N°d'ordre NNT : 2017LYSET007

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
l'École Nationale des Travaux Publics de l'État

LGCB-LTDS UMR 5513

Ecole Doctorale N°162
MEGA (Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique)
Spécialité : Génie Civil

Soutenue publiquement le 19/09/2017, par

Florian CHAMPIRE

Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction

---

devant le jury composé de

Jean-Claude Morel	Professeur	Coventry University, UK	Président
Teddy Fen-Chong	DR	IFSTTAR Marne la vallée	Rapporteur
Domenico Gallipoli	Professeur	Université de Pau	Rapporteur
Julia Mainka	Maître de conférence	Université de Lorraine	Examinatrice
Mathilde Morvan	Maître de conférence	Université Blaise-Pascal	Examinatrice
Antonin Fabbri	Chargé de recherche, HDR	ENTPE	Directeur
Henry Wong	DR	ENTPE	Directeur

Table des matières

Résumé **5**

Abstract **7**

Nomenclature **9**

Publications **11**

1 La terre comme matériau de construction **21**
1 Constructions en terre 22
2 Pourquoi construire en terre de nos jours ? 30
3 Comportement mécanique de la terre crue compactée 34
4 Conclusion : présentation de l'objet d'étude de la thèse 44

2 Caractérisation des terres étudiées et réalisation des échantillons **47**
1 Caractérisation du matériau étudié 48
2 Fabrication des échantillons 58
3 Conditionnement des échantillons 63

3 Développement d'une cellule triaxiale à hygrométrie contrôlée **65**
1 Présentation de la cellule triaxiale 66
2 Instrumentation de l'échantillon 68
3 Protocole de mise en place de l'échantillon et son instrumentation . . . 74
4 Régulation de la cellule 75
5 Validation du dispositif expérimental 79

4 Essais triaxiaux **83**
1 Variables et caractéristiques de chargement 84
2 Résultats et discussion 87

5 Essais de gonflement et leur exploitation numérique **103**
1 Estimation de l'état hydrique de l'échantillon 105
2 Essais à la coupelle sèche : perméabilité à la vapeur 110
3 Essais à écoulement forcé : perméabilité intrinsèque 114

4 Essais de gonflement sous gradient hygroscopique 115
5 Modélisation des transferts hydriques et loi de gonflement 121

6 Essais de compression simple **131**
1 Description des échantillons 132
2 Mesure de déformations par corrélation d'images 135
3 Description des essais et résultats 139
4 Comparaison avec les essais triaxiaux 143

Conclusion générale **147**

Annexes **151**

A Plans détaillés des pièces usinées **153**

B Résultats détaillés des essais triaxiaux **167**

C Note de calculs **179**

D Protocole détaillé de réalisation des BTC **181**

Références **181**

Résumé

Le matériau terre peut apporter une réponse face aux problèmes que les constructions modernes rencontrent en termes d'enjeux sociétaux, économiques et écologiques. Cependant, les difficultés à comprendre et à prédire son comportement représente un obstacle au développement de cette technique dans les pays développés. Cette thèse s'insère dans un projet de recherche appelé « Primaterre » et financé par l'Agence Nationale de la Recherche française (ANR). Il vise à apporter les connaissances scientifiques nécessaires afin de pallier ce manque et aider à établir des règlementations adaptées. Ce travail s'intéresse plus particulièrement à l'impact de l'eau sur le comportement mécanique de la matrice fine du matériau, qui a un impact essentiel sur le comportement du matériau dans son ensemble. Cette matrice est constituée de sables, de limons, et d'argiles, et ce sur trois types de terres prélevées sur d'anciennes constructions en pisé.

Afin de réaliser des échantillons les plus identiques et homogènes possible, un moule a tout d'abord été conçu, ce qui a permis de travailler avec des échantillons cylindriques de 3,5cm de diamètre et 7cm de hauteur. Une cellule triaxiale a été utilisée et, la seconde étape a été de concevoir les dispositifs permettant la mesure des déformations axiales et radiales, le conditionnement à température contrôlée et l'imposition d'un flux d'air humide variable de part et d'autre de l'échantillon. Différents types d'essais ont alors pu être réalisés : des essais triaxiaux à différent taux d'humidité relative ainsi que des essais de gonflement. Les paramètres mécaniques obtenus ont pu être analysés à la lumière des caractéristiques matériaux mesurées en parallèle. Enfin, l'analyse des essais de gonflement a été menée à bien à l'aide d'un modèle numérique, et ce afin de pouvoir évaluer des paramètres caractéristiques plus complexes.

Ce travail de thèse se conclut par une étude supplémentaire, visant à évaluer l'impact du changement de taille d'échantillon sur les paramètres mécaniques mesurés précédemment. Ces essais ont été effectués sur des échantillons approximativement deux fois plus grands, et grâce à un dispositif expérimental plus simple, utilisant la mesure par corrélation d'images.

Abstract

Experimental study of the hydro-mechanical behaviour of compacted earthen material for construction

Earthen buildings can provide an answer to face difficulties in modern constructions in both terms of sociology, economics as well as ecology. However, the difficulty to understand and to predict their behavior prevent the spreading of this technique in developed countries. This PhD is part of a research program called "Primaterre" and founded by the French National Agency for Research (ANR). It aims at providing the necessary scientific knowledge to overcome this lack and at helping the creation of appropriate standards. This work is more precisely focusing on the impact of water on the mechanical behavior of the fine proportion of the material, including sand, silt and clay, and on three different earths coming from existing rammed earth constructions.

In order to be able to produce samples as identical and homogeneous as possible, a mold has first been designed, which enable to manufacture cylindrical samples with a diameter of 3.5cm and a height of 7cm. A triaxial cell was used and, the second step was to design different devices allowing the measurement of axial and radial deformations, conditioning at constant temperature, and the command of a variable moist air flux at both sides of the sample. Different types of tests have thus been realized : triaxial tests at different relative humidity, as well as swelling tests. The mechanical parameters thus obtained have been analyzed in comparison with material characteristics measured in parallel. Finally, results of swelling tests have been analysed using numerical modelling, in order to assess more complex material parameters.

This thesis work ends with an additional study, aiming at evaluating the impact of scale change on the mechanical parameters previously measured. Tests have been conducted on sample approximatively twice larger, and thanks to a simpler experimental device using measurement through image correlation.

Nomenclature

Symboles

∇	-	symbole nabla
$\underline{X}$	-	vecteur X

Notations latines

c	Pa	cohésion
d_{SCi}	m	distance entre le capteur sans contact SCi (i=1,...4) et sa cible
D	$m^2.s^{-1}$	coefficient de diffusion de la vapeur
D_{brut}	$m^2.s^{-1}$	coefficient de diffusion de la vapeur sans correction
D_{lame}	$m^2.s^{-1}$	coefficient de diffusion de la vapeur avec correction lame d'air
D_β	$m^2.s^{-1}$	coefficient de diffusion de la vapeur avec correction β
e	m	épaisseur de l'échantillon
e_a	m	épaisseur de la lame d'air
m_I	$kg.m^{-3}$	masse de I par unité de volume élémentaire
$\dot{m}_{\rightarrow V}$	$kg.m^{-3}.s^{-1}$	masse d'eau crée par unité de volume par unité de temps due au phénomène de changement de phase
E	Pa	module d'Young
g	$m.s^{-2}$	accélération de la pesanteur
H	m	hauteur de l'échantillon
I_P	%	indice de plasticité
k	m^2	perméabilité intrinsèque
k_{rG}	-	perméabilité relative au gaz
M_{H_2O}	$g.mol^{-1}$	masse molaire de l'eau
p	Pa	pression de confinement
p_C	Pa	pression capillaire
p_G	Pa	pression de gaz
p_L	Pa	pression liquide
p_V	Pa	pression partielle de vapeur
p_V^{sat}	Pa	pression de vapeur saturante
p_{atm}	Pa	pression atmosphérique
q	Pa	contrainte déviatorique

q_{max}	Pa	contrainte déviatorique max, résistance à la compression
Q	$ml.min^{-1}$	débit d'air entrant
r	m	rayon du tube capillaire
R	$J.mol^{-1}.K^{-1}$	constante des gaz parfaits
S	m	section de l'échantillon
S_0	m	section initiale de l'échantillon
S_r	-	degré de saturation
S_{res}	-	saturation résiduelle
T	K	température
w_L	$kg.kg^{-1}$	teneur en eau massique
w_{res}	$kg.kg^{-1}$	teneur en eau résiduelle
W_L	%	limite de liquidité
W_P	%	limite de plasticité

Notations grecques

δ_a	$kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$	résistance à la diffusion de la vapeur dans l'air
η_G	$m.s^{-2}$	viscosité dynamique du gaz
ε_r	def	déformation radiale
ε_{res}	def	déformation résiduelle
ε_v	def	déformation volumique
ε_z	def	déformation axiale
$\varepsilon_{zz}^{q_{max}}$	def	déformation axiale à la rupture
ϕ	-	porosité totale
ϕ_G	-	porosité occupée par le gaz
ϕ_L	-	porosité occupée par l'eau liquide
φ	-	humidité relative
φ_e	-	humidité relative d'entrée
φ_s	-	humidité relative de sortie
φ_{int}	$^\circ$	angle de frottement interne
γ	$N.m^{-1}$	tension de surface de l'eau
λ	-	paramètre de Corey
ν	-	coefficient de Poisson
ρ_d	$kg.m^{-3}$	densité sèche
ρ_L	$kg.m^{-3}$	masse volumique de l'eau
ρ_V	$kg.m^{-3}$	masse volumique de la vapeur d'eau
σ_z	Pa	contrainte axiale
τ	Pa	contrainte de cisaillement

Publications

Publications dans des journaux scientifiques

2016 *Construction and Building Materials*
Champiré, F., Fabbri, A., Morel, J.-C., Wong, H., McGregor, F.
Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material.

Contributions à des conférences internationales avec actes

2014 *40th IAHS World Congress on Housing, Funchal, Madeira*
Champiré, F., Fabbri, A., Morel, J.-C., Wong, H.
Experimental identification of key mechanical parameters of earth materials.

2017 *2nd International Conference on Bio-Based Building Materials ICBBM EcoGraphi, Clermont-Ferrand, France*
Fabbri, A., Champiré, F., Xu, L., Soudani, L., Wong, H., McGregor, F., Branque, D.
Experimental investigation and modelling of the hydromechanical behavior of compacted earth.

2017 *6th Biot Conference on Poromechanics, Paris, France*
Xu, L., Champiré, F., Fabbri, A., Wong, H., Branque, D.
Hydro-mechanical triaxial behaviour of compacted earth at different temperatures .

2017 *6th Biot Conference on Poromechanics, Paris, France*
Fabbri, A., Champiré, F., Soudani, L., McGregor, F., Wong, H.
Poromechanics of compacted earth for building applications.

Participation à des workshops internationaux

2014 *Forum franco-suisse de l'innovation pour la transition énergétique dans le bâtiment, Lyon, France*
Champiré, F., Soudani, L., Fabbri, A., Morel, J.-C., Woloszyn, M., Wong, H.
Poster : « Le pisé, un atout pour la transition énergétique dans le bâtiment »

Prix du jury pour le meilleur poster.

Participation à des workshops nationaux

Mars 2015 *Rencontres interdisciplinaires doctorales de l'architecture et de l'aménagement durable, Lyon, France.*
Étude du comportement hygro-mécanique du matériau terre - Application aux constructions en pisé.

Table des figures

1.1 Constructions en terre dans le monde ; (a) Ville de Shibam, Yémen ; (b) Grande Muraille de Chine, Chine ; (c) Pyramide du Soleil à Teotihuacan, Mexique ; (d) Grande Mosquée de Djenné, Mali ; (e) Citadelle de Bam, Iran. 23
1.2 Types de constructions en terre en Europe. 24
1.3 Différents types de soubassements : (a) galets ; (b) pierres ; (c) béton. . 24
1.4 Différents joints en chaux : (a) traditionnel sous forme horizontale ou en biais, d'après [9] ; (b) dans le coin d'une construction moderne à St-Antoine-L'Abbaye. 25
1.5 Comparaison entre les outils traditionnels et modernes utilisés dans la construction en pisé [13]. 25
1.6 Coffrage métallique et ses équipements, d'après N. Meunier. 26
1.7 (a) Dame manuelle en bois ; (b) Dame pneumatique avec un sabot en bois. 26
1.8 Presse CINVA RAM, Paraguay ; un mur en BTC, d'après [38]. 27
1.9 Maison construite avec des BTC (dont la tour est en pisé) en Rhône-Alpes, France. 28
1.10 (a) La technique du torchis illustrée ; (b) Une construction en torchis à Angers, France. 29
1.11 Un mur en bauge en construction en France. 30
1.12 Contribution des déchêts pour les différentes étapes d'un bâtiment pour un total de 37 millions de tonnes pour l'année 1999, d'après l'ADEME dans [9]. 31
1.13 La faible énergie grise des constructions en terre, d'après [13]. 32
1.14 Emission de gaz à effet de serre pour différentes méthodes de construction, d'après [17]. 33
1.15 Représentation des trois échelles utilisées par Bui [9]. 35
1.16 Isotherme de sorption/désorption avec l'état de saturation des pores. . 37
1.17 Illustration des forces appliquées à la surface d'une molécule d'eau en surface. 39
1.18 Illustration des phénomènes de remontée capillaire. 39
1.19 Ménisque capillaire dans le cas de grains sphériques. 40
1.20 Résultats d'essais triaxiaux à succion constante sur un limon non saturé dans le plan déviateur / déformations axiales, d'après [7]. 41

1.21 Représentation schématique des unités de la microstructure des argiles, schéma réalisé à partir des données de [46]. 43
1.22 Photographies au MEB du mélange sable Hostun + kaolinite à différentes teneurs (5% (a), 10% (b), 15% (c) et 20% (d) en masse), d'après [26]. 43
1.23 Photographies au MEB du mélange sable Hostun + kaolinite, zoom sur le ménisque formé par les particules d'argile, d'après [26]. 44

2.1 Lieux d'extraction des différentes terres. 48
2.2 Courbes granulométriques des matériaux prélevés et leur comparaison avec les bornes supérieure et inférieure des normes BS1377, MOPT et AFNOR. 49
2.3 Courbes granulométriques des matériaux étudiés après tamisage à 2mm et leur comparaison avec les bornes supérieure et inférieure des normes BS1377, MOPT et AFNOR. 50
2.4 Confrontation des indices de plasticité et de liquidité avec différentes normes. 51
2.5 Isothermes de sorption à 23°C des matériaux étudiés, mesurées avec les solutions salines. 54
2.6 Schéma récapitulatif du fonctionnement du DVS. 55
2.7 Isothermes de sorption à 23°C des matériaux étudiés, mesurées avec le DVS. 56
2.8 Isothermes de sorption à 23°C des matériaux étudiés, mesurées avec le DVS, avec la correction de la masse sèche. 57
2.9 Isothermes de sorption à 23°C des matériaux étudiés, mesurées avec les solutions salines et le DVS avec la correction de la masse sèche. . . 57
2.10 Différence des isothermes de sorption à 23°C et 30°C des matériaux étudiés, mesurées avec le DVS. 58
2.11 Résultats de la détermination des optima Proctor pour les terres CRA et STR. 59
2.12 Vue éclatée du moule et des différents composants. 60
2.13 Photo du moule et ses composants. 60
2.14 Méthodologie de remplissage du moule. 61
2.15 Protocole de compactage. 62
2.16 Comparaison de l'homogénéité entre les deux protocoles de réalisation des échantillons pour la terre CRA ; mesures de la variation de la densité sur la hauteur de l'échantillon, pour les trois terres étudiées. . 63

3.1 Schéma de la cellule triaxiale. 66
3.2 Schéma des cas types de désalignement. 67
3.3 Schéma du système conventionnel et de la rotule. 68
3.4 Photo de la rotule utilisée. 68
3.5 Schéma éclaté des éléments du porte-capteur. 69

