiques sont basées sur la résolution d'une équation de conduction thermique unidimensionnelle en supposant un sol homogène (Kodikara et al. 2011, Rajeev et Kodikara 2016, Ukrainczyk 2009), ce qui est rarement le cas pour un sol.

En laboratoire, les propriétés thermiques des sols peuvent être mesurées en régime permanent ou en régime transitoire (Abu-Hamdeh et al. 2001, Kraemer et Chen 2014). La méthode de la plaque chaude centrée est une méthode en régime permanent qui permet de mesurer la conductivité thermique lorsque le flux de chaleur à travers l'échantillon de sol a atteint un équilibre (Jannot et al. 2010). La méthode de l'aiguille permet de mesurer les propriétés thermiques pendant le processus de transfert de chaleur, en régime transitoire, en laboratoire et sur le terrain (Barry-Macaulay et al. 2013). Cette méthode permet des mesures ponctuelles, elle reflète la capacité du matériau au moment de la mesure (Rajeev et Kodikara 2016).

Sur le terrain, la diffusivité thermique peut également être estimée en mesurant en continu la température via des capteurs placés à différentes profondeurs dans le sol (Asrar et Kanemasu 1983, Gehlin et Hellström 2000). Sur la base de ces résultats, différents modèles analytiques et numériques ont été proposés pour prédire la fonction de transfert de chaleur et par conséquent la diffusivité thermique apparente. Gao et al. (2009) et Rajeev et Kodikara (2016) ont utilisé des modèles analytiques simplifiés avec l'hypothèse d'une variation sinusoïdale de la température à la surface du sol, ce qui n'est pas réaliste pour le stockage de chaleur puisque la durée du refroidissement n'est pas nécessairement aussi longue que la période de chauffage.

Jannot et al. (2010) ont proposé un modèle analytique inverse simple pour estimer les propriétés thermiques de poudres ou de matériaux granulaires. Dans cette méthode, la fonction de transfert ne dépend ni de la forme et de l'intensité du flux thermique ni de conditions limites externes. Une collaboration avec Yves Jannot, dans le cadre de la thèse de Mojdeh Lahoori, a permis d'adapter ce modèle pour estimer la diffusivité thermique de notre sol compacté non saturé. Pour cela, les enregistrements de température, réalisés dans le cadre de la thèse de Ahmed Boukelia (partie IV.4.3) ont été utilisés. Ensuite, la capacité thermique volumétrique a été mesurée en laboratoire, ce qui a permis d'estimer la conductivité thermique du massif. Ce résultat a été comparé aux résultats obtenus avec les méthodes classiques de laboratoire.

IV.5.1. Le modèle analytique inverse

Le modèle analytique inverse basé sur la solution unidimensionnelle de l'équation de Fourier est utilisé pour estimer la diffusivité thermique du sol compacté en considérant les variations de température entre deux capteurs de température (Lahoori et al. 2020). Dans ce modèle, la température initiale du sol compacté est considérée comme uniforme, le transfert de chaleur est supposé unidirectionnel et le transfert de masse est négligé.

La méthode inverse est exprimée par les équations suivantes. La conduction thermique transitoire dans la direction radiale en coordonnées cylindriques est :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Équation 22}$$

Avec les conditions aux limites suivantes :

$$T(r, t = 0) = T_i \quad , \quad 0 \leq r \leq R$$

$$T(R, t) = T_0(t)$$

Où T est la température (K), r est le rayon (m), c'est à dire (la distance des capteurs de température par rapport à l'axe du récipient), α est la diffusivité thermique ($m^2 \cdot s^{-1}$), t est le temps (s), R est le rayon total du massif (m) et T_i est la température initiale de l'échantillon (K).

Le modèle présenté dans l'article Lahoori et al. (2020) permet d'estimer la diffusivité thermique α en minimisant la somme des différences au carré entre la courbe expérimentale $\bar{T}(r_1)$ et la courbe modélisée calculée par une relation du type :

$$\bar{T} = T - T_i \quad \text{Équation 23}$$

$$\bar{T}r_{1\text{model}} = \bar{T}r_{2\text{experimental}} \otimes F(t, \alpha) \quad \text{Équation 24}$$

$$\text{Avec : } F(t, \alpha) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{I_0(qr_2)}{I_0(qr_1)} \right] \quad \text{et} \quad q = \sqrt{\frac{p}{\alpha}}$$

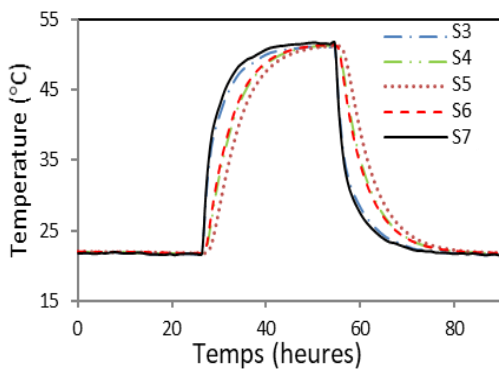
Où I_0 est la fonction de Bessel modifiée de première espèce d'ordre 0.

La minimisation de la somme des écarts au carré est effectuée avec l'algorithme de Levenberg-Marquart, et la fonction $F(t, \alpha)$ est calculée avec la transformée de Laplace inverse et l'algorithme de De Hoog et al. (1982). Ce modèle analytique dépend de la diffusivité thermique et des variations transitoires de température aux distances r_1 et r_2 de l'axe de l'éprouvette cylindrique. Les variations de température à différentes distances du centre du récipient ont été obtenues à partir de l'expérience réalisée en laboratoire.

Les suivis de températures acquis en différents points du massif de limon de Plaisir compacté soumis au programme P5 ont été utilisés dans le cadre du développement du modèle (Figure II. 79b). La température initiale du sol compacté était de 20 °C et la variation de température a été imposée à la surface latérale extérieure du conteneur. La Figure II. 83 isole les enregistrements de température des capteurs de température S3, S4, S5, S6, et S7 (Figure II. 79). Comme attendu, le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre à 50 °C est différent en fonction de la distance entre les capteurs de température et la source du flux thermique. Ainsi, les capteurs de température S7 et S3, au plus proche de la source de chaleur (Figure II. 79) sont les premiers à atteindre l'équilibre.

Les valeurs de diffusivité thermique α ($m^2 \cdot s^{-1}$) pour chaque section entre 2 capteurs de température (Tr_2 et Tr_1) sont évaluées à l'aide de la méthode inverse et présentées en Figure II. 83b. La valeur moyenne de la diffusivité thermique est de $9,6 \cdot 10^{-7} m^2 \cdot s^{-1}$. Cette valeur est cohérente avec l'intervalle de variation des diffusivités thermiques évalué à $5 \cdot 10^{-7} \leq \alpha \leq 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ par Busby (2015)

à partir d' une base de données de mesures de température prises sur différents types de sols à une profondeur de 1 m.



Tr ₂	Tr ₁	r ₁ m	r ₂ m	α 10 ⁻⁷ m ² .s ⁻¹	λ W.m ⁻¹ .K ⁻¹
S3	S4	0,25	0,15	0,99	2,61
S3	S5	0,25	0	1,00	2,64
S4	S5	0,15	0	1,03	2,71
S6	S5	0,15	0	0,84	2,21
S7	S5	0,25	0	0,9	2,37
S7	S6	0,25	0,15	0,93	2,45
Moyenne				0,96	2,51

Figure II. 83: a) Suivi de la température en différents points d'un massif de limon de Plaisir compacté (cycle 1 Programme P5, extrait de la Figure II. 79b). b) Diffusivité thermique α et conductivités thermiques λ du sol compacté estimé à l'aide de la méthode inverse à partir des données enregistrées à une distance r_1 and r_2 du centre du massif.

La Figure II. 84b compare les enregistrements expérimentaux avec les résultats du modèle analytique inverse pour les sondes S5 et S6 (Figure II. 84a). Les résidus, c'est-à-dire la différence entre la température mesurée et les valeurs du modèle analytique inverse, sont inférieurs à 0,02 °C pour une augmentation 27 °C, ce qui valide l'applicabilité du modèle de conduction thermique 1D (figure 5b). Les détails du modèle ainsi que l'analyse de sa sensibilité en fonction de l'unicité de la solution, de l'écart-type de la température enregistrée par les capteurs et des erreurs dues aux variations de distance des capteurs par rapport à l'axe du récipient sont décrits dans l'article Lahoori et al. (2020).

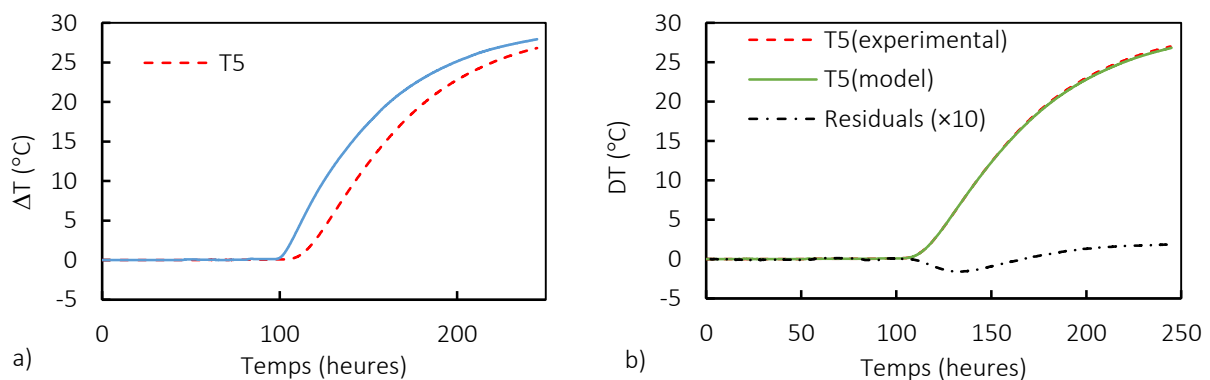


Figure II. 84 : a) Evolution des températures pour les sondes T5 et T6; b) comparaison entre les résultats expérimentaux et la modélisation.

Afin de déterminer la conductivité thermique du sol, la chaleur spécifique sèche, C_{dry} du matériau sec a été mesurée à différentes températures avec un microcalorimètre (DSC, SETARAM μ dsc3). Puis, en considérant la teneur en eau initiale des échantillons testés (16,3 %), la chaleur spécifique du sol C_p a été évaluée à 1322 J.kg⁻¹.K⁻¹ et la capacité thermique volumétrique C_v à 2,641 J.m⁻³.K⁻¹. Connaissant la capacité thermique volumétrique du matériau (2,64.10⁶ J.m⁻³.K⁻¹), sa conductivité thermique λ (W.m⁻¹.K⁻¹) a pu être évaluée à 2,51 ± 0,23 (W.m⁻¹.K⁻¹).

$$C_p = \frac{C_{dry} + w C_{water}}{1 + w} \quad \text{Équation 25}$$

$$C_v = \rho C_p \quad \text{Équation 26}$$

Avec C_{water} est la chaleur spécifique de l'eau pure ($C_{water} = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à $20 \text{ }^\circ\text{C}$) et ρ est la masse volumique humide du sol (kg. m^{-3}).

IV.5.2. Comparaison des résultats avec les méthodes de mesure classique en laboratoire

La conductivité thermique obtenue est comparée avec des mesures classiques de laboratoires décrites en partie IV.1.1. L'utilisation du conductimètre à aiguille (KD2 pro) sur deux éprouvettes préparées au même état de compactage que la cuve fournit une conductivité thermique moyenne d'environ $2,46 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Deux essais ont également été réalisés avec la méthode de la plaque chaude centrée. Lors des essais, la température de l'élément chauffant (T_1) était de $24,3 \pm 0,76 \text{ }^\circ\text{C}$, la température de la plaque d'aluminium (T_{01}) de $14,5 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ et l'air ambiant maintenu $23 \text{ }^\circ\text{C}$ pour assurer un transfert de chaleur unidimensionnel au centre de l'échantillon. Le premier test a duré 2 jours et le second 6 jours. Au cours du second test, une diminution sensible de la conductivité thermique a été mesurée au cours du second jour de $2,08$ à $2,05 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Cette diminution peut s'expliquer par l'évaporation de l'eau sous l'effet du chauffage, la teneur en eau de l'échantillon étant passée de $16,3\%$ à $14,6\%$. La conductivité thermique moyenne du sol compacté pour les deux tests était de $1,97 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Les valeurs estimées de la conductivité thermique mesurées par le modèle analytique inverse ($2,47 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et par la méthode de l'état transitoire ($2,46 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) sont très proches. En revanche, les valeurs obtenues avec la méthode de la plaque chaude centrée ($1,97 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) sont inférieures de 20% . Cette différence peut s'expliquer en partie par la diminution de la teneur en eau observée au cours de l'essai, car la présence d'eau augmente la surface de contact effective entre les particules du sol et facilite le transfert de chaleur. Cela induit une vigilance particulière dans le maintien d'une teneur en eau suffisante des massifs de stockage afin d'éviter une diminution de leur performance thermique.

Une différence importante entre les méthodes concerne l'anisotropie du matériau. En effet, lors de la préparation des échantillons, le matériau a été compacté en couches successives afin d'atteindre la densité et l'homogénéité souhaitées. Dans la cuve d'essai, ainsi que lors de l'utilisation du conductimètre à aiguille, la conductivité thermique estimée est mesurée parallèlement à la stratification tandis que lors de l'essai à la plaque chaude centrée, la mesure est réalisée perpendiculairement à la stratification. La faible valeur de conductivité thermique dans le sens perpendiculaire à la stratification semble cohérente avec la succession des interfaces qui s'opposent à la conduction de la chaleur (Midttømme et al. 1998, Low et al. 2015). Ces résistances s'ajoutent à celle produite par la fine couche d'air entre l'échantillon de sol et l'élément chauffant qui est ici négligée (Jannot et al. 2016). Ainsi, une solution de mesure en continu de la conductivité thermique au sein de massifs de stockage est importante pour garantir sa représentativité. Les mesures in situ permettront également de tenir compte de l'hétérogénéité en termes de minéralogie, granulométrie, teneur en eau et densité.

D'un point de vue pratique, cette méthode permettra de prendre en compte l'hétérogénéité du matériau mais elle n'est validée que pour un transfert de chaleur unidirectionnel. Dans un remblai, un flux thermique radial peut être identifié en considérant la forme cylindrique des boucles d'échangeur de chaleur (de la surface des tubes vers une surface cylindrique fixée). Cependant, les sondes de température devront être placés à une distance inférieure à la zone d'impact des autres

tubes échangeurs de chaleur. Cette distance peut être déterminée par modélisation des transferts dans le massif (voir partie IV.6). Deux capteurs de température doivent être placés à des distances différentes des tubes échangeurs de chaleur pour mesurer la température. La distance entre les deux capteurs doit être mesurée avec précision. Cette méthode permettrait d'assurer la surveillance en temps réel des propriétés thermiques du stockage, que ce soit dans un remblai ou dans d'autres configurations tout au long de la vie de l'ouvrage. Une diminution de la conductivité thermique pourrait par exemple permettre de détecter une désaturation du massif. Au contraire, une augmentation de conductivité thermique au-delà des valeurs attendues à saturation pourrait permettre d'identifier des variations de densité signe d'un tassement du massif.

Les propriétés thermiques obtenues pour les matériaux compactés étudiés sont compatibles avec les valeurs attendues pour la réalisation des stockages de chaleur. L'étape suivante consiste donc à évaluer la performance thermique des remblais.

IV.6. Evaluation de la performance thermique d'un sol compacté pour le stockage de chaleur

La performance thermique des massifs utilisés pour stocker de la chaleur est généralement évaluée à l'aide d'outils de modélisations numériques aux éléments finis ou aux différences finies. Dans ces modèles, les simulations sont généralement réalisées en considérant une masse de sol homogène avec des propriétés thermiques constantes. Le transfert de chaleur est alors modélisé par conduction au travers des particules solides du sol (Jradi et al. 2017). Cependant, comme nous avons pu le voir précédemment, dans les sols compactés non saturés, les propriétés thermiques évoluent au grés des variations de la température ainsi que des propriétés physiques et hydrauliques du sol. Par conséquent, une simulation thermo-hydraulique avec la prise en compte du transfert de masse par les flux de vapeur et de liquide est nécessaire (Jradi et al. 2017, Gan 2013, Gao et al. 2016, Boukelia 2016, Li et al. 2018, Asgari et al. 2020).

Jradi et al. (2017) ont montré l'efficacité du couplage d'un aérotherme avec le sol support d'un bâtiment comme stockage saisonnier sous forme d'énergie thermique. Cependant d'importantes pertes de chaleur entre les saisons de stockage et de destockage furent constatées. Pour conserver l'efficacité du stockage, il est possible d'augmenter le nombre de boucles d'échangeurs comme le montrent Asgari et al. (2020) avec leurs calculs de performance thermique lorsque plusieurs échangeurs de chaleur horizontaux linéaires sont disposés dans le sol. Il est également possible d'agir sur la profondeur d'enfouissement des échangeurs. Gan (2013) a montré que pendant l'extraction de chaleur en hiver, un positionnement plus profond des boucles favorise l'efficacité thermique du système puisqu'en profondeur, les échangeurs sont moins affectés par la variation de la température ambiante quotidienne et saisonnière. Le choix de la géométrie de l'échangeur est également un paramètre important, par exemple les échangeurs spiralés seraient moins dépendants de la profondeur. Enfin, la mise en place d'une couche isolante au sommet du stockage pourrait être envisagée, cette possibilité fera l'objet de la partie IV.7.

Afin d'évaluer les pertes de chaleur aux interfaces atmosphère-massif, Tang et Nowamooz (2019) ont proposé un modèle permettant d'évaluer la performance des systèmes géothermiques en tenant compte de l'équilibre énergétique et hydrique à la surface du sol. Leurs résultats ont montré que la prise en compte de l'interaction atmosphère-massif sous-estime fortement la température de sortie, en particulier pour les systèmes horizontaux installés près de la surface du sol, avec une différence de 48%. Une collaboration scientifique avec les auteurs a permis d'adapter le modèle à notre problématique et d'évaluer la performance thermique d'un stockage réalisé avec le limon de

Plaisir compacté. Pour cela, les propriétés thermo-hydomécaniques mesurées en laboratoire ont été utilisées et plusieurs scénarii de stockage ont été simulés.

IV.6.1. Géométrie et caractéristiques du modèle

Le stockage étudié a une longueur de 30 m, une largeur de 12 m et une hauteur de 20 m. Cette géométrie permet de considérer que l'impact hydrothermique des conditions météorologiques saisonnières est nulle à la limite inférieure. Le système est supposé être installé en Alsace, à l'est de la France en juin. L'échangeur spiralé en polyéthylène haute densité présente un diamètre intérieur de 0,03 m et un diamètre extérieur de 0,036 m. Sa conductivité thermique est de $0,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et il est parcouru par du propylène glycol à une concentration de 25%. Dans ces conditions, la viscosité dynamique du fluide caloporteur est de $0,0055 \text{ Pa.s}$, sa masse volumique de 1026 kg.m^{-3} , sa conductivité thermique de $0,45 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et sa capacité thermique spécifique de $3974 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (Tang et Nowamooz, 2019). Il est installé à 1 m sous la surface, le sol local est remplacé par du limon de Plaisir compacté à une densité sèche de $1,72 \text{ Mg.m}^{-3}$ (Tableau II. 23). Le fluide caloporteur circule à une vitesse de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ pendant la période de fonctionnement.

Tableau II. 23 : Propriétés hydromécaniques du sol local.

	$K \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	$I \text{ (-)}$	$\alpha \text{ (m}^{-1}\text{)}$	$n \text{ (-)}$	$w_s \text{ (-)}$	$w_r \text{ (-)}$	$x_s \text{ (-)}$	$\rho_s \text{ (Mg.m}^{-3}\text{)}$	$\rho_d \text{ (Mg.m}^{-3}\text{)}$
Limon sableux	$1,78 \times 10^{-5}$	0,5	2,60	1,52	0,39	0,02	0,80	2,62	1,60
Limon compacté	$1,00 \times 10^{-9}$	0,5	0,134	1,52	-	1	0,62	2,57	1,72

Le maillage du modèle a été optimisé pour obtenir un temps de calcul raisonnable (Figure II. 85). Les mailles sont plus denses à l'interface sol-atmosphère, là où le sol est le plus sensible aux variations de température et d'hygrométrie de l'atmosphère et autour des échangeurs en raison des forts gradients de température et de succion (Choi et Ooka 2016).

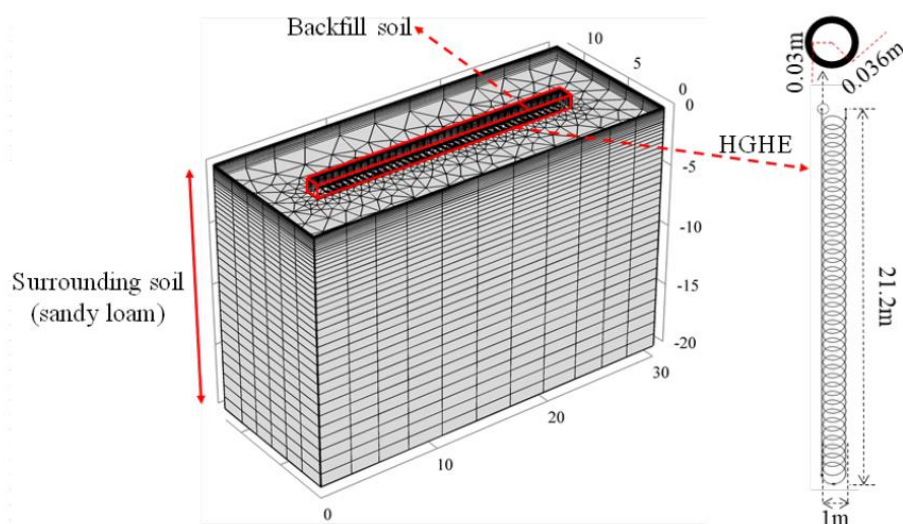


Figure II. 85 : Géométrie et maillage du système pour les simulations numériques (Tang et al., 2021).

Le gradient de température à la limite inférieure est fixé à $0,142 \text{ K.m}^{-1}$ (Bailleux et al. 2013), le niveau des eaux souterraines est fixé à une profondeur constante de 7,5 m pendant toute l'année et l'eau supplémentaire provenant des précipitations est supposée être drainée en limite inférieure. Aucun flux hydrothermal n'est imposé aux limites latérales. Les conditions météorologiques

correspondent aux conditions locales (Tang et Nowamooz 2020), cohérentes avec une installation en juin. Les Figure II. 86a et b présentent les températures ambiantes et le rayonnement lumineux appliqué au cours de l'année sous la forme d'une courbe sinusoïdale simplifiée. Une couverture nuageuse moyenne de 0,41, une vitesse de vent moyenne de 2 m.s^{-1} , des précipitations mensuelles moyennes de 55,7 mm, et une humidité de l'air moyenne de 83% sont appliquées dans le modèle pour prendre en compte les principales conditions météorologiques du site. Pour ce qui concerne le bilan hydrique, 20% des précipitations sont supposées ruisseler tandis que les 80% restant participent à l'évapotranspiration ou à l'infiltration. Un calcul préliminaire (Tang et Nowamooz 2019) est utilisée pour obtenir les profils initiaux de succion et de températures (Figure II. 86c et d).

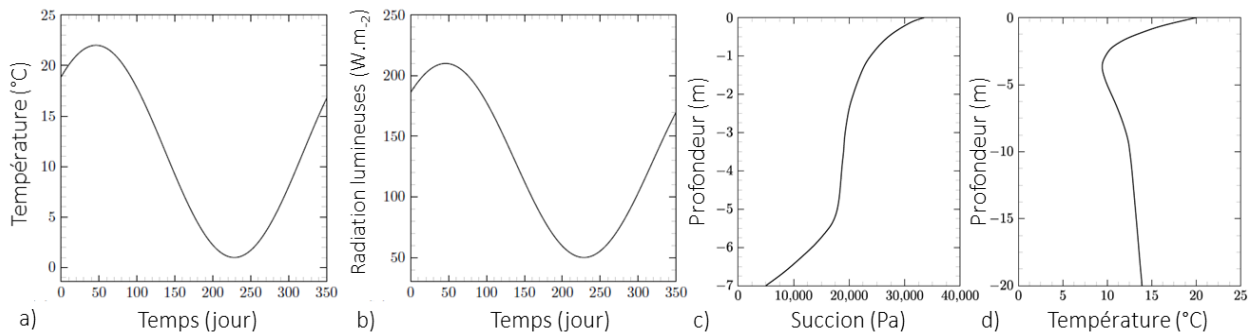


Figure II. 86 : Conditions météorologiques et hydrothermiques appliquées : a) température ambiante au cours de l'année, b) radiations lumineuses au cours de l'année, c) profil de succion initial dans le sol et d) profil de température initial dans le sol.

La Figure II. 87 présente, de façon schématique, les phénomènes pris en compte lors de la modélisation. Les équations permettant de considérer l'interaction atmosphère-sol sont :

- le bilan énergétique de la surface du sol ;
- le bilan hydrique de la surface du sol ;
- le transfert hydrothermique dans le sol (subsurface) ;
- le transfert de chaleur dans le tube.

L'ensemble des équations sont publiées dans l'article Tang et Nowamooz (2020).

$$R_n + H - LE - G = 0$$

Équation 27

$$P = W_r + E + W_I$$

Équation 28

Avec R_n : le flux radiatif net de chaleur, H : le flux de chaleur sensible, LE : le flux de chaleur latente, G : la quantité de chaleur traversant le sol, P : les précipitations, w_r : les pertes d'eau par ruissellement, E : l'évapotranspiration et w_I : les infiltrations dans le sol.

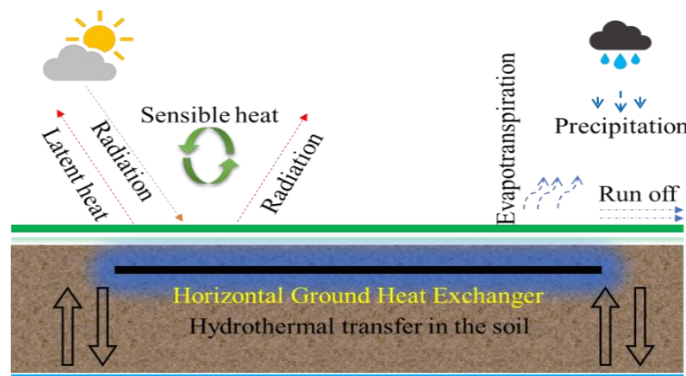


Figure II. 87 : Diagramme schématique des mécanismes de transfert d'énergie et d'eau (Tang et al. 2019).