3.6 Schéma zoomé sur le dispositif permettant le positionnement du capteur radial. 71
3.7 Photo de la cible placée sur l'élément en plastique et de la vis micrométrique pour l'étalonnage des capteurs sans contact radiaux. 71
3.8 Schématisation de montage des capteurs sans contact pour la mesure des déformations axiales et radiales, d'après [30]. 72
3.9 Schéma du dispositif de placement et de maintien des capteurs pour la mesure des déformations axiales. 72
3.10 Photo de la cible et de la vis micrométrique pour l'étalonnage des capteurs sans contact axiaux. 74
3.11 Protocole de mise en place des cibles et de la membrane autour de l'échantillon. 75
3.12 Schéma éclaté de l'échantillon et de ses accessoires : pierres poreuses, cibles, membrane, joints toriques, chapeau. 76
3.13 Photographies des deux types de porte suivant la durée des essais : (a) porte rigide en plexiglas ; (b) bâche en plastique. 77
3.14 Description des différentes configurations du système hydraulique. . . . 79
3.15 Impact de l'élancement sur le comportement mécanique. 80
3.16 Mesure de la contrainte et de la déformation radiale en fonction de la déformation axiale sur un échantillon étalon de plexiglas. 81

4.1 Vues de face et du dessus de l'essai triaxial. 84
4.2 Les deux types de chargement dans le plan contraintes / déformations. 86
4.3 Résultats d'essais en contraintes/déformations axiales et déformations volumiques/déformations axiales pour les échantillons ALX à 30°C et 1bar. 88
4.4 Résultats d'essais en contraintes/déformations axiales et déformations volumiques/déformations axiales pour les échantillons CRA à 30°C et 1bar. 89
4.5 Résistance à la compression en fonction de l'humidité relative et de la teneur en eau, pour chacune des terres étudiées, et chaque pression de confinement. 91
4.6 Module d'Young en fonction de la l'humidité relative et de la teneur en eau évalués lors de la décharge et la recharge à 20%. 93
4.7 Valeurs de l'angle de frottement et la cohésion pour chaque terre et chaque humidité relative. 97
4.8 Évolution du module d'Young, du coefficient de Poisson et des déformations résiduelles en fonction du niveau de chargement pour la terre ALX. 98
4.9 Évolution du module d'Young, du coefficient de Poisson et des déformations résiduelles en fonction du niveau de chargement pour les terres CRA et STR. 100
4.10 Cercles de Mohr et droites de Mohr Coulomb. 101

5.1 Photo des boîtes utilisées pour mesurer le coefficient de diffusion à la vapeur D. . . . 111
5.2 Variation de masse en fonction du temps des coupelles sèches pour les terres ALX, CRA et STR pour des épaisseurs d'échantillon de 1,4 cm et 2,4 cm. . . . 112
5.3 Détermination graphique de la correction beta à appliquer, pour chaque terre. . . . 113
5.4 Schéma du flux traversant et les termes employés pour la description des résultats. . . . 115
5.5 Évolution de l'humidité relative et de la pression en entrée et en sortie de l'échantillon CRA 25 au cours du temps. . . . 117
5.6 Évolution des déplacements moyens mesurés par les capteurs axiaux et radiaux lors de l'essai sur l'échantillon CRA 25. <dL> est la moyenne des déplacements mesurés par les capteurs axiaux SC1 et SC2. <dU> est la moyenne des déplacements mesurés par les capteurs axiaux SC3 et SC4. <dR> est la moyenne des déplacements des capteurs radiaux SC5, SC6 et SC7. . . . 118
5.7 Évolution de la température au cours du temps dans la cellule pour l'essai de gonflement de CRA25. . . . 119
5.8 Évolution des déformations axiales et radiales de l'échantillon CRA 25 au cours du temps. . . . 119
5.9 Évolution de l'humidité relative et de la pression en entrée et en sortie de l'échantillon STR 15 au cours du temps. . . . 121
5.10 Évolution des déplacements moyens mesurés par les capteurs axiaux et radiaux lors de l'essai sur l'échantillon STR 15. <dL> est la moyenne des déplacements mesurés par les capteurs axiaux SC1 et 2. <dU> est la moyenne des déplacements mesurés par les capteurs axiaux SC3 et 4. <dR> est la moyenne des déplacements des capteurs radiaux SC5, SC6 et SC7. . . . 122
5.11 Évolution des déformations axiales et radiales de l'échantillon STR 15 au cours du temps. . . . 122
5.12 Représentation de l'essai du flux traversant avec sa modélisation sur COMSOL. . . . 123
5.13 Évolution des pressions et de l'humidité relative en entrée et en sortie de l'échantillon CRA 25 au cours du temps, mesurées et calculées numériquement. . . . 125
5.14 Évolution de l'humidité relative en entrée et en sortie de l'échantillon CRA 26 et CRA 27 respectivement au cours du temps, mesurée et calculée numériquement. . . . 126
5.15 Évolution de l'humidité relative en entrée et en sortie de l'échantillon STR au cours du temps, mesurée et calculée numériquement. . . . 127
5.16 Déformation volumique en fonction de l'humidité relative et de la teneur en eau dans le tiers central des échantillons de CRA 25, 26 et 27 ainsi que STR. . . . 128

6.1 BTC et ses échantillons cylindriques. 134
6.2 Principe de réalisation des échantillons cylindriques sur BTC. 134
6.3 Schéma de l'agencement géométrique des caméras. 135
6.4 Photo de l'agencement géométrique des caméras. 136
6.5 Outils nécessaires au mouchetis et à la calibration pour la corrélation d'images. 137
6.6 Mouchetis à la surface de l'échantillon à gauche, maillage défini par Vic-3D à droite. 137
6.7 Image prise par chaque caméra et la corrélation d'images pour chaque système donnant le champ de déplacement vertical à 1MPa sur un échantillon de STR équilibré à 75%HR. 138
6.8 Comparaison entre les déformations axiales mesurées par les extensomètres et ceux déduites de la corrélation d'images. 138
6.9 Évolution de la contrainte axiale (A) et la déformation volumique (B) pour STR et les écarts-types respectifs calculés sur 3 échantillons. "q_{max}" correspond au point où la contrainte maximum est atteinte, et "$\varepsilon_{v,max}$" correspond au point où la déformation volumique maximum est atteinte. 140
6.10 Évolution de la contrainte axiale (A) et la déformation volumique (B) pour CRA et les écarts-types respectifs calculés sur 3 échantillons. "q_{max}" correspond au point où la contrainte maximum est atteinte, et "$\varepsilon_{v,max}$" correspond au point où la déformation volumique maximum est atteinte. 140
6.11 Évolution de la contrainte axiale (A) et la déformation volumique (B) pour ALX et les écarts-types respectifs calculés sur 3 échantillons. "q_{max}" correspond au point où la contrainte maximum est atteinte, et "$\varepsilon_{v,max}$" correspond au point où la déformation volumique maximum est atteinte. 141
6.12 Évolution de la contrainte axiale (A) et la déformation volumique (B) en fonction de la déformation axiale pendant les cycles de chargement/déchargement pour STR à 25%HR. 141
6.13 Évolution de la contrainte axiale (A) et la déformation volumique (B) en fonction de la déformation axiale pendant les cycles de chargement/déchargement pour CRA à 25%HR. 142
6.14 Modules d'Young (en haut) et déformations résiduelles (en bas) en fonction du niveau de chargement. "ε_{res}" correspond à la déformation résiduelle à la fin du déchargement. 142
6.15 Résistance à la compression en fonction du module d'Young évalué pendant le premier cycle. 143
6.16 Variations de la résistance à la compression (A) et du module d'Young (B) évalués pendant le premier cycle (20% de q_{max} en fonction de l'humidité relative. 144

6.17 (1) état actuel du porte-capteur avec 1,4 mm entre les cales et le porte cible et de 2 mm entre les cibles et les montants (2) situation après alésage de 1 mm sur les cales et de 2 mm sur les montants. 149

D.1 Protocole pour obtenir l'optimum BTC. 182
D.2 Détermination de l'optimum BTC pour la terre STR : évolution de la densité sèche en fonction de la teneur en eau de fabrication. 183

Liste des tableaux

1.1 Consommation énergétique de différents types de construction, d'après [42]. 33
1.2 Résultats des études présentées sur le matériau terre (* : valeurs corrigées du fait du faible élancement). 34
1.3 Résultats de Bui [9] obtenus sur un mur, suivant l'orientation par rapport aux lits de compactage. 35
1.4 Résultats de Bui obtenus après homogénéisation sur des blocs de terre compactée, suivant l'orientation par rapport aux lits de compactage. . 36
1.5 Résultats obtenus sur des éprouvettes cylindriques Proctor par [39]. . . 38

2.1 Répartition granulométrique des terres étudiées, d'après la classification de la norme NF P18-560. 50
2.2 Résultats des mesures de limites d'Atterberg et de valeurs au bleu pour les terres étudiées. 52
2.3 Résultats de la détermination des classifications des sols avant et après tamisage, pour les terres étudiées, d'après la classification GTR. 53
2.4 Correspondance entre les solutions salines et l'humidité relative à 20°C. 54
2.5 Comparaison des masses sèches des échantillons utilisés pour déterminer l'isotherme de sorption/désorption à 23°C, données par le DVS et le séchage à 105°C, ainsi que les teneurs en eau résiduelles. 56
2.6 Caractéristiques des optimum BTC de terres tamisées à 10mm. 59
2.7 Tableau récapitulatif de la répartition de densité des échantillons réalisés : densité moyenne et écart maximal à la moyenne. 64

3.1 Récapitulatif des caractéristiques du générateur d'air humide WetSys. 78
3.2 Coefficient de Poisson et module d'Young obtenus lors des différents cycles sur l'échantillon étalon de plexiglas. 80

4.1 Tableau récapitulatif des échantillons de la terre ALX. 87
4.2 Tableau récapitulatif des échantillons des terres CRA et STR. 88
4.3 Comparaison de l'influence de la température sur la résistance à la compression, le module d'Young et la déformation axiale à la rupture pour les échantillons de la terre CRA en désorption. 92

4.4 Comparaison de l'influence de la sorption sur la teneur en eau, la résistance à la compression, le module d'Young et la déformation axiale à la rupture pour les échantillons de la terre CRA, à 21°C. 94

5.1 Tableau des valeurs brutes de D et corrigées pour les terres ALX, CRA et STR pour les échantillons de 1,4 cm et 2,4 cm. 114
5.2 Tableau récapitulatif des paramètres d'entrée pour chacune des terres. 124

6.1 Caractéristiques des optimum BTC de terre tamisée à 10mm. 133
6.2 Caractéristiques du système optique. 136
6.3 Récapitulatif des résultats obtenus avec les essais triaxiaux (1bar) et les essais de compression simple, déformation résiduelle (mdef) et module d'Young (MPa). 144
6.4 Récapitulatif des résistances à la compression (MPa) déduites des essais triaxiaux (1bar) et celles obtenues avec les essais de compression simple. 145

D.1 Densité sèche des BTC réalisés pour la terre STR. 181

Chapitre 1

La terre comme matériau de construction

Contents

1 Constructions en terre 22
1.1 Pisé 22
1.1.1 Une technique de construction historique en Rhône-Alpes 22
1.1.2 Comment construire en pisé ? 23
1.2 Blocs de Terre Compactée 27
1.2.1 Une technique répandue 27
1.2.2 Fabrication des blocs de terre 28
1.3 Autres techniques 29
2 Pourquoi construire en terre de nos jours ? 30
2.1 Impact environnemental des constructions 30
2.2 Faible énergie grise des constructions en terre 32
3 Comportement mécanique de la terre crue compactée . 34
3.1 Mesure de la résistance du matériau 34
3.2 Impact de l'eau sur le comportement mécanique 36
3.2.1 Équilibre capillaire de l'eau liquide et de la vapeur 38
3.2.2 Rôle des argiles 42
4 Conclusion : présentation de l'objet d'étude de la thèse 44

Cette thèse a été financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au travers du projet "Primaterre", dont l'un des objectifs majeurs est de fournir des moyens de mesure permettant de garantir les performances (hygro)thermiques et mécaniques des constructions en terre crue. Dans ce contexte général, ce travail de thèse se concentre sur le comportement hydro-mécanique à l'échelle du matériau. En préambule à la présentation de mes travaux de thèse, il convient de définir le terme "construction en terre crue".

1 Constructions en terre

Partout dans le monde et à travers les siècles, les matériaux de construction directement disponibles ont été utilisés pour construire des maisons et des abris. Dans les climats chauds-arides et tempérés, le matériau de construction le plus répandu a été la terre. De nos jours, près d'un tiers de la population mondiale vit dans des maisons en terre et ce nombre atteint même plus de la moitié dans les pays en voie de développement [21][38].

Des exemples d'architectures remarquables en terre sont présents sur tous les continents (voir Figure 1.1). La citadelle de Bam en Iran compte des parties de plus de 2500 ans ; la grande mosquée de Djenné au Mali est le plus grand édifice en terre ; la grande Muraille de Chine, vieille de 4000 ans, était à l'origine construite en terre mais fut ensuite couverte de pierres ; la pyramide du Soleil, à Teotihuacan au Mexique fut construite en terre crue aux alentours de 200 avant J-C ; la ville de Shibam au Yémen, qui s'étend sur près de 20 000 m^2, date du 15ème siècle.

Les constructions en terre sont diverses : la terre fournit des matériaux de compositions différentes suivant les régions, et les techniques de construction ont évoluées pendant des milliers d'années. Chaque technique diffère en fonction de la composition de la terre utilisée, de la méthode de compactage, de la teneur en eau de fabrication, et du processus de séchage. Les principales méthodes utilisées sont reportées sur la carte de l'Europe dans la Figure 1.2 et détaillées dans les parties suivantes.

1.1 Pisé

Le pisé est une technique qui consiste à damer des couches successives de terre crue à l'intérieur d'un coffrage. Il en résulte une superposition de couches, placées entre un soubassement et un grand toit.

1.1.1 Une technique de construction historique en Rhône-Alpes

La technique du pisé apparait récente en comparaison avec les autres techniques courantes de constructions en terre. Le premier cas répertorié semble avoir été à Carthage en Tunisie autour de l'an 814 avant J-C. Cette technique s'est ensuite répandue dans le bassin méditerranéen et a atteint l'Europe à travers l'Espagne à partir du 8ème siècle [5]. En France, la région Rhône-Alpes est celle où le pisé est le

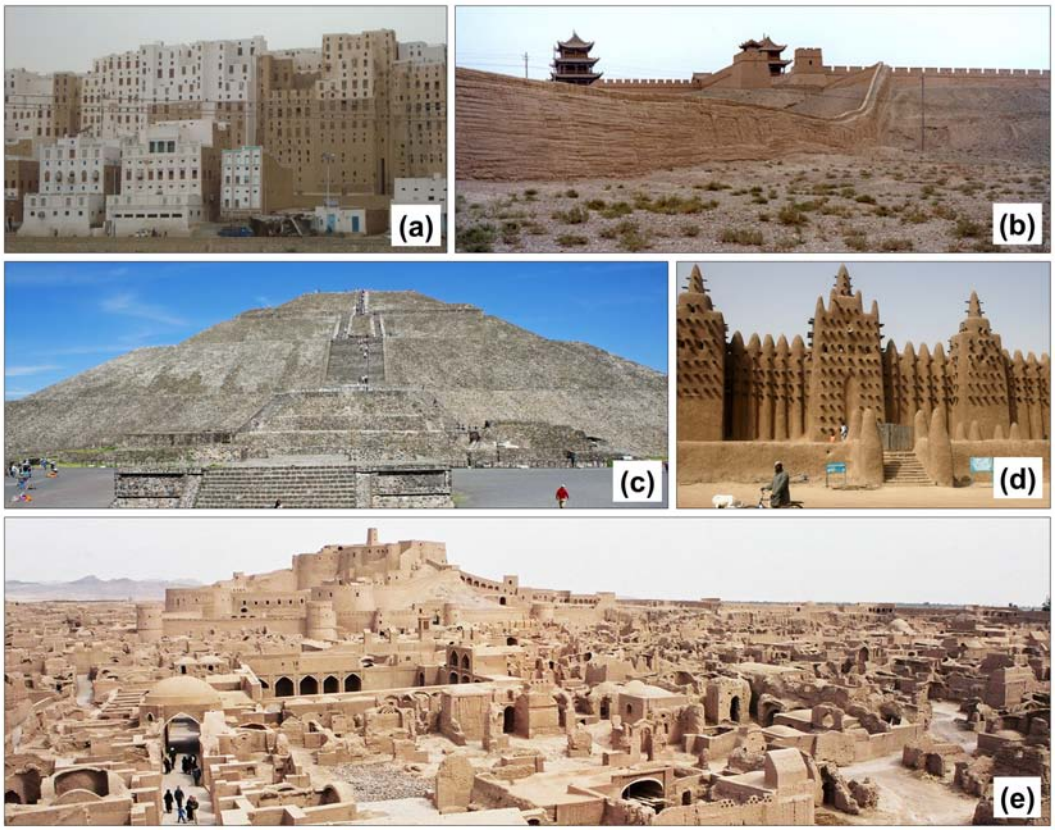


FIGURE 1.1 – Constructions en terre dans le monde ; (a) Ville de Shibam, Yémen ; (b) Grande Muraille de Chine, Chine ; (c) Pyramide du Soleil à Teotihuacan, Mexique ; (d) Grande Mosquée de Djenné, Mali ; (e) Citadelle de Bam, Iran.

plus répandu, et compte un héritage d'architectures rurales de près de 40% en pisé [16].

La ville de Lyon est classée au patrimoine mondiale de l'UNESCO, entre autres pour son héritage d'architectures en pisé [49]. L'agglomération de Lyon est l'une des seules en Europe à regrouper une telle proportion de constructions "urbaines" en pisé. On y compte des bâtiments, certains d'entre eux assez hauts, construits dans le centre ou en périphérie, suivant une technique traditionnelle ancienne en vigueur jusqu'au 20ème siècle.

1.1.2 Comment construire en pisé ?

Le pisé est une technique de construction qui consiste à superposer des couches de terre crue compactées, à l'intérieur d'un coffrage et damées. La première couche repose sur un soubassement généralement en pierres, galets ou béton (Figure 1.3) d'une hauteur allant de 50 cm à environ 2 m, de manière à protéger le matériau

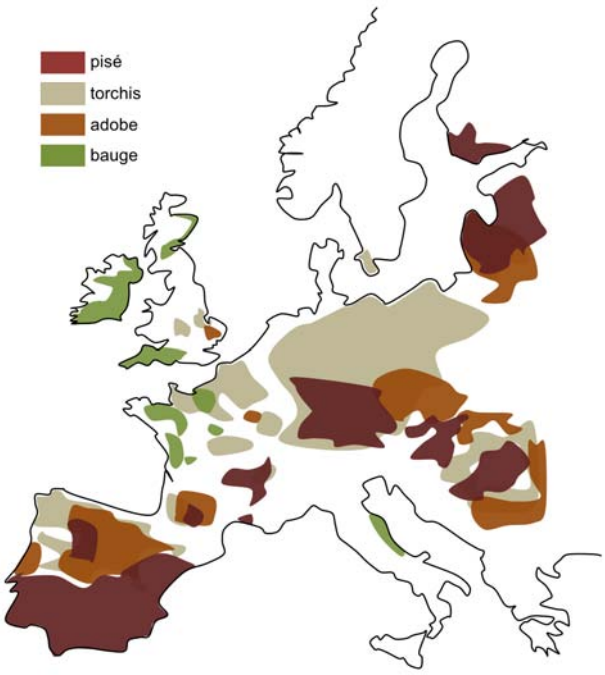


FIGURE 1.2 – Types de constructions en terre en Europe.

des projections d'eau, des remontées capillaires, ainsi que des animaux. Dans les constructions modernes, la maçonnerie en pierres est souvent remplacée par du béton. La partie supérieure du mur est également protégée de la pluie par un toit débordant.

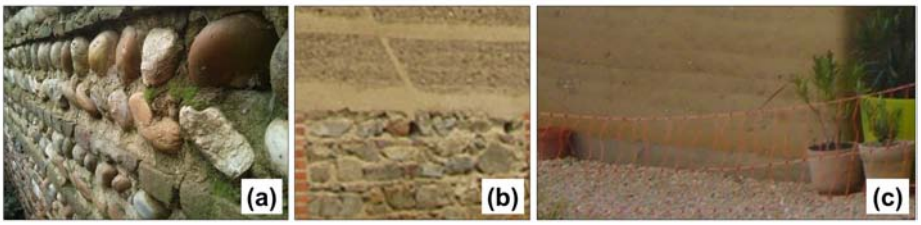


FIGURE 1.3 – Différents types de soubassements : (a) galets ; (b) pierres ; (c) béton.

Même si le principe reste le même, il y a eu et il existe différentes techniques pour construire un mur en pisé. La technique traditionnelle utilise des joints en mortier de chaux entre les couches et entre les panneaux (horizontalement ou de biais ;voir Figure 1.4a) afin de renforcer la structure et limiter la fissuration. De nos jours, il n'y a plus de joints entre les couches, mais ils peuvent être localisés dans les coins (Figure 1.4b).

Coffrage :
De nos jours, le traditionnel coffrage en bois est remplacé par un coffrage métal-

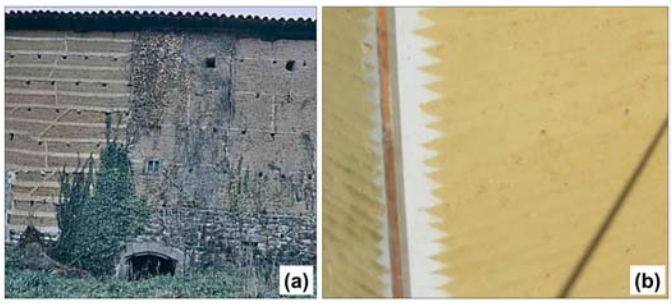


FIGURE 1.4 – Différents joints en chaux : (a) traditionnel sous forme horizontale ou en biais, d'après [9] ; (b) dans le coin d'une construction moderne à St-Antoine-L'Abbaye.

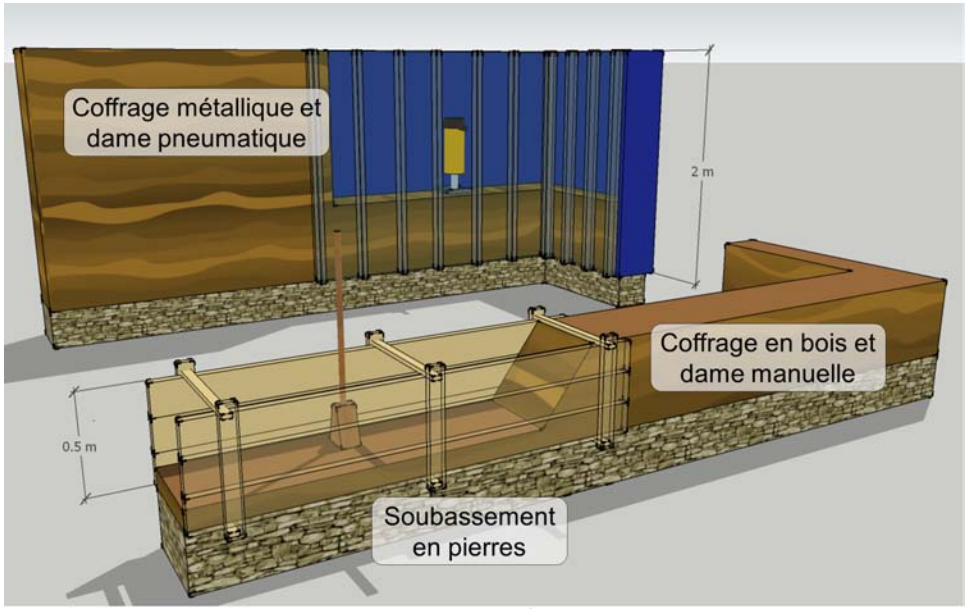


FIGURE 1.5 – Comparaison entre les outils traditionnels et modernes utilisés dans la construction en pisé [13].

lique, qui permet une énergie de compactage plus élevée (Figure 1.5 et Figure 1.6). En effet, la seule nécessité est qu'il soit suffisamment solide pour supporter les chocs dus à la compactage. Il doit être renforcé afin d'éviter toute distorsion pendant la fabrication, ce qui conduirait à des murs difformes et irréguliers.

Traditionnellement, le coffrage mesurait autour de 80 cm de haut, de manière à ce que le maçon puisse le chevaucher. De nos jours, cela dépend des préférences de chacun : des coffrages hauts permettent de monter les murs plus rapidement, mais des coffrages bas permettent de voir et d'être vu par les autres ouvriers. Ils peuvent atteindre jusqu'à 2 m de haut.

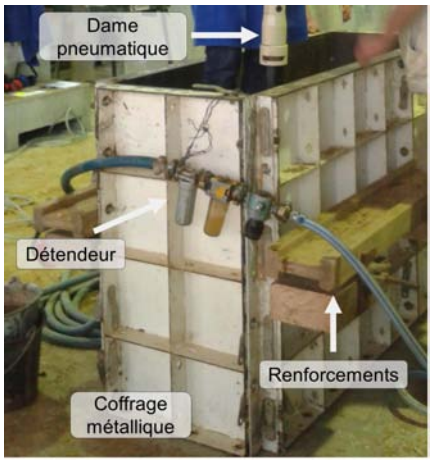


FIGURE 1.6 – Coffrage métallique et ses équipements, d'après N. Meunier.

Dame :

Traditionnellement, la dame était manuelle et en bois, composée d'un manche et d'un sabot rectangulaire pour épouser au mieux les formes du coffrage. Le sabot était en bois pour ne pas abimer le coffrage et limiter les nuisances sonores. La dame manuelle illustrée dans la Figure 1.7a pèse 7,5 kg.

De nos jours, la dame est pneumatique : elle nécessite d'être connectée à un compresseur et un détendeur pour permettre au maçon de réguler la pression et ainsi améliorer sa prise en main. Pour les mêmes raisons, un sabot en bois est utilisé. La dame pneumatique illustrée dans la Figure 1.7b pèse environ 20 kg.



FIGURE 1.7 – (a) Dame manuelle en bois ; (b) Dame pneumatique avec un sabot en bois.

Type de terre :

Toutes les terres ne conviennent pas pour la construction en pisé. Historiquement,

les meilleures terres pour le pisé se situent dans les mêmes régions où des maisons centenaires sont toujours en état.

Le matériau est prélevé entre 20 et 40 cm au-dessous de la surface du sol, sous la couche d'arable. En effet, cette dernière, composée de matière organique, ne constitue pas un matériau suffisamment résistant et augmente le risque de colonisation par les plantes.

La terre doit être préparée à la bonne teneur en eau de façon à être suffisamment humide pour avoir la bonne consistance, mais pas trop humide pour éviter les fissurations dues au retrait, ou pour empêcher un bon compactage.

1.2 Blocs de Terre Compactée

1.2.1 Une technique répandue

La brique de terre crue est composée de terre non-végétale (graviers, sable, limon, argile) à laquelle peuvent être ajoutés des liants tels que la chaux ou encore le ciment. La terre est ensuite comprimée à l'aide d'une presse qui peut être manuelle ou motorisée, à transmission mécanique, hydraulique ou pneumatique.

La brique de terre crue compactée est apparue en France au 18ème siècle avec le développement de la "Crécise", presse à brique dérivée d'un pressoir à vin, par l'architecte français Jean-François Cointeraux qui fut chargé de la construction de la ville de la Roche-Sur-Yon de 1804 à 1808 [38]. En 1952, la presse à brique manuelle du chilien Raul Ramirez du nom CINVA RAM, ouvre de réelles perspectives et est largement diffusée sur le continent africain.



FIGURE 1.8 – Presse CINVA RAM, Paraguay ; un mur en BTC, d'après [38].

Une fois constituée, les briques sont entreposées et recouvertes d'une bâche opaque pendant une dizaine de jours. Les briques de terre sont ensuite montées en rang et scellées grâce à un mortier de terre, de chaux ou de ciment. Comme pour toute construction, les maisons en briques de terre ont besoin d'être bâties sur de solides fondations, avec de "bonnes bottes" pour éviter toute remontée d'humidité par capillarité, ainsi qu'un "bon chapeau".

On trouve des constructions utilisant cette technique partout dans le monde et particulièrement en Afrique, en Amérique du Sud et en Asie. La Figure 1.8 regroupe une illustration de l'utilisation de la presse CINVA RAM au Paraguay, ainsi qu'un

zoom sur un mur en BTC. Un exemple de maison moderne construite en Rhône-Alpes avec des BTC est reporté en Figure 1.9.



FIGURE 1.9 – Maison construite avec des BTC (dont la tour est en pisé) en Rhône-Alpes, France.

1.2.2 Fabrication des blocs de terre

De nos jours, des machines industrielles sont conçues pour produire des Blocs de Terre Compactée (BTC). D'après [45], les premières presses ont été les presses manuelles (cf. Figure 1.8) qui ont par la suite donné naissance à de nombreuses presses conçues sur le même principe. Afin d'augmenter les rendements et diminuer la fatigue humaine, d'autres types de presses, mécaniques ou hydrauliques, ont été développés, à partir notamment des machines utilisées pour la fabrication des parpaings de ciment. Cependant, la présence d'argile en quantité importante dans la terre a rendu le compactage de la terre avec ces outils beaucoup plus délicat, et le résultat loin de la qualité escomptée, ce qui a valu leur dépréciation de la part des populations dans de nombreux pays.

Les presses utilisées pour la fabrication des BTC peuvent être classées en trois grandes catégories suivant leur fonctionnement :

— compactage par vibro-compression : la liquéfaction du matériau découle de la technique de vibration, utilisée notamment pour la fabrication de parpaings de ciment. Cependant, en ce qui concerne les matériaux argileux, elle est difficile à obtenir.

— compactage dynamique : proche de celui du Proctor modifié, le compactage des blocs se fait à l'aide de marteaux manœuvrés par des volants d'inertie. Dérivées de la fabrication des pavés en sable-ciment, elles sont difficiles à utiliser avec des sols argileux.

— compactage quasi-statique : présentes en grande majorité, elles peuvent travailler à force ou à déplacement imposé. Les presses à force imposée se com-

posent d'un vérin hydraulique dont la pression est régulée par une valve et générée par un moteur ; elles peuvent travailler à moyenne pression (5 à 10 MPa)ou à hyper-compression (25 à 100 MPa)[8]. Lorsque le déplacement est imposé, la compression est obtenue par déplacement d'un piston sur une course imposée : à l'aide d'un bras de levier que l'on amène d'une position verticale à une position proche de l'horizontale (presse manuelle), ou d'un piston déplacé à l'aide d'une came entrainée par un moteur.

1.3 Autres techniques

Torchis

La technique du torchis utilise une ossature en bois emplie de terre, ou le plus souvent d'un mélange de terre et de paille. Le matériau à l'état plastique est ainsi forcé de remplir les espaces vides. La surface peut être laissée telle qu'elle ou enduite pour obtenir des finissions plus régulières. Les murs en torchis ne sont pas porteurs et leur épaisseur est généralement comprise entre 15 et 20 cm.

La Figure 1.10a montre un mur en torchis pendant sa construction, tandis que la Figure 1.10b est un édifice en torchis situé à Angers, en France.



FIGURE 1.10 – (a) La technique du torchis illustrée ; (b) Une construction en torchis à Angers, France.

Adobe

L'adobe est le nom le plus courant pour désigner les briques séchées au soleil, modelées à partir d'une terre argileuse humide, qui peut également être mélangée à des fibres végétales.

A l'origine, les briques étaient fabriquées à la main, puis compactées dans des coffrages prismatiques en bois ou en métal, à l'aide d'un pilon ou d'un couvercle lourd. Les bâtiments de la ville de Shibam illustrés dans la Figure 1.1 sont construits

en adobe, recouverts d'un enduit en terre, ce qui est une pratique courante pour ce type de constructions.

L'épaisseur moyenne d'un mur en adobe est généralement d'environ 50 cm sans variation dans la hauteur. Les constructions habituelles comptent entre un et deux étages, ce qui correspond à une hauteur allant de 2,5 à 5 m.

Bauge

La bauge est montée en piles de terre autoportantes sans l'aide de mortier ou de coffrage. Pour ce type de constructions, la terre est légèrement humidifiée et est souvent mélangée à des fibres végétales. Le matériau mélangé est soit empilé à la main sous forme de monticules, soit jeté vigoureusement contre le mur. La surface rugueuse est ensuite enduite de manière à obtenir une paroi lisse.