IV.6.2. Effet d'un stockage de la chaleur sur les températures atteintes à proximité d'un échangeur

Dans cette section, l'effet du stockage de l'énergie thermique pendant l'été sur la performance de l'échangeur installé dans un sol compacté est étudié (Tang et al. 2021). Les résultats sont comparés au système original sans stockage de chaleur (appelé scénario N_{sto} dans cette section), plusieurs profondeurs d'installation sont testées dans les simulations numériques. Afin de simuler un stockage de chaleur au cours de la période estivale, un fluide dont la température est plus élevée que celle du sol est mis en circulation dans le tube afin d'échanger de la chaleur avec le massif de stockage. L'énergie stockée pendant la saison estivale est extraite en hiver par un fluide circulant à une température de 1°C dans l'échangeur. Le système est en relaxation au cours des périodes printanières et automnales (Figure II. 88).

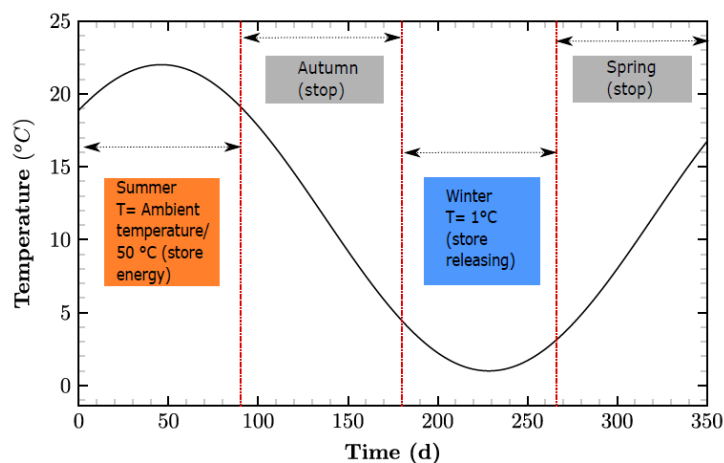


Figure II. 88: Scenario de fonctionnement du système au cours de l'année.

Deux scénarios avec stockage sont étudiés :

- 1) Dans le premier scénario avec stockage (StoA), un réservoir de fluide caloporteur est supposé être exposé à la température extérieure avant d'être injecté dans l'échangeur. Ainsi, la température d'entrée pendant les 3 mois d'été correspond à la température de l'atmosphère.
- b) Dans le second scénario avec stockage (Sto50), des panneaux solaires sont utilisés pour chauffer le fluide caloporteur avant son injection dans le circuit au cours de l'été. La température du fluide est alors supposée atteindre 50 °C

Tableau II. 24: Température du fluide entrant pour le scénario StoA et le scénario Sto50.

Scénario	Été (Jour 0 à 92)	Automne (Jour 92 à 183)	Hiver (Jour 183 à 274)	Printemps (Jour 274 à 365)
StoA	Température ambiante	relaxation	1 °C	relaxation
Sto50	50 °C	relaxation	1 °C	relaxation

Au cours de la période automnale, une partie de l'énergie stockée est perdue à cause de l'interaction avec l'atmosphère. Ce phénomène sera d'autant plus important si l'échangeur est placé à proximité de l'interface. Trois profondeurs de 1, 1,5 et 2 m ont été étudiées pour chaque scénario.

Comparaison du scénario avec stockage (StoA) avec le scénario sans stockage (N_{sto})

La Figure II. 89 compare le scénario sans stockage N_{sto} au scénario avec stockage StoA pour une installation de l'échangeur à différentes profondeurs. L'effet de l'injection du fluide à température

ambiante est bien visible au cours de la période estivale. Cependant, la chaleur stockée est rapidement dissipée au cours de la période de relaxation : les deux courbes sont superposées le reste de l'année. Une forte diminution de la température du fluide de sortie est enregistrée lors de l'injection du fluide à 1°C au cours de la période hivernale. L'écart entre la courbe affichée et la température de consigne (1°C) dépend de la quantité de chaleur mobilisable au sein du massif. La profondeur d'installation de l'échangeur a un impact sur la température maximale atteinte par le fluide en été : +1°C pour 1m, +2°C pour 1,5 m, et +3°C pour 2 m de profondeur. Le temps pour atteindre une température stable en fin d'hiver est également impacté, ce qui signifie que la quantité de chaleur stockée était plus importante lorsque l'échangeur a été placé à 2 m de profondeur.

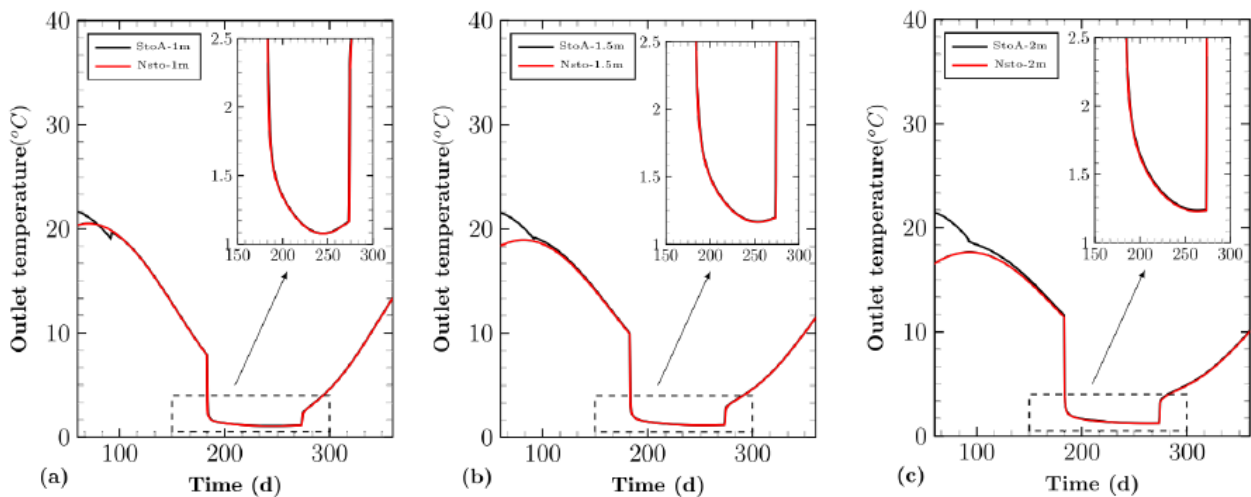


Figure II. 89 : Comparaison de la température de sortie du scénario avec stockage StoA (température ambiante) et du scénario sans stockage NSto pour trois profondeurs d'installation a) 1m, b) 1,5m et c) 2m

Comparaison du scénario Sto50 avec le scénario sans stockage NSto

La Figure II. 90 compare le scénario sans stockage NSto au scénario avec stockage Sto50 pour une installation de l'échangeur à différentes profondeurs. L'injection d'un fluide chaud (50°C) augmente manifestement la température du sol en été, ceci est d'autant plus important que l'installation est profonde. Au cours de l'automne (jours 92 à 183), une part significative de la chaleur est perdue mais le fluide sortant reste plus chaud que le scénario sans stockage au début de l'hiver. La température atteinte à la fin de l'hiver est supérieure au scénario sans stockage quelle que soit la profondeur, ce qui signifie qu'une quantité de chaleur importante est mobilisable dans le cas du scénario Sto50.

Les profils de température obtenus en fin d'été, en fin d'automne et en fin d'hiver lorsque l'échangeur est placé à 2 m de profondeur sont représentés pour chaque scénario en Figure II. 91. La figure montre bien l'apport négligeable du scénario StoA au contraire du scénario Sto50 pour lequel le profil de température est supérieur aux deux autres scénarii.

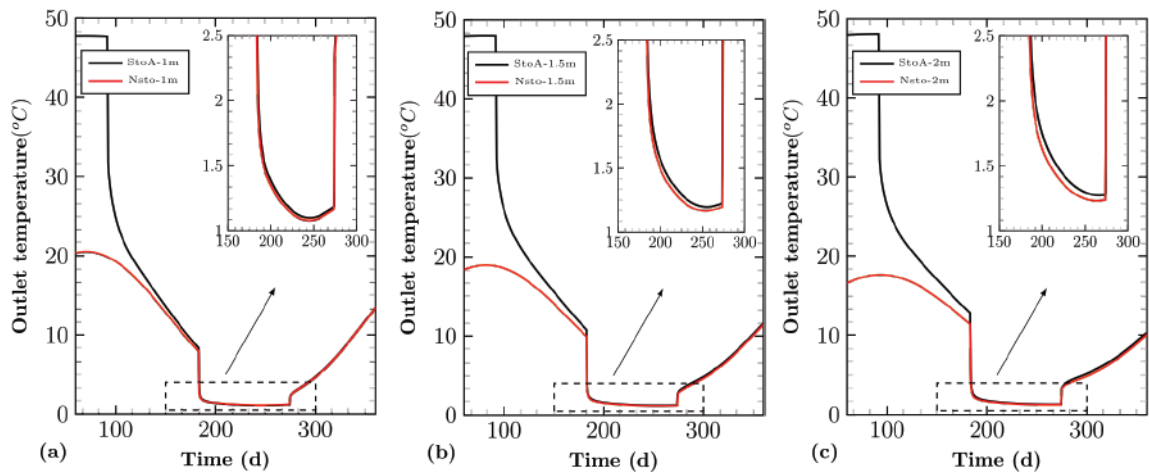


Figure II. 90 : Comparaison de la température de sortie du scénario avec stockage ($T_{fluide}=50\text{ °C}$ pendant l'été) et du scénario sans stockage pour trois profondeurs d'installation : a) 1m, b) 1,5m et c) 2m.

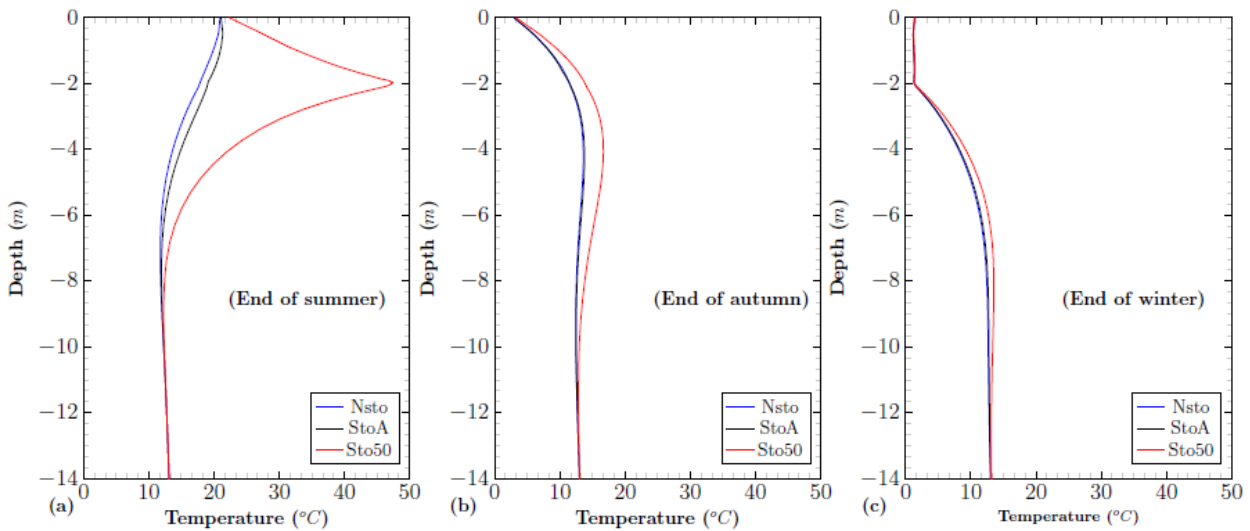


Figure II. 91: Profils de température obtenus lors de la mise en place des échangeurs à 2m de profondeur a) à la fin de l'été, b) à la fin de l'automne, c) à la fin de l'hiver.

IV.6.3. Performance énergétique du système géothermique intégrant un stockage.

Au cours de la durée d'utilisation d'un échangeur géothermique, l'énergie totale extraite (TEE) peut être calculée au cours du temps (t) par l'équation :

$$TEE = \int A \rho_f u_f C_{p-f} (T_{out} - T_{in}) dt \quad \text{Équation 29}$$

Où T_{in} est la température d'entrée du fluide ($^{\circ}\text{C}$), T_{out} est la température de sortie du fluide ($^{\circ}\text{C}$), A est la section transversal interne du tube (m^2), ρ_f est la densité du fluide ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), C_{p-f} est la capacité thermique du fluide ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) et u_f est la vitesse d'écoulement du fluide ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

En utilisant cette équation, la quantité d'énergie extraite est calculée pour chaque scénario et chaque profondeur (Figure II. 92). Les résultats montrent que le stockage de chaleur permettrait d'augmenter la quantité d'énergie disponible en période hivernale, a fortiori à plus forte profondeur et pour des températures d'injection plus importantes (50°C). Par exemple, pour une profondeur d'installation de 1 m, sur le scénario Sto50, l'augmentation du TEE est de 0,34 GJ (+13,7

%). A 2 m de profondeur, cette amélioration atteint +1,03 GJ soit + 41,4 % en comparaison avec un scénario sans stockage.

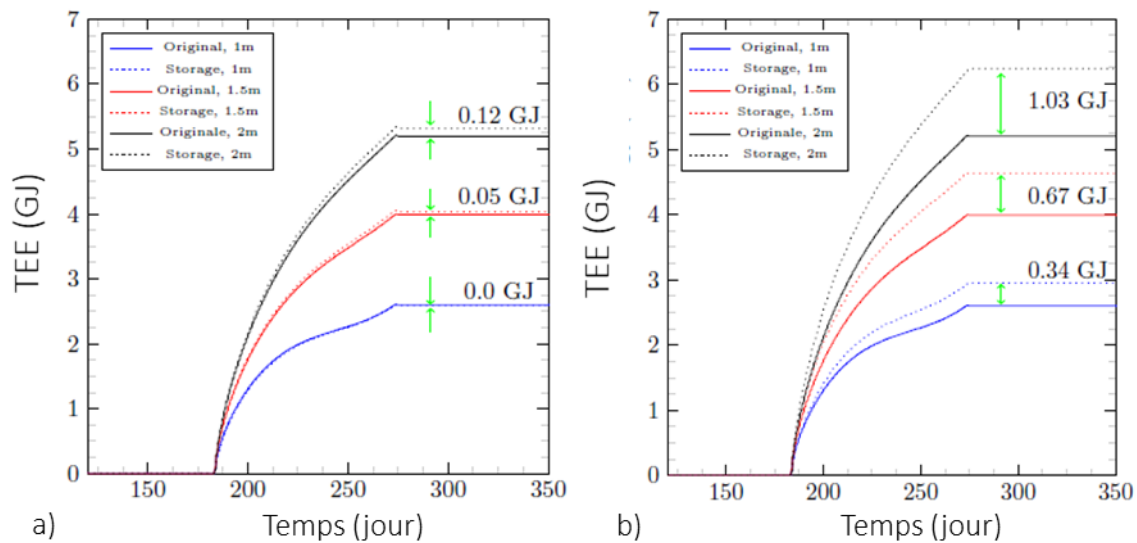


Figure II. 92 : Quantité totale d'énergie extraite au cours du temps pour a) le scénario NSto, en comparaison avec b) le scénario Sto50.

Les résultats (Figure II. 93) montrent qu'une température du fluide d'entrée de 50 °C en été (Sto50) augmente fortement la performance du système (13,7 à 41,4%) alors que l'amélioration par rapport à un système sans stockage (NSto) est moins significative (0 à 4,8%) lorsque la température au cours de l'été correspond à la température ambiante (StoA). Par ailleurs, une perte de chaleur considérable a été observée pendant les saisons de relaxation et de déstockage. L'augmentation de la profondeur d'installation améliore la performance énergétique mais augmente également les coûts d'installation, la mise en place d'une solution d'isolation pourrait donc être avantageuse.

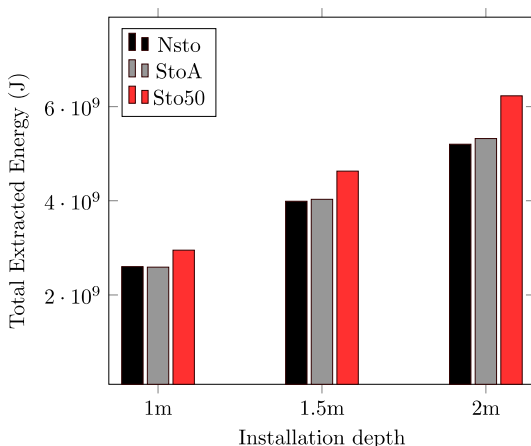


Figure II. 93 : Comparaison de Energie Totale extraite (TEE) entre les scénarios de stockage de la chaleur (StoA et Sto50), et le scénario sans stockage (NSto) à trois profondeurs d'installation différentes.

IV.6.4. Bilan

Les travaux de recherche en lien avec la modélisation des échanges thermiques avec l'atmosphère ont été réalisés en collaboration avec l'équipe « Génie Civil et Énergétique » de l'INSA de Strasbourg. Ces travaux communs avec Hossein Nowamooz et Fujiao Tang ont permis de réaliser une simulation numérique hydro-thermique d'un stockage en sol compacté qui tient compte de

l'interaction atmosphère-sol. Les calculs de la performance thermique du système, sous différentes configurations, apportent des précisions sur le choix du sol de remblai et la profondeur d'installation des échangeurs de chaleur. La comparaison des résultats obtenus pour une installation dans le sol compacté ou dans le sol naturel montre une amélioration de 18,5% de la performance thermique lorsque l'échangeur est installé dans le sol compacté. Ce résultat montre la pertinence des travaux de recherche sur la thématique du stockage de chaleur en sol compacté. La problématique de la perte de chaleur au cours des périodes de relaxation sera plus faible dans le cas d'une installation des échangeurs au cœur du remblais (à 10 m de profondeur par exemple), elle peut également être limitée par la mise en place d'une isolation à l'interface sol-atmosphère. Cette problématique sera développée dans la partie IV.7. De plus, la modification de la température pourrait affecter la stabilité de l'ensemble, pour cela des simulations numériques pourraient être envisagées (partie IV.8).

IV.7. Utilisation des géosynthétiques pour l'isolation thermique des géostructures énergétiques

Dans la littérature, différentes solutions d'isolation sont proposées pour limiter les pertes de chaleur, comme les laines et mousses qui entourent les cuves d'eau utilisées pour stocker la chaleur (Schmidt et al. 2003, Baetens et al. 2010, Al Homoud 2005). Dans le cas de remblais de stockages géothermiques, étant données les grandes surfaces à recouvrir, les contraintes sont différentes : le matériau d'isolation doit être fin, économique, facile à mettre en œuvre et ses propriétés d'isolation thermique doivent résister à la compression. Dans cette application, les géosynthétiques et plus précisément des géotextiles non tissés aiguilletés, pourraient être des matériaux de choix. Au regard des utilisations classiques de ces produits définies dans la norme NF EN ISO 10318 (AFNOR, 2015), cet usage pour l'isolation thermique est nouvelle. Une étude de faisabilité a donc été menée au cours du master de Mojdeh Lahoori (Lahoori et al. 2021b), en collaboration avec Yves Jannot et Guillaume Stoltz, géotechnicien et spécialiste de ces matériaux à l'INRAE. La performance thermique de quatre géotextiles non tissés aiguilletés est évaluée en vue de leur utilisation pour l'isolation d'un stockage de chaleur saisonnier dans des remblais.

IV.7.1. Conductivité thermique de géosynthétiques sous chargement

Quatre types de géotextiles non tissés aiguilletés sont testés dans cette étude, constitués soit de fibres recyclées (géotextiles R1 et R2) soit de fibres vierges (V1 et V2), ces produits ont des épaisseurs et masses surfaciques différentes (Tableau II. 25).

Tableau II. 25 : Propriétés de géotextiles non tissés aiguilletés.

Ref.	Type de fibres	Epaisseur (10^{-3} m)			Masse surfacique (g.m^{-2})	Masse volumique à 2 kPa (kg.m^{-3})
		à 2 kPa	à 20 kPa	à 200 kPa		
R1	Recyclées	3,670 $\pm 0,110$	3,000 $\pm 0,212$	1,817 $\pm 0,100$	382,1 $\pm 19,9$	104,1 $\pm 0,1$
R2	Recyclées	7,113 $\pm 0,408$	5,903 $\pm 0,346$	3,692 $\pm 0,308$	883,4 $\pm 67,7$	124,2 $\pm 0,1$
V1	Vierges	7,940 $\pm 0,141$	7,091 $\pm 0,154$	5,396 $\pm 0,269$	1207,6 $\pm 61,7$	152,1 $\pm 0,2$
V2	Vierges	6,824 $\pm 0,118$	6,082 $\pm 0,130$	3,851 $\pm 0,110$	825,6 $\pm 28,2$	121,0 $\pm 0,1$

Les conductivités thermiques des quatre géotextiles testés ont été mesurées en fonction de leur épaisseur avec la méthode à la plaque chaude (voir partie IV.2.1). L'épaisseur du géotextile R1 étant trop faible, la mesure a été réalisée sur 3 éprouvettes superposées. La Figure II. 94a montre que la compression des géotextiles conduit à une hausse de leur conductivité thermique du fait de l'augmentation de la densité des produits. La relation est pratiquement linéaire sous de faibles contraintes verticales jusqu'à une épaisseur limite au-delà de laquelle la conductivité thermique augmente fortement, cette évolution est particulièrement visible pour le géotextile R2 (Figure II. 94a).

Dans le cas d'une utilisation dans un ouvrage, la contrainte normale de compression correspond aux couches de sol placées au-dessus du géotextile et à d'éventuelles charges en lien avec l'utilisation de la structure (route, voie ferroviaire ...). Ainsi, le niveau de contrainte dans l'ouvrage est une condition essentielle vis-à-vis du dimensionnement du géotextile en tant qu'isolant thermique. Des essais de compression ont permis de déterminer la relation entre la contrainte de compression et l'épaisseur pour les quatre produits testés. Ainsi, les conductivités thermiques des matériaux ont pu être tracées en fonction de la contrainte normale appliquée sur le géosynthétique (Figure II. 94b). Il est à noter que cette représentation ne prend pas en considération le fluage en compression des produits puisque les essais de compression ont été menés sur le court terme.

La Figure II. 94b, montre que la variation de la conductivité thermique en fonction de la contrainte de compression est spécifique à chaque produit et ne présente pas une tendance particulière (linéaire, etc.). Sur la Figure II. 94b, le trait rouge indique une contrainte verticale de 8 kPa, qui correspondrait à la contrainte appliquée par une couche de matériau de 40 cm d'épaisseur disposée au-dessus de la future isolation du remblai stockant de la chaleur. Sous cette contrainte, le géotextile V1, le plus épais et de plus forte masse surfacique, est le produit qui présente la conductivité thermique la plus élevée tandis que le géotextile R2 présente la conductivité thermique la plus faible.

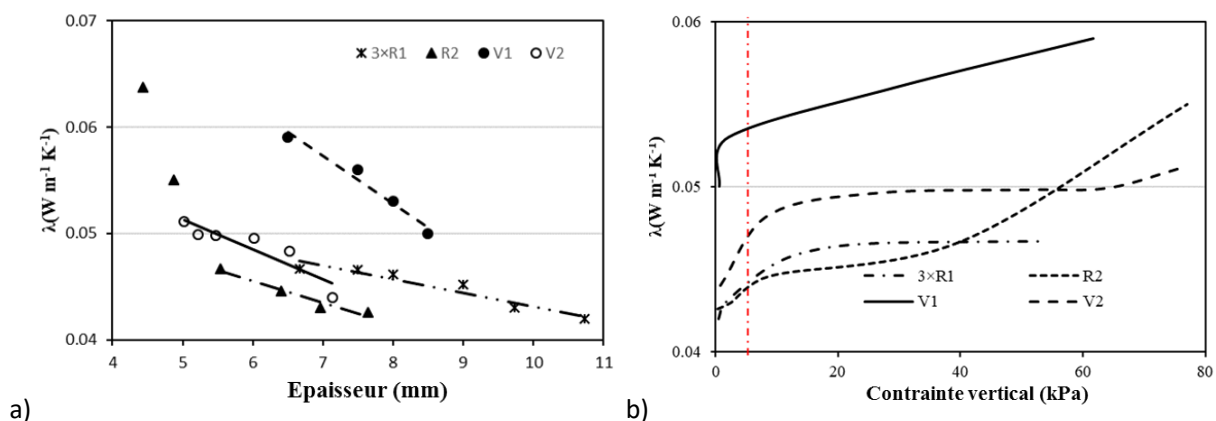


Figure II. 94 : Conductivité thermique des géotextiles a) en fonction de l'épaisseur des géotextiles testés, b) en fonction de la contrainte normale appliquée sur les géotextiles testés.

Afin de pouvoir comparer l'efficacité thermique de produits d'épaisseurs différentes, l'utilisation de la résistance thermique, c'est à dire le rapport entre l'épaisseur du matériau et sa conductivité thermique, est préconisée (Figure II. 95). Selon cette représentation, ce sont les trois couches de géotextile R1 qui présentent la plus forte résistance thermique, mais ce type de configuration n'est pas réaliste sur site pour des raisons de stabilité et de temps de mise en place. Au final, les trois géotextiles R2, V1 et V2 offrent une résistance thermique pratiquement égale sous une contrainte de 8 kPa. Le géotextile R2 est le plus économique et le plus écologique des trois puisqu'il est constitué de fibres recyclées, il semble donc être le plus adapté techniquement et économiquement pour cette application d'isolant thermique sur le pourtour d'un remblai utilisé pour stocker de la chaleur. Ce géotextile est retenu pour la suite de l'étude.

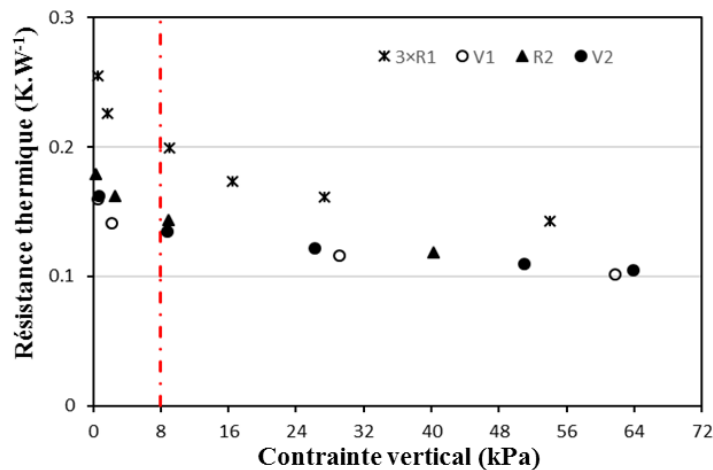


Figure II. 95 : Résistivité thermique des géotextiles testés calculée en fonction de la contrainte normale appliquée sur les géotextiles.