Étant données les quantités importantes d'eau apportées au matériau pendant la construction, des phénomènes de retrait de dessiccation importants sont susceptibles de se produire. Une sélection soigneuse de la terre et de la mise en œuvre est nécessaire. La faible énergie de compactage conduit à de faibles densités, même si le retrait tend à l'augmenter.



FIGURE 1.11 – Un mur en bauge en construction en France.

La Grande Mosquée de Djenné illustrée dans la Figure 1.1 est construite avec une technique locale basée sur le même procédé que la bauge. Un mur en construction est également illustré dans la Figure 1.11.

2 Pourquoi construire en terre de nos jours ?

2.1 Impact environnemental des constructions

Face aux conséquences graves du changement climatique durant les dernières décennies, et aux prévisions de tarissement des ressources naturelles dans un futur

proche, le développement durable est au cœur des esprits dans tous les secteurs de l'industrie. Les problèmes les plus importants sont liés à l'énergie et les déchets mais tous les secteurs travaillent à réduire l'impact environnemental de leurs activités.

D'après [23], le secteur de la construction joue un rôle central car il compte près de 40% de la génération de gaz à effet de serre ; 44% des déchets collectés en France proviennent de l'industrie de la construction, ce qui a représenté près de 345 millions de tonnes en 2012 [2].

La consommation énergétique au cours de la vie d'un bâtiment se divise en trois catégories principales :

— Construction : extraction du matériau brut, transport, fabrication du matériau de construction (ciment, armatures, charpente, etc), transport, construction sur site
— Utilisation : chauffage, ventilation, climatisation, éclairage, etc et restauration
— Démolition et traitement des déchets

Il est souvent considéré qu'un bâtiment possédant une bonne efficacité énergétique est un bâtiment ayant une faible consommation énergétique durant la phase d'utilisation. Ce postulat est basé sur plusieurs études affirmant que la phase de construction ne représente que seulement approximativement 15% de la consommation énergétique totale sur 50 ans [1]. Il est cependant intéressant de remarquer que ces méthodes de prévision ne tiennent pas compte du traitement des déchets après la démolition. Or, comme le montre la Figure 1.12, ces derniers non contents de ne pas être négligeables, ils représentent la plus grande part (56%) .

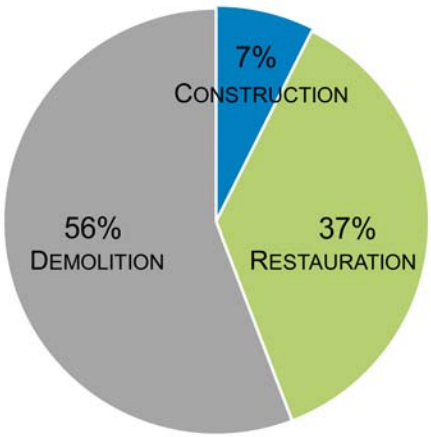


FIGURE 1.12 – Contribution des déchêts pour les différentes étapes d'un bâtiment pour un total de 37 millions de tonnes pour l'année 1999, d'après l'ADEME dans [9].

D'autre part, Thormak dans [48] relie les performances thermiques d'un bâtiment (souvent liées aux matériaux isolants) aux coûts de construction associés. L'étude révèle que pour les bâtiments à basse consommation BBC (au dessous de 45 $kWh.m^{-2}.an^{-1}$), l'énergie utilisée pendant la phase de construction atteignait 40%

de l'énergie totale. De plus, l'étude prévoit une part de 15% de l'énergie totale pour le traitement des déchets.

2.2 Faible énergie grise des constructions en terre

L'énergie grise est un concept utilisé pour évaluer l'énergie nécessaire pour la production de tout bien ou service durant leur cycle de vie complet. Elle est la somme de toutes les énergies, qu'elles soient humaines, animales, électriques, thermiques, etc.

La faible énergie grise des constructions en pisé est synthétisée dans la Figure 1.13.

Tout d'abord, comme mentionné précedemment, la terre crue est un matériau prélevé directement du sol et facilement préparé pour être utilisé dans la construction. Elle est extraite à seulement quelques kilomètres du chantier afin de minimiser les coûts de transport. D'après [42], dont les données sont reportées dans le Tableau 1.1, la comparaison de trois types de construction, en termes de transport en t.km, met en évidence que ce coût pour les constructions en béton est 644% plus important que pour le pisé. D'autre part, le matériau, étant composé de sol naturel, il ne dégage pas de substance nocive.

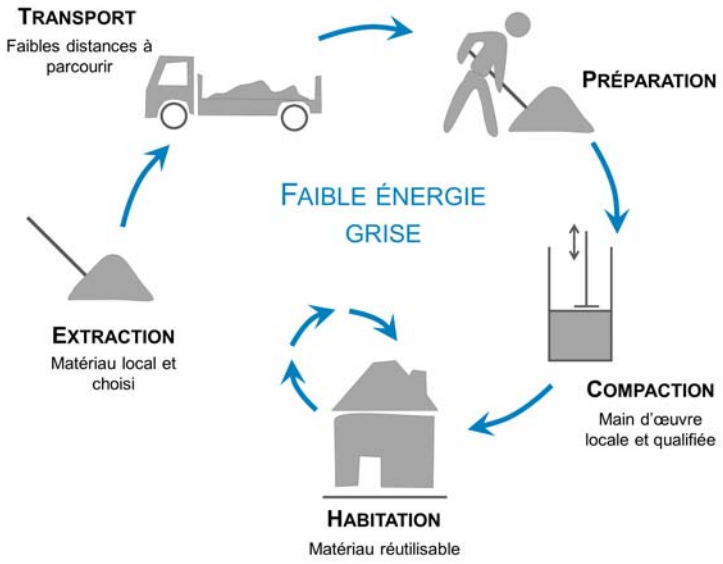


FIGURE 1.13 – La faible énergie grise des constructions en terre, d'après [13].

Le processus de construction en terre crue requière une main d'oeuvre nombreuse et qualifiée. Depuis l'extraction de la terre, sa préparation, l'installation du coffrage, jusqu'au damage, la réalisation d'un mètre carré de mur de 50 cm d'épaisseur de pisé nécessite environ 8h alors que cette durée est divisée par 4 pour les autres méthodes classiques de construction, comme le béton armé par exemple (Vincent Rigassi Architecte dans [17]). Le travail d'un maçon-piseur nécessite un savoir-faire afin de

	Maçonnerie en pierres avec mortier de terre	Pisé	Béton
Énergie totale (GJ)	97	70	239
Transport (t.km)	1390	1041	6707

TABLEAU 1.1 – Consommation énergétique de différents types de construction, d'après [42].

garantir la bonne réalisation et la durabilité de la construction en terre. Cet héritage est transmis par la formation d'apprentis, ce qui diffère grandement de l'approche de la plupart des autres matériaux de construction où l'automatisation, l'industrialisation et la mécanisation sont de mise. D'autre part, les constructions en pisé ont certes besoin d'une main d'oeuvre nombreuse, mais de très peu d'énergie et utilisent le matériau brut. En revanche, les autres techniques de construction classiques sont plus couteuses en termes de matériaux et de transport, mais moins en termes de masse salariale. En effet, d'après [17], la main d'œuvre représente environ 20% de l'énergie de construction pour un mur d'1m^2 de pisé, contre environ 0,3% pour la maçonnerie industrielle. Ces données sont confirmées dans le Tableau 1.1, où l'énergie totale nécessaire pour le béton est à 341% supérieure à celle du pisé.

La comparaison en termes d'émission de gaz à effet de serre est réalisée par [17] et est synthétisée dans la Figure 1.14.

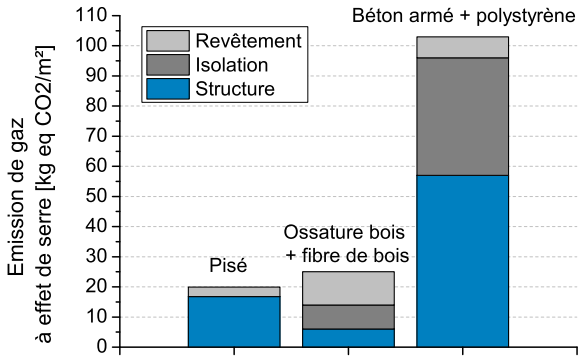


FIGURE 1.14 – Emission de gaz à effet de serre pour différentes méthodes de construction, d'après [17].

Enfin, les constructions en pisé non stabilisées sont réutilisables. Ce processus est facilement mis en œuvre du fait de la sensibilité à l'eau du matériau : la réhumidification de la terre est suffisante. Le matériau peut être réutilisé pour un autre projet de construction dans les environs ou rejeté dans la nature sans traitement, ce qui limite considérablement l'impact environnemental.

Pour conclure, le développement de constructions à base de terre apparait comme

une alternative durable face aux constructions conventionnelles, étant donné que l'avantage principal de la terre est lié au fait que ce soit un matériau local, qui peut être produit et utilisé immédiatement sur le chantier, et qui ne nécessite aucun processus industriel. Enfin, ce n'est pas un matériau recyclable mais réutilisable : il ne nécessite aucun traitement, ce qui diminue fortement son impact environnemental.

3 Comportement mécanique de la terre crue compactée

3.1 Mesure de la résistance du matériau

Quelques recherches ont été effectuées sur le pisé. On peut citer les recherches de Hall [28], Lilley [35], Jaquin [33], Bullen [11], Maniatidis [36], Bui [9] et Mollion [39]. A titre d'exemple, certains de ces résultats sont reportés dans le Tableau 1.2. Ces études mettent en évidence une assez grande variabilité des caractéristiques mécaniques du pisé, non attribuable à la seule variation de densité des matériaux testés.

Études	**d** ($kg.m^{-3}$)	q_{max} (MPa)	$E_{tangent}$ (MPa)	**Taille** (cm)	**Élancement**
HALL	2020-2160	0,75-1,46*	-	cube 10	1
LILLEY	1870-2170	1,8-2,0	-	cube 15	1
JAQUIN	-	0,6-0,7	60	100x100x30	1
BULLEN	2000	0,89*	-	cube 10	1
MANIATIDIS	1850	3,88	205	cyl d10 h20	2
	1850	2,46	160	cyl d10 h20	2
	-	1,9	-	cyl d30 h60	2
	1763	0,62	60	30x30x60	2
	1971	0,84	65	31x30x60	2
	2027	0,97	70	32x30x60	2

TABLEAU 1.2 – Résultats des études présentées sur le matériau terre (* : valeurs corrigées du fait du faible élancement).

En outre, dans [36], Maniatidis compare des résultats obtenus à partir d'une même terre pour différentes géométries d'échantillon : des cylindres de 10 cm de diamètre et 20cm de hauteur ; des cylindres de 30cm de diamètre et 60cm de hauteur ; des prismes de $30\times30\times60cm^3$ choisis à l'image des murs en pisé d'Angleterre dont épaisseur courante est 30cm. Ces résultats ont montré que des petits échantillons et des cylindres de 30cm de diamètre ne donnent pas les mêmes valeurs que celles des prismes qui sont représentatifs des murs sur site. Se pose alors le problème de la représentativité des essais conduits en laboratoire et de la signification à donner aux valeurs de module d'Young et de résistance à la compression ainsi obtenues.

Dans son étude [9], Bui a déterminé le module d'Young et la résistance à la compression pour des échantillons de tailles variées. La procédure adoptée est la suivante : étude du comportement de la terre compactée à l'échelle macroscopique

(mur sur site), à l'échelle d'un volume élémentaire représentatif fabriqué de la même façon que sur site, et enfin à l'échelle microscopique avec des blocs de terre compactée et des échantillons cylindriques fabriqués en laboratoire.(voir la Figure 1.15.

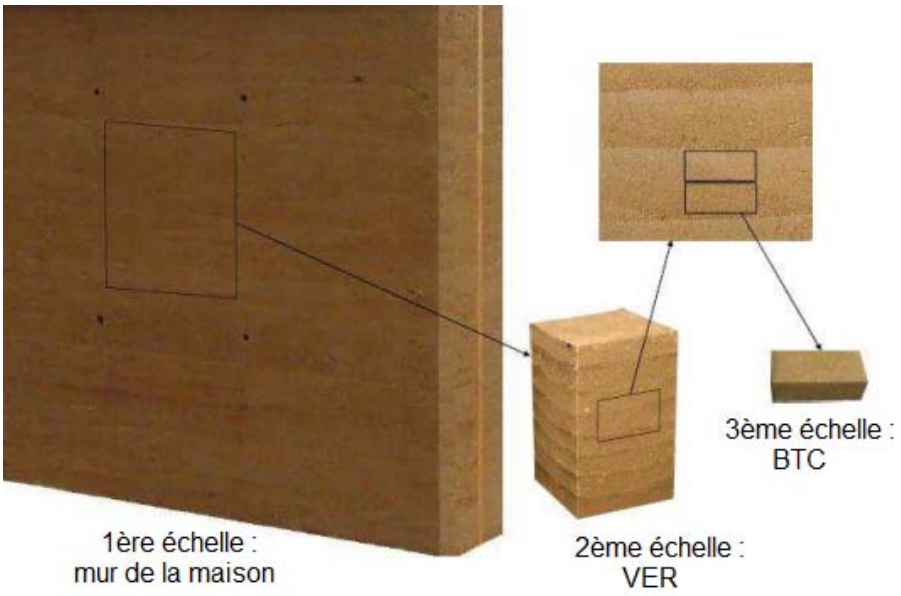


FIGURE 1.15 – Représentation des trois échelles utilisées par Bui [9].

Pour les essais à l'échelle du mur, Bui a utilisé des échantillons prélevés sur site par découpage puis les a testés de deux façons : essais en compression dans le sens parallèle aux lits et essais en compression dans le sens perpendiculaire aux lits. Les murs ont été fabriqués par un artisan piseur à l'aide d'une dame pneumatique. Pour chacun de ces tests, des cycles de décharge-recharge sont effectués à différents niveaux de pré-charge : 0,06 MPa (pré-charge 1) ; 0,12 MPa(pré-charge 2) ; 0,22 MPa (pré-charge 3) ; 0,4 MPa (pré-charge 4). A partir de ces cycles, le module d'Young est déterminé par régression linéaire d'une portion de la courbe contrainte / déformation de l'éprouvette. Les résultats sont regroupés dans le Tableau 1.3.

	E (MPa)				q_{max}
	pré-charge 1	pré-charge 2	pré-charge 3	pré-charge 4	(MPa)
$\perp$	165	230	340	410	0,84
$\parallel$	220	280	320	430	0,92

TABLEAU 1.3 – Résultats de Bui [9] obtenus sur un mur, suivant l'orientation par rapport aux lits de compactage.

Les résultats étant proches pour chacune des deux directions considérées, Bui conclut sur l'acceptabilité des hypothèses d'un matériau isotrope.

Notons qu'une approche similaire a été réalisée en partant d'essais sur des BTC

décimétriques afin d'obtenir, via une loi de changement d'échelle, les caractéristiques mécaniques du mur.

	E (MPa)				q_{max}
	pré-charge 1	pré-charge 2	pré-charge 3	pré-charge 4	(MPa)
$\perp$	195	250	336	414	0,88
$\parallel$	205	260	350	435	1,06

TABLEAU 1.4 – Résultats de Bui obtenus après homogénéisation sur des blocs de terre compactée, suivant l'orientation par rapport aux lits de compactage.

Les résultats obtenus, reportés au Tableau 1.4, montrent une très bonne corrélation entre les modules d'Young et les résistances à la compression obtenus directement sur mur et ceux estimés à partir des essais sur BTC, bien que ces derniers ne soient pas fabriqués de la même manière (compactage statique pour les BTC et dynamique pour les murs). Dans notre étude expérimentale, nous nous servirons largement de ces constats.

Afin de prendre en compte des chemins de sollicitation plus complexes, la seule connaissance de la résistance en compression simple n'est pas toujours suffisante. Pour ce faire, un critère de rupture en cisaillement de type "Mohr-Coulomb", largement utilisé pour les sols, est souvent employé pour la terre compactée et/ou damée. Ce critère établit une relation linéaire entre la contrainte de cisaillement maximale τ et la contrainte normale σ à une facette, et s'exprime sous la forme :

$$\tau = c + \tan(\varphi_{int})\sigma \tag{1.1}$$

avec c la cohésion et φ_{int} l'angle de frottement interne.