IV.7.2. Conductivité thermique de géosynthétiques en contact avec le sol

Afin d'évaluer les interactions thermiques entre le limon compacté et le géotextile R2, la conductivité thermique d'une association sol / géotextile a été mesurée. La valeur obtenue de $0,47 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ est supérieure à la valeur théorique de $0,15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ calculée selon l'équation :

$$\lambda = \frac{e_{(sol+R2)}}{\frac{e_{sol}}{\lambda_{sol}} + \frac{e_{R2}}{\lambda_{R2}}} \quad \text{Équation 30}$$

Où e_{sol} et e_{R2} sont les épaisseurs du limon et du géosynthétique (m) tandis que λ_{sol} et λ_{R2} sont les conductivités thermiques des matériaux ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Cette différence s'explique par un transfert d'eau depuis le sol vers le géotextile. En effet, la masse du géotextile en fin d'essai a augmenté d'un facteur 2 environ tandis que la teneur en eau de l'éprouvette de sol a diminué de 16,6% à l'état initial à environ 10,6% à l'état final. Ce transfert d'eau s'opposant à la gravité a lieu alors que le géotextile est placé au-dessus du sol, c'est-à-dire en s'opposant à la gravité. Le transfert d'humidité suit le sens du flux de chaleur. Ainsi, pour conserver l'efficacité énergétique du géotextile en temps qu'isolant, il serait nécessaire d'utiliser des géofilms de part et d'autre du géotextile pour éviter ce transfert d'eau qui aboutirait à une diminution des performances thermiques à la fois du géotextile en tant qu'isolant et du sol en tant que support de stockage de chaleur.

IV.7.3. Bilan

Les résistances thermiques des géosynthétiques seuls ou en contact avec un sol humide ont été mesurées à l'aide d'un dispositif de mesure à plaque chaude. Les résultats montrent que, en plus de l'épaisseur et de la conductivité thermique des produits, l'effet de la contrainte normale est un paramètre essentiel à considérer pour un dimensionnement. La résistivité thermique, issu du rapport entre l'épaisseur et la conductivité thermique est déterminée pour une contrainte donnée et peut ainsi être considérée comme un paramètre dimensionnant dans la mesure où il intègre à la fois l'effet de la contrainte sur l'épaisseur et sur la conductivité thermique. La prise en compte du fluage des géosynthétiques devra cependant être prise en considération dans les prochaines études.

De plus, des transferts hydriques entre le géotextile et le sol humide ont été mis en évidence. Cette migration d'humidité conduit à une baisse des performances thermiques du géotextile en tant qu'isolant et à une baisse de la performance énergétique du stockage. Pour éviter cela, l'utilisation de géofilms au contact des géotextiles est envisagée pour des application de type isolation thermique mais cet ajout augmentera sensiblement le cout des produits et de leur mise en place. De plus, l'installation de cette interface imperméable pourrait occasionner d'autres problématiques en lien avec la mobilité de l'eau au sein du massif.

En effet, dans le cas de l'utilisation de sols compactés pour le stockage de chaleur, l'augmentation de la température dans les échangeurs conduit à une migration de l'eau vers les couches superficielles (McCartney et al. 2014). Le principe est illustré à l'échelle d'un champ de stockage de chaleur par forage (borehole) en Figure II. 96. De la vapeur d'eau se forme au contact des échangeurs et migre vers les couches superficielles. Nous avons également observé ce phénomène lors d'expérimentations conduites en laboratoire sur des massifs de sol compactés (Eslami et al. 2017). La diminution de la teneur en eau à proximité des échangeurs diminue l'efficacité énergétique du système (Boukelia et al. 2019). Si la vapeur d'eau ne peut pas s'échapper dans l'atmosphère en raison d'une isolation superficielle et/ou d'une barrière hydraulique, elle se condense près de la surface. L'eau liquide ainsi formée va percoler sous l'effet de la gravité vers les couches profondes et vers les échangeurs puisque le sol chaud, à proximité des échangeurs, présentera une succion plus importante. McCartney et al. (2014) ont simulé ce phénomène en insérant un réseau triangulaire de boucles d'échangeur dans le réservoir cylindrique isolé de 603 mm de diamètre contenant un limon compacté à une densité sèche de 1400 kg/m^3 à une teneur en eau de compactage de 24% ($S_{r\text{initial}} = 0,5$). Une couche de sable saturée avait préalablement été placée à la base de la cuve (Figure II. 97). Des capteurs diélectriques ont permis de mesurer les changements de température et de teneur en eau le long de la ligne centrale en fonction de la profondeur, et une sonde KD2Pro a été utilisée pour mesurer les changements de conductivité thermique. De l'eau chaude a ensuite circulé à un débit de 37 ml/s dans les tubes. Les températures d'entrée et de sortie furent maintenues à 85 et $79 \text{ }^\circ\text{C}$, simulant une injection de chaleur régulière.

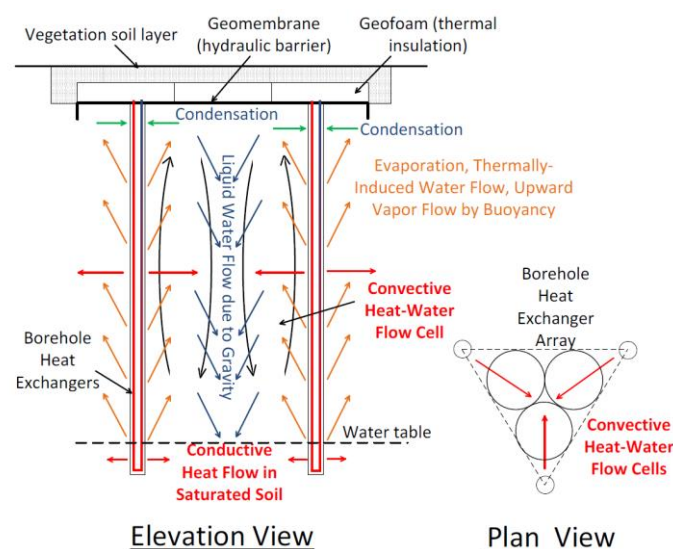


Figure II. 96 : Illustration de l'effet couplé des transferts de chaleur et d'humidité au sein d'une zone non saturée équipée d'échangeurs de chaleurs (McCartney et al. 2014)

Les résultats ont montré que dans ces conditions, la température du sol au centre du réseau augmentait régulièrement de $16 \text{ }^\circ\text{C}$ après environ 100 heures et le degré de saturation a augmenté de 23 %. Une augmentation linéaire de la conductivité thermique et de la capacité thermique

spécifique a également été observée, reflétant une augmentation du transfert de chaleur signe de l'apparition probable d'une cellule convective au sein du massif.

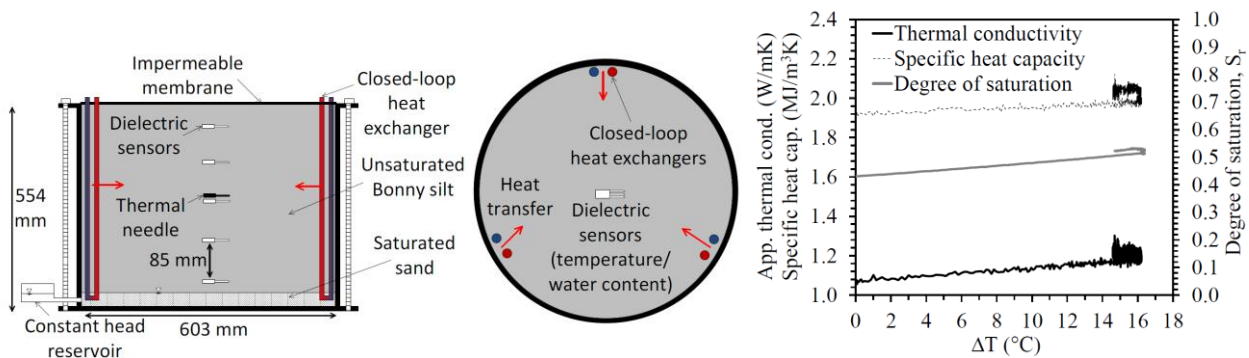


Figure II. 97 : Cuve en modèle réduit utilisée par McCartney et al. 2016 pour étudier l'effet de l'échange thermique sur la mobilité de l'eau et résultats obtenus. (McCartney et al. 2014)

Le verrou scientifique identifié sur cette thématique est de quantifier les transferts d'eau au sein des matériaux poreux sous l'effet de sollicitations thermo-hydriques. Pour y répondre et améliorer la compréhension du comportement thermo-hydrromécanique des sols non saturés situés à l'interface sol-atmosphère des expérimentations à différentes échelles d'investigation sont présentées dans la partie projet.

En conclusion, cette étude est une première étape de faisabilité, des investigations supplémentaires sont nécessaires pour évaluer les performances en isolation des géotextiles. En particulier, des expérimentations sur un ouvrage réel seraient importantes pour évaluer l'impact d'une isolation sur l'efficacité du système et prendre en compte les variations thermiques saisonnières.

IV.8. Modélisation thermo-hydrrique d'un remblai géothermique

Les parties précédentes ont montré la faisabilité en terme d'efficacité énergétique du stockage de chaleur en remblais et établis que la mise en place technique des échangeurs ne constitue pas un obstacle au développement de la méthode. En revanche, la prévision du comportement thermo-hydrromécanique (THM) et la durabilité mécanique de l'ouvrage au cours des cycles successifs pose d'importantes questions scientifiques et pratiques. Dans ce cadre, une modélisation du comportement thermo-hydrrique d'un remblai de stockage prenant en compte le transfert de chaleur par conduction dans la phase solide et liquide et par convection de la phase vapeur a été initié dans la cadre de la thèse de Ahmed Boukelia (2016). La simulation numérique du comportement du remblai compacté est effectuée à l'aide du code de calcul éléments finis Code_Bright. Ce code a été développé par une équipe de l'Ecole Polytechnique de Barcelone (Olivella et al., 1996), il permet d'effectuer des calculs THM couplés ou non.

Les équations d'équilibre sont résolues simultanément pour tenir compte des diverses combinaisons entre les phénomènes. Pour cela, les hypothèses suivantes sont considérées :

- l'air est considéré comme un élément et constitue le composant principal de la phase gazeuse ;
- l'équilibre thermique entre la phase solide, la phase liquide et la phase gazeuse est supposé établi, ce qui signifie que les trois phases ont la même température ;

- l'équilibre des éléments dissous et de la phase liquide est régi par les équations constitutives (loi de Darcy et loi de Fick).

Dans le cadre de cette étude, deux hypothèses supplémentaires sont envisagées. Premièrement, la faible perméabilité du sol compacté étudié implique un faible débit d'eau souterraine. En conséquence, le mécanisme de transfert de chaleur convectif a été négligé et seul le mécanisme de transfert de chaleur conducteur a été considéré. Deuxièmement, le sol compacté est non saturé et l'augmentation de la température pourrait convertir une partie de l'eau interstitielle en vapeur, impliquant des changements de température et d'hygrométrie du sol. Ce mécanisme a été pris en compte dans la diffusion du flux de vapeur. L'ensemble des propriétés mécaniques (compressibilité, cisaillement), hydriques (conductivité hydrique saturée et non saturée, courbe de rétention) et thermiques (conductivité thermique, capacité calorifique) ont été acquises en laboratoire sur le limon compacté à son état optimal pour le stockage de chaleur. Ces résultats ont permis de définir les paramètres du modèle.

IV.8.1. Détermination des paramètres du modèle

Afin de résoudre le problème de transfert thermique dans le sol, l'évolution de conductivité thermique du sol est modélisée en fonction de son état de saturation à l'aide du modèle :

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda &= \lambda_{sat} \sqrt{Sr} + \lambda_{dry} (1 - \sqrt{Sr}) \\ \lambda_{sat} &= \lambda_{solid}^{(1-\phi)} \lambda_{liquid}^{\phi} \\ \lambda_{dry} &= \lambda_{solid}^{(1-\phi)} \lambda_{gaz}^{\phi} \end{aligned} \right. \quad \text{Équation 31}$$

Où Sr est le degré de saturation ; λ_{sat} et λ_{dry} sont les conductivités thermiques à l'état saturé et à l'état sec respectivement ; λ_{solid} , λ_{liquid} , λ_{gaz} sont les conductivités thermiques du solide, de l'eau et du gaz respectivement ; ϕ est la porosité du sol.

La capacité thermique du sol est calculée en fonction des capacités thermiques de ses constituants (modèle de De Vries) :

$$C = \rho_s C_s (1 - \phi) + \phi \rho_w C_w Sr \quad \text{Équation 32}$$

Où ρ_s et ρ_w sont les masses volumiques du solide et de l'eau respectivement ; C_s et C_w sont les capacités thermiques massiques du solide et de l'eau respectivement ; ϕ est la porosité et Sr le degré de saturation.

Ces modèles ont permis d'obtenir une bonne concordance avec les résultats expérimentaux obtenus en partie IV.3.1 et rappelés en Figure II. 98a et b. Les paramètres obtenus sont donnés en Tableau II. 26.

Tableau II. 26 : Paramètres du modèle utilisés pour calculer la conductivité thermique du limon de Plaisir (λ_{eau} , λ_{gaz} et λ_{solide}) et la capacité thermique du limon de Plaisir (C_s , C_w)

λ_{eau} (w/mK)	λ_{gaz} (w/mK)	λ_{solide} (w/mK)	C_s (J/kg.K)	C_w (J/kg.K)
0,6	0,024	5,5	1020	4180

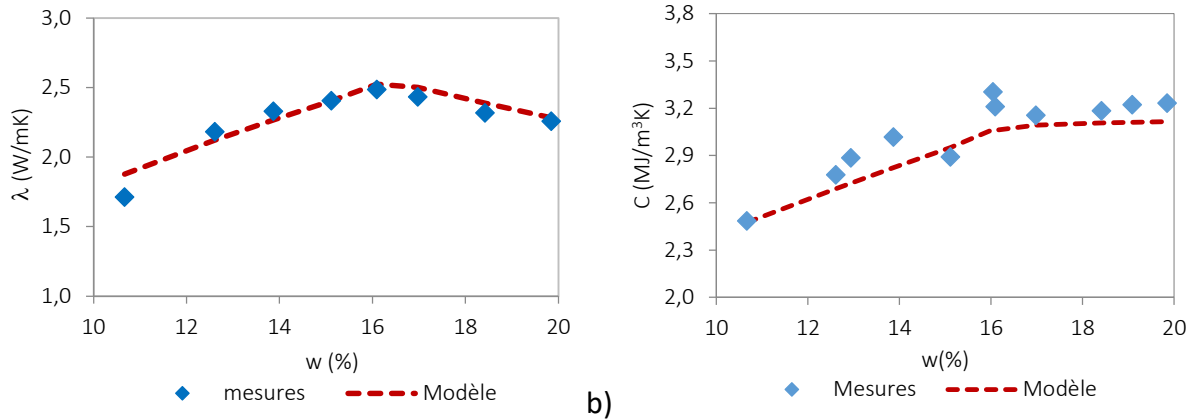


Figure II. 98 : Comparaison des mesures expérimentales et calculées à l'aide du modèle utilisé pour a) les conductivités thermiques ; b) les capacités thermiques

Une forme particulière du modèle de van-Genuchten est utilisée dans le Code_Bright pour modéliser la courbe de rétention d'eau reliant le taux de saturation relative et la succion :

$$Se = \frac{Sr - Srl}{Sls - Srl} = \left[1 + \left(\frac{Ua - Uw}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-\beta}} \right]^{-\beta} \quad \text{Équation 33}$$

Où S_{rl} et S_{ls} sont les degrés de saturation résiduels et finaux respectivement ; $(Ua-Uw)$ est la succion ; β et P_0 sont les paramètres du modèle.

Ce modèle, appliqué aux résultats expérimentaux présentés en partie IV.3.3, a permis de définir les paramètres P_0 , β , S_{rl} , S_{ls} présentés en Tableau II. 27. Ce tableau fournit également les perméabilités intrinsèques et relatives calculées à partir des résultats présentés en partie IV.3.3. suite à la réalisation d'essais triaxiaux.

Tableau II. 27: Paramètres thermo- hydriques utilisés pour la modélisation du remblai (Boukelia, 2016)

	Pression d'entrée d'air P_0 (MPa)	0,019
Courbe de rétention d'eau	Paramètre du modèle β	0,2
	Degré de saturation minimal S_{rl}	0,01
	Degré de saturation maximal S_{ls}	1
Perméabilité intrinsèque	Perméabilité intrinsèque k_1 (m^2)	5.10^{-16}
	Porosité initiale ϕ_0	0,39
Perméabilité relative	Paramètre du modèle A	1
	Paramètre du modèle λ	3
Diffusion de flux de vapeur	Coefficient de dispersion D ($m^2.s^{-1}.K^{-n}.Pa$)	$5,9.10^{-6}$
	Paramètre du modèle n	2,3
	Coefficient de tortuosité τ_0	0,8
Flux conductif de chaleur	Conductivité thermique du solide λ_{solide} ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	5,5
	Conductivité thermique de l'eau λ_{eau} ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	0,6
	Conductivité thermique du gaz λ_{gaz} ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	0,024
Propriétés des phases	Capacité thermique du solide C_s ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	1020
	Masse volumique du solide ρ_s ($kg.m^{-3}$)	2700
	Coefficient de dilatation thermique du solide α_s ($^{\circ}C^{-1}$)	$7,8.10^{-6}$

IV.8.2. Modélisation du comportement thermo-hydrigue d'un remblai de stockage de chaleur

La modélisation numérique du transfert de chaleur dans un remblai de 10 m de hauteur construit en couches successives de 50 cm d'épaisseur avec des talus faisant une pente de $\frac{1}{2}$ avec l'horizontal est réalisée. Le remblai est soumis à une température extérieure de l'air de 5°C en hiver, 25°C en été et 15°C en automne et au printemps. La température initiale du sol est supposée égale à 12°C. Le sol est considéré à un état de compactage identique à celui atteint dans la cuve d'essai en laboratoire et une succion initiale de 50 kPa est appliquée sur l'ensemble du massif. Le stockage de chaleur est effectué dans le remblai à l'aide de sondes thermiques implantées parallèlement au sein de l'ouvrage. Sur la base des valeurs proposées par Hesaraki et al. (2015), la température d'injection dans les échangeurs de chaleur ($T_{\text{échangeurs}}$) en été est comprise entre 25 et 50 °C et pendant la période d'extraction (hiver), elle est supposée égale à 5°C. Durant le printemps et l'automne, les sondes sont en relaxation : aucune température n'est appliquée (Figure II. 99).

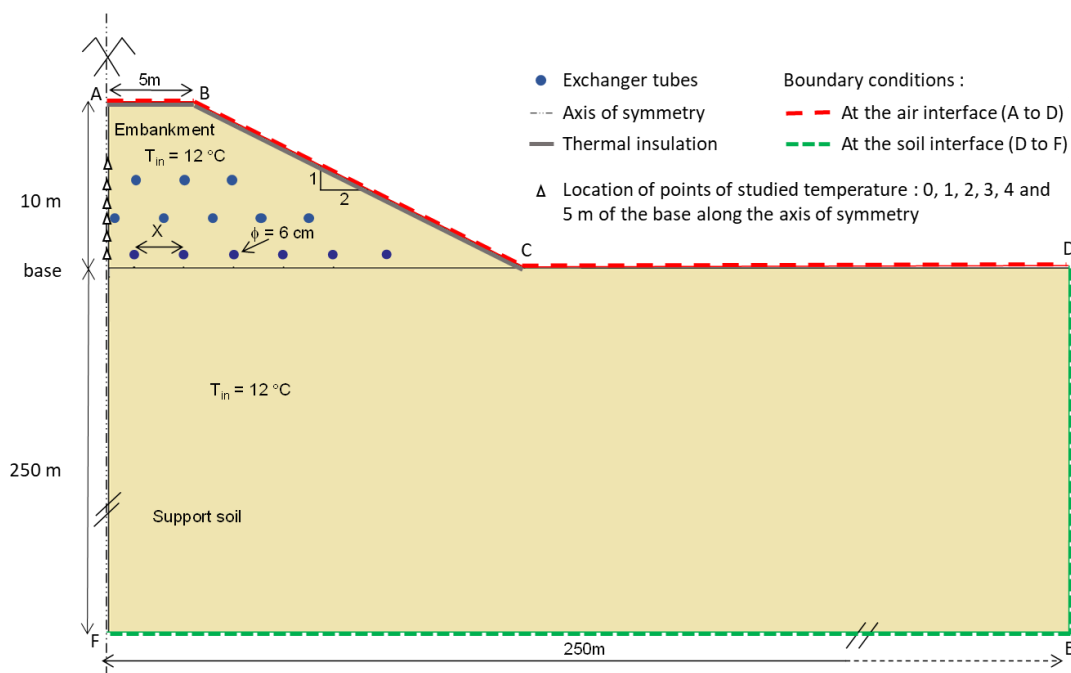


Figure II. 99: Géométrie du remblai géothermique et conditions aux limites imposées (modifié de Boukelia, 2016).

La modélisation numérique a permis de simuler différentes distributions des tubes échangeurs au sein du massif ainsi que différents scénarios d'injection/extraction. Le modèle a été simplifié en considérant que la température dans les tubes échangeurs est constante. Les résultats ont montré que l'espacement des échangeurs de 3 m peut être considéré comme une situation optimale car il réduit leurs interactions. L'installation de trois rangées d'échangeurs et d'une couche d'isolation de 0,05 m d'épaisseur avec une conductivité thermique de 0,03 W/m.K est placée à l'interface sol-atmosphère.

Les champs de température obtenus à la fin de chaque saison (Figure II. 100) montrent que la température du remblai a augmenté de manière homogène dans la zone de stockage pendant l'été. A la fin de l'automne, la température s'est diffusée à l'intérieur du remblai mais le point le plus chaud dans le système de stockage reste important, de l'ordre de 34,4 °C soit une différence de +22,4 °C par rapport à la température initiale. À la fin de l'hiver, sous l'effet de l'injection du fluide froid (5°C), la température a diminué de façon significative (-14 °C). La période printanière permet

une homogénéisation des températures dans le stockage si bien que le point le plus froid est à 13,9 °C.

Les résultats de ces modélisations sont représentés en Figure II. 101 en fonction du temps. L'installation de 3 rangées d'échangeurs et l'isolation du stockage a permis d'augmenter la température à la fin de l'été et de réduire les pertes en automne. L'efficacité du stockage de la chaleur serait ainsi améliorée. Cependant, les températures finales indiquent un réchauffement de la zone de stockage qui pourrait s'amplifier année après année.

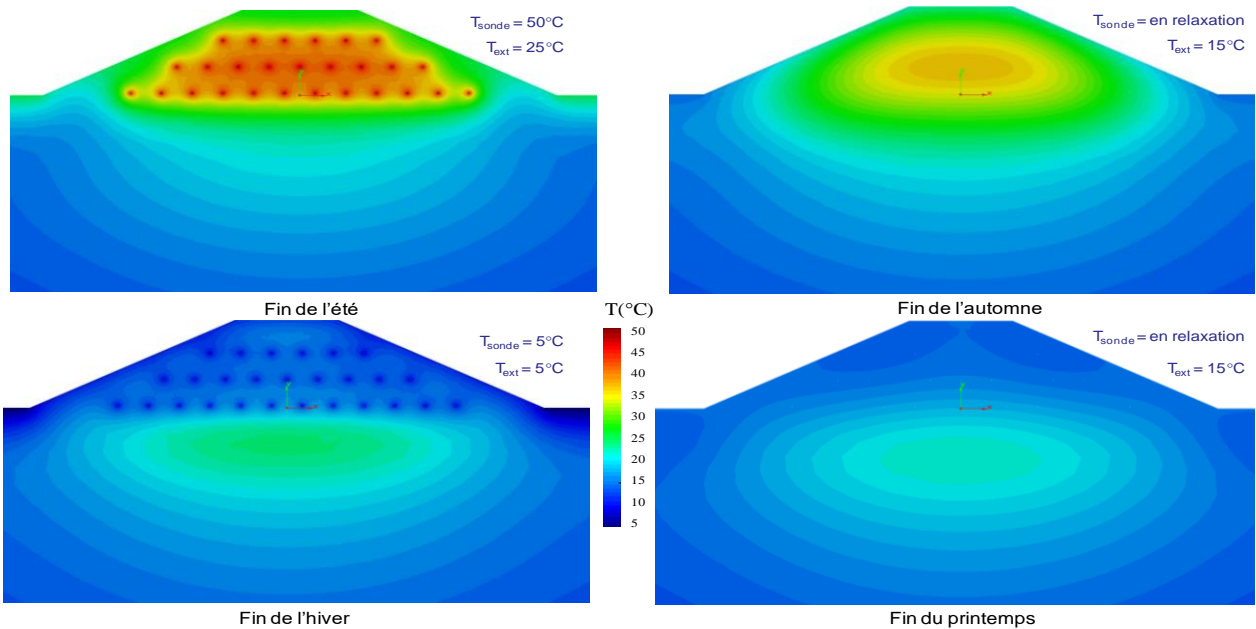


Figure II. 100: Champ de température obtenu à la fin de chaque saison lors de la mise en place de 3 rangées d'échangeurs et d'une isolation thermique.

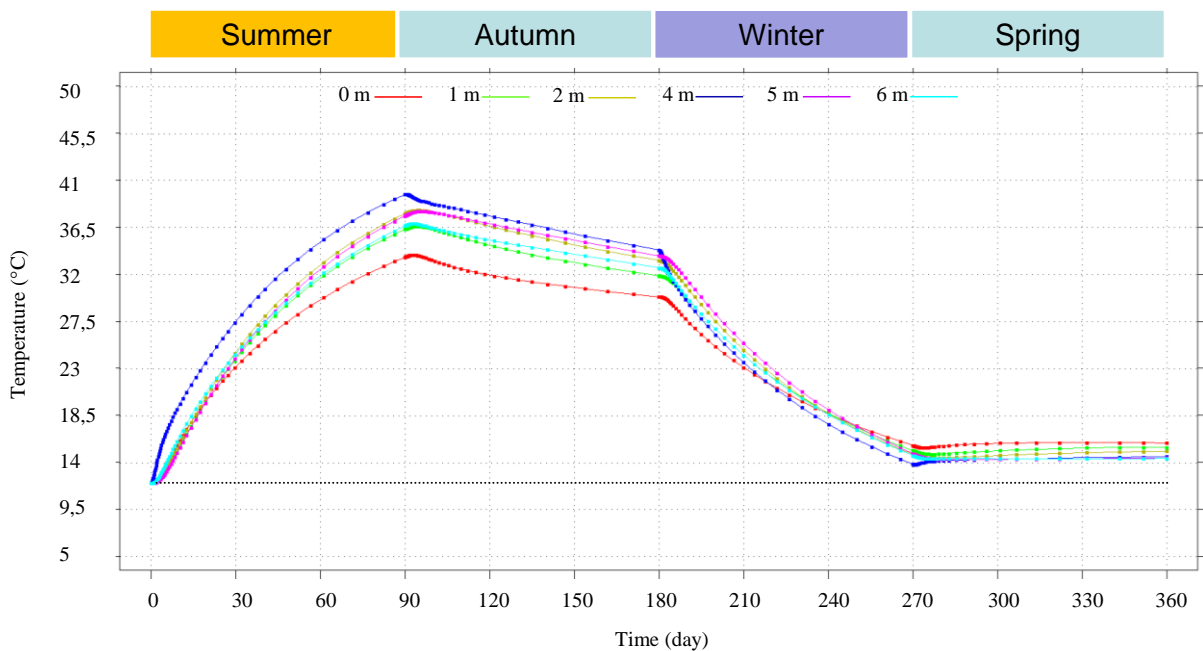


Figure II. 101: Evolution de la température au centre du remblai, à différentes altitudes de la base.

Afin d'aborder le comportement à long terme du stockage, la simulation de 10 cycles de chauffage-refroidissement (10 ans) a été réalisée en conservant la même géométrie que dans le cas précédent.

L'évolution de la température au centre du remblai est présentée à la fin de chaque demi-cycle en Figure II. 102a. Les résultats montrent que la température du stockage augmente au cours des trois premières années puis tend vers une valeur constante, c'est-à-dire un état d'équilibre après 7 ans de fonctionnement. La Figure II. 103b montre que la différence de température entre la fin de l'été et la fin de l'automne tend vers 3,14 °C ce qui représente les pertes au cours de la période de relaxation.

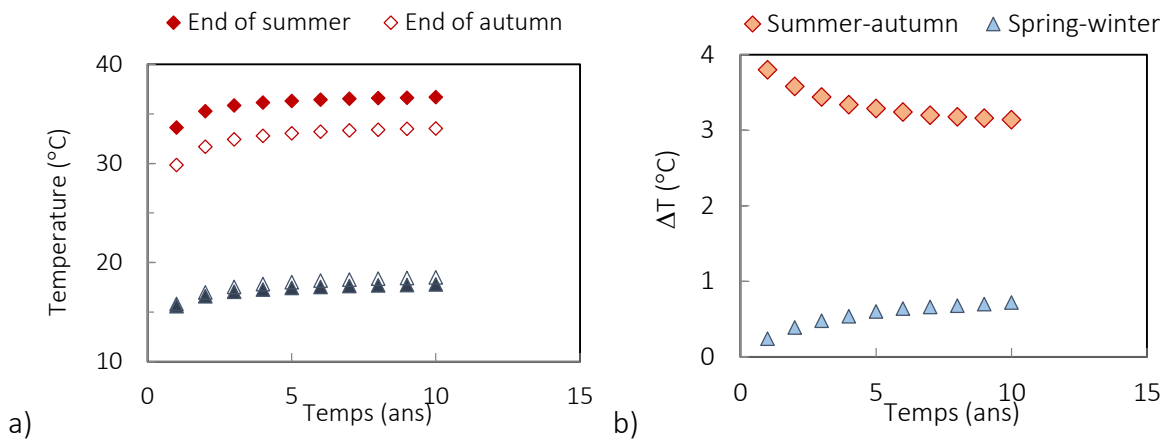


Figure II. 102: a) Températures moyennes obtenues au centre du stockage à la fin de l'été et de l'hivers et b) pertes de température obtenues au cours des périodes de relaxation pour 10 années successives.

IV.8.3. Bilan

Très peu d'expériences de ce type de conception de systèmes de stockage ont été présentées dans la littérature. Les simulations numériques, réalisées dans le cadre de la thèse de Ahmed Boukelia ont permis d'obtenir des informations intéressantes sur le dimensionnement et la pérennité du stockage de chaleur dans un remblai. Ce type de modélisation permettrait de proposer, pour tous types de sols et de remblais, une géométrie optimale de mise en place des échangeurs (profondeur, espacement, nombre de boucles). Ainsi, l'espacement entre les tubes pourrait être fixé à 3 m pour limiter leurs interactions et améliorer le processus de stockage de la chaleur. Dans ces conditions, une partie de la chaleur stockée pendant la période d'accumulation (été) serait encore disponible tout au long de la période d'extraction (hiver). Ce résultat est possible grâce à la forte inertie thermique du sol. En effet, dans cette étude, les échangeurs ont été situés près de la base du remblai, à une profondeur de 9 m de la surface, ce qui limite l'effet des variations climatiques en surface.

L'efficacité du stockage peut être améliorée en augmentant les températures d'injection, par exemple 50°C. Cette valeur garantirait une température supérieure à 12 °C tout au long de l'année et permettrait d'atteindre en été, des températures de l'ordre de 36,6°C à proximité des échangeurs. Cette valeur peut encore être augmentée en insérant plusieurs rangées d'échangeurs de chaleur (3 dans notre exemple) ainsi que d'une isolation thermique, ces possibilités sont simples à mettre en œuvre dans le cas du stockage de chaleur dans un remblai. Dans ces conditions, nos simulations, réalisées dans un contexte environnemental simplifié, prédisent une température de 39,7°C, homogène sur une grande partie du volume du remblai. De plus, ce grand volume de sol chauffé, protégé des pertes de chaleur par l'isolation supérieure, subit peu de pertes de chaleur pendant la période de relaxation (automne). Ainsi, l'efficacité thermique du stockage sera grandement améliorée.

Au fil des années, la succession des cycles de chauffage-refroidissement conduit à une modification de la température atteinte à la fin de chaque saison de chaque année. Selon ces modélisations, les températures augmentent légèrement au cours des années et atteignent un état d'équilibre après 7 ans. Cette évolution s'explique par l'augmentation progressive de la température du sol support, réduisant les pertes. Dans ces conditions, les températures restent dans les intervalles classiques de 5°C à 50°C généralement atteints pour les systèmes de stockage de chaleur (Hesaraki et al. 2015). Ces simulations montrent la faisabilité du stockage saisonnier de la chaleur dans un remblai en climat tempéré, la chaleur stockée en été pourrait être réutilisée efficacement en hiver. Cependant, elles contiennent de nombreuses simplifications du contexte environnemental et de l'échange énergétique. Ainsi, dans de prochaines simulations, des variations plus naturelle de la température à l'interface sol-atmosphère devront être appliquées. Les précipitations saisonnières devront également être prises en compte. De plus, des géométries plus réalistes, tenant compte de l'interconnexion des tubes, devront être envisagées afin de quantifier l'efficacité thermique du stockage (comme initié en partie IV.3). La modulation de l'application de températures des fluides en lien avec un processus industriel ou des panneaux solaires hybrides par exemple serait également intéressante. La simulation d'une couche isolante composée par exemple de géosynthétiques (voir partie I.7.) pourrait être envisagée. Enfin, ce modèle aux éléments finis devrait également permettre à terme d'évaluer la stabilité du massif. En effet, les résultats obtenus en partie II pourront être utilisés afin de mieux prendre en considération l'effet des cycles de chauffage-refroidissement sur les propriétés hydromécaniques du matériau. Ces pistes de développement seront reprises en partie projet (V).

IV.9. Conclusion de la partie stockage en sol compacté

Afin d'envisager l'utilisation de remblais pour stocker de l'énergie sous forme de chaleur sensible, une succession d'études a été réalisée. Les propriétés thermiques de sols compactés ont tout d'abord été mesurés afin d'identifier un matériau support et un état de compactage optimal pour cette application. Puis des essais mécaniques sur des matériaux non saturés réalisés avant et après l'application de multiples cycles chauffage-refroidissement ont été réalisés afin d'évaluer la stabilité mécanique du futur stockage. La situation la plus défavorable a ainsi été identifiée lors du premier chauffage qui engendre une diminution de l'étendue du domaine élastique. Ces résultats, obtenus sur un massif sans contrôle de succion, devront être confirmés lors de futures expérimentations. Le nombre de cycles de chauffage-refroidissement sera également augmenté pour évaluer le nombre de cycles nécessaire pour atteindre un équilibre mécanique reproductible de cycle en cycle. Une attention particulière devra être portée aux variations volumiques, non mesurées ici, qu'il serait nécessaire d'anticiper pour éviter d'éventuels désordres à proximité du stockage.

Afin de suivre l'efficacité du stockage dans le temps, un modèle analytique inverse a été appliqué à des séries de mesures de température en cuve. La valeur estimée de la conductivité thermique ($2,47 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) est proche de celle obtenue en laboratoire ($2,46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Cet outil permettrait d'envisager la mise en place d'un suivi in situ en continu des propriétés thermiques du massif. Ainsi, d'éventuelles dérives susceptibles d'affecter l'efficacité énergétique ou mécanique du stockage pourraient être identifiées et des solutions de remédiations pourraient être envisagées. En particulier, le maintien d'une teneur en eau suffisante des massifs de stockage est nécessaire afin d'éviter une diminution de leur performance thermique.

Une simulation numérique hydro-thermique d'un stockage en sol compacté en considérant l'interaction atmosphère-sol a ensuite été réalisée. Les calculs de la performance thermique du système, sous différentes configurations, apportent des précisions sur le choix du sol de remblai et la profondeur d'installation des échangeurs de chaleur. La comparaison des résultats obtenus pour

une installation dans le sol compacté ou dans le sol naturel montre une amélioration de 18,5% de la performance thermique lorsque l'échangeur est installé dans le sol compacté. Ce résultat montre la pertinence des travaux de recherche sur la thématique du stockage de chaleur en sol compacté d'autant plus que les pertes de chaleur au cours des périodes de relaxation seront plus faibles dans le cas d'une installation des échangeurs au cœur d'un remblai.

L'installation d'une isolation à l'interface sol-atmosphère a ensuite été étudiée. Les résistances thermiques des géosynthétiques seuls ou en contact avec un sol humide ont été mesurées à l'aide d'un dispositif de mesure à plaque chaude. Les résultats montrent que, en plus de l'épaisseur et de la conductivité thermique des produits, l'effet de la contrainte normale est un paramètre essentiel à considérer pour le dimensionnement. Un géotextile épais et résistant à la pression pourrait être un bon candidat pour isoler les massifs à condition que leur teneur en eau reste faible puisqu'une migration d'humidité du stockage vers l'isolant conduirait à une baisse des performances thermiques du géotextile en tant qu'isolant et à une baisse de la performance énergétique du stockage. Pour cela la mise en place de géofilms de part et d'autre du géotextile serait nécessaire mais cet ajout augmentera sensiblement le coût des produits et de leur mise en place. La prise en compte du fluage des matériaux devra également être prise en considération dans les prochaines études. Des expérimentations sur un ouvrage réel seraient importantes pour évaluer l'impact d'une isolation sur l'efficacité du système et prendre en compte les variations thermiques saisonnières. Enfin des simulations numériques à l'aide d'un code à éléments finis ont permis d'évaluer l'espacement entre les tubes nécessaires pour limiter leurs interactions (3 m). Dans ces conditions, une partie de la chaleur stockée pendant la période d'accumulation (été) serait encore disponible tout au long de la période d'extraction (hiver). Ce résultat est possible grâce à la forte inertie thermique du sol. Différentes géométries sont envisageables mais leur dimensionnement doit s'appuyer sur des valeurs réalistes du contexte environnemental et du réseau d'échangeur à mettre en place. Des collaborations avec des thermiciens seraient nécessaires sur ce thème.

V. Conclusion de la partie bilan

Les sollicitations thermiques des sols dans le cadre de l'utilisation des géostructures énergétiques sont diverses et occasionnent de nombreuses problématiques en lien avec la durabilité énergétique des structures et leur stabilité. Si le comportement thermo-hydromécanique des sols saturés est de mieux en mieux appréhendé, sa compréhension revêt encore de nombreuses inconnues. Pour avancer sur ces thématiques, il est possible d'étudier séparément les aspects purement thermiques, hydriques et mécaniques mais les couplages rendent ensuite complexe la synthèse. Ainsi, pour ajouter la composante thermique au comportement hydromécanique déjà bien étudié, nous avons réalisé des études en couplant les paramètres thermohydriques puis thermomécaniques. Ces études ont été l'occasion de travailler sur des applications en phase avec la transition énergétique et fut l'occasion de nombreuses collaborations. Les conclusions de ces études montrent que la prise en compte de l'évolution de la température pour l'évaluation de la conductivité thermique des sols doit être intégrée dans les modèles prédictifs de comportement thermique des massifs, surtout lorsqu'il s'agit de massifs non saturés. Ces résultats, implémentés dans les modèles numériques, permettent d'optimiser l'utilisation des systèmes de stockage d'énergie thermique.

Actuellement, de nombreux types de géostructures énergétiques se développent (i.e. pieux énergétiques, parois moulées énergétiques, tunnels ...). Ces nouveaux supports d'échangeurs géothermiques viennent compléter le panel des solutions géothermiques à très faible profondeur existant. Ces adaptations contribuent à la diminution de l'empreinte carbone de nos sociétés, du moins pour ce qui concerne le chauffage-refroidissement de nos habitats. Toutefois, la durabilité énergétique de ces solutions ne sera possible qu'à condition d'une bonne gestion de la ressource puisqu'une multiplication non raisonnée de ces solutions pourrait compromettre leur efficacité. Ainsi, l'idée d'une possible recharge de la ressource, comme dans le cas d'un stockage de chaleur semble une bonne alternative mais son développement ne sera possible qu'à condition d'un réel soutien financier des recherches sur le sujet.

VI : Projet scientifique

Depuis mon intégration à l'Université de Lorraine, en septembre 2010, mes travaux de recherche se sont concentrés sur l'étude de l'impact de l'application de sollicitations thermiques cycliques sur les propriétés hydromécaniques des sols fins compactés. L'équipe Mécanique des Sols, alors rattachée au LAEGO, bénéficiait déjà d'une plateforme d'essai avancée permettant la caractérisation des sols fins saturés ou non saturés développée à la faveur de projets successifs d'envergure nationale (ANR ARGIC I et II, ANR Ter-DOUEST) et de programmes de recherches avec des partenaires institutionnels (ANDRA, ADEME, ...) et industriels (Bouygues TP, Egis Géotechnique, ...). Grâce à l'accompagnement de l'équipe, j'ai pu rapidement m'intégrer aux différentes thématiques scientifiques en m'investissant tout d'abord sur la thématique de la fissuration des sols puis sur les problématiques en lien avec les géostructures énergétiques émergentes en France en 2010 et différentes approches pour le stockage de chaleur.

Dès 2011, j'ai participé avec mes collègues au montage du projet ANR GECKO (Géostructures, Couplage solaire hybride et stockage d'énergie Optimisé : Solution pour bâtiments à énergie positive – 2012-2015) puis exercé la responsabilité de l'action de recherche « Essais en laboratoire ». Ce projet fut l'occasion de ma 1^{ère} codirection de thèse (Hossein Eslami de 2011-2014) avec Farimah Masrouri et de travail avec un post doctorant (Wahib Arai, 2014). A la suite de ce projet, un projet COST (GABI 2015-2019) a été initié par Sébastien Burlon (IFSTTAR), ce projet a permis de donner une dimension européenne au réseau constitué lors du projet ANR. Il m'a permis d'échanger avec des spécialistes européens de cette thématique en pleine expansion et de participer à la rédaction d'un article commun. En cohérence avec ces actions, j'ai pu participer au développement d'une solution innovante consistant à stocker l'énergie sous forme de chaleur dans des remblais en sols compactés. Sur ce thème j'ai co-encadré avec Farimah Masrouri, le doctorat de Ahmed Boukelia (2013-2016) dans le cadre d'un programme de recherche, soutenu par Bouygues TP et la Région Lorraine. Ce travail s'est poursuivi dans la cadre de la thèse de Mojdeh Lahoori (2017-2020) que j'ai également co-encadré avec Farimah Masrouri. Le cadre académique de ce financement (bourse ministérielle) nous a permis de travailler sur des verrous scientifiques fondamentaux (comportement THM des sols compactés) et de mettre en place des collaborations fructueuses au sein du laboratoire (sur la thématique du transfert de chaleur) et à l'échelle nationale (Institut INRAE, INSA de Strasbourg). Parallèlement à ces travaux, d'autres thèses ont été co-encadrées par l'équipe sur des thématiques nécessitant la caractérisation thermo-hydromécanique des sols (Zayad Kaddouri 2015-2018, Soheib Magsoodi 2016-2020). La thématique des géostructures énergétiques est aujourd'hui un sujet majeur de recherche de l'équipe en accord avec les thématiques de notre laboratoire et de la région.

Des problématiques analogues se posent dans le cas de l'utilisation de sols compactés pour sceller les galeries de stockage de déchets dégageant de la chaleur (stockage HAVL) ou pour recouvrir des stockages en surface (stockage FAVL). Des programmes de recherche successifs sont pilotés depuis de nombreuses années dans notre équipe par Olivier Cuisinier et Farimah Masrouri. Sur ce thème, j'ai travaillé sur l'évolution du front de séchage sous l'effet de sollicitations thermo-hydriques dans le cadre d'un projet GNR-FORPRO que j'ai porté en 2011 à 2012 avec l'appui du laboratoire IC2MP pour la partie dédiée à la caractérisation minéralogique. Ce projet fut l'occasion d'utiliser la méthodologie IRM, Grâce à l'appui de l'équipe IRM du LEMTA, pour localiser l'eau au sein des éprouvettes et d'évaluer sa mobilité sous l'effet de sollicitations hydriques et thermiques couplées. J'ai également participé au projet FAVL II (2015-2018) porté par mes collègues en réalisant une campagne d'essai propre à caractériser les transferts d'eau au sein des couvertures en sols compactés pour en évaluer la durabilité.

Le troisième axe de recherche de l'équipe concerne le traitement des sols. Sur cet aspect, je me suis intéressée à la problématique de la réutilisation des sédiments de dragages pour les constructions géotechniques dans le cadre du projet ANR-GeoStab porté par Olivier Cuisinier. Les travaux du groupe de travail ont abouti à la mise en place du projet européen GEORES favorisant la mobilité des chercheurs afin de développer des solutions innovantes pour la réutilisation des géomatériaux. Ce projet, actuellement en cours, m'a permis de travailler à nouveau sur la thématique de la fissuration des sols avec Farimah Masrouri, Adel Abdallah et en collaboration avec Bernardo Caicedo (Université UNIANDES de Bogota). Je participe actuellement à l'encadrement de Jaime Granados, doctorant dirigé par Bernardo Caicedo, qui est venu réaliser une partie de ses expérimentations dans notre laboratoire. J'ai poursuivi mes travaux sur ces thématiques lors d'un déplacement de 1 mois, financé par le projet GEORES en 2022. Un second séjour de 2 mois est prévu en 2023.

Au cours des prochaines années, je souhaite poursuivre les travaux entrepris sur le thème de la caractérisation de sols non saturés soumis à des sollicitations thermo-hydrromécaniques. En effet, les couches superficielles du sol sont constituées de matériaux non saturés soumis à des variations climatiques susceptibles de s'accroître sous l'effet du changement climatique. Des défis importants sont à venir en ce qui concerne l'évaluation de la stabilité des massifs en sols compactés soumis à ces nouvelles sollicitations. De plus, avec l'essor des géostructures énergétiques, des désaturations peuvent également survenir au contact avec les échangeurs géothermiques. Cela constitue une problématique importante tant d'un point de vue énergétique que mécanique puisqu'une diminution du degré de saturation diminuerait la conductivité thermique du milieu et donc son efficacité énergétique. Au contraire, une augmentation du degré de saturation pourrait affecter la stabilité de la géostructure.

VI.1. Caractérisation couplée thermo-hydrromécanique des sols fins non saturés

Pour étudier ces problématiques scientifiques essentielles au développement de solutions ambitieuses, le développement de la plateforme d'essai doit permettre de reproduire dans des conditions maîtrisées l'ensemble des conditions thermo-hydrromécaniques susceptibles d'être rencontrées in situ.

Actuellement, la plate-forme expérimentale « Mécanique des sols » du LEMTA est équipée pour la réalisation et le développement d'essais avancés en Mécanique des Sols et en géotechnique avec notamment la prise en compte des facteurs environnementaux (teneur en eau, température, chimie du fluide hydratant, vieillissement, etc.). Ces essais fournissent les paramètres du comportement couplé Thermo-Hydro-Chimio-Mécanique (THCM) des sols, essentiels pour la simulation et la modélisation des différents ouvrages de géotechnique et du génie civil et pour leur conception³⁷. La procédure de référencement des méthodes et de communication est en cours avec dans un premier temps un référencement sur la plateforme Plug in Labs³⁸. La prochaine étape, à laquelle je souhaite également participer, concerne sa labellisation avec le label Infra+³⁹. L'ambition de ce programme, à l'initiative de Lorraine Université d'Excellence, est de développer et de mettre en réseau les infrastructures de recherche présentes en Lorraine, afin d'assurer le développement de son potentiel de recherche.

³⁷ [Mécanique des sols - LEMTA \(univ-lorraine.fr\)](https://www.lemta.univ-lorraine.fr/) consulté le 11/07/2022

³⁸ [Résultats de recherche - Plug in labs Lorraine \(univ-lorraine.fr\)](https://www.univ-lorraine.fr/) consulté le 11/07/2022

³⁹ [INFRA+ | Lorraine Université d'Excellence \(univ-lorraine.fr\)](https://www.univ-lorraine.fr/) consulté le 11/07/2022

Les méthodes actuellement disponibles sur la plateforme permettent de réaliser des expérimentations sur des sols à différents états de saturation et différentes températures à plusieurs échelles d'investigation. Il est ainsi possible de réaliser des essais de compressibilité et de cisaillement thermorégulés à l'état saturé (Chapitre IV.1). Certains essais, comme les essais pressiométriques en cuve, dont les résultats ont été largement décrits et utilisés dans le chapitre III, permettent de réaliser des essais non saturés à différentes températures mais sans maîtrise en continu de l'état de saturation. Nous sommes donc contraints de calculer ou supposer certains paramètres utiles aux modélisations plutôt que de les mesurer. D'autres bancs expérimentaux sont utilisés pour réaliser par exemple des essais de compressibilité sur des matériaux soumis à une succion constante mais uniquement à 20°C. Des adaptations de nos expérimentations de laboratoire doivent être menées pour permettre la réalisation d'essais mécaniques thermorégulés sur des matériaux non saturés avec contrôle de la succion.

La réalisation d'essais triaxiaux sur des matériaux non saturés et en condition thermo-régulée serait envisageable en installant un système de régulation de la température au sein de la cellule. Pour cela, un volume conséquent est nécessaire et les cellules classiques (T50) sont peu adaptées. En revanche nous disposons au laboratoire d'une cellule de grande dimension (T100) de 100 mm de diamètre et 200 mm de hauteur avec un bâti et un outillage de manutention adapté. L'adaptation de l'extrémité du piston et de la platine inférieure sur une cellule similaire pourrait permettre de travailler sur des éprouvettes de taille classique (35 mm de diamètre pour 70 mm de haut) ce qui laisserait un volume significatif à l'intérieur de la cellule pour y positionner un élément chauffant, un agitateur et une sonde de température afin de réguler le fonctionnement de l'élément chauffant. Ces éléments pourraient être solidaires de la plateforme inférieure afin d'éviter toute interaction avec le dispositif d'application de la pression axiale. Une attention particulière devra être portée au maintien de l'étanchéité, pour cela l'entrée et la sortie excédentaire pourraient être utilisées comme passe-fils. Afin de permettre la réalisation d'essais sur des éprouvettes non saturées, la méthode de la translation d'axe serait envisageable. Cet équipement permettrait de caractériser les propriétés hydromécaniques des sols compactés non saturés soumis à des variations cycliques de température, représentatives des stockages de chaleur (1° à 50°C). Le développement d'une telle instrumentation nécessiterait des fonds conséquents mais notre équipe possède une expertise avancée sur des développements expérimentaux de ces thématiques. Ainsi, la proposition d'un projet ANR de recherche mono-équipe (instrument PRME) sur ce sujet pourrait être déposé dans l'axe H1 (sciences de la durabilité).

VI.2. Caractérisation post-rupture des sols fins compactés

L'application d'un flux de chaleur à un sol, qu'il soit d'origine naturelle (climat) ou anthropique (stockage de chaleur ou stockage de déchets dégageant de la chaleur) conduit à une migration de l'eau au sein des massifs sous l'effet des gradients de température ou d'une charge hydraulique. Cette problématique est particulièrement importante à l'interface sol-atmosphère puisque ces variations volumiques et hygrométriques peuvent conduire à l'apparition de fissures. La fissuration des sols résulte d'une interaction complexe entre la sollicitation thermo-hydrigue à l'interface sol-atmosphère et la succion qui se développe dans le sol et engendre des contraintes de traction à l'origine de la fissuration (Ledesma, 2016). Ce phénomène est tridimensionnel et les fissures peuvent se connecter en profondeur en formant des réseaux susceptibles d'accélérer le séchage des couches profondes (Tang et al. 2019). Un sol fissuré voit sa résistance à l'érosion, sa stabilité et sa capacité de portance diminuer, ce qui pourrait compromettre la stabilité et le fonctionnement optimal des ouvrages en service (Auvray et al. 2013, Cui et al. 2014, Lozada et al. 2015).