Des mesures ont été réalisées[14] sur des échantillons cylindriques de terre stabilisée au ciment, réalisés au Proctor et renforcés avec des fibres végétales en différentes proportions. L'angle de frottement interne varie entre 47° et 56° et la cohésion entre 550 et 760 kPa. D'autres mesures ont été réalisées [26] sur un matériau reconstitué et composé de sable Hostun et de kaolinites. L'angle de frottement interne varie de 25° à 30° et une cohésion moyenne de 140 kPa est constatée. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par [18] et [25] par des essais de cisaillement direct sur des échantillons de terre compactée non stabilisée.

3.2 Impact de l'eau sur le comportement mécanique

Le matériau terre est hygroscopique, ce qui se caractérise par sa capacité à capter les molécules d'eau contenues dans l'air. Ce comportement est identifiable par la courbe de sorption du matériau, qui représente l'évolution de sa teneur en eau en fonction de l'humidité relative de l'air. En fonction du taux d'humidité dans l'air, l'état de l'eau captée à la surface des pores du matériau change (cf. Figure 1.16) :

— à basse humidité relative, l'hydratation des surfaces des particules se fait avec une seule couche de molécules d'eau : c'est la sorption mono-moléculaire. On parle alors d'eau adsorbée.
— au-delà de 10% d'humidité relative et jusqu'à 50%, on constate une superposition des molécules de vapeur d'eau : c'est la sorption poly-moléculaire.
— au-delà de 50% d'humidité relative, il y a suffisamment de molécules d'eau pour former des ponts capillaires entre les particules : il existe alors une phase liquide à l'intérieur du matériau. On parle alors d'eau capillaire.

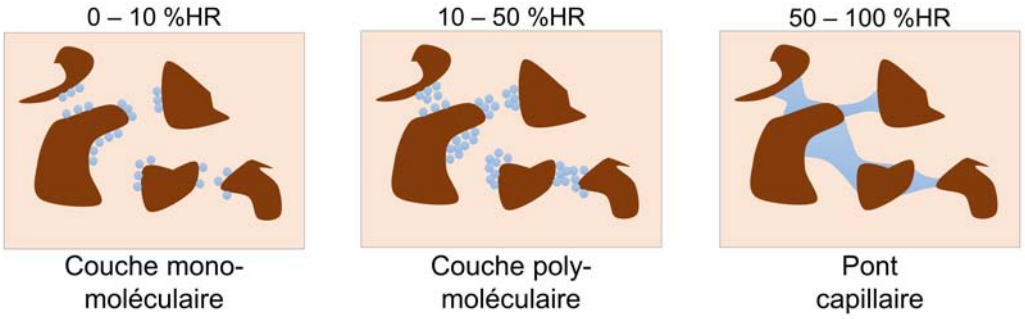


FIGURE 1.16 – Isotherme de sorption/désorption avec l'état de saturation des pores.

Ainsi, dans la majorité des cas, l'air et l'eau coexistent au sein du réseau poreux du matériau terre, qui peut être modélisé comme une superposition d'un squelette solide (S) et d'un réseau de pores partiellement saturés d'eau liquide (L), considérée comme pure, et de gaz (G), considéré comme le mélange de deux gaz parfaits que sont l'air sec (A) et la vapeur d'eau (V). La porosité est définie comme le rapport du volume actuel du réseau de pores sur une unité de volume initial de l'échantillon étudié, alors que la saturation en eau S_r, est définie comme le volume actuel d'eau liquide par unité actuelle de volume des pores. Cette variable est liée à la teneur en eau liquide ($w_L = m_L/m_S$, ou m_L et m_S sont respectivement la masse de l'eau et du solide par unité de volume d'échantillon), soit :

$$S_r = w_L \frac{\rho_d}{\phi \rho_L} \tag{1.2}$$

Avec :
S_r [-] : degré de saturation
w_L [kg.kg^{-1}] : teneur en eau massique
ϕ [-] : porosité à la fois occupée par L et G on a alors $\phi = \phi_L + \phi_G$
ρ_d [kg.m^{-3}] : densité sèche du matériau
ρ_L [kg.m^{-3}] : densité de l'eau liquide

Cette présence d'eau porale impacte le comportement mécanique de la terre. Cet effet a déjà été étudié par plusieurs auteurs (e.g. [32], [26]). A titre d'exemple,

les résultats obtenus par [39] sur des échantillons de terre non stabilisée réalisés au Proctor sont regroupés dans le Tableau 1.5.

Eprouvette considérée	$E_{tangent}$ (MPa)	**Coefficient de Poisson**	q_{max} (MPa)
Humide	819	0,38	0,38
Ayant perdu 1% d'eau	972	0,3	0,59
Ayant perdu 2% d'eau	1098	0,36	0,79
Ayant perdu 3% d'eau	1458	0,34	1,23
Ayant perdu 4% d'eau	1627	0,29	1,28
Ayant perdu 5% d'eau	1971	0,26	1,7
Ayant perdu 6% d'eau	2039	0,25	1,78
Ayant perdu 7 % d'eau	2065	0,23	1,93
Sèche	2081	0,22	1,95

TABLEAU 1.5 – Résultats obtenus sur des éprouvettes cylindriques Proctor par [39].

3.2.1 Équilibre capillaire de l'eau liquide et de la vapeur

À l'interface entre deux fluides, une molécule est soumise à un ensemble de forces d'interaction différentes venant de la phase liquide et de la phase vapeur, notamment les forces de Van Der Waals et électrostatiques. Une molécule d'eau à l'interface eau / air est attirée simultanément par la masse d'eau et la masse d'air. Toutefois, compte-tenu de la plus grande densité massique de l'eau, c'est la première qui l'emporte. Afin de minimiser l'énergie potentielle liée à cette attraction mutuelle entre les particules d'eau, la masse d'eau a tendance à minimiser son interface avec la phase gazeuse. Tout se passe comme si la surface de l'eau était une peau tendue, ce qui est à l'origine du phénomène de tension de surface (voir Figure 1.17).

Si, maintenant, les deux fluides sont en contact avec un solide, le fluide mouillant (ici l'eau) aura tendance à maximiser sa surface de contact avec le solide. Ce phénomène peut s'expliquer par des forces d'attraction plus importantes entre les molécules d'eau et le solide (forces d'adhésion) qu'entre les molécules d'eau elles-mêmes (forces de cohésion).

Afin d'illustrer ces effets d'interfaces, considérons le phénomène de remontée capillaire dans un tube cylindrique en verre. Dans ce cas, l'équilibre des interfaces eau/verre, eau/air et air/verre relie la différence entre la pression de l'eau (p_L) et la pression de l'air (p_G), appelée pression capillaire ou succion, avec l'angle de mouillage θ, la tension de surface eau/air γ et le rayon du tube capillaire, noté r . Si on l'on approxime l'interface eau/air à une calotte sphérique de rayon $R = r/cos\theta$, cette relation est donnée par la loi de Jurin :

$$p_G - p_L = \frac{2\gamma \cos\theta}{r} \tag{1.3}$$

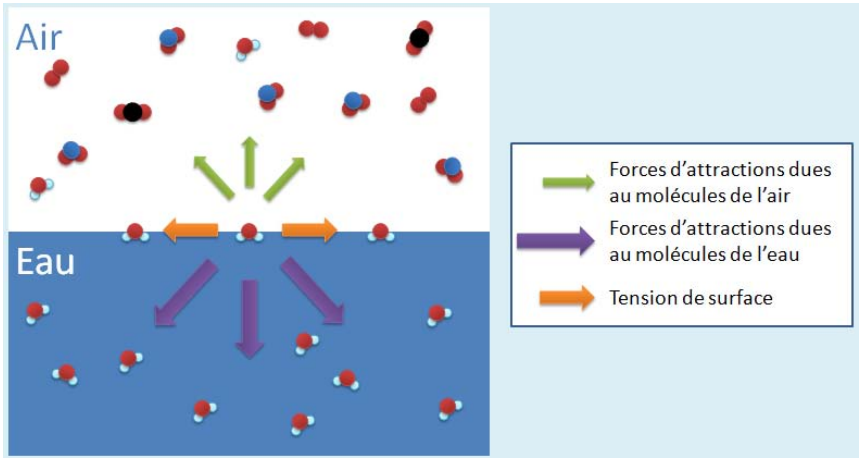


FIGURE 1.17 – Illustration des forces appliquées à la surface d'une molécule d'eau en surface.

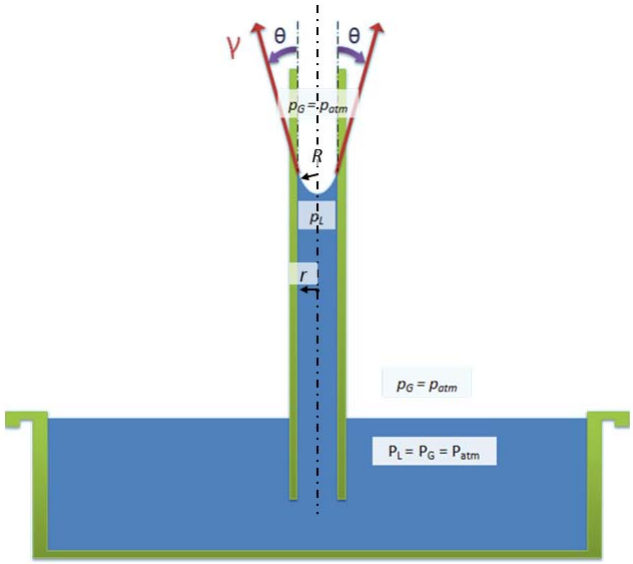


FIGURE 1.18 – Illustration des phénomènes de remontée capillaire.

Dans le cas où $\cos\theta > 0$ (i.e. eau plus mouillante que l'air), p_L sera inférieure à p_G au voisinage de l'interface dans le tube. D'un autre côté, p_L sera égale à p_G au niveau de l'interface plane du récipient dans lequel le tube est plongé. Cette différence de pression impose donc à l'eau de remonter dans le tube d'une hauteur égale à $h = 2\gamma cos\theta/(r\rho_L g)$ avec ρ_L la densité du fluide et g l'accélération de la pesanteur.

Afin d'étudier l'impact qu'auraient ces phénomènes de capillarité sur le comporte-

ment mécanique, il est instructif d'étudier le cas idéalisé où les grains sont sphériques. Dans le cas représenté en Figure 1.19, la loi de Laplace nous donne la relation suivante :

$$p_G - p_L = \gamma \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{l} \right) \tag{1.4}$$

où les paramètres R et l caractérisent les deux courbures de l'interface eau/air illustrées dans la Figure 1.19.

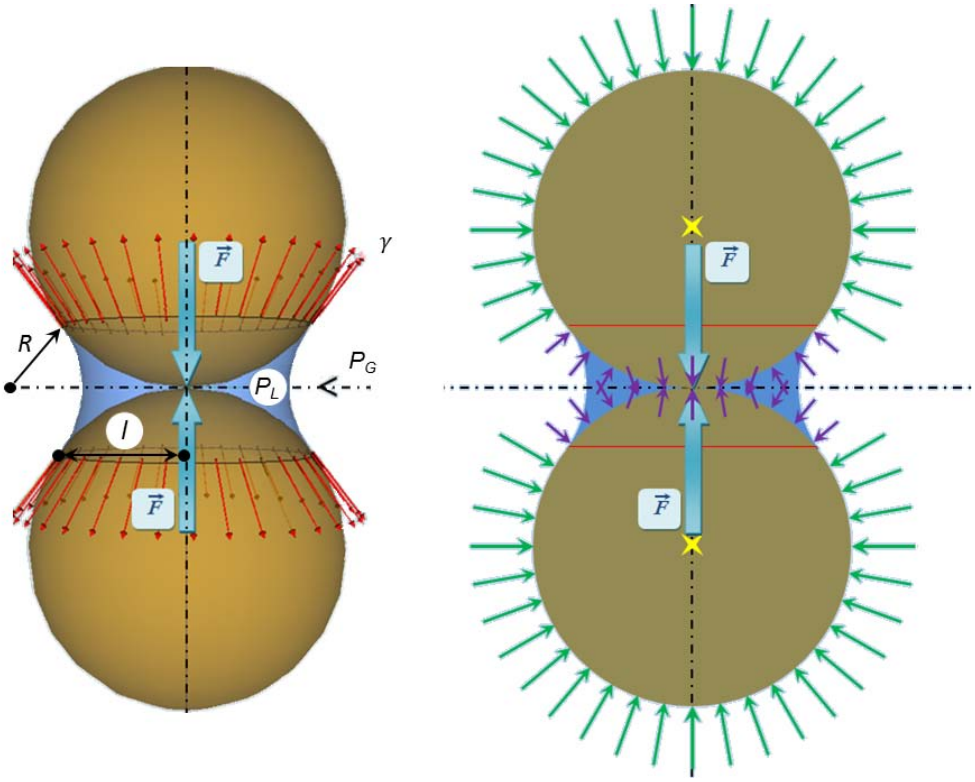


FIGURE 1.19 – Ménisque capillaire dans le cas de grains sphériques.

Ainsi, la masse d'eau coincée entre les deux grains est en dépression (lorsque $l > R$ par rapport à l'air ambiant). La conséquence directe est mécanique : cela augmente la force normale de contact entre les deux grains. D'après la loi de Coulomb (cf. équation 1.1), la résistance au glissement s'en trouve augmentée. À l'échelle d'un bloc de terre, ce phénomène induit une augmentation de la résistance au cisaillement avec la succion.

Ce point est mis en évidence notamment par les expériences de Blight en 1967 [7] dont les résultats, reportés en Figure 1.20, montrent une augmentation de la résistance d'un sol limoneux avec la succion. Pour une succion de 137,9kPa la résistance du sol s'élève à 175kPa alors que pour une succion de 6,9kPa la résistance est d'environ 25kPa.

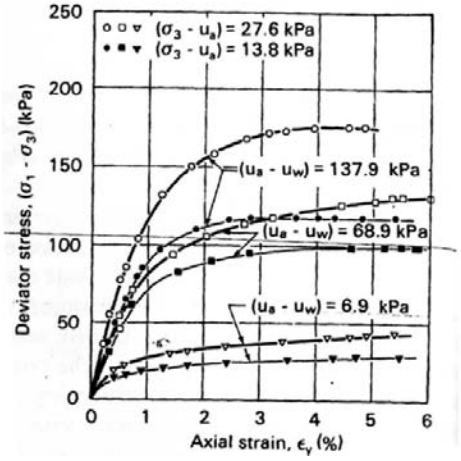


FIGURE 1.20 – Résultats d'essais triaxiaux à succion constante sur un limon non saturé dans le plan déviateur / déformations axiales, d'après [7].

D'un autre côté, l'équilibre chimique entre l'eau et la vapeur d'eau permet de relier la succion $(p_G - p_L)$ à l'humidité relative de l'air dans les pores, via la loi de Kelvin :

$$p_C = p_G - p_L = -\frac{\rho_L RT}{M_{H_2O}} ln\varphi \tag{1.5}$$

Avec :
p_C [Pa] : pression capillaire
M_{H_2O} [kg.mol^{-1}] : masse molaire de l'eau
R [J.mol^{-1}.K^{-1}] : constante des gaz parfaits
T [K] : température
φ [-] : humidité relative, définie comme :

$$\varphi = \frac{p_V}{p_V^{sat}} \tag{1.6}$$

Avec :
p_V [Pa] : pression partielle de vapeur d'eau dans la phase gazeuse
p_V^{sat} [Pa] : pression de vapeur saturante

La combinaison des équations (1.4) et (1.5) souligne le lien entre la teneur en eau liquide du matériau, à température constante et à l'équilibre à l'humidité relative de l'air ambiant. Ce lien est propre à chaque matériau et est déterminé par des essais d'absorption et de désorption. Cependant, la présence d'argile dans le matériau complexifie encore ces phénomènes.