Pour améliorer la compréhension du comportement thermo-hydomécanique des sols non saturés situés à l'interface sol-atmosphère des expérimentations à différentes échelles d'investigation sont envisagées. A l'échelle de l'agrégat, j'envisage de poursuivre les travaux initiés avec Sébastien Leclerc, Didier Stemmelen et Jean-Christophe Perrin (équipe IRM du LEMTA) afin de mettre en œuvre des méthodes de mesure à temps d'écho très court (ZTE, USTE) nécessaires pour mesurer les temps de relaxation des matériaux argileux. La mise en place d'une boucle permettant l'application d'un air à humidité contrôlée à la surface de l'éprouvette a été développé dans le cadre d'autres projets de l'équipe IRM. Un projet a été soumis et accepté dans le cadre de l'appel à projet Needs 2022, le financement obtenu permettra d'adapter cet équipement d'une régulation de la température. A l'échelle de l'éprouvette, la mise en œuvre de cette méthodologie au cours de l'application de cycles de chauffage/refroidissement permettra de quantifier les vitesses et les quantités d'eau mobilisées au cours des cycles successifs. Le traitement des résultats permettra également de quantifier l'effet des variations de température sur la courbe de conductivité hydraulique non saturée nécessaire lors de modélisations thermo-hydrigue des massifs.

Les résultats obtenus permettront par exemple de définir les intervalles de températures limitant les pertes irréversibles d'humidité, afin de garantir par exemple l'efficacité d'un stockage de chaleur et maîtriser la stabilité d'une géostructure énergétique. Cette problématique est également importante dans le cas de l'utilisation de sols compactés pour obturer les galeries de stockage de déchets dégageant de la chaleur (stockage HAVL, Figure II. 103) puisque cela pourrait faciliter les transferts sous forme de vapeur au travers des scellements.

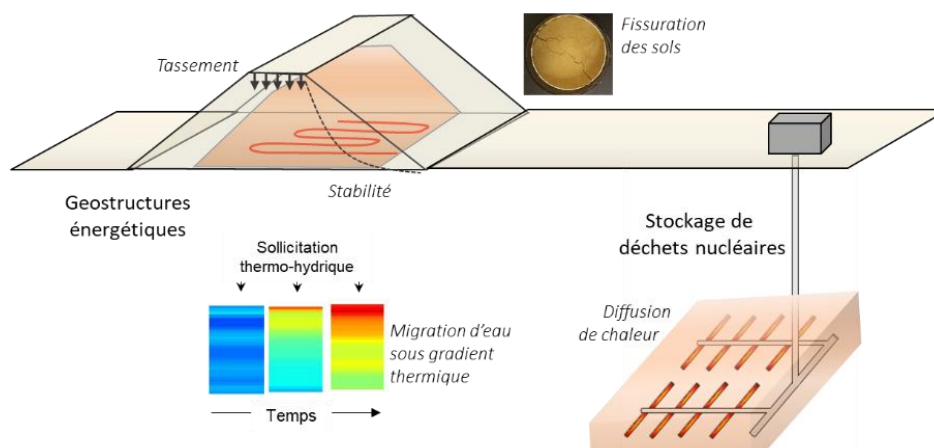


Figure II. 103 : Représentation schématique d'un remblai utilisé pour stocker de la chaleur et d'alvéoles de stockage de déchets.

A l'échelle de l'éprouvette, les conditions critiques favorisant le retrait et l'initiation de la fissuration pourront être étudiées en fonction de l'état initial du matériau grâce à l'utilisation d'un dispositif de suivi positionné dans une enceinte climatique (Figure II. 104). Le montage expérimental, développé avec le support du pôle technique du LEMTA, permet de suivre en continu les masses, l'état de la surface (analyse d'images) et, depuis l'ajout de profilomètres lasers motorisés, l'épaisseur des éprouvettes. Le traitement des résultats selon des méthodes décrites dans la bibliographie (Sanchez et al. 2013) permettra d'évaluer le retrait et les profondeurs atteintes par les fissures sous l'effet des sollicitations thermo-hydrigues. Ces problématiques seront étudiées dans le cadre d'une thèse qui débutera en septembre 2022 sur ce sujet que je codirigerai avec Adel Abdallah. Une approche de type Intelligence Artificielle sera utilisée pour le traitement des images obtenues, et devrait permettre de suivre l'apparition et la progression des fissures. Ces résultats,

confrontés aux paramètres mécaniques de résistance au cisaillement des éprouvettes (Murray et al. 2014) permettront de simuler plus fidèlement le comportement des sols compactés sujets à la fissuration (Figure II. 104). Une collaboration internationale est envisagée afin de développer ces aspects dans la dernière partie de cette thèse si l'avancée des travaux expérimentaux le permettent (B. Caicedo, Uniandes, Bogota, Colombie).

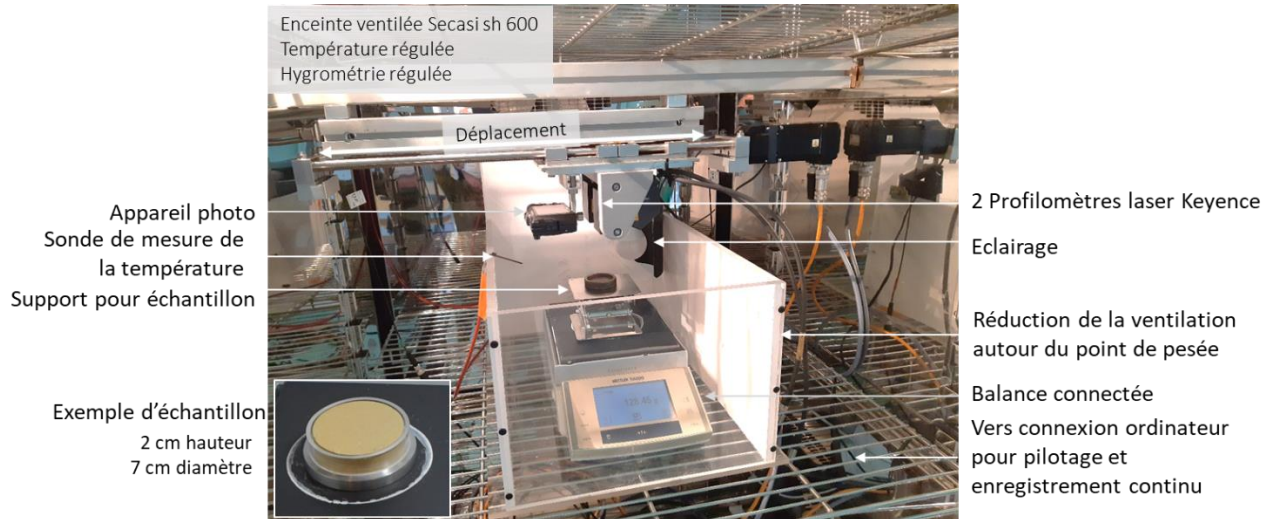


Figure II. 104 : Dispositif de suivi de fissuration permettant l'application de sollicitation thermo-hydriques.

Ces travaux viennent compléter les travaux initiés lors de la venue en 2019 du B. Caicedo dans notre équipe. J'ai eut l'occasion de consolider ces relations à l'occasion d'un séjour scientifiques d'un mois au sein de leur équipe [Projet GEORES]. Initialement prévu en 2020, ce séjour a été reporté 2022 en raison de la crise sanitaire. Les résultats obtenus permettront d'améliorer la compréhension puis la modélisation du comportement THM des sols compactés fissurés et ainsi de mieux anticiper leurs conséquences sur les ouvrages.

Les applications de ces recherches sont diverses puisque la fissuration des massifs de sol peut avoir des conséquences négatives sur la fissuration du réseau routier. Des contacts sont actuellement en cours avec l'entreprise Colas et le Cerema et pourraient aboutir au développement de projets communs. Ce phénomène de fissuration est également une problématique importante lors du stockage de déchets de type déchets miniers ou de sédiments de dragages.

VI.3. Changement d'échelle : prise en compte des aléas environnementaux

La poursuite des travaux entrepris afin d'améliorer la prise en compte du changement d'échelle depuis l'essai de laboratoire vers l'expérimentation in situ est également envisagée à moyen terme. La cuve d'essai thermo-régulée d'échelle métrique permet de réaliser des essais mécaniques sur des sols non saturés soumis à des sollicitations thermiques cycliques. Les massifs de sols, compactés en couches successives ont pu être caractérisés à l'aide d'essais représentatifs de ceux réalisés sur site. Des adaptations permettraient de suivre l'établissement des équilibres thermiques au sein du massif lorsqu'une sonde traverse le matériau. Cela permettrait de répondre aux questions relatives à l'évolution de l'interface sol-échangeur. Cependant, le montage actuel ne permet pas d'appliquer des contraintes mécaniques sur le massif, nous pouvons reproduire des conditions superficielles mais pas des conditions de contraintes présentes à proximité des échangeurs comme ce serait le cas s'ils étaient inclus dans un remblais. Pour cela l'utilisation d'une centrifugeuse pourrait être envisagée mais nécessiterait des adaptations afin de conserver une orientation de la charge réaliste au regard de la position de l'échangeur.

Pour prendre en compte les aléas externes, la mise en place d'un modèle réduit en chambre expérimentale thermo-régulée de grande capacité pourrait également être envisagé. Le massif, équipé d'un échangeur thermique et finement instrumenté (mesures hydriques, thermiques et mécaniques), reproduirait le fonctionnement réel d'un stockage dans des conditions parfaitement maîtrisées. Ce modèle réduit pourrait permettre de tester des solutions d'isolation du massif. Il pourrait également permettre de tester différentes sources d'apport de chaleur comme une connexion à des panneaux solaires ou à une route solaire thermique (Eurovia, Power road^{®40}). Le projet soumis en 2019 en collaboration avec le Cerema et l'institut Irstea dans le cadre de l'appel à projet jeunes chercheurs de l'ANR n'a pas été retenu mais des réflexions sont en cours afin de le soumettre à moyen terme sous d'autres modalités.

A plus long terme, la réalisation d'un remblai expérimental en sol compacté in situ équipé de différents capteurs pour mesurer la température, la teneur en eau et les déformations mécaniques serait pertinente. Cela permettrait une meilleure compréhension des performances thermiques et mécaniques d'un remblai pour stocker de la chaleur. La réalisation d'un prototype de stockage ouvrirait également la voie à une généralisation de ce type de méthode, il serait alors nécessaire d'identifier précisément les caractéristiques des sols permettant de garantir une efficacité thermique optimale. L'adaptation de la méthode aux sols traités serait également intéressante afin de garantir une bonne portance de l'ouvrage, réduire les coûts de transport des matériaux de construction et permettre une plus large application de la méthode.

⁴⁰ <https://www.power-road.com> (consultation 4/05/2021)

VI.4. Modélisation du comportement mécanique de sols fins compactés soumis à des sollicitations thermo-hydriques

Dans la continuité des travaux réalisés sur les géostructures énergétiques, et notamment le développement du stockage de chaleur en sol compacté, l'utilisation de modèles s'impose pour prendre en compte toute la complexité de ces systèmes. Leurs contributions peuvent être diverses pour évaluer l'efficacité énergétique du stockage et/ou pour en garantir la stabilité à long terme. Trois types de modélisations peuvent être envisagées avec pour chacune des capacités différentes, et des besoins expérimentaux adaptés qui restreignent parfois la possibilité de leur mise en place.

Une modélisation multi-physique fine, par éléments finis sous logiciel dédié, telle qu'initiiée dans la thèse de Ahmed Boukelia (Chapitre IV.8), peut être poursuivie afin d'appréhender plus précisément les couplages entre les dynamiques hydrique, thermique et mécanique. Ce type de modélisation améliorerait la compréhension de ce système complexe et évaluerait le mieux possible les conséquences en terme de stabilité mécanique de l'ouvrage sous l'effet des variations cycliques de la température. Cependant, l'utilisation de ce type de modèle se heurte à la nécessité d'un grand nombre de paramètres expérimentaux parfois difficiles à obtenir expérimentalement. Par exemple, il serait nécessaire de mesurer l'évolution des paramètres mécaniques de sols non saturés soumis à des variations de température. L'adaptation de nos expérimentations de laboratoires tels que décrits plus tôt répondrait à ce besoin.

D'autres types de modélisation pourraient également être envisagées. En 2019, dans le cadre d'un appel à projet ANR Jeunes Chercheurs, le développement d'un modèle ambitieux avait été envisagé avec Nicolas Blet, spécialiste du couplage des systèmes multi-physiques (thermique-mécanique des fluides) dans l'opération scientifique « Gestion de la Chaleur » au LEMTA. La démarche proposée consistait à, dans un premier temps, se baser sur une approche macroscopique en décrivant les échanges thermiques entre les différents sous-systèmes de la problématique scientifique : remblais, échangeur, sol support, atmosphère. La modélisation de la dynamique de l'échangeur devait être traitée par des méthodes classiques de dimensionnement (bilans globaux ou méthode nodale par exemple) (Blet et al. 2016). Puis, l'étude des différents niveaux de complexité était envisagée par une gestion dynamique de ce système énergétique. Pour cela, l'enjeu principal était de définir et d'estimer les différents paramètres du modèle (résistance thermique, coefficient d'échange, ...) afin de décrire correctement le couplage thermique dynamique de la structure avec l'échangeur et l'environnement. L'utilisation des données expérimentales obtenues en laboratoire permettraient d'identifier ces paramètres grâce à des modèles paramétriques avec résolution de problèmes thermiques inverses, tel que réalisé pour la détermination de la conductivité thermique (Chapitre IV.5). Afin d'étudier les échanges hydriques et thermiques dans des conditions optimisées, il faudrait adapter l'utilisation de la cuve d'essai thermo-régulée d'échelle métrique tel que décrit précédemment. Le projet soumis n'a pas été retenu pour financement mais, fort de l'expérience accumulée depuis, l'intégration de cette proposition à un nouveau projet serait envisageable.

A court terme, nous continuerons d'optimiser les capacités de stockage des sols compactés en poursuivant le développement du modèle thermo-hydrique utilisé en collaboration avec Hossein Nowamooz et Fujiao Tang de l'équipe « Génie Civil et Énergétique » de l'INSA de Strasbourg. Différents axes de développement sont envisagés à commencer par la modélisation de la géométrie exacte du remblai, en incluant les pentes. Cela permettrait d'estimer la performance thermique du système avec la prise en compte des interactions sol-atmosphère. Des discussions sont en cours afin d'y intégrer la stabilité mécanique de l'ouvrage. De plus, différentes formes et dispositions des échangeurs de chaleur pourraient être modélisées en fonction de la chaleur disponible et du

volume du stockage. Par ailleurs, les flux de chaleur à l'entrée pourraient être affinés pour représenter au mieux les quantités de chaleur apportées par des panneaux solaires par exemple ou toute autre source. Enfin, la mise en place d'un matériau d'isolation pourrait être étudiée pour réduire les pertes de chaleur pendant les intersaisons. Par exemple, l'utilisation des géotextiles pourrait constituer une solution intéressante. Ces modélisations permettraient de préparer l'éventuelle réalisation d'un remblai expérimental en sol compacté in situ.

VI.5. Conclusion du projet

Dans la continuité des recherches entreprises sur les géostructures énergétiques, de nombreux projets pourraient être développés afin de participer au développement de la technologie du stockage réversible de chaleur en sol compacté. En laboratoire, la compréhension du comportement couplé thermo-hydrromécanique des sols compactés permettrait de mieux appréhender leur durabilité énergétique et mécanique. Toutefois, pour prendre en compte les apports et les pertes de chaleur tout au long de la vie de l'ouvrage, il serait intéressant de changer d'échelle via la réalisation d'un démonstrateur et la mise au point d'outils de suivis adaptés. Toutes ces informations seraient importantes pour valider les simulations de fonctionnement de ces ouvrages qui permettront de les dimensionner en fonction de leur localisation géographique. Une meilleure compréhension de cette problématique permettrait également de mieux appréhender l'effet du changement climatique sur les structures en sol compacté actuellement en place.

De plus de nombreuses questions demeurent en ce qui concerne la caractérisation des interfaces. En effet, des phénomènes de retrait voir de fissuration sont craints dans le cas d'une désaturation du matériau. Ces questions sont communes aux phénomènes existants à l'interface sol-atmosphère ou sol-structure. Afin de mieux les caractériser, un changement d'échelle, vers les plus petites échelles cette fois ci serait nécessaire afin de mieux appréhender la mobilité de l'eau disponible sous forme de vapeur au sein de la porosité ouverte des matériaux.

VII. Conclusion générale

Les problématiques scientifiques développées dans ce document sont actuelles. Elles ont été soutenues par l'Agence Nationale de la Recherche (projets ANR), par l'Union Européenne (projet H2020 et COST) et ont également une forte potentialité applicative, ce qui permet à l'équipe d'entretenir de solides relations partenariales avec des entreprises (BOUYGUES) ou de grands donneurs d'ordre (ANDRA, BRGM). Les projets développés se réfèrent tous à des situations dans lesquels les sols, naturels ou anthropiques sont soumis à des sollicitations thermo-hydromécaniques. Cette homogénéité thématique permet de consolider les connaissances fondamentales nécessaires à une bonne compréhension des mécanismes en œuvre lors des sollicitations thermiques des sols tout en répondant à des problématiques sociétales actuelles en lien avec la transition énergétique.

La réalisation de ces études m'ont permis de mieux appréhender le comportement fondamental des matériaux saturés soumis à des sollicitations thermiques. J'ai également pu consacrer beaucoup de temps aux spécificités de l'étude des matériaux non saturés qui constituaient un véritable challenge puisque mes compétences étaient initialement tournées vers les fluides depuis l'état liquide à pâteux. Cette adaptation a été rendue possible grâce au soutien de mes collègues de l'équipe Mécanique des Sols, avec qui j'ai pu travailler à l'occasion de projets ou de co-encadrement d'étudiants. Cependant le chemin est encore long avant de pouvoir appréhender correctement le comportement couplé thermo-hydromécanique des sols soumis à des sollicitations cycliques. Les outils scientifiques disponibles doivent être adaptés à ces nouvelles problématiques et le recours aux modélisations s'avère souvent nécessaire.

Pour aborder ces problématiques, des compétences scientifiques poussées en thermique, hydrique, mécanique sont nécessaires et différentes échelles d'investigation doivent être explorées. Les avancées concernant ces problématiques pluridisciplinaires sont souvent plus rapides lorsque des collaborations entre des spécialistes de chaque domaine peuvent avoir lieu. J'ai pu l'apprécier à l'échelle nationale au cours de ces dernières années [RI 12, 14, 16, 17] et je compte développer cette aptitude au travail collaboratif à l'international en m'impliquant et en consolidant les partenariats débutés dans le cadre de projets favorisant les réseaux de chercheurs [projets COST, ANR, ITN] afin de contribuer, à mon échelle, aux enjeux sociétaux.

VIII. Liste des figures et des tableaux du Volume II

Figure II. 1 : Evolution de la production primaire d'énergies renouvelables par filière (Phan et al. 2021) ...	56
Figure II. 2 : Illustration des principales méthodes de stockage saisonnier de chaleur dans le sol.	57
Figure II. 3: Insertion en milieu urbain de différentes géostructures énergétiques : a) parois de tunnels, b) murs de soutènements et c) pieux (modifié de Delerablee et al., 2020).	58
Figure II. 4 : Diffusion des géostructures énergétiques dans différents pays (Di Donna, 2019).	59
Figure II. 5 : Déformations volumiques mesurées lors d'un cycle de chauffage refroidissement pour différents sols à différents états de consolidation (OCR).	63
Figure II. 6 : a) Cadre théorique schématisé de l'évolution de la limite entre le domaine élastique en grisé et le domaine pseudo-élastique des sols chauffés (Laloui et Di Dona 2013) dans le plan contrainte effective moyenne-température et b) son extension en trois dimensions en considérant la contrainte déviatorique.	64
Figure II. 7 : Déformation volumétrique d'éprouvettes de sols soumises à des cycles de chauffage-refroidissement, essais œdométriques thermo-régulés réalisés sur a) le limon de Bonny (McCartney et al. 2014), b) un sol silto-argileux (Di Donna 2014).	65
Figure II. 8 : Représentation graphique a) de l'écrouissage durcissant qui se produit lors de la contraction d'une éprouvette à différentes températures et b) de la contraction du domaine élastique lors de l'application d'une augmentation de température pour différents états initiaux (modifié de Di Donna et Laloui, 2015).	66
Figure II. 9 : Modélisation ACMEG-T du comportement volumétrique d'un sol surconsolidé soumis à une succession de chauffage, refroidissement puis réchauffage sous une contrainte constante (Di Donna, 2014).	67
Figure II. 10 : a) Courbe de rétention d'un sable argileux par Delage et Cui (2000).	69
Figure II. 11 : Courbe de compression pour un sol saturé et un sol non saturé (Alonso et al. 1990).	69
Figure II. 12 : a) Surface de charge dans le plan (p-s), b) vue tridimensionnelle du modèle de Alonso et al. (1990).	70
Figure II. 13 : a) Cellule triaxiale thermique développée par Saix et Jouanna (1990), b) Montage expérimental permettant la réalisation d'essai mécanique à température et succion contrôlées (Romero et al. 1995, reproduit par Romero et al. 2001).	71
Figure II. 14 : a) Cellule d'essais isotropiques avec contrôle de la succion et de la température (Tang et al. 2007). B) cellule pour essais isotropes thermorégulés (Coccia et McCartney, 2016).	71
Figure II. 15 : Cellule de Bishop-Wesley modifiée par Uchapichat et Khalili (2009).	72
Figure II. 16 : Courbes de rétention d'eau obtenues en humidification par Romero et al. (2003) sur de l'argile de Boom compactée à deux poids volumiques différents et deux températures.	73
Figure II. 17 : a) Surfaces limites établies par Wiebe et al. (1998) rassemblant les résultats d'essais de compression triaxiale (contrainte de confinement P_{con} et contrainte déviatorique au pic q_f) réalisés sur un mélange sable-bentonite à différentes températures (T) et différents états de saturation (S_r).	74
Figure II. 18 : a) Evolution de la contrainte de préconsolidation d'éprouvettes de limon compactées en fonction de la succion matricielle à différentes températures obtenues par Uchapichat et Khalili (2009) à l'aide de cellules triaxiales modifiées. b) Surface tridimensionnelle des valeurs de résistance ultimes obtenues par Gu et al. (2014) à l'aide d'essai mini-pénétrométriques thermo-régulés.	74
Figure II. 19 : Variation en fonction de la température du coefficient κ_{oed} caractérisant la déformation élastique pré-seuil d'un essai œdométrique et λ_{oed} caractérisant la déformation plastique post-seuil pour des essais de compressibilité réalisés sous différentes succions et deux températures (Romero et al. 2003). Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes préparées à deux densité ($\gamma_d = 16,7$ et $13,7$ kN/m ³)	75

Figure II. 20 : a) Analyse granulométrique du matériau PL quarté et b) caractéristiques physico-chimiques.	76
Figure II. 21 : Diffractogramme mode poudre de limon de Plaisir (Ca : Calcite ; Do : Dolomite ; F : Feldspath potassique; I : Illite; Q : Quartz; Sm : Smectite).	77
Figure II. 22 : Diffractogrammes des minéraux argileux de limon de Plaisir sur préparations orientées, séchée à l'air (AD), glycolée (EG) puis chauffée à 350°C et 500°C. (Ar : Minéraux argileux; C : chlorite; Ca : Calcite ; Do : Dolomite ; F : feldspath potassique; Go : Goethite ; He : Hématite ; I : Illite; IS : Interstratifié type illite-smectite ; P : Plagioclase; Q : Quartz; S : Smectite).	78
Figure II. 23 : a) photographie du banc œdométrique thermo-régulé et b) schématisation du banc d'essai œdométriques thermorégulés (modifié de Jarad, 2016)	79
Figure II. 24 : a-b) détail de fonctionnement de la cellule œdométrique et c) courbe de calibration en température de la cellule d'essai.	79
Figure II. 25 : a) Photographie et b) schématisation du banc d'essai de cisaillement thermorégulés	80
Figure II. 26 : a-b) Schéma et photographie de la cellule d'essai et c) courbe de calibration en température.	80
Figure II. 27 : a) Courbes de compressibilités obtenues à trois températures différentes : 20°C (Essai 1), 5°C (Essai 2) et 50°C (Essai 3) et b) Evolution de la contrainte de préconsolidation en fonction de la température.	82
Figure II. 28: Essais 1, 2, 3 : évolution de a) la perméabilité intrinsèque et b) la conductivité hydraulique en fonction de l'indice des vides à différentes températures (°C).	83
Figure II. 29: Déformation volumétrique pendant les cycles thermiques 20°-50°C sous 400 kPa (essai 6, OCR =1) et 100 kPa (essai 7, OCR =16)	83
Figure II. 30 : a) Représentation schématique de la courbe de consolidation lors de l'application d'une contrainte mécanique puis thermomécanique (Coccia et McCartney, 2016). b) Effet de la température sur le taux de consolidation d'une argile normalement consolidée (Towhata et al. 1993).	84
Figure II. 31 : Déformation volumétrique pendant les cycles thermiques 5°-50°C sous 9kPa (essai 4, OCR =8) et 170 kPa (essai 5, OCR =1).	86
Figure II. 32 : Suivi de la compressibilité d'éprouvette de limon compacté après l'application de variation cyclique de la température (4 cycles 5°-50°C) a) à l'état initial ; b) sous 170 kPa.	87
Figure II. 33: Exemples de résultats d'essais de cisaillement réalisés à 5, 20 et 50°C a et b) sous une contrainte normale de 200 kPa et c) courbe intrinsèque obtenues à 5, 20, 50 °C et après des cycles 5-50°C.	87
Figure II. 34 : Représentation de l'évolution de la surface de charge au cours d'un cycle de chauffage-refroidissement entre deux température (T_0 et T_1).	88
Figure II. 35 : a) Force portante d'un pieu; b) Schéma de principe du fonctionnement d'une géostructure thermique en hivers (Delerablée et al. 2020).	90
Figure II. 36 : a) Dispositif expérimental de l'essai pénétrométrique à l'aiguille ; b) Force en pointe et force totale en fonction de l'enfoncement des sondes P1 et P2.	92
Figure II. 37 : Cuve en modèle réduit et instrumentation associée	93
Figure II. 38 : Position des sondes thermiques et des essais pressiométriques dans le massif compacté : a) coupe transversale, b) vue générale de la cuve, c) coupe sagittale.	94
Figure II. 39 : a) Courbes de calibration de la sonde pressiométrique en fonction de la température ; b) Détermination des paramètres mécaniques à partir des courbes pressiométriques.	95
Figure II. 40 : Diffraction aux rayons X en mode poudre du matériau illitique (Ar : Minéraux argileux; Ca : Calcite; F : Feldspath potassique; I : Illite; K : Kaolinite; Q : Quartz).	96

Figure II. 41 : Diffractogrammes aux rayons X des minéraux argileux du matériau illitique sur préparations orientées, séchée à l'air (AD), glycolée (EG) puis chauffée à 350°C et 500°C (Ca : Calcite; F : Feldspath potassique; I : Illite; K : Kaolinite, Q : Quartz; Sm : Smectite).....	96
Figure II. 42 : a) Structure cristallographique de l'illite (USGS 2001), b) analyse chimique du matériau illitique et c) composition minéralogique.....	97
Figure II. 43 : a) Courbe granulométrique b) caractéristiques géotechniques du matériau illitique.....	97
Figure II. 44 : a) Courbe de compactage Proctor normal et b) aspect des éprouvettes à différents états de compactage.....	98
Figure II. 45 : Etat de compactage des éprouvettes en comparaison avec la courbe de compactage Proctor normal.....	99
Figure II. 46 : Force d'enfoncement de l'aiguille P1 (a) et de l'aiguille P2 (b) en fonction de la profondeur pour des éprouvettes d'illite compactées à différents teneurs en eau et masses volumiques sèches.....	99
Figure II. 47 : Contrainte en pointe moyenne à 1, 20, 40 et 70°C à différents teneurs en eau et masses volumiques sèches pour l'illite.....	100
Figure II. 48 : Contrainte de frottement latéral moyenne à 1, 20, 40 et 70°C à différents teneurs en eau et masses volumiques sèches pour l'illite.....	100
Figure II. 49 : Paramètres du premier massif : a) Evolution de la température au sein du massif à mi-hauteur et à 150 mm du bord de la cuve, b) Profils moyens de la teneur en eau et de la masse volumique sèche, c) Courbes pressiométriques et d) Courbes de fluage.....	103
Figure II. 50 : Second massif : a) Evolution de la température au sein du massif à mi-hauteur et à 150 mm du bord de la cuve, b) Courbes pressiométriques.....	104
Figure II. 51. Evolution des températures au sein des 3 ^{ème} et 4 ^{ème} massifs (a et b) à 150 mm du bord de la cuve et chronologie des essais réalisés.....	105
Figure II. 52. Courbes pressiométriques obtenues a) dans le 3 ^{ème} massif et b) dans le 4 ^{ème} massif.....	106
Figure II. 53 : Variation de la pression de fluage (P_f) (a-b), de la pression limite (P_l) (c-d) et du module pressiométrique (E_M) (e-f) pour chaque palier du 3 ^{ème} et du 4 ^{ème} massif.....	107
Figure II. 54 : a) Variation du module en fonction de la déformation volumique selon le modèle de Frank et Zao (1982), b) Géométrie de la cuve vue en plan, c) Conditions aux limites.....	108
Figure II. 55 : Exemples de confrontation numérique et expérimentale de la déformation volumique en fonction de la pression appliquée a) 1 ^{er} massif à 20°C et à 40°C, b) 2 nd massif à 20°C et 1°C.....	109
Figure II. 56 : Variation de la pression limite P_l et de la déformation limite $\epsilon_{v,limit}$ en fonction de la température.....	110
Figure II. 57 : a-b) Localisation du site d'essai (modifié de Google Earth) ; c) Extrait du résultat de l'essai pressiométrique réalisé sur site (Szymkiewicz et al. 2015).....	111
Figure II. 58 : a) Plan de localisation des pieux géothermiques et des essais mini-pressiométriques réalisés ; b) Photographie du site instrumenté.....	111
Figure II. 59 : Température du fluide caloporteur entrant et sortant des pieux géothermiques au cours de la période de fonctionnement de la pompe à chaleur (Rapport ANR GECKO, Bernard et al. 2015).	112
Figure II. 60 : Courbes mini-pressiométriques obtenues lors des essais P1, P2, P3 et P4 réalisés avant l'application des cycles de variation de la température.....	112
Figure II. 61 : Températures mesurées dans le 1 ^{er} et le 2 nd pieu géothermique à l'aide de fibres optiques.....	113
Figure II. 62 : Comparaison des courbes pressiométriques obtenues avant et après application de cycles variations de température.....	114
Figure II. 63 : a) Essai de chargement de pieu in situ (Szymkiewicz et al. 2015) avant et après application des cycles de chauffage-refroidissement aux pieux géothermiques. b) résultats des essais mini-pressiométriques.....	114

Figure II. 64: Volume nécessaire au stockage de 10 GJ de chaleur sensible selon différents mécanismes ($\Delta T = 70^\circ\text{C}$) (Giordano et al. 2016 selon Hadorn, 2008)	117
Figure II. 65 : Exemple de stockage de chaleur: a) en sol naturel via un champ de forage, b) en fosse comblée par du gravier saturé (Hesaraki et al., 2015)	117
Figure II. 66 : Géométrie envisageable pour des stockage de chaleur en sol compacté	118
Figure II. 67 : a) Coupe longitudinale de l'aire d'essai de Benet et al. (1983), rapporté par Saix (1991), b) a) Mur de soutènement thermoactif (McCartney et al. 2014)	119
Figure II. 68 : a) Conductimètre thermique KD2 Pro et sondes thermiques associées ; b) Intervalle des mesure et précision des sondes	120
Figure II. 69: Schéma du dispositif de plaque chauffante centrée ; où T_1 est la température de l'élément chauffant, T_{01} et T_{02} sont les températures des plaques d'aluminium et T_a est la température de l'air.	121
Figure II. 70 : a) Schéma de principe d'imposition de la succion par phase vapeur ; b) Relation entre l'humidité relative et la succion imposée en fonction de la nature du sel	122
Figure II. 71 : a) Mesure de la succion avec le potentiomètre ; b) Spécifications techniques du potentiomètre (Dewpoint PotentiaMeter WP4C®).	122
Figure II. 72 : a) Courbes de compactage (Proctor normal) des matériaux I, PL, S+I, S+JL et S+XL et b) ρ_{dmax} et w_{OPN} des matériaux compactés à l'Optimum Proctor normal.	125
Figure II. 73. Evolution des paramètres thermiques le long des courbes de compactage Proctor normal des matériaux I, LP, S-LJ, S-LX et S-I.	126
Figure II. 74 : a) Essai de poinçonnement, b) Variation de l'IPI sur les points de la courbe Proctor du limon LP.	127
Figure II. 75 a) Courbe de rétention obtenue sur le matériau LP par mesure de succion à l'aide du potentiomètre Decagon WP4C, et paramètres du modèle utilisé. b) Courbe de conductivité hydraulique non saturée pour le limon de Plaisir compacté.	128
Figure II. 76: a) Programmes thermiques appliqués aux éprouvettes du limon de Plaisir ; b) Résistance à la compression en fonction de la teneur en eau de compactage et de la température.	129
Figure II. 77 : Effet de chauffage et les cycles thermiques sur les propriétés thermiques du limon de Plaisir (P1, P2) : a) conductivité thermique, b) capacité thermique.	130
Figure II. 78 : Teneurs en eau et masses volumiques sèches visées et mesurées Programme P4.	131
Figure II. 79 : a) Positionnement des sondes S2 à S8 en différents points de la cuve, la sonde S9 mesurant la température de la salle d'essai. b) Profils de température enregistrés au cours du programme et c) du programme P5 pour le premier, le 6e et le dernier cycle.	132
Figure II. 80: Courbes pressiométriques : a) programme P4, b) programme P5.	132
Figure II. 81 : Variation de la pression limite (P_l), de la pression du fluage (P_f) et du module pressiométrique (E_M) pour le programme P4 et le programme P5.	133
Figure II. 82 : Effet de la successions de cycles de chauffage refroidissement sur la résistance en pointe (à 300 mm de profondeur) obtenu lors d'essais micro-pénétrométriques sur des argiles surconsolidées à deux masses volumiques sèches différentes (Gu et al. 2014).	135
Figure II. 83: a) Suivi de la température en différents points d'un massif de limon de Plaisir compacté (cycle 1 Programme P5, extrait de la Figure II. 79b). b) Diffusivité thermique α et conductivités thermiques λ du sol compacté estimé à l'aide de la méthode inverse à partir des données enregistrées à une distance r_1 and r_2 du centre du massif.	138
Figure II. 84 : a) Evolution des températures pour les sondes T5 et T6; b) comparaison entre les résultats expérimentaux et la modélisation.	138
Figure II. 85 : Géométrie et maillage du système pour les simulations numériques (Tang et al., 2021).	141

Figure II. 86 : Conditions météorologiques et hydrothermiques appliquées : a) température ambiante au cours de l'année, b) radiations lumineuses au cours de l'année, c) profil de succion initial dans le sol et d) profil de température initial dans le sol.	142
Figure II. 87 : Diagramme schématique des mécanismes de transfert d'énergie et d'eau (Tang et al. 2019).	142
Figure II. 88: Scenario de fonctionnement du système au cours de l'année.	143
Figure II. 89 : Comparaison de la température de sortie du scénario avec stockage StoA (température ambiante) et du scénario sans stockage NSto pour trois profondeurs d'installation a) 1m, b) 1,5m et c) 2m	144
Figure II. 90 : Comparaison de la température de sortie du scénario avec stockage ($T_{\text{fluide}}=50$ °C pendant l'été) et du scénario sans stockage pour trois profondeurs d'installation : a) 1m, b) 1,5m et c) 2m.	145
Figure II. 91: Profils de température obtenus lors de la mise en place des échangeurs à 2m de profondeur a) à la fin de l'été, b) à la fin de l'automne, c) à la fin de l'hiver.	145
Figure II. 92 : Quantité totale d'énergie extraite au cours du temps pour a) le scénario NSto, en comparaison avec b) le scénario Sto50.	146
Figure II. 93 : Comparaison de Energie Totale extraite (TEE) entre les scénarios de stockage de la chaleur (StoA et Sto50), et le scénario sans stockage (NSto) à trois profondeurs d'installation différentes.	146
Figure II. 94 : Conductivité thermique des géotextiles a) en fonction de l'épaisseur des géotextiles testés, b) en fonction de la contrainte normale appliquée sur les géotextiles testés.	148
Figure II. 95 : Résistivité thermique des géotextiles testés calculée en fonction de la contrainte normale appliquée sur les géotextiles.	149
Figure II. 96 : Illustration de l'effet couplé des transferts de chaleur et d'humidité au sein d'une zone non saturée équipée d'échangeurs de chaleurs (McCartney et al. 2014).....	150
Figure II. 97 : Cuve en modèle réduit utilisée par McCartney et al. 2016 pour étudier l'effet de l'échange thermique sur la mobilité de l'eau et résultats obtenus. (McCartney et al. 2014).....	151
Figure II. 98 : Comparaison des mesures expérimentales et calculées à l'aide du modèle utilisé pour a) les conductivités thermiques ; b) les capacités thermiques	153
Figure II. 99: Géométrie du remblai géothermique et conditions aux limites imposées (modifié de Boukelia, 2016).	154
Figure II. 100: Champ de température obtenu à la fin de chaque saison lors de la mise en place de 3 rangées d'échangeurs et d'une isolation thermique.	155
Figure II. 101: Evolution de la température au centre du remblai, à différentes altitudes de la base.	155
Figure II. 102: a) Températures moyennes obtenues au centre du stockage à la fin de l'été et de l'hivers et b) pertes de température obtenues au cours des périodes de relaxation pour 10 années successives.	156
Figure II. 103 : Représentation schématique d'un remblai utilisé pour stocker de la chaleur et d'alvéoles de stockage de déchets.	165
Figure II. 104 : Dispositif de suivi de fissuration permettant l'application de sollicitation thermo-hydriques.	166

Tableau II. 1 : Objectifs en matière de chaleur renouvelable dans le cadre de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE 2018-2028) (Phan et al. 2021).....	57
Tableau II. 2 : Paramètres des essais œdométriques thermorégulés.	81
Tableau II. 3 : Paramètres de compressibilité et b) Courbes de compressibilités obtenues à trois températures différentes : 20°C (Essai 1), 5°C (Essai 2) et 50°C (Essai 3).	82
Tableau II. 4 : Caractéristiques des deux différentes aiguilles P1 et P2.	92
Tableau II. 5 : Spécifications techniques du thermorégulateur Vulcatherm®	93
Tableau II. 6 : Spécifications techniques du contrôleur pression/volume : modèle standard type 2 GDS Instruments®.	94
Tableau II. 7 : Teneur en eau et masse volumique sèche des éprouvettes.	98
Tableau II. 8. Paramètres pressiométriques obtenus lors des essais sur le premier massif (20-40-20 °C)...	103
Tableau II. 9 : Paramètres pressiométriques obtenus lors des essais du 2 ^{ème} massif (20-1-20 °C).....	104
Tableau II. 10 : Paramètres pressiométriques obtenus dans le 3 ^{ème} massif.	106
Tableau II. 11: Paramètres pressiométriques obtenus dans le 4 ^{ème} massif.....	106
Tableau II. 12 : Paramètres mécaniques utilisés pour la simulation des essais pressiométriques en fonction de la température (C1 et C2).....	109
Tableau II. 13: Paramètres pressiométriques mesurés à 3 et 4 m de profondeur selon l'essai sur site.	110
Tableau II. 14 : Résultats des essais mini-pressiométriques réalisés sur site.	113
Tableau II. 15 : Caractéristiques minéralogiques des matériaux.	124
Tableau II. 16 : Caractéristiques des matériaux : I (Eslami, 2014), LP (Boukelia, 2017), LJ (Fleureau et al. 1993) et LX (Blanck et al., 2011).....	125
Tableau II. 17 : Propriétés hydromécaniques du limon de Plaisir compacté.....	128
Tableau II. 18 : Etat de compactage des éprouvettes et résultats des essais de compression simple après les cycles thermiques.	129
Tableau II. 19: Programme d'essai dans la cuve	131
Tableau II. 20: Récapitulatif des paramètres pressiométriques pour les programmes P4 et P5.	133
Tableau II. 21 : Paramètres initiaux et sollicitations thermiques dans les deux sols.....	134
Tableau II. 22 : Valeurs normalisées des paramètres pressiométriques de l'illite et du limon de Plaisir.....	135
Tableau II. 23 : Propriétés hydromécaniques du sol local.	141
Tableau II. 24: Température du fluide entrant pour le scénario StoA et le scénario Sto50.....	143
Tableau II. 25 : Propriétés de géotextiles non tissés aiguilletés.	147
Tableau II. 26 : Paramètres du modèle utilisé pour calculer la conductivité thermique du limon de Plaisir (λ_{eau} , λ_{gaz} et λ_{solide}) et la capacité thermique du limon de Plaisir (C_s , C_w)	152
Tableau II. 27: Paramètres thermo- hydriques utilisés pour la modélisation du remblai (Boukelia, 2016)..	153

IX. Bibliographie

- Abu-Hamdeh N.H., Reeder R.C., 2000. Soil Thermal Conductivity: Effects of Density, Moisture, Salt Concentration, and Organic Matter. *Soil Science Society of America Journal* 64/4: 1285–1290.
- Abu-Hamdeh N. H., Khdaïr A. I., Reeder R. C., 2001. A comparison of two methods used to evaluate thermal conductivity for some soils. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44/5: 1073-1078.
- Abuel-Naga H., Raouf M. I. N., Raouf A. M., Nasser A. G., 2015. Energy piles: current state of knowledge and design challenges. *Environmental Geotechnics*, 2(4), 195-210.
- AFNOR, 1982. NF X11-681 Granulométrie - Analyse granulométrique par sédimentation par gravité dans un liquide - Méthode de la pipette. Association Française de Normalisation. 12p.
- AFNOR, 1993. NF P94-051 Sols : reconnaissance et essais ; Détermination des limites d'Atterberg-Limite de liquidité à la coupelle-Limite de plasticité au rouleau. Association Française de Normalisation 15p.
- AFNOR, 1996a. NF P 94-048 : Sols : Reco. et Essais – Détermination de la teneur en carbonate, 11p
- AFNOR. 1997. NF P94-078 - Sols : reconnaissance et essais : Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice portant Immédiat - Association Française de Normalisation, Paris, France.
- AFNOR, 1996b. NF P94-113 : Sols : reconnaissance et essais ; Essai de pénétration statique. Association Française de Normalisation 16p.
- AFNOR, 1999. NF EN 933-9 : Assessment of fines-Methylene blue test, Association Française de Normalisation, 12p
- AFNOR, 1999b. NF P 94-093 Sols : Reconnaissance et essais Détermination des références de compactage d'un matériau. Essai Proctor Normal-Essai Proctor Modifié [Soils: Investigation and testing. Determination of the compaction characteristics of a soil. Standard Proctor test. Modified Proctor test] (p. 18). Paris : Association Française de Normalisation.
- AFNOR, 2009. ISO 13320 : Particle size analysis—Laser diffraction methods. , Association Française de Normalisation, 60p.
- AFNOR, 2015. EN ISO 10318-1: Geosynthetic - Part 1: Terms and Definitions. European Committee for Standardization, Brussels.
- Al-Homoud M.S., 2005. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and environment*, 40/3: 353-366.
- Alonso E.E., Josa A., Gens A., 1990. A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40/3: 405–430.
- Andresen H.T., Li Y., 2015. Modelling the Heating of the Green Energy Lab in Shanghai (...). *Energy Procedia* 70: 155-62.
- Asgari B., Habibi M., Hakkaki-Fard A., 2020. Assessment and comparison of different arrangements of horizontal ground heat exchangers for high energy required applications, *Applied Thermal Engineering* 167: 114770.
- Asrar G., Kanemasu E.T., 1983. Estimating Thermal Diffusivity Near the Soil Surface Using Laplace Transform: Uniform Initial Conditions 1. *Soil Science Society of America Journal* 47/3: 397-401.
- Araïro W., Eslami H., Abdallah A., Rosin-Paumier S., Masrouï F., 2015. Effect of the temperature variation on the presuremeter test parameters of a compact illitic-soil. XVI^e European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 13-17 Septembre, Edinburgh, Scotland, 6p.
- ASTM 2011. D 2435 -03. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. ASTM International, West Consholocken, PA, pp. 1–10.
- Auvray R., Rosin-Paumier S., Abdallah A., Masrouï F., 2013. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Taylor & Francis 18/1:11 - 32.
- Baetens R., Jelle B.P., Thue J.V. et al., 2010. Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings*, 42(2), 147-172.
- Baillieux P., Schill E., Edel J., Mauri G., 2013. Localization of temperature anomalies in the Upper Rhine Graben: insights from geophysics and neotectonic activity. *International Geology Review* 55: 1744-1762.
- Baldi G., Hueckel T., Pellegrini R., 1988. Thermal volume changes of the mineral water system in low-porosity clay soils, *Canadian geotechnical journal* 25/4: 807-825.

- Barry-Macaulay D., Bouazza A., Singh R. M., Wang B., Ranjith P. G., 2013. Thermal conductivity of soils and rocks from the Melbourne (Australia) region. *Engineering Geology* 164: 131-138.
- Barla M., Di Donna A., 2018. Energy tunnels: concept and design aspects. *Underground Space* 3, 268–276.
- Beier R. A., Holloway, W. A., 2015. Changes in the thermal performance of horizontal boreholes with time, *Applied Thermal Engineering* 78: 1-8.
- Benet J.C., Chevassus D., Della-Valle G., Duruisseaud P., Koufogiannis D., Saix C., Jouanna P., 1983. Etude du stockage de chaleur dans les sols non saturés. Réalisation d'une colonne d'essai de simulation de l'évolution d'une couche de sol non saturé utilisée comme zone de stockage. Rapport final, contrat Communauté Economique Européenne No ESA-S-05 1-F(S).
- Bernard J.B., Rosin-Paumier S., Burlon S., Maragna C., Masrouri F., Mroueh H., Rachez X., Abdallah A., Suryatriyastuti M., Eslami H., Jahangir E., 2015. Rapport de final du projet GECKO : GEostructures, Couplage solaire hybride et stockAge d'énergie Optimisé : Solution pour bâtiments à énergie positive. Projet ANR-11-SEED-0013, 150p.
- Blanck G., Cuisinier O., Masrouri F., 2011. Effet d'un traitement non traditionnel acide sur le comportement mécanique de trois limons. 20^{ème} Congrès Français de Mécanique. pp. 1–6.
- Blet N., Platel V., Ayel V., Bertin Y., Romestant C. J., 2016. Transient modeling of a capillary pumped loop for terrestrial applications. *Heat Transfer* 138/7: 072802.
- Boukelia A., Rosin-Paumier S., Eslami H., Masrouri F., 2019. Effect of temperature and initial state of fine grained soils on variation of thermal parameters. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 23/9: 1125-1138. <doi.org/10.1080/19648189.2017.1344144>
- Boukelia A., 2016. Modélisation physique et numérique des géo-structures énergétiques. Thèse de doctorat, Université de lorraine.
- Bourne-Webb P.J., Amatya B., Soga K., Amis T., Davidson C., Payne P., 2009. Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile re-sponse to heat cycles. *Géotechnique*, 59/3: 237-248.
- Bourne-Webb P.J., Soga K., Amatya B., 2013. A frame-work for understanding energy pile behaviour. *Geotechnical Engineering*, ICE Publishing 166/2: 170-177.
- Bourne-Webb P.J., Burlon S., Javed S., Kuerten S., Loveridge F., 2016. Analysis and design methods for energy geostructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65: 402-419.
- Brandl H., 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique* 56/2: 81-122.
- Brigaud F., Vasseur G., 1989. Mineralogy, porosity and fluid control on thermal conductivity of sedimentary rocks. *Geophysical Journal International* 98, 525–542.
- Burghignoli A., Desideri A., Miliziano S., 2000. A laboratory study on the thermomechanical behaviour of clayey soils. *Can. Geotech. J.* 37: 764–780.
- Busby J., 2015. Determination of thermal properties for horizontal ground collector loops. Proc. World Geothermal Congress 2015, 19-25 April, Melbourne, Australia
- Campanella R.G., Mitchell J.K., 1968. Influence of temperature variations on soil behavior. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 94/3: 709-734.
- Casagrande A., 1936. The determination of pre-consolidation load and its practical significance. In Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Cambridge, Mass. 3, p. 60).
- Cekerevac C., Laloui L., 2004. Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics* 28: 209–228.
- Chapuis S., Bernier M., 2009. Seasonal Storage of Solar Energy in Borehole Heat Exchangers, Eleventh International IBPSA Conference Glasgow, Scotland July 27-30: 599-606.
- Coccia C.J.R., McCartney J.S., 2016. Thermal volume change of poorly draining soils I: Critical assessment of volume change mechanisms. *Computers and Geotechnics* 80 : 26–40
- Choi W., Ooka R., 2016. Effect of disturbance on thermal response test, part 2: Numerical study of applicability and limitation of infinite line source model for interpretation under disturbance from outdoor environment. *Renewable Energy* 85: 1090-1105.
- Cruickshank C.A., Baldwin C., 2016. Chapter 15 - Sensible Thermal Energy Storage: Diurnal and Seasonal. In *Storing Energy*, T. M. Letcher (ed.), Elsevier, 291-311.
- Cui Y., Delage P., 1996. Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt, *Géotechnique* 46/2: 291-311.