3.2.2 Rôle des argiles

Les argiles sont des silicates d'alumine hydratés qui forment des feuillets, constitués d'une combinaison de structures simples : assemblages tétraédriques et octaédriques. Les tétraèdres sont constitués d'un atome central de silicium entouré de quatre atomes d'oxygène, tandis que les octaèdres d'un ion métallique central (Al^{3+}, Fe^{2+}, Mg^{+}) entouré d'ions OH^{-}. Ces structures simples se superposent sous forme de deux ou trois couches pour former une unité d'argiles. Un feuillet est la répétition latérale d'unités d'argile.

Par exemple, la superposition d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique, dont l'ion métallique est un ion d'aluminium, forme une kaolinite. Lorsque deux feuillets de kaolinite sont superposés, une grande stabilité vis-à-vis des actions de l'eau est rendue possible par une liaison hydrogène O-H forte. Généralement, il faut un empilement d'une centaine de feuillets pour constituer une particule de kaolinite.

Un autre exemple est celui de la superposition de trois couches : une couche octaédrique encadrée par deux couches tétraédriques. L'ion métallique de la couche octaédrique définit généralement la nature de l'argile. Les montmorillonites comportent un ion d'aluminium. Les feuillets de montmorillonite comportent un déficit de charges, qui les rendent instables vis-à-vis de l'eau, ce qui se caractérise par une attraction des molécules d'eau (en tant que molécules dipolaires) ou des cations présents dans l'eau. Les particules de montmorillonite sont constituées de 3 à 10 feuillets.

Par ailleurs, l'illite possède la même composition que la montmorillonite, mais la présence de potassium K^{+} entre les feuillets permet une liaison forte. Ainsi, comme la kaolinite, l'illite est stable vis-à-vis de l'eau.

La Figure 1.21 récapitule les différentes unités présentées dans cette section.

Le rôle des argiles dans la matrice granulaire, et en particulier sur la cohésion, a notamment été étudié par David Gelard dans sa thèse [26]. Il y présente entre autres des photographies réalisées au microscope électronique à balayage, d'échantillons constitués de sable Hostun (grains allant de 30µm à 3mm) et de kaolinite à différentes teneurs.

La Figure 1.22 regroupe quatre photographies illustrant l'enrobement des granulats par les particules d'argile, de plus en plus important à mesure que la teneur en kaolinite augmente. Plus précisément, la Figure 1.23 se focalise sur l'agglomérat sous forme de ménisques entre deux granulats. L'explication donnée de l'origine de ces structures en ménisques est le processus de séchage du matériau, lors duquel les particules d'argile sont réorientées sous l'effet notamment des tensions superficielles [26]. A noter qu'initialement les particules d'argile sont désordonnées en une sorte de "boue" formée par la kaolinite saturée. La présence de ces structures d'argiles et de leurs interactions dues aux forces électrostatiques et de Van Der Vaals, expliquent la cohésion du matériau lorsque celui-ci est entièrement sec ou en équilibre avec un air à faible humidité relative (inférieur à 50%HR). En effet, en l'absence de la kaolinite dans l'exemple précédent, le sable ne possèderait aucune cohésion à l'état sec.

Lorsque le matériau s'hydrate, les molécules d'eau sont attirées par les feuillets d'argile et se positionnent à la surface ou à l'intérieur des particules d'argile. Cet

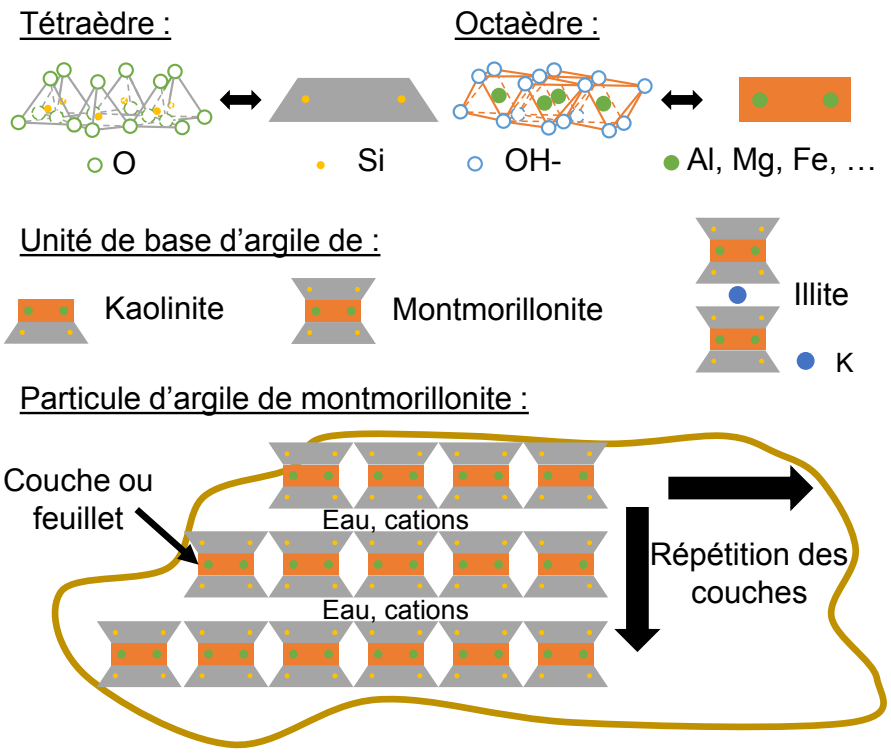


FIGURE 1.21 – Représentation schématique des unités de la microstructure des argiles, schéma réalisé à partir des données de [46].

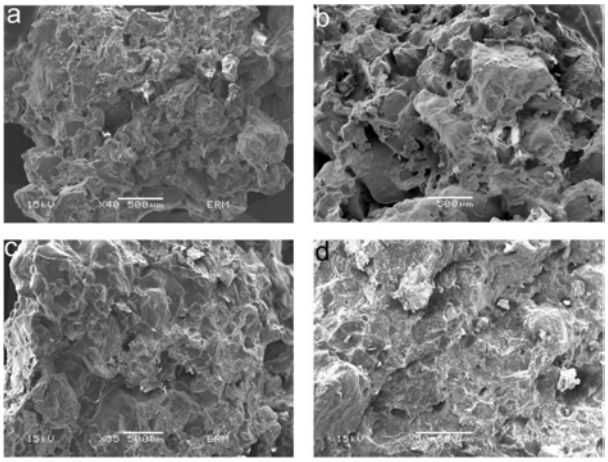


FIGURE 1.22 – Photographies au MEB du mélange sable Hostun + kaolinite à différentes teneurs (5% (a), 10% (b), 15% (c) et 20% (d) en masse), d'après [26].

arrangement tend vers une structure pseudo-cristalline [24] à la différence que les molécules de la couche adsorbée peuvent se déplacer parallèlement au feuillet d'argile.

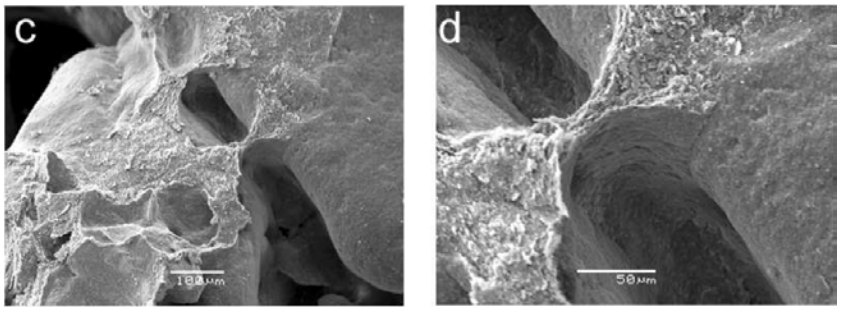


FIGURE 1.23 – Photographies au MEB du mélange sable Hostun + kaolinite, zoom sur le ménisque formé par les particules d'argile, d'après [26].

Ceci explique qu'en dépit de l'attraction forte de l'eau par les feuillets d'argile, la résistance mécanique globale du matériau diminue lorsque sa teneur en eau augmente.

4 Conclusion : présentation de l'objet d'étude de la thèse

Les études présentées précédemment montrent l'importance des argiles dans le comportement global de la terre crue. D'autre part, nous avons également pu voir que le comportement du matériau est sensible à la présence d'eau et que les particules fines jouent un rôle important dans la rétention de l'eau. La thèse présentée dans ce manuscrit a pour objectif d'apporter des outils permettant de mesurer finement le comportement du matériau dans des états hydriques divers.

Pour cela, une cellule triaxiale a été équipée pour mesurer ce comportement. Elle comporte un ensemble de capteurs sans contact chargés de mesurer les déformations axiales et radiales de l'échantillon, et mis en place grâce à un dispositif de porte-capteurs et porte-cibles spécifiquement élaboré pour cette étude. Un système de mesure et de régulation de l'état hydrique avant et pendant les essais a également été rattaché à la cellule. Une étuve assurant la régulation en température de tout le dispositif a été ajoutée autour de la presse.

D'autre part, un moule a été conçu et un protocole précis a été élaboré pour garantir l'homogénéité et la répétabilité des échantillons testés. Celui-ci permet de réaliser des échantillons cylindriques de 7cm de hauteur et 3,5cm de diamètre.

Grâce à ce dispositif, différentes études ont été menées sur trois terres issues de constructions en pisé.

Des essais triaxiaux ont permis d'étudier la variabilité des paramètres mécaniques (modules d'élasticité, résistance à la compression, etc.) en fonction de leur état hydrique. Ces mesures ont été corrélées avec des mesures de caractérisation de matériaux (sorption, plasticité, activité des argiles, etc.) afin de mettre en évidence des tendances globales.

Des essais de gonflement ont été réalisés sur des échantillons traversés par un flux d'air humide. Un modèle hydrique a été développé afin d'étudier les lois de transport hydrique adaptées.

Enfin, une étude complémentaire a été réalisée sur des échantillons de plus grande taille (environ deux fois plus grands) afin de comparer les observations faites sur la variation des paramètres mécaniques. Pour ce faire, des mesures de déformations par corrélation d'images ont été faites pendant des essais de compression simple.

Chapitre 2

Caractérisation des terres étudiées et réalisation des échantillons

Contents

1 Caractérisation du matériau étudié 48
1.1 Présentation des terres 48
1.2 Caractérisation des terres en laboratoire 49
1.2.1 Granulométrie 49
1.2.2 Indice de plasticité 51
1.2.3 Valeur au bleu 52
1.2.4 Diffractomètre à rayons X (DRX) 52
1.2.5 Isothermes de sorption 53
2 Fabrication des échantillons 58
2.1 Teneur en eau de fabrication 58
2.2 Conception du moule 59
2.2.1 Géométrie 60
2.2.2 Double compactage et ressorts 61
2.3 Protocole de réalisation des échantillons 61
2.4 Vérification de l'homogénéité 63
3 Conditionnement des échantillons 63

1 Caractérisation du matériau étudié

Ce travail de thèse a porté sur trois différentes terres prélevées sur des ruines de constructions en pisé localisées en région Rhône-Alpes. Elles ont été caractérisées selon différents aspects.

1.1 Présentation des terres

Lors du lancement du projet Primaterre, la question s'est posée du choix des terres qui allaient être étudiées. Les sources possibles étant d'anciennes constructions en ruine de la région Rhône-Alpes ou d'autres chantiers de construction en terre, et les critères de sélection ont été les suivants :

— une terre adaptée à la construction en pisé
— une terre dont les stocks étaient suffisamment abondants
— des terres de compositions différentes de par leur argilosité et leur granulométrie

Face à ces contraintes, trois terres ont été sélectionnées, nommées STR, CRA et ALX et prélevées respectivement dans les villes de Saint Trivier de Courtes, de Cras sur Reyssouze et Alixan, comme représenté sur la Figure 2.1.

Le projet dans lequel s'insère l'étude étant focalisé sur les constructions pisé, il était important de caractériser le comportement de terres qui conviennent pour ce type de constructions. Le fait d'avoir prélevé le matériau directement sur des ruines centenaires de maisons en pisé constitue une assurance sur ce point.

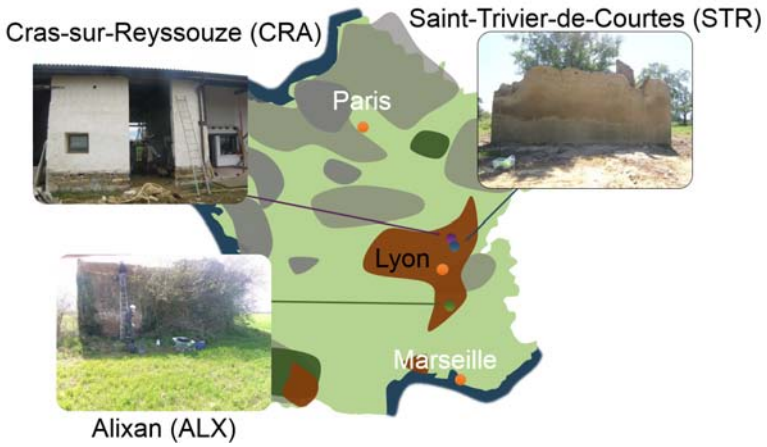


FIGURE 2.1 – Lieux d'extraction des différentes terres.

Sur site, ont été prélevés de gros blocs de terre qui correspondaient à des parties de murs, qui ont ensuite été détruits et la terre ainsi obtenue a été séchée à l'étuve.

1.2 Caractérisation des terres en laboratoire

1.2.1 Granulométrie

La courbe granulométrique de chacune des terres a été mesurée suivant les normes françaises NF P94-056 et NF P94-057. Les résultats sont reportés dans la Figure 2.2 et dans le Tableau 2.1 (matériau brut). Elles mettent en évidence une teneur en argile (dont les particules sont inférieures à 2µm) d'environ 15% pour STR, 17% pour CRA et 6% pour ALX.

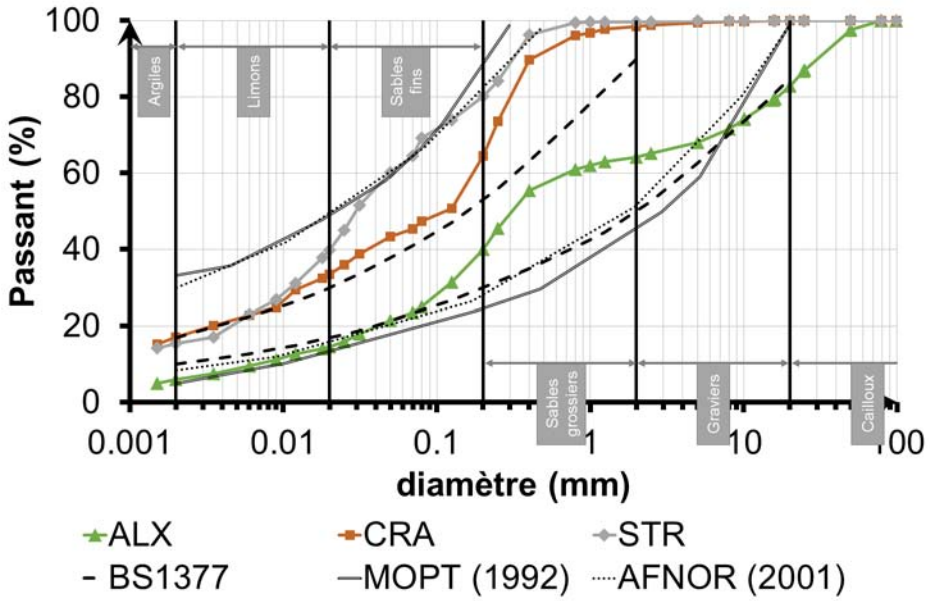


FIGURE 2.2 – Courbes granulométriques des matériaux prélevés et leur comparaison avec les bornes supérieure et inférieure des normes BS1377, MOPT et AFNOR.

D'autre part, la norme BS1377-2 ;1990 relative aux travaux de géotechnique est utilisée par Houben dans [31] en tant que critère pour identifier les sols convenables pour les constructions en terre sur la base de leur courbe granulométrique qui doit être comprise dans un fuseau. Cependant, aucune des courbes granulométriques des terres étudiées n'entre dans le fuseau préconisé, malgré le fait qu'elles proviennent de constructions réelles. Afin de mieux coller à la réalité du terrain, d'autres fuseaux peuvent être utilisés, tels que ceux proposés par la norme AFNOR XP-P13-901 [3] pour les BTC ou la norme MOPT [40] pour le pisé. A noter que les courbes granulométriques des trois terres étudiées sont compatibles avec les fuseaux préconisés par ces deux documents et que le constat de la non-validité du critère de la norme BS1377-2 ;1990 pour la construction en terre a déjà était fait par [6] pour des constructions en adobe.