- Cui Y.J., Tang C.S., Tang A.M., Ta A.N., 2014. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 24 : 9-20
- Cuny M., 217. Etude de l'impact des conditions géologiques et climatiques sur l'efficacité énergétique des systèmes géothermiques de surface. *Géotechnique*. Université de Strasbourg, 149 p.
- De Bruyn D., Thimus J. F., 1996. The influence of temperature on mechanical characteristics of Boom clay: The results of an initial laboratory program. *Engineering Geology* 41: 117-226.
- De Hoog F.R., Knight J., Stokes A., 1982. An improved method for numerical inversion of laplace transforms, *SIAM. Journal on Scientific and Statistical Computing* 3/3: 357-366.
- Delage P., 2000. L'eau dans les sols non saturés. *Techniques de l'ingénieur-Construction*, (C 301).
- Delage P., Cui Y.J., 2008. An evaluation of the osmotic method of controlling suction. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 3(1), 1-11.
- Delalieux F., Py X., Olives R. 2008. Programme ANR Stock-E Solargeotherm 2012.
- Delerablée Y., Habert J., Burlon S., 2020. *Techniques de l'Ingénieur*, C264 V1
- Derjaguin B.V., Karasev V.V., Khromova E.N., 1986. Thermal expansion of water in fine pores. *Journal of colloid and interface science*, 109/2: 586-587.
- Di Donna A., 2014. Thermo-mechanical aspects of energy piles, PhD thesis.
- Di Donna A., 2019. La géothermie, une source d'énergie verte sous nos bâtiments. *Encyclopédie de l'environnement*. <https://www.encyclopedie-environnement.org/sol/geothermie-source-energie-verte-batiments/> (consultation 04.05.21).
- Dysli M., 1991. Le gel et son action sur les sols et les fondations. PPUR presses polytechniques.
- Ekwue E.I., Stone R.J., Bhagwat D., 2006. Thermal Conductivity of Some Compacted Trinidadian Soils as affected by Peat Content. *Biosystems Engineering*, 94, 461–469.
- Elminshawy N.A., Siddiqui F.R., Farooq Q.U., Addas M.F., 2017. Experimental investigation on the performance of earth-air pipe heat exchanger for different soil compaction levels, *Applied Thermal Engineering* 124: 1319-1327.
- Eslami H., 2014. Comportement thermo-hydrromécanique des sols au voisinage des géo-structures énergétiques. Thèse de doctorat, Université de lorraine.
- Eslami H., Rosin-Paumier S., Abdallah A., Masrouri F., 2017. Pressuremeter test parameters of a compacted illitic soil under thermal cycling. *Acta Geotechnica*, Springer Verlag, 12/5: 1105-1118. doi.org/10.1007/s11440-017-0552-2 Annexe 2
- Eslami H., Rosin-Paumier S., Abdallah A., Masrouri F., 2013. Impact of temperature variation on penetration test parameters in compacted soils. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Taylor & Francis, 19/5: 628 - 648. doi.org/10.1080/19648189.2014.960952
- Fantucci S., Lorenzati A., Kazas G., Levchenko D., Serale G., 2015. Thermal energy storage with super insulating materials: a parametrical analysis. *Energy Procedia*, 78, 441-446.
- Fleureau J., Indarto, 1993. Comportement du limon de Jossigny remanié soumis à une pression interstitielle négative. *Revue française de géotechnique* 62: 59–66.
- Frank R., Zhao S. R., 1982. Estimating the Settlement of Axially Loaded Bored Piles in Fine Sand by PMT Data. *Bulletin Liaison LPC No.119 Paris*.
- Fisch M.N., Guigas M., Dalenback J.O., 1998. A review of large-scale solar heating systems in Europe. *Solar Energy* 63: 355–366.
- Franchomme G., Rosin-Paumier S., Masrouri F., 2013. Evaluating the impact of thermal variations on the penetration test parameters. In *First Pan-American Conference on Unsaturated Soils*. Taylor & Francis Group, Cartagena de Indias (Colombia). 371–376
- Fromentin A., Pahud D., Laloui L., Moreni M., 1999. *Revue française de génie civil* 3(6) : 387-421.
- Gabrielsson A., Lehtmetts M., Moritz L., Bergdahl U., 1997. Heat Storage in Soft Clay. *Swedish Geotechnical Institute*.
- Gan G., 2013. Dynamic thermal modelling of horizontal ground-source heat pumps, *International Journal of Low-Carbon Technologies* 8/2: 95-105.
- Gao Y., Fan R., Li H., Liu R., Lin X., Guo H., Gao Y., 2016. Thermal performance improvement of a horizontal ground-coupled heat exchanger by rainwater harvest. *Energy and Buildings* 110: 302-313.
- Gao Z., Wang L., Horton R., 2009. Comparison of six algorithms to determine the soil thermal diffusivity at a site in the Loess Plateau of China. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6, 2247.
- Gao L., Zhao J., Tang Z., 2015. A review on borehole seasonal solar thermal energy storage. *Energy Procedia*, 70: 209-218;

- Gehlin S., Hellström G., 2000. Recent Status of In-situ Thermal Response Tests for BTES Applications in Sweden. Proc. Terrastock'2000, August 28th September 1st, Stuttgart, Germany, pp 159-164.
- Giordano N., Comina C., Mandrone G., Cagni A., 2016. Borehole thermal energy storage (BTES). First results from the injection phase of a living lab in Torino (NW Italy). *Renewable Energy*, 86, 993-1008.
- Givoni B., 1977. Underground Longterm Storage of Solar Energy--an Overview. *Solar Energy* 19: 617-23.
- Gonzalez R., Verhoef A., Vidale P., Main B., Gan G., Wu Y., 2012. Interactions between the physical soil environment and a horizontal ground coupled heat pump, for a domestic site in the UK. *Renewable Energy* 44: 141-153. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.080>.
- Gu K., Tang C., Shi B., Hong J., Jin F., 2014. *Bull Eng Geol Environ* 73:747–758.
- Graham J., Tanaka N., Crilly T., Alfaro M., 2001. Modified Cam-Clay modelling of temperature effects in clays, *Canadian Geotechnical Journal* 38: 608-621.
- GTR, 2000. Réalisation des remblais et des couches de forme. Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Paris, France, 102 pp.
- GSHPA 2012. Thermal Pile Design, Installation & Materials Standards, Ground Source Heat Pump Association, 85p.
- Habibi M., Hakkaki-Fard A., 2018. Evaluation and improvement of the thermal performance of different types of horizontal ground heat exchangers based on techno-economic analysis. *Energy Conversion and Management* 171: 1177-1192.
- Hesaraki A., Holmberg S., Haghghat F., 2015 *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43: 1199–121.
- Hillel D., 1980. *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Academic Press, Elsevier, 771 p.
- Houston S.L., Houston W.N., Williams N.D, 1985. Thermo-mechanical behavior of seafloor sedi-ments», *Journal of Geotechnical Engineering* 111/11: 1049-1263.
- Hueckel T., Baldi G., 1990. Thermoplasticity of saturated clays: Experimental constitutive study, *Journal of Geotechnical Engineering*, 116/12: 1778-1796.
- Hueckel T., Pellegrini R., Del Olmo C. 1998. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics* 22/7: 549-574.
- Hurtado F., Kaiser A., Zamora B., 2012. Evaluation of the influence of soil thermal inertia on the performance of a solar chimney power plant, *Energy* 47/1: 213-224.
- Gombert, P. 2015. Underground storage of thermal energy within the context of energy transition. Study report. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques - Ineris. Rapport d'étude DRS-15-149645-11964A, 37p.
- Jahangir M.H., Ghazvini M., Pourfayaz F., Ahmadi M.H., 2018. A numerical study into effects of intermittent pump operation on thermal storage in unsaturated porous media. *Applied Thermal Engineering*, 138, 110-121
- Jannot Y., Felix V., Degiovanni A., 2010. A centered hot plate method for measurement of thermal properties of thin insulating materials. *Measurement Science and technology*, 21(3), 035106 10.
- Jannot Y., Degiovanni A., Grigorova-Moutiers V., Godefroy J., 2016. A passive guard for low thermal conductivity measurement of small samples by the hot plate method. *Measurement Science and Technology*, 28/1, 015008.
- Jarad N., 2016. Temperature impact on the consolidation and creep behaviour of compacted clayey soils, PhD thesis, Université de Lorraine.
- Jradi M., Veje C., Jørgensen B. N., 2010. Performance analysis of a soil-based thermal energy storage system using solar-driven air-source heat pump for Danish buildings sector. *Applied Thermal Engineering*, 114, 360-373.
- Jradi M., Veje C., Jørgensen B. N., 2017. Performance analysis of a soil-based thermal energy storage system using solar-driven air-source heat pump for Danish buildings sector. *Applied Thermal Engineering*, 114, 360-373.
- Khalili N., Uchaipichat A., Javadi A., 2010. Skeletal thermal expansion coefficient and thermo-hydro-mechanical constitutive relations for saturated homogeneous porous media. *Mechanics of Materials* 42: 593–598
- Kim H., Nam Y., Bae S., Cho S., 2020. Study on the Performance of Multiple Sources and Multiple Uses Heat Pump System in Three Different Cities. *Energies* 13, 5211.

- Kuntiwattanakul P., Towhata I., Ohishi K., Seko I., 1995. Temperature effects on undrained shear characteristics of clay, *Soil and Foundations*, 35/1: 147-162.
- Knellwolf C., Peron H., Laloui L., 2011. Geotechnical Analysis of Heat Exchanger Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*. 137/10: 890-902.
- Kodikara J., Rajeev P., Rhoden N. J., 2011. Determination of thermal diffusivity of soil using infrared thermal imaging. *Canadian Geotechnical Journal* 48/8: 1295-1302.
- Kraemer D., Chen, G., 2014. A simple differential steady-state method to measure the thermal conductivity of solid bulk materials with high accuracy. *Review of Scientific Instruments*, 85/2 : 025108
- Lahoori M. 2020. Comportement Thermo-Hydro-Mécanique (THM) des remblais de stockage énergétiques. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- Lahoori M., Rosin-Paumier S., Masrouri F., 2021a. Effect of monotonic and cyclic temperature variations on mechanical behavior of a compacted soil. *Engineering Geology* 290: 106195
- Lahoori M., Rosin-Paumier S., Stoltz G., Jannot Y., 2021b. Thermal conductivity of nonwoven needle-punched geotextiles: effect of stress and moisture. *Geosynthetics International* 2021, 28/2: 186-194.
- Lahoori M., Jannot Y., Rosin-Paumier S., Boukelia A., Masrouri F., 2020. Measurement of the thermal properties of compacted soil by a transfer function estimation method. *Applied Thermal Engineering* 167: 114795. <doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114795>
- Laloui L., Moreni M., Vulliet L., 2003. Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur. *Canadian Geotechnical Journal* 40/2: 388-402.
- Laloui L., Di Donna A., 2013. Energy geostructures: innovation in underground engineering. John Wiley & Sons.
- Le Borgne T., Hamonet V., Rolland S., 2016. Accuther : un stockage géothermique piloté dans un sol reconstitué et structuré, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nancy, France.
- Ledesma A., 2016. Cracking in desiccating soils. *E3S Web of Conferences* 9, 03005
- Li C., Cleall P. J., Mao J., Muñoz-Criollo J. J., 2018. Numerical simulation of ground source heat pump systems considering unsaturated soil properties and groundwater flow. *Applied Thermal Engineering* 139 : 307-316.
- LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, 23p.
- Loveridge F., Low J., Powrie W., 2017. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 50/2: 158-168.
- Low J. E., Loveridge F. A., Powrie W., Nicholson D., 2015. A comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity for energy foundations and other ground heat exchanger applications. *Acta geotechnica* 10/2: 209-218
- Ménard L., 1975. Interpretation and Application of Pressuremeter Test Results to Foundation Design, *Sols-Soils*, No. 26.
- Lozada C., Caicedo B., Thorel L., 2015. Effects of cracks and desiccation on the bearing capacity of soil deposits. *Géotechnique Letters* 5, 112-117
- Marques M.E.S., Leroueil S., Almeida M.S.S., 2004. Viscous behaviour of St-Roch-de-l'Achigan clay, Quebec. *Can Geotech J* 41: 25-38.
- Martin J-C., 2013. Carte de France des profils de température 0-200 m selon les zones climatiques. Rapport final. BRGM/RP-62281-FR: 17 p.
- McCartney J.S., Murphy J.S., Stewart M.A., 2013. Thermo-Mechanical Behavior of Energy Foundations. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.
- McCartney J.S., Coccia C. J. R., Alsharif N. A., Stewart M. A., Baser T., Traore T., Goode J. C., 2014. Unsaturated Soil Mechanics in Geothermal Energy Applications. 6th International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT Taylor and Francis-Balkema, 835-841.
- McCartney J. S., 2016. Thermal Volume Change of Unsaturated Silt under Different Stress States and Suction Magnitudes. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 9, p. 09009). EDP Sciences.
- Midttømme K., Roaldset E., Aagaard P., 1998. Thermal conductivity of selected claystones and mudstones from England. *Clay Minerals* 33/1: 131-145.
- Mitchell J.K., 1964. Shearing resistance of soils as a rate process, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*. 90: 29-61.

- Moel M., Bach P.M., Bouazza A., Singh R.M., Sun J.L.O., 2010. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 2683–2696.
- Mualem Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water resources research 12/3: 513-522.
- Murray I., Tarantino A., Francescon F., 2014. Desiccation cracking in clay forms subjected to non-uniform hydraulic and mechanical boundary conditions. 6th Int. Conference on Unsaturated Soils, 2-4 Jul, Sydney, Australia
- Nguyen V.T., Tang A.M., Pereira J.P., 2017. Long-term thermo-mechanical behavior of energy pile in dry sand. Acta Geotechnica, Springer Verlag, 10.1007/s11440-017-0539-z
- Nicholson D., 2011. GSHPA Thermal Pile Standard. Technical Seminar Ground Source Heat Pump Association 16 November 2011, Homerton College, Cambridge University.
- Nielsen K., 2003. Thermal Energy Storage – A state-of-the-Art. A report within the research program Smart Energy-Efficient Buildings at NTNU and SINTEF 2002- 2006.
- Olivella S., Gens A., Carrera J., Alonso E.E., 1996. Numerical formulation for a simulator (Code_Bright) for the coupled analysis of saline media. Engineering Computations 13/7: 87-112.
- Pahud D., Fromentin A., Hubbuch M., 1999. Technical Report. Switzerland: Swiss Federal Office of Energy.
- Penner E., Johnsto, G. H., Goodrich L. E., 1975. Thermal conductivity laboratory studies of some Mackenzie Highway soils. Canadian Geotechnical Journal, 12(3), 271-288.
- Peron H., Knellwolf C., Laloui L., 2011. A Method for the Geotechnical Design of Heat Exchanger Piles. Geo-Frontiers pp. 470-479.
- Pinel P., Cruickshank C.A., Beausoleil-Morrison I., Wills A., 2011. A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15/7: 3341-3359.
- Pfleiderer P., Schleussner C.F., Kornhuber K., Coumou D., 2019. Summer weather becomes more persistent in a 2°C world. Nature Climate Change 9 : 666-671.
- Phan C., Plouhinec C. et al., 2021. Chiffres clés des énergies renouvelables, édition 2021. Service des données et études statistiques (SDES). statistiques.developpement-durable.gouv.fr
- USGS 2001. A Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction, ILLITE GROUP. Geological Survey Open-File Report 01-041
- Raboudi L., 1986. Résistance au cisaillement à l'interface entre un sol à cohésion et différents matériaux, Thèse de doctorat, INPL, France, 135p.
- Rajeev P., Kodikara J., 2016. Estimating apparent thermal diffusivity of soil using field temperature time series. Geomechanics and Geoengineering, 11(1), 28-46.
- Romero E., Lloret A., Gens A., 1995. Development of a new suction and temperature controlled oedometer cell, in Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils. Vol. 2 Paris, 1995 (edited by E. E. Alonso and P. Delage). Balkema/Presses des Ponts et Chaussées. pp. 553-559.
- Romero E., Gens A. Lloret A., 2001. Temperature effects on the hydraulic behaviour of an unsaturated clay. Geotechnical and Geological Engineering, pp. 311–332.
- Romero E., Gens A., Lloret A., 2003. Suction effects on a compacted clay under non-isothermal conditions. Géotechnique 53/1, 65–81
- Rosin-Paumier S., Boukelia A., Eslami H., Masroui F., 2017. Effect of temperature cyclic variation on pressuremeter parameters of compacted soils. 19th International Conference on soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Coex, Seoul, Korea, 17-22 sept. 2017.
- Rosin-Paumier S., Eslami H., Masroui F., 2020. In situ investigation of the impact of cyclic thermal variations impact on the mechanical properties of sandy soil. EGU2020: Sharing Geoscience Online, 4-8 mai 2020.
- Sanchez M., Atique A., Kim S., Romero E., Zielinski M. 2013. Exploring desiccation cracks in soils using a 2D profile laser device. Acta Geotechnica 8 :583–596
- Saix C., 1991. Consolidation thermique par chaleur d'un sol non saturé. Canadian Geotechnical Journal, 28(1), 42-50.
- Saix C., Jouanna, 1990. Appareil triaxial pour l'étude du comportement thermique de sols non saturés. Canadian Geotechnical Journal 27: 119-128.
- Shetty R., Singh D. N., Ferrari A., 2019. Volume change characteristics of fine-grained soils due to sequential thermo-mechanical stresses. Engineering Geology 253, 47-54.

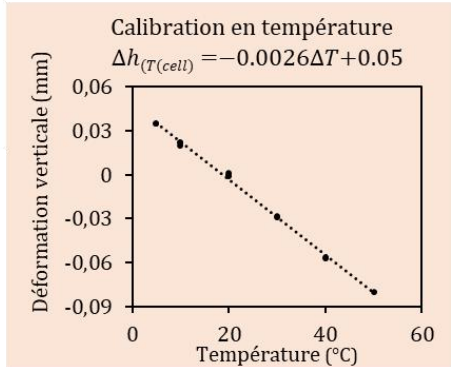
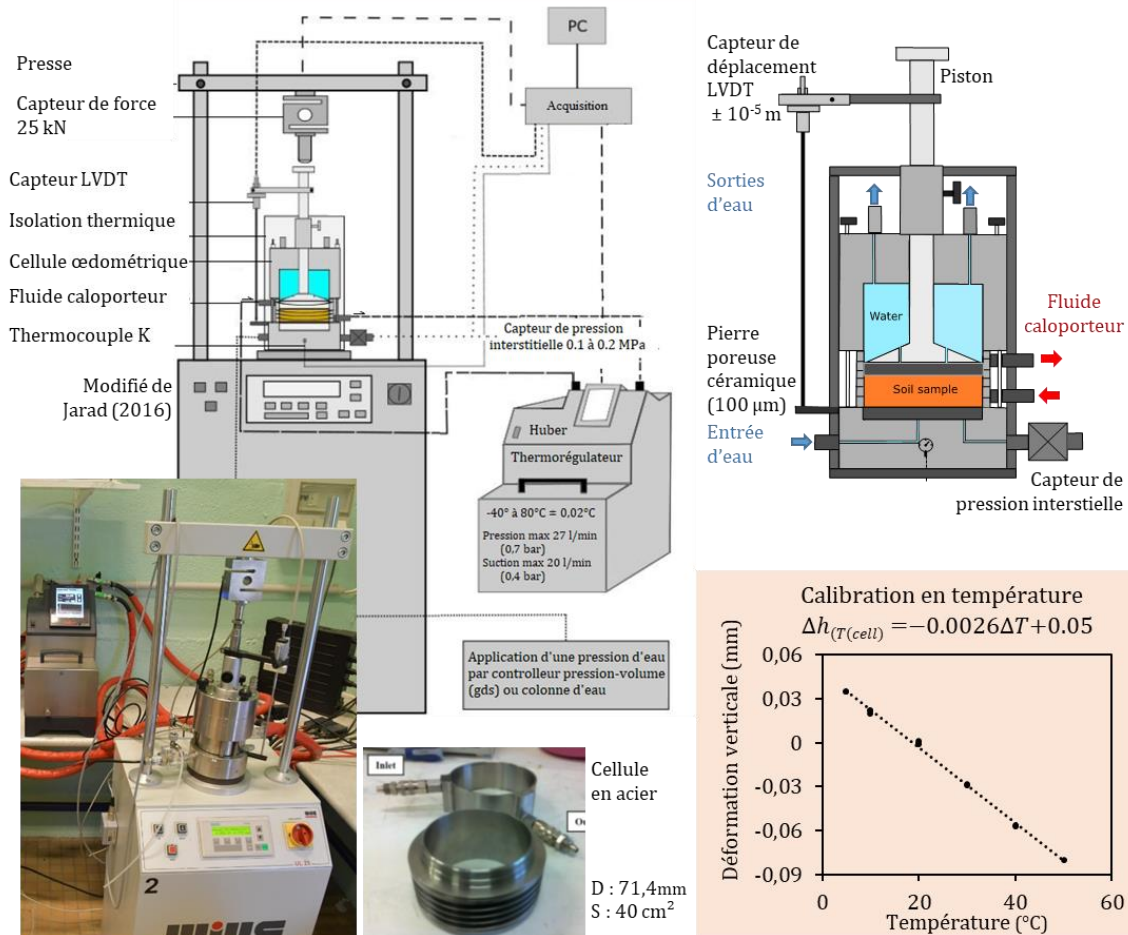
- Schmidt T., Mangold D., Müller-Steinhagen H., 2003. In ISES solar world congress 14/19: 2003.
- Sibbitt B., McClenahan D., Djebbar R., Thornton J., Wong B., Carriere J., Kokko J., 2012. The performance of a high solar fraction seasonal storage district heating system—five years of operation. *Energy Procedia*, 30, 856-865.
- Shetty R., Singh D. N., Ferrari A., 2019. Volume change characteristics of fine-grained soils due to sequential thermo-mechanical stresses. *Engineering Geology*, 253, 47-54.
- Sterpi D., Coletto A., Mauria L., 2017. Investigation on the behaviour of a thermo-active diaphragm wall by thermo-mechanical analyses. *Geomechanics for Energy and the Environment* 9, 1–20
- Stojanović B, Akander J., 2010. Build-up and long-term performance test of a full-scale solar-assisted heat pump system for residential heating in Nordic climatic conditions. *Applied Thermal Engineering* 30/2: 188-195.
- Sultan N., Delage P., Cui Y. J., 2002. Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay. *Engineering Geology*, 64(2-3), 135-145.
- Szymkiewicz F, S. Burlon, F. Guirado, C. Minatchy and G. Vincelas, 2015. Impact of heating-cooling cycles on the bearing capacity of CFA piles in sandy soils. XVI ECSMGE, Paris, France
- Tanaka N, Graham J., Crilly T., 1996. Stress-strain behaviour of reconstituted illitic clay at different temperatures, *Engineering Geology* 47: 339-350.
- Tang C.S., Zhu C., Leng T., Shi B., Cheng Q., Zeng H., 2019. Three-dimensional characterization of desiccation cracking behavior of compacted clayey soil using X-ray computed tomography. *Engineering Geology*. 255, 1-10.
- Tang A.M., 2005. Effet de la température sur le comportement des barrières de confinement, Thèse de Doctorat, École des Ponts Paris Tech, Paris, p207.
- Tang A.-M., Cui Y.-J., Barnel N., 2007. A new isotropic cell for studying the thermo-mechanical behavior of unsaturated expansive clays. *Geotechnical Testing Journal* 30/5: 341–348.
- Tang F., Lahoori M., Nowamooz H., Rosin-Paumier S., Masroui F., 2021 A numerical study into effects of soil compaction and heat storage on thermal performance of a horizontal ground heat exchanger. *Renewable Energy* 172: 740-752 <doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.025>
- Tang F., Nowamooz H., 2018. Long-term performance of a shallow borehole heat exchanger installed in a geothermal field of Alsace region. *Renewable Energy* 128: 210-222.
- Tang F., Nowamooz H., 2019. Factors influencing the performance of shallow Borehole Heat Exchanger. *Energy Conversion and Management* 181:571-583.
- Tang F., Nowamooz H., 2020. Outlet temperatures of a slinky-type Horizontal Ground Heat Exchanger with the atmosphere-soil interaction, *International Journal of Renewable Energy* 146: 705-718.
- Towhata I., Kuntiwattanakul P., Seko I., Ohishi K., 1993. Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests. *Soils Found* 33/4:170–83.
- USCS, 2017. ASTM D2487 - 17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes. Unified Soil Classification System, 10p.
- Ukrainczyk N., 2009. Thermal diffusivity estimation using numerical inverse solution for 1D heat conduction. *International journal of heat and mass transfer*, 52(25-26), 5675-5681.
- Uchaipichat A., 2005. Experimental investigation and constitutive modelling of thermo-hydro-mechanical coupling in unsaturated soils. Thèse de doctorat, University of New South Wales.
- Uchaipichat A., Khalili N., 2009. Experimental investigation of thermo-hydro-mechanical behaviour of an unsaturated silt. *Géotechnique* 59/4: 339–353
- Van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44/5: 892-898.
- Vega A., 2012. Impact of temperature cycles on the thermal consolidation of saturated silt under different stress states. Doctoral dissertation, University of Colorado at Boulder.
- Vieira A., Maranha J., Christodoulides P., M. Alberdi-Pagola, F. Loveridge, F. Nguyen, G. Florides, G. Radioti, F. Cecinato, I. Prodan, E. Ramalho, A. Georgiev, S. Rosin-Paumier, S. Lenart, S.E. Poulsen, G. Radioti, S. Javed, G V Lysebetten and D. Salciarini, 2017. Characterisation of Ground Thermal and Thermo-Mechanical Behaviour for Shallow Geothermal Energy Applications. *Energies*, MDPI 10/12 : 2044-2095. { doi.org/10.3390/en10122044 } {hal-01717735}

- Wiebe B., Graham J., Tang G.X., Dixon D., 1998. Influence of pressure, saturation and temperature on the behaviour unsaturated sand-bentonite, *Canadian Geotechnical Journal*, 35, 1998, p. 194-205.
- Wind G.P., 1966. Capillary conductivity data estimated by a simple method. Proceedings of the Wageningen Symposium, June 1966, Water in the unsaturated zone, 13p.
- Xu S., Scherer G.W., Mahadevan T.S., Garofalini S.H., 2009. Thermal expansion of confined water. *Langmuir*, 25/9: 5076-5083.
- Xu J., Wang R.Z., Li Y., 2014. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage, *Solar Energy* 103 : 610–638
- Zhang G., Xia C., Sun M., Zou Y., Xiao S., 2013. A new model and analytical solution for the heat conduction of tunnel lining ground heat exchangers. *Cold Regions Science and Technology* 88: 59-66

Annexes : Fiches synthétiques concernant les essais et de laboratoire et les matériaux étudiés

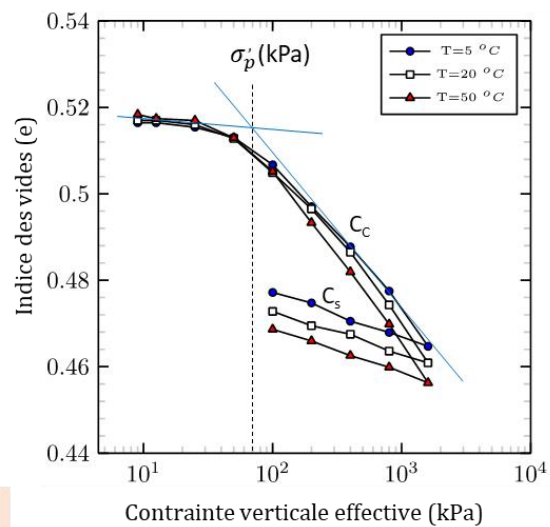
Essais œdométriques thermo-régulés

Objectif : réaliser des essais de chargement sur des éprouvettes saturées et régulées en température afin d'en déterminer les paramètres de consolidation et de compressibilité.



L'essai classique consiste à appliquer des paliers de contrainte successifs à une éprouvette cylindrique. L'évolution de l'épaisseur est suivie au cours de chaque palier de consolidation. L'indice des vides à l'équilibre en fin de palier permet de tracer la courbe de compressibilité $e=f(\log\sigma)$. La courbe fait apparaitre un premier palier de faible déformation puis de fortes déformations (pente C_c) au-delà d'un seuil, la contrainte de préconsolidation (σ'_p). Le déchargement de l'éprouvette permet de déterminer l'indice de décompression (C_s).

Les modifications de température peuvent être appliquées à l'ensemble de l'essai ou seulement au cours d'un palier choisi. Il peut s'agir d'un chauffage, d'un refroidissement ou de plusieurs cycles de variation de température.



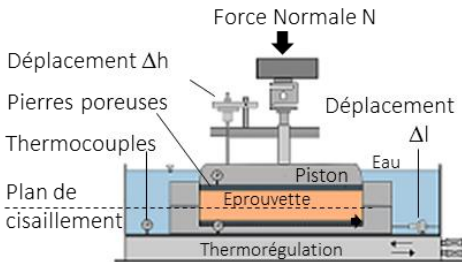
Publications associées : [RI 16] [CI 18] [T 3]

σ'_p : contrainte de préconsolidation (kPa); C_c : indice de compression; C_s : indice de décompression

Essais de cisaillement direct thermo-régulés

Objectif : réaliser des essais de cisaillement régulés en température et évaluer l'effet d'une variation de température sur c la cohésion et φ l'angle de frottement interne.

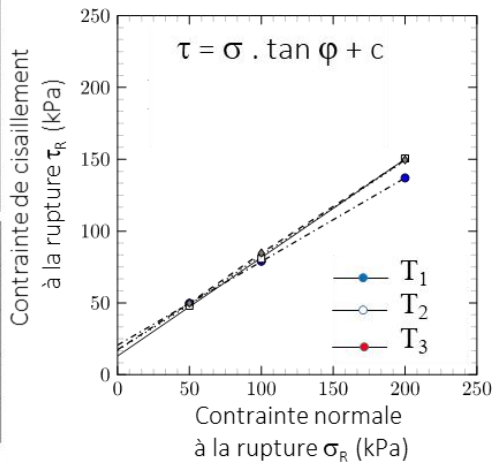
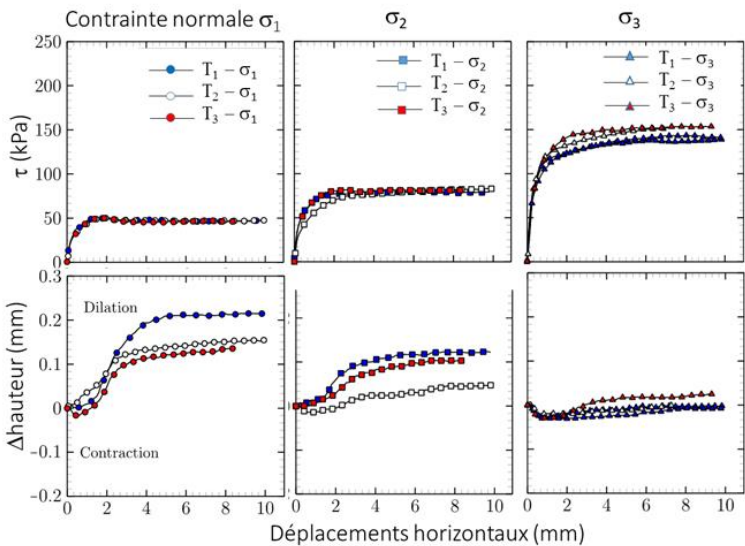
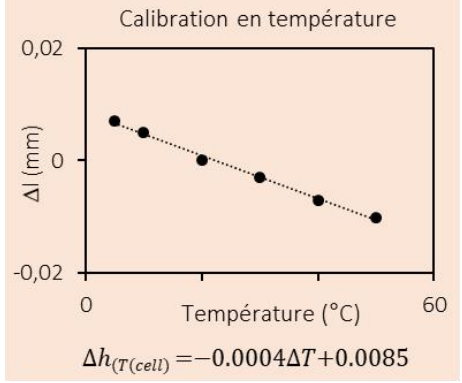
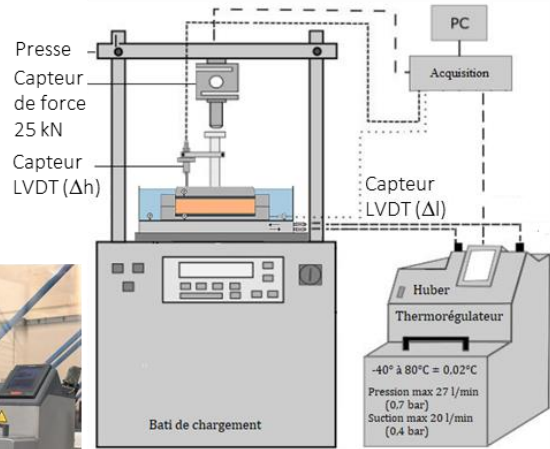
L'éprouvette est placée dans 2 demi-boîtes superposées qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre à une vitesse contrôlée. Le banc de compression exerce un effort normal N constant sur l'éprouvette et sa température est régulée tout au long de l'essai. A tout instant, la force de cisaillement T , la variation de hauteur Δh et le déplacement latéral Δl sont mesurés.



Force Normale N
Déplacement Δh
Pierres poreuses
Thermocouples
Plan de cisaillement
Eau
Déplacement Δl
Piston
Epreuve saturée (60 x 60 x 30 mm³)
Thermorégulation

T (kPa)
 σ_n (kPa)
 T (°C)

L'essai consiste à appliquer une contrainte normale puis modifier la température et enfin cisailier l'éprouvette



La valeur au pic ou à une valeur de déformation donnée est retenue pour chaque essai. La réalisation d'essais sous différentes contraintes normales permet de tracer la droite de Mohr-Coulomb puis de déterminer les paramètres de cisaillement.

$$\sigma_R = \frac{N}{S_R} \quad \tau_R = \frac{T_R}{S_R}$$

φ : angle de frottement (°)
 c : cohésion (kPa)

Publications associées : [RI 16] [T 3]

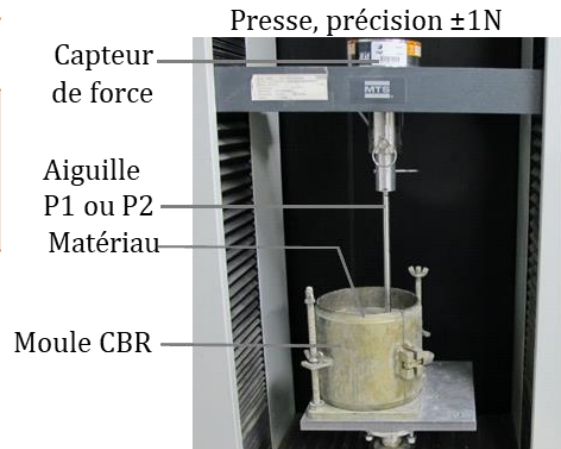
N : Force normale (kN) T : Force de cisaillement (kN) S_R : Section à la rupture

Le mini-pénétromètre, un outil simple de comparaison des sols compactés

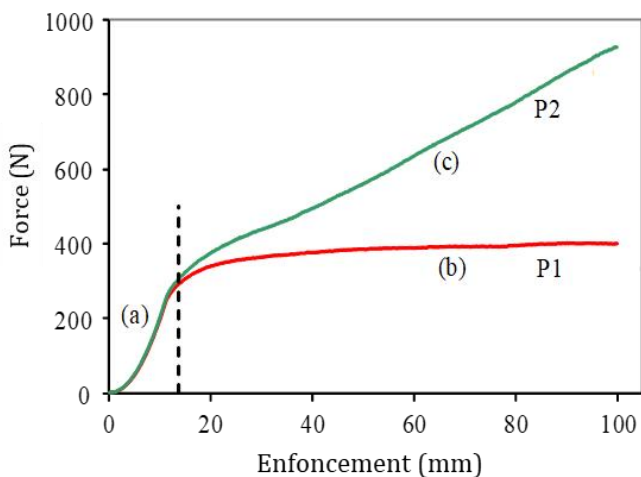
Objectif : réaliser des essais en enfoncement sur des éprouvettes de taille décimétrique, afin de quantifier la résistance en pointe (q_c) et le frottement latéral (f_s)

Matériel :	P1	P2
Diamètre Tige (mm)	10	12
Hauteur (mm)	10,4	10,4
Angle pointe (°)	60	60
Diamètre pointe (mm)	12	12

L'aiguille est enfoncée à la vitesse constante de 30mm/min jusqu'à une profondeur maximale d'investigation qui est de 100 mm. En simultanément, la force nécessaire à l'enfoncement de l'aiguille est mesurée par l'intermédiaire d'un capteur de force.



Calculs des paramètres :



Pour chaque aiguille, l'évolution de la force totale en fonction de la profondeur permet d'observer :

- (a) la pointe de l'aiguille pénètre dans le sol.
- (b) spécifique à P1 : comme le frottement n'existe pas, la variation de résistance est constante pour un sol homogène

-> calcul de la force en pointe $q_c = \frac{Q_c}{\pi R_p^2}$

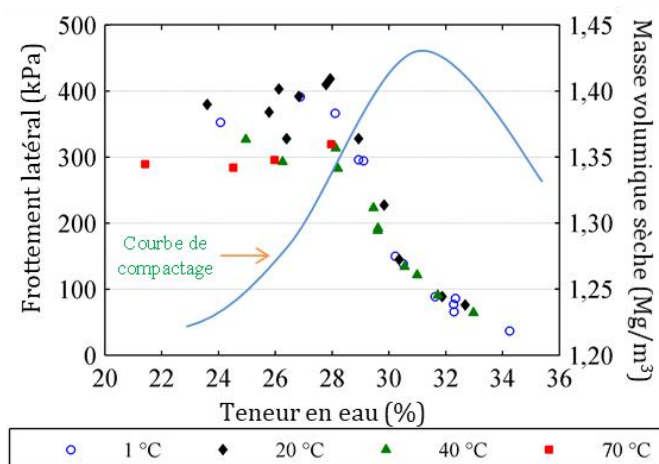
- (c) spécifique à P2 : la force augmente à mesure que l'aiguille pénètre dans le sol à cause des frottements sur le corps de l'aiguille
- > calcul de la contrainte de frottement :

$$f_s = \frac{Q_t - Q_c}{2\pi R_p (L - L_p)}$$

Exemple de résultat :

[T1] : Etude de l'influence de la variation de la température (1 à 70°C) sur des éprouvettes de matériau illitique préparées à différents états initiaux de teneur en eau et de densité sèche.

Les résultats montrent que l'essai mini-pénétrométrique est un essai répétable, reproductible et efficace pour aborder les phénomènes complexes induits par l'utilisation de pieux énergétiques.



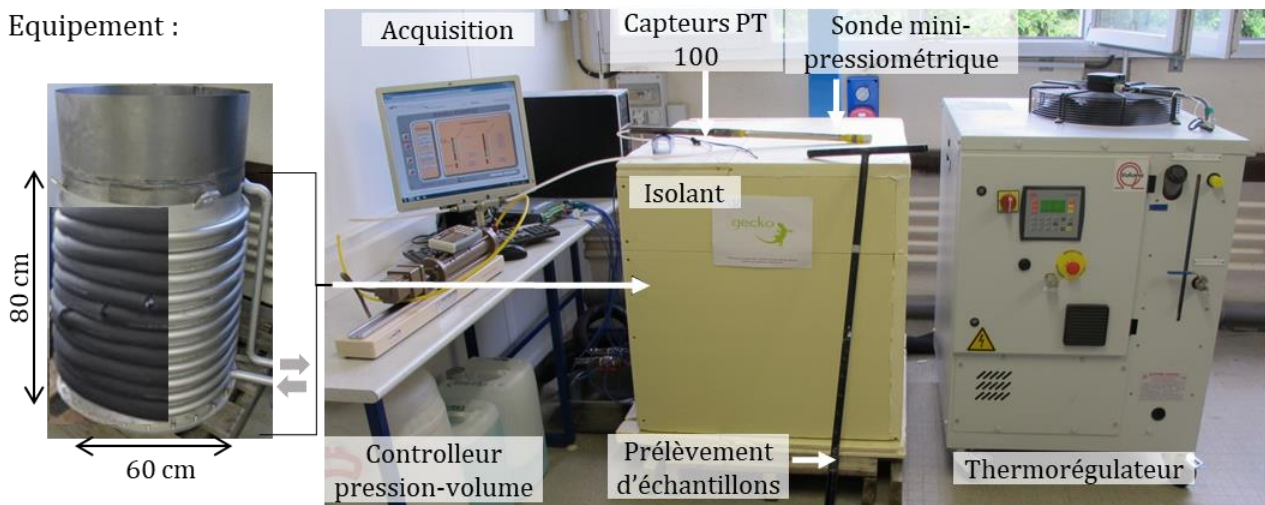
Publications associées : [RI 10] [O2] [CI 10,7] [CN 8] [M 1] [T 1]

Q_c : la force en pointe mesurée par P1 (kN); Q_t : la force totale mesurée par P2 (kN);
 R_p : le rayon maximum de la pointe (m); L : l'enfoncement de l'aiguille (m);
 L_p : la hauteur de la pointe de l'aiguille (m).

Cuve d'essai métrique thermo-régulée pour la réalisation d'essais mini-pressiométrique

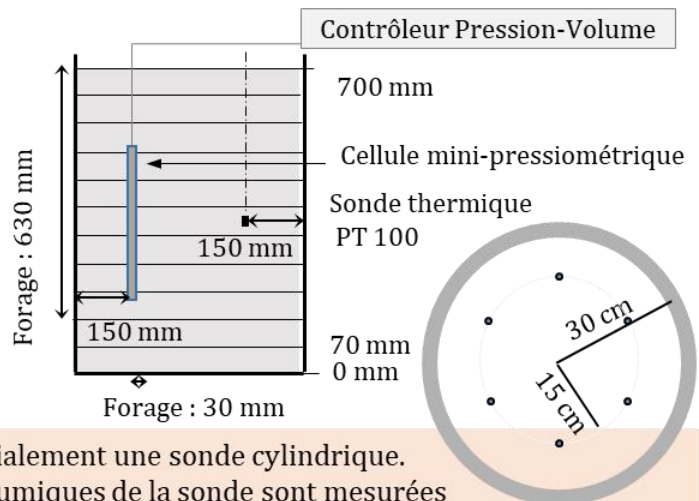
Objectif : Mesurer l'impact d'une variation cyclique de la température sur les paramètres pressiométriques d'un sol compacté

Equipement :



Protocole d'essai :

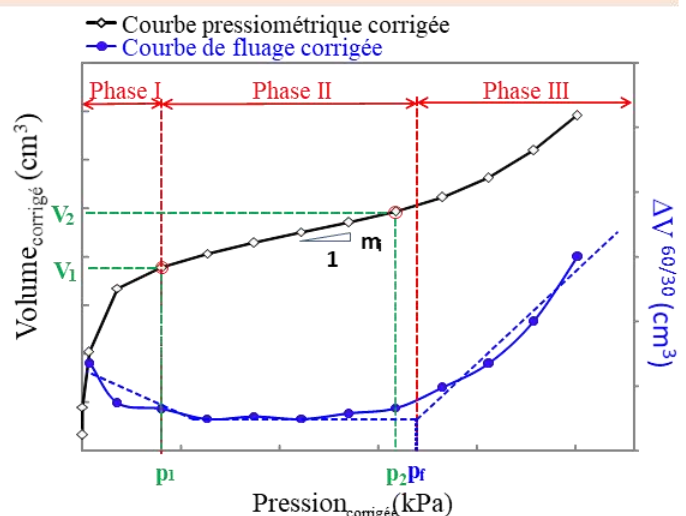
- Humidification d'environ 300 kg de sol
- Compactage dynamique en 11 couches pour un volume final de 600 x 800 mm
- Isolation hydrique et thermique du massif
- Régulation de la température
- Echantillonnage pour la vérification de la teneur en eau et de la densité
- Réalisation de six essais pressiométriques dans chaque cuve



L'essai pressiométrique consiste à dilater radialement une sonde cylindrique. Les pressions appliquées et les variations volumiques de la sonde sont mesurées et enregistrées, afin de déterminer la relation entre la pression appliquée et la déformation du sol

La courbe pressiométrique comprend trois domaines :

- (I) mise en contact de la paroi de la sonde avec le sol,
- (II) augmentation linéaire du volume -> calcul du module pressiométrique E_M
- (III) augmentation importante du volume indiquant que le sol a atteint un état plastique. La pression de fluage, P_f est la limite entre le 2^e et le 3^e domaine de la courbe. La pression limite P_l est la pression mesurée ou extrapolée pour un volume injecté équivalent à deux fois le volume initial de la cavité.

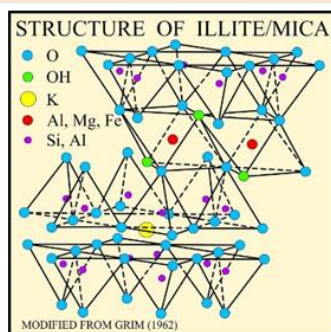


Les campagnes d'essais réalisées ont permis de mettre en évidence et de quantifier la contraction du domaine pseudo-élastique aux températures plus importantes sur plusieurs natures de matériaux. L'impact des cycles chauffage-refroidissement a également été étudié.

Publications associées : [RI 11,14] [O 4] [RN 4] [CI 11-16] [CN 11-14] [RS 4,6-7] [T 2,3]

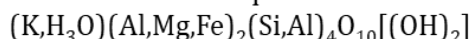
Propriétés du matériau illitique

L'illite est une argile non gonflante que l'on trouve en proportions variables dans de nombreux sols. Ce matériau, nommé Arginotech®, est un produit commercialisé provenant de l'est de l'Allemagne, deux tonnes de matériaux ont été reçues



Ce matériau est principalement constitué d'illite (77%) mais contient également des proportions de calcite et de kaolinite de 12% et 10% ainsi que des traces de quartz et de feldspath. L'illite est une argile non gonflante qui se forme par l'altération de silicates tels que des feldspaths, de la muscovite ou d'autres minéraux argileux.

Formule chimique de l'illite :



Analyse chimique :
% Oxydes

SiO ₂	46
Al ₂ O ₃	20
Fe ₂ O ₃	7
CaO	6
K ₂ O	5,5
MgO	3
Na ₂ O	0,15
TiO ₂	0,80
P ₂ O ₅	0,30
Matière Organique	11

Structure des feuillets de l'illite
(Poppe et al., 2001)

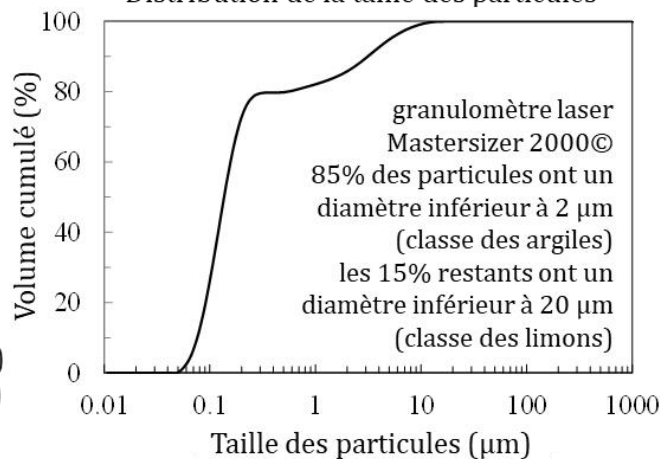
Caractéristiques géotechniques

Limite de liquidité (%)	65
Limite de plasticité (%)	34
Indice de plasticité (%)	31
Teneur en eau optimale (%)	31,3
Masse volumique sèche maximale (Mg/m ³)	1,43

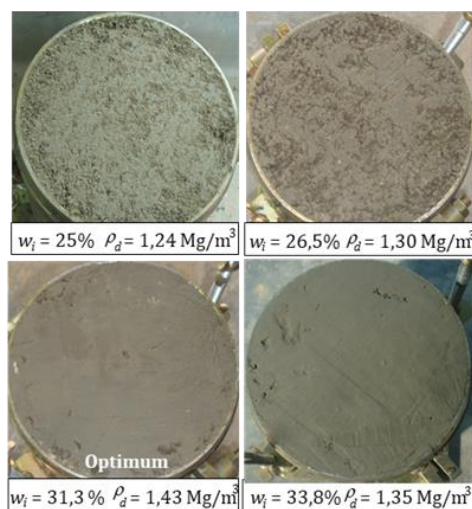
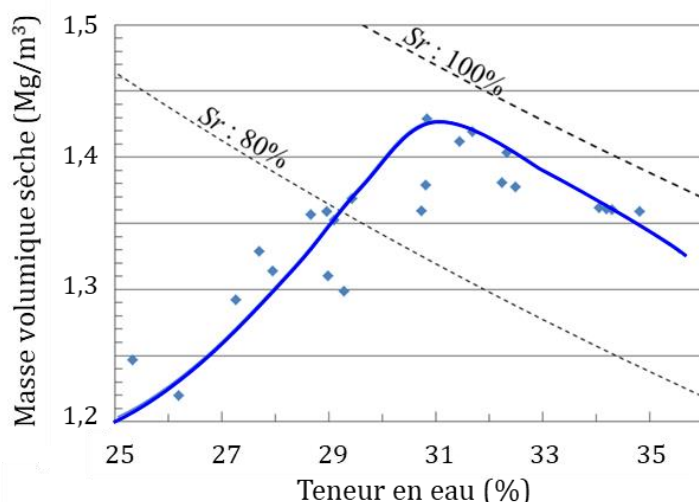
Classé A3 selon la classification du GTR (2000)

Classé MH selon la classification ASTM (USCS)

Distribution de la taille des particules



Courbe de compactage Proctor normal



Publications en lien : [CI 11 à 15] [RI 10 et 11] [T 1] [PD 1]

AFNOR 2009. ISO 13320: Particle size analysis–Laser diffraction methods. 60p.

AFNOR 1993. NF P94-051 - Sols : reconnaissance et essais : Détermination des limites d'Atterberg

AFNOR 1999. NF P94-093 - Sols : Reconnaissance et essais : Essai Proctor Normal - Essai Proctor Modifié.

GTR 2000. Réalisation des remblais et des couches de forme. LCPC, Paris, France.

Limon de Plaisir

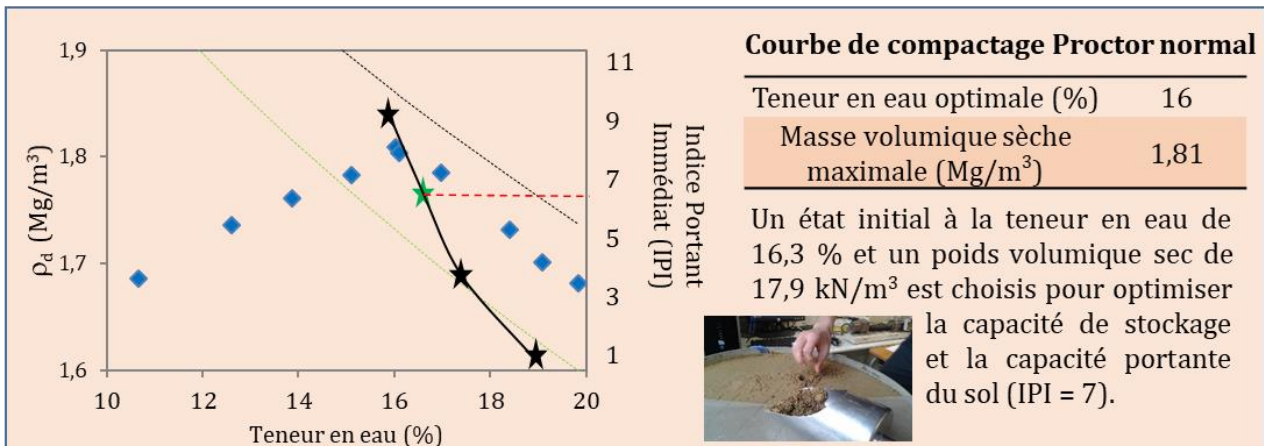
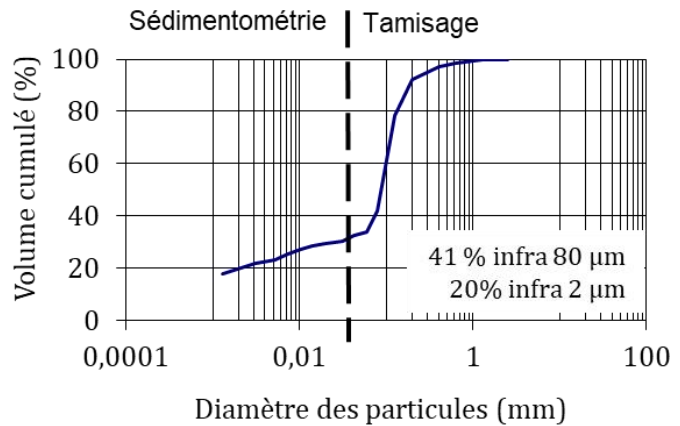
Matériau naturel, prélevé sur chantier, séché (3,7 tonnes), broyé et tamisé à 2 mm puis quarté et stocké en fûts hermétiques.



Caractérisation physico-chimique

Quartz	81%
Minéraux argileux	5%
Teneur en carbonates	0,8
Limite de liquidité (%)	27.3
Limite de plasticité (%)	20.6
Indice de plasticité (%)	6.7
Surface spécifique (m ² /100g)	1,85

GTR (2000) : L,p Limon peu plastique
 ASTM (USCS) : CL, Sandy lean clay



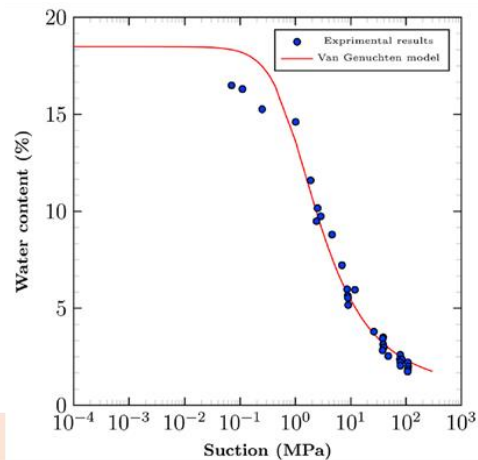
Courbe de rétention d'eau à 20 °C Modèle de Van Genuchten (1980)

$$w = w_r + \frac{(w_{sat} - w_r)}{(1 + (\alpha s)^n)^m}$$

α (m ⁻¹)	n (-)
0,0134	1,52



Mesure de la succion avec le Potentiomètre Decagon WP4C®



Avec : w , w_{sat} et w_r : les teneurs en eau respectivement à la succion s , à l'état saturé et à l'état sec (résiduelle); α : paramètre du modèle lié à la pression d'entrée d'air; m et n : constant du modèle avec $m=1-1/n$.

Publications en lien : [CI 15, 16, 18, 19] [RI 13 à 18] [T2 et 3]

AFNOR. (1996). NF P 94-048: Sols : Reco. et Essais – Détermination de la teneur en carbonate, 11p.
 AFNOR. (1999a). NF EN 933-9: Assessment of fines-Methylene blue test, 12p.
 M.T. van Genuchten (1980). Soil Sci. Soc. Am. J. 44 (5) 892-898.

Le développement de l'utilisation des géostructures équipées d'échangeurs géothermiques est en phase avec la transition énergétique et les préoccupations environnementales. Cependant, les sollicitations thermiques cycliques des sols engendrent de nombreuses questions, car elles pourraient modifier sensiblement la durabilité mécanique et énergétique de ces systèmes. Une étude multicouplée du comportement thermo-hydromécanique s'avère donc nécessaire. Dans ce travail, l'effet des variations cycliques de température sur les paramètres hydromécaniques a été étudié, à l'aide d'une approche expérimentale multiéchelle et multiphysique, afin d'enrichir les modèles prédictifs du comportement THM des géostructures énergétiques.

The increasing use of geostructures equipped with geothermal exchangers is in line with the energy transition and environmental concerns. However, the cyclic thermal solicitations of soils raise many questions, as they may substantially modify the mechanical and energy sustainability of these systems. A multicoupled study of the thermo-hydromechanical behavior is thus necessary. In this work, the effect of cyclic temperature variations on the hydromechanical parameters was studied. A multi-scale and multiphysics experimental approach is employed to improve the predictive models of the THM behavior of energetic geostructures.