Quoi qu'il en soit, comme le souligne Schroeder dans [29], les connaissances actuelles concernant les courbes granulométriques ne justifient pas l'application de li-

mites aussi étroites ; les fuseaux ont pour objectif de fournir une recommandation et non pas de constituer une règlementation rigide.

	brut			tamisée à 2mm			
%	**ALX**	**CRA**	**STR**	**ALX**	**CRA**	**STR**	
Cailloux	17	-	-	-	-	-	20mm à 200mm
Graviers	19	2	-	-	-	-	2mm à 20mm
Sables grossiers	24	34	20	38	35	20	200µm à 2mm
Sables fins	25	31	40	39	32	40	20µm à 200µm
Limons	9	16	24	13	16	25	2µm à 20µm
Argiles	6	17	15	9	17	15	$<$ à 2µm

TABLEAU 2.1 – Répartition granulométrique des terres étudiées, d'après la classification de la norme NF P18-560.

Le matériau utilisé ne doit pas comporter de grains dont le diamètre est supérieur à 1/10ème de la dimension la plus petite des échantillons fabriqués dans la suite de cette thèse. Ainsi, le matériau brut a dû être tamisé à 2mm. La nouvelle courbe granulométrique est présentée dans la Figure 2.3, et les classes correspondantes présentes dans le Tableau 2.1.

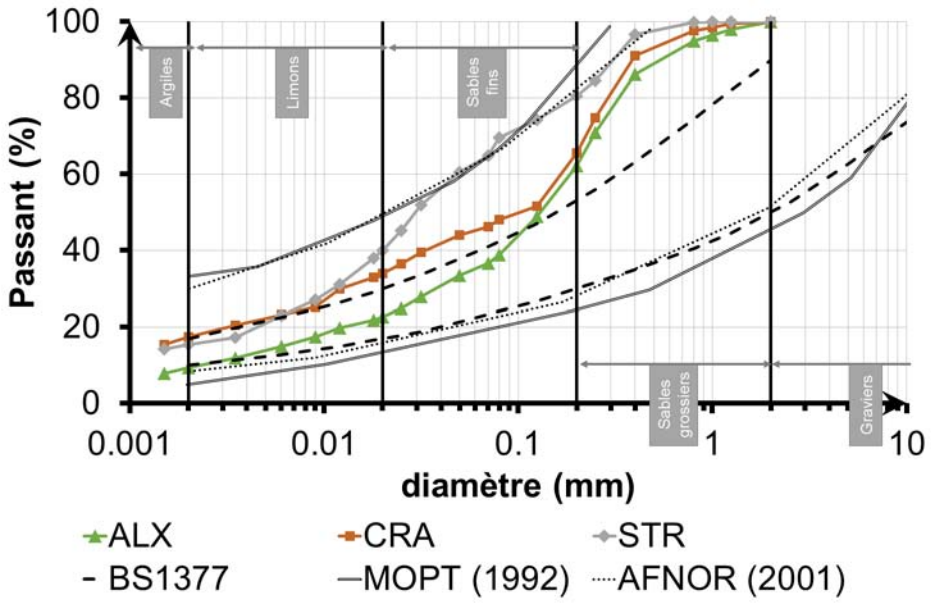


FIGURE 2.3 – Courbes granulométriques des matériaux étudiés après tamisage à 2mm et leur comparaison avec les bornes supérieure et inférieure des normes BS1377, MOPT et AFNOR.

1.2.2 Indice de plasticité

L'indice de plasticité et la valeur au bleu de méthylène (VB) sont mesurés sur la fraction des sols entre 0 et 400 µm. Ces données supplémentaires sur les matériaux permettent d'augmenter la précision des informations données par les mesures, ainsi que de fournir une comparaison directe entre les activités des parties fines des matériaux testés.

Les limites d'Atterberg permettent de calculer l'indice de plasticité d'un sol, selon la formulation de l'équation (2.1). Celles-ci sont au nombre de deux :

— Limite de liquidité W_L : elle caractérise la transition entre un état plastique et un état liquide. C'est la teneur en eau au-dessus de laquelle le sol s'écroule comme un liquide visqueux sous l'influence de son propre poids.

— Limite de plasticité W_P : elle caractérise la transition entre un état solide élastique et un état plastique. C'est la teneur en eau optimale pour travailler un sol et favoriser le compactage.

$$I_P = W_L - W_P \tag{2.1}$$

où I_P est l'indice de plasticité.

Les limites d'Atterberg ont été mesurées suivant la procédure décrite dans [41]. Les résultats sur les différentes terres sont regroupés dans le Tableau 2.2.

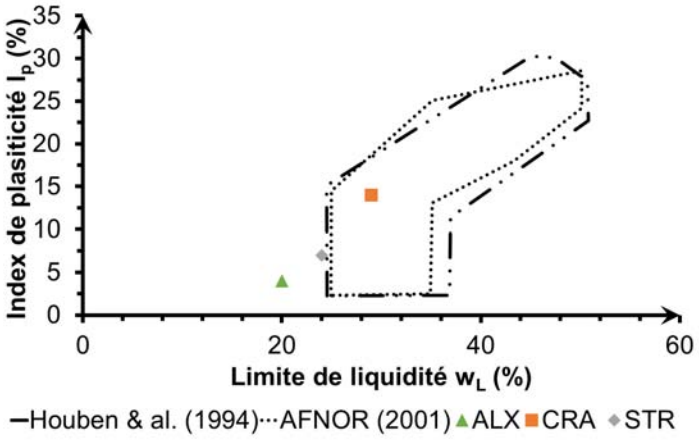


FIGURE 2.4 – Confrontation des indices de plasticité et de liquidité avec différentes normes.

La Figure 2.4 présente la confrontation entre les valeurs des indices de plasticité et de liquidité des matériaux étudiés, avec les normes [4] et [31] ayant pour but d'aider à identifier les sols convenables pour la construction en terre. On peut remarquer que seul le matériau CRA se trouve à l'intérieur du fuseau, tandis que ALX est située complètement à l'extérieur ; STR, quant à lui, est localisé sur la frontière. Cela souligne une seconde fois l'aspect indicatif et non nécessaire des fuseaux, étant donné que tous les matériaux sont issus de constructions réelles.

1.2.3 Valeur au bleu

L'essai au bleu est utilisé en géotechnique pour déterminer la propreté d'un sol. En effet, le bleu de méthylène est absorbé préférentiellement par les argiles et les matières organiques. Dans l'étude qui nous intéresse, déterminer la valeur au bleu de la partie fine des matériaux permet de mesurer leur capacité à capter les molécules de bleu de méthylène et par extension les molécules d'eau. Il se révèle donc être un indicateur de l'activité des argiles présentes.

Les valeurs au bleu ont été mesurées suivant la procédure décrite dans [41].

Les résultats sur les différentes terres sont regroupés dans le Tableau 2.2.

	ALX	**CRA**	**STR**
Limite de liquidité (W_l)	20%	29%	24%
Limite de plasticité (W_p)	16%	16%	18%
Indice de plasticité (I_p)	4%	14%	7%
Valeur au bleu (VB)	0,8	2,7	1,0
Principaux minéraux argileux	Illite + Vermiculite	Illite + Kaolinite	Illite + Chlorite

TABLEAU 2.2 – Résultats des mesures de limites d'Atterberg et de valeurs au bleu pour les terres étudiées.

L'indice de plasticité et la valeur au bleu de la fraction 0-400µm de CRA sont au moins deux fois supérieurs aux valeurs correspondantes pour STR, alors que leur granulométrie sont similaires. D'autre part, les valeurs au bleu de la fraction 0-400µm de STR et ALX sont similaires.

1.2.4 Diffractomètre à rayons X (DRX)

Enfin, les minéraux argileux ont été identifiés à l'aide d'un diffractomètre à rayons X de marque Siemens D5000, équipé d'un monochromateur à anticathode en cobalt Ka (λ=1,789 A), orienté sur les granulats et utilisant trois préparations : de l'air sec ou air ambiant, après glycolation et après traitement à 500°C.

L'analyse de la diffraction à rayons X (DRX) montre que les argiles des trois matériaux sont relativement stables (illite, kaolinite, et chlorite), à l'exception de la vermiculite dans la terre ALX.

Ces résultats sont en concordance avec les connaissances répandues [26] qui stipulent que la teneur globale en argiles devrait être suffisante pour assurer une bonne rigidité et résistance du matériau, mais la proportion d'argiles gonflantes doit rester limitée pour éviter la fissuration.

Les résultats sur les différentes terres sont regroupés dans le Tableau 2.2.

Pour conclure, les mesures présentées dans cette section permettent de déterminer la classification des sols étudiés selon la classification GTR, regroupées dans le

Tableau 2.3. A noter qu'il existe une différence de classification entre le matériau brut et celui tamisé à 2mm pour la terre ALX (passage d'un sol "sableux et graveleux avec fines" à sol "fin"), mais celle-ci n'est pas modifiée pour les terres CRA et STR (sols "fins"). L'étude menée dans cette thèse ne se rapporte donc qu'à des sols fins.

	ALX	**CRA**	**STR**
matériau brut	B5	A2	A1
matériau tamisé	A1	A2	A1

TABLEAU 2.3 – Résultats de la détermination des classifications des sols avant et après tamisage, pour les terres étudiées, d'après la classification GTR.

1.2.5 Isothermes de sorption

Les isothermes de sorption/désorption sont souvent utilisées pour caractériser le comportement hygroscopique des matériaux. Elles établissent la relation entre la teneur en eau dans le matériau en fonction de l'humidité relative de l'environnement en contact, à une température donnée.

L'isotherme de sorption/désorption est composée de deux courbes, une pour la sorption, l'autre pour la désorption. Ceci révèle l'existence d'une hystéresis entre la sorption et la désorption, qui est plus ou moins importante selon les matériaux.

Ces courbes ont été mesurées pour les trois terres étudiées et selon deux méthodes.

Solutions salines

Les isothermes de sorption ont été mesurées à 23°C pour chacune des terres selon la norme NF EN ISO 12571 :2000. A noter qu'avec cette technique, les isothermes de désorption n'ont pas été réalisées.

La mesure ayant été réalisée pour un nombre important d'échantillons, les dessiccateurs du laboratoire se sont trouvés inadaptés et des boites étanches ont été fabriquées. Elles sont composées d'une grille sur laquelle sont posés les échantillons, et sous laquelle se trouve la solution saline saturée. De petits ventilateurs ont également été ajoutés afin de s'assurer du brassage permanent de l'air et donc du maintien de la bonne humidité relative partout à l'intérieur de la boite. Un joint supplémentaire a été ajouté pour éviter tout échange avec l'environnement extérieur. La boite est ensuite stockée dans une salle à une température contrôlée de 23°C. Enfin, un capteur de température/humidité relative est placé à l'intérieur des boites afin d'en vérifier l'ambiance.

Afin d'avoir un nombre de points suffisants, huit boites ont été réalisées à huit humidités relatives différentes. Celles-ci, avec les solutions salines correspondantes, sont regroupées dans le Tableau 2.4. A partir d'un état sec, les échantillons sont placés successivement dans des boites à humidité relative croissante (sorption), puis décroissante (désorption), en prenant soin de faire le changement d'une boite à l'autre

après avoir atteint l'équilibre (stabilisation de leur masse avec une balance précise à 0,0001g). A noter que la masse sèche est obtenue par un séchage à l'étuve à 105°C, non représenté sur l'isotherme. Pour chacune des terres, les isothermes de sorption/désorption sont regroupées sur la Figure 2.5.

Composé chimique	**Formule**	**HR à 20°C** (%)
Silica gel	$Si(OH)_4$	3,0
Acétate de potassium	KC_2H_302	23,1
Carbonate de potassium	K_2CO_3	43,2
Bromure de sodium	NaBr	59,1
Chlorure de sodium	NaCl	75,5
Chlorure de potassium	KCl	85,5
Sulfate de potassium	K_2SO_4	97,1

TABLEAU 2.4 – Correspondance entre les solutions salines et l'humidité relative à 20°C.

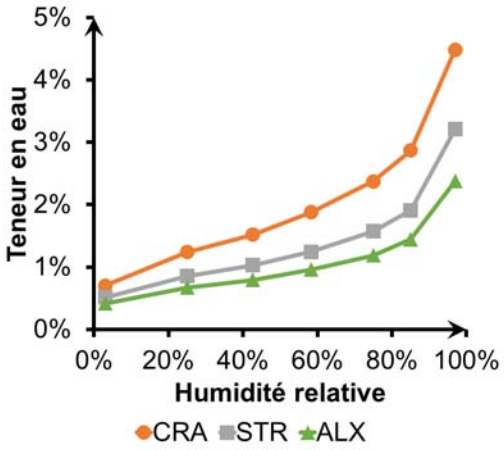


FIGURE 2.5 – Isothermes de sorption à 23°C des matériaux étudiés, mesurées avec les solutions salines.

Dans la Figure 2.5, on peut remarquer que la teneur en eau des échantillons de CRA est la plus élevée pour toutes les humidités relatives étudiées. Cette observation concorde avec la mesure de valeur au bleu de la fraction 0-80µm des matériaux. En effet, la capacité d'absorption est connue pour augmenter avec la capacité d'échange des cations [51], qui est, elle aussi, liée à l'activité des argiles et donc à la valeur au bleu.

Sorption dynamique de vapeur (DVS)

Le DVS est un appareil permettant de mesurer la prise en eau d'un échantillon de matériau. Initialement utilisé dans le milieu pharmaceutique pour évaluer la vul-

nérabilité des médicaments à l'humidité, son utilisation a été étendue à l'étude des matériaux hygroscopiques tels que le chanvre, la terre, etc. L'appareil est composé de différents éléments : une chambre à hygrométrie et température contrôlées, ainsi qu'une balance, précise au micro-gramme, qui mesure la prise en eau de l'échantillon variant avec l'hygrométrie générée dans la chambre. La température de la chambre est maintenue par un système chauffant, contrôlé par un PID. La chambre est traversée par un flux d'humidité contrôlé, généré par un mélange d'air sec et d'air saturé en vapeur d'eau, tous deux maintenus à la même température que celle de la chambre. La gamme de fonctionnement du DVS va de la température ambiante à 50°C en température, et de 0%HR à 97,5%HR en humidité relative. Les différents éléments composant ce dispositif sont illustrés dans la Figure 2.6.

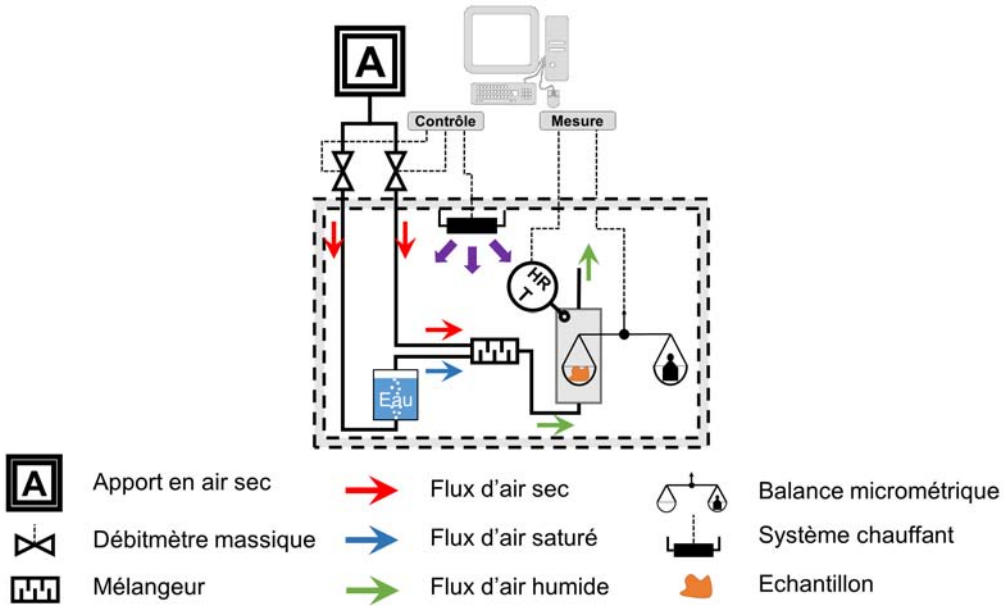


FIGURE 2.6 – Schéma récapitulatif du fonctionnement du DVS.

Pour la détermination d'une isotherme de sorption/désorption, un échantillon de matériau de masse inférieure à 1g est placé sur la balance. Pour une température donnée, les paliers de variation d'humidité relative désirés sont à renseigner. Dans le cas de notre étude, les paliers ont été plus petits dans les très hautes et très basses humidités : un palier de 2,5% a été appliqué entre 0%HR et 20%HR, un de 10% entre 20%HR et 60%HR, un de 5% entre 60% et 85%HR, et enfin un de 2,5% entre 85%HR et 97,5%HR ; ceux-ci étant identiques pour l'isotherme de désorption. Effectuant une mesure toutes les minutes, le temps de chaque palier est déterminé par l'appareil, lorsque la variation de masse de l'échantillon est inférieure à 0,1% sur plusieurs mesures d'affilée (ici 10 mesures). La détermination complète de l'isotherme de sorption/désorption dans notre étude nécessite environ 9 jours.

Les isothermes de sorption/désorption à 23°C pour les trois terres étudiées sont

regroupées dans la Figure 2.7.

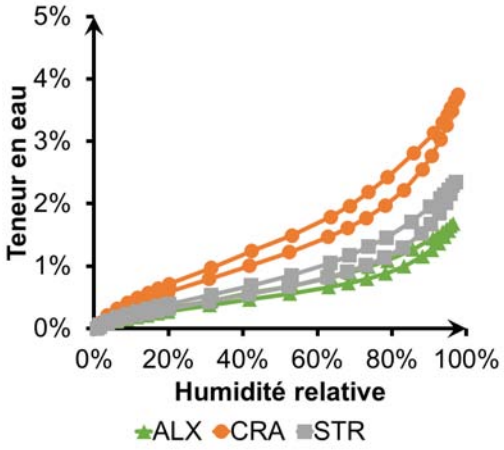


FIGURE 2.7 – Isothermes de sorption à 23°C des matériaux étudiés, mesurées avec le DVS.

En comparant rapidement les isothermes de sorption/désorption déterminées avec les solutions salines de celles déterminées avec le DVS, on constate une différence non négligeable, visible notamment sur la teneur en eau à 97%HR (e.g. pour STR, elle est d'environ 3% avec les sels et 2% avec le DVS). Une différence due à la différence de taille des échantillons existe ; elle apparait cependant très importante dans notre cas d'étude. Nous avons décidé de regarder ce qu'il en était de la masse sèche de l'échantillon, qui sert de référence au calcul de la teneur en eau.

En effet, l'humidité relative de 0%HR n'étant pas atteignable expérimentalement, l'humidité relative utilisée pour déterminer la masse sèche de l'échantillon par le DVS correspond à l'humidité relative de l'air sec d'arrivée, et le séchage se fait à 23°C. L'idée a alors été de sécher à l'étuve à 105°C l'échantillon placé dans la balance du DVS à la fin des cycles ; ce séchage étant celui réalisé pour la détermination des isothermes avec les solutions salines. Les différences de "masse sèche" entre les deux méthodes, ainsi que la teneur en eau résiduelle correspondante, sont regroupées dans le Tableau 2.5.

	m_{DVS} (mg)	m_{105C} (mg)	w_{res} (%)
ALX	512,7	511,1	0,32%
CRA	465,1	462,4	0,58%
STR	535,9	531,9	0,76%

TABLEAU 2.5 – Comparaison des masses sèches des échantillons utilisés pour déterminer l'isotherme de sorption/désorption à 23°C, données par le DVS et le séchage à 105°C, ainsi que les teneurs en eau résiduelles.

On constate alors que la différence de masse sèche est importante, et la Figure 2.8 expose les isothermes de sorption/désorption des différentes terres dont la masse sèche

a été corrigée. Enfin, la Figure 2.9 compare les isothermes de sorption/désorption déterminées avec les solutions salines avec celles déterminées par le DVS. On peut constater la meilleure correspondance entre les résultats obtenus à partir de méthodes expérimentales différentes.

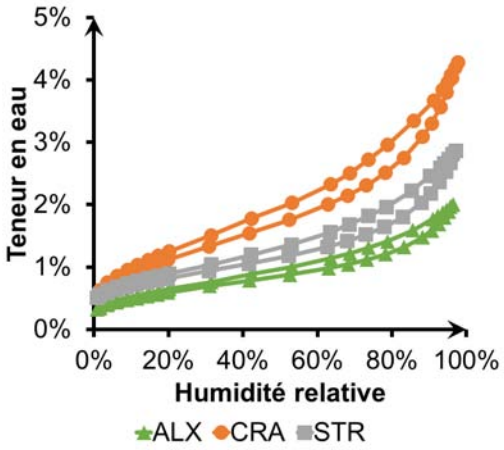


FIGURE 2.8 – Isothermes de sorption à 23°C des matériaux étudiés, mesurées avec le DVS, avec la correction de la masse sèche.

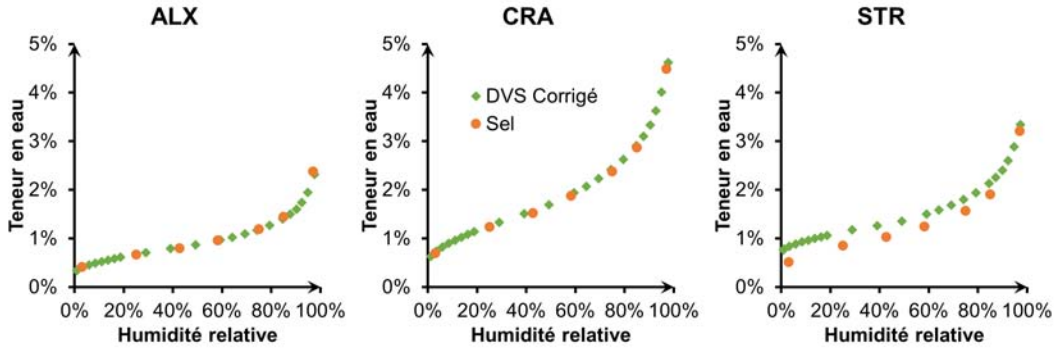


FIGURE 2.9 – Isothermes de sorption à 23°C des matériaux étudiés, mesurées avec les solutions salines et le DVS avec la correction de la masse sèche.

Influence de la température

L'influence de la température sur les isothermes de sorption/désorption a été étudiée pour de nombreux matériaux de construction et est, la plupart du temps, non-négligeable. Cependant, aucune étude ne semble avoir été publiée en ce qui concerne le matériau terre.

La Figure 2.10 représente, pour chaque humidité relative, la différence de teneur en eau de l'échantillon à 23°C et à 30°C. La différence est toujours inférieure à 0,4%, ce qui reste très faible. En conséquence, la variation avec la température de la teneur en eau, pour une humidité relative donnée, est par la suite négligée.

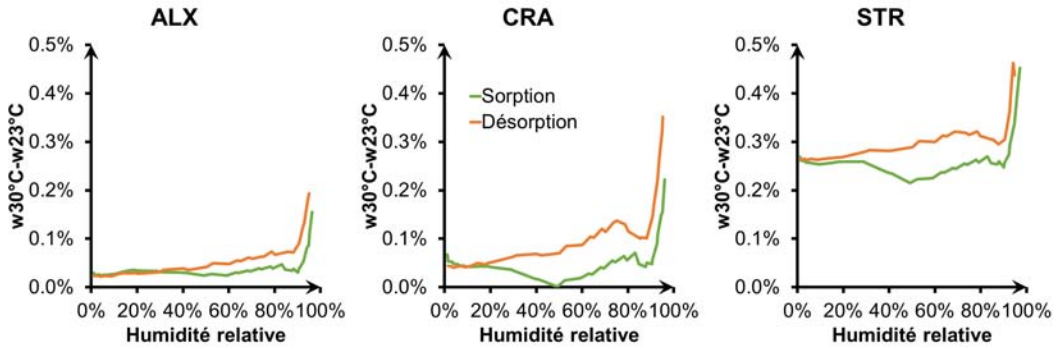


FIGURE 2.10 – Différence des isothermes de sorption à 23°C et 30°C des matériaux étudiés, mesurées avec le DVS.

2 Fabrication des échantillons

2.1 Teneur en eau de fabrication

Afin de déterminer la teneur en eau de fabrication optimale, deux méthodes courantes ont été étudiées : l'essai Proctor et l'optimum BTC.

L'essai Proctor est un essai géotechnique permettant de déterminer la teneur en eau de fabrication conduisant à la densité sèche maximale, pour une énergie de compactage fixée. L'essai consiste à damer l'échantillon en couches successives et à énergie de compactage fixée, le tout étant détaillé dans la norme NF P94-093. Deux énergies et donc deux essais existent : l'essai Proctor et l'essai Proctor modifié. Ce dernier a été choisi car il permet d'aboutir à des densités proches de celles obtenues dans les murs en pisé.

Des essais de Proctor modifié ont été réalisés sur les terres de CRA et STR dont les résultats sont présentés dans la Figure 2.11. Pour ces deux terres, l'optimum Proctor se situe autour de 9% de teneur en eau pour une densité de 2,02 g.cm^{-3} pour STR et 2,07 g.cm^{-3} pour CRA. On peut ainsi remarquer que la teneur en eau optimale est la même pour les deux terres, bien que l'activité de CRA soit plus importante que celle de STR.

Le principe de l'optimum BTC est similaire à celui du Proctor, mis à part que l'échantillon n'est pas fabriqué par damage en couches successives mais par double compactage statique à force constante. Dans le cadre de cette thèse, l'optimum BTC a été déterminé selon la procédure décrite dans [41]. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 2.6.

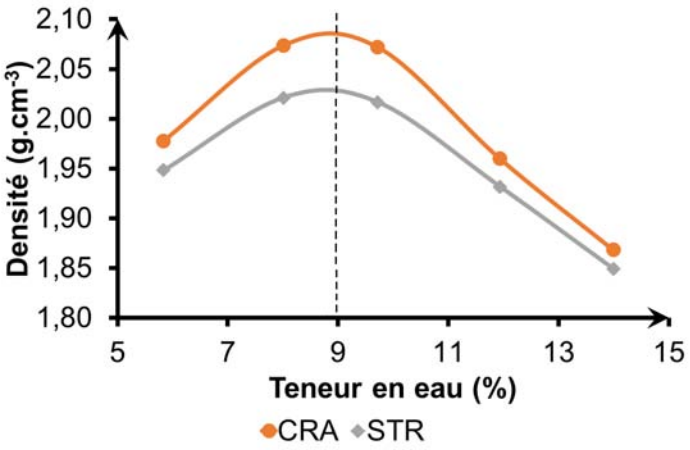


FIGURE 2.11 – Résultats de la détermination des optima Proctor pour les terres CRA et STR.

Terres	ALX	CRA	STR
Teneur en eau optimale (%)	9	11	11
Poids de fabrication (kg)	9	8,8	8,8
Densité sèche (g/cm^3)	1,98	1,97	1,95
Porosité estimée (%)	25,3	25,7	26,4

TABLEAU 2.6 – Caractéristiques des optimum BTC de terres tamisées à 10mm.

Ces densités sèches à l'optimum sont assez proches pour les deux méthodes (2,05 en moyenne pour le Proctor modifié contre 1,96 pour le BTC). Par contre, l'optimum BTC conduit à des teneur en eau optimales significativement plus élevées (11% contre 9%).

Dans la suite de l'étude, le choix a été fait de se concentrer sur des échantillons de terre compactée statiquement, en conséquence de quoi nous avons retenu la teneur en eau de l'optimum BTC pour la réalisation des échantillons.

2.2 Conception du moule

Le moule a été conçu afin de répondre à trois critères :

— la géométrie de l'échantillon doit être soignée
— le moule doit être simple d'utilisation et doit pouvoir être manipulé par une seule personne
— la densité de l'échantillon doit être homogène

La solution technologique répondant à ces critères est représentée sur la Figure 2.12, elle est pour beaucoup inspirée du moule de [45].

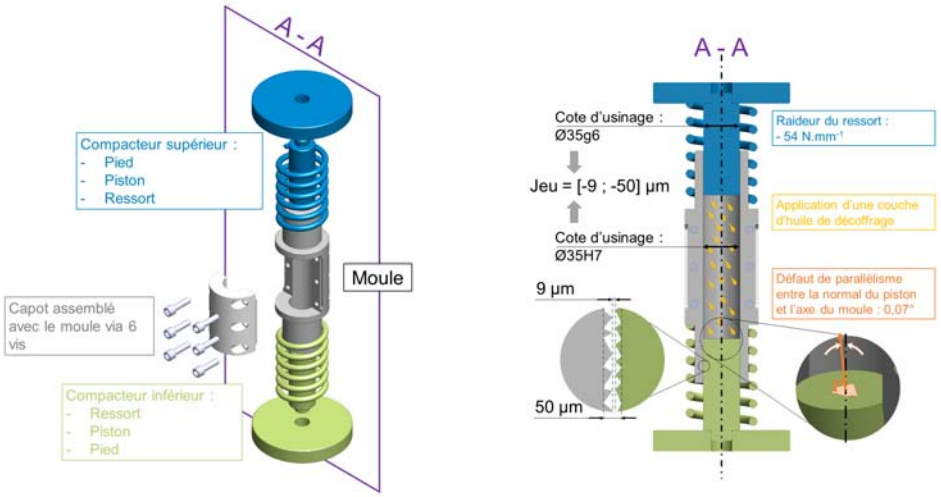


FIGURE 2.12 – Vue éclatée du moule et des différents composants.



FIGURE 2.13 – Photo du moule et ses composants.

2.2.1 Géométrie

L'échantillon à réaliser est un cylindre de 35 mm de diamètre et d'une hauteur de 70 mm. Les deux faces supérieure et inférieure du cylindre doivent être rigoureusement parallèles entre elles et perpendiculaires à l'axe de révolution. L'état de surface du moule doit être adapté au contact du matériau terre sans être détérioré par une utilisation répétée. Enfin, le moule doit être suffisamment rigide pour garantir les dimensions souhaitées quel que soit le niveau de compactage.

Pour ce faire, le matériau utilisé est un acier 35NCD16 trempé, adapté pour des pièces mécaniques fortement sollicitées (d'après les documents du constructeur Aubert Duval), ce qui limitera les dégradations dues à l'abrasion du matériau terre contre les parois du moule. Ces dégradations seront d'autant plus limitées par un usinage ajusté des pistons avec le moule : l'ajustement choisi (35H7g6) impose un jeu limité compris entre 9 et 50µm. Ce faible jeu limite la rugosité de surface ainsi

que l'insertion de particules abrasives entre les éléments. D'autre part, l'ajustement des pistons avec le moule permet un alignement parfait des éléments entre eux, le parallélisme des faces supérieure et inférieure résultant du bon usinage de la face de chaque piston (face perpendiculaire à son axe). Enfin, les 17,5mm d'épaisseur des parois du moule assurent la résistance.

2.2.2 Double compactage et ressorts

Le comportement mécanique du matériau étant fortement lié à sa densité, le moule doit permettre un compactage homogène du matériau. La méthodologie de remplissage, présentée dans le paragraphe suivant, est une première étape afin de garantir une bonne homogénéité du matériau. Le jeu de ressorts permettant le double compactage et le dépôt d'une fine couche de décoffrage (cf Figure 2.12) limitent le gradient de densité longitudinal de l'échantillon.

Le but du double compactage est de s'assurer que les déplacements moule/piston inférieur, moule/piston supérieur soient égaux, ce qui est permis par les ressorts inférieur/supérieur montés en série.

2.3 Protocole de réalisation des échantillons

Le protocole de réalisation des échantillons, en commençant par le remplissage du moule, est représenté dans la Figure 2.14.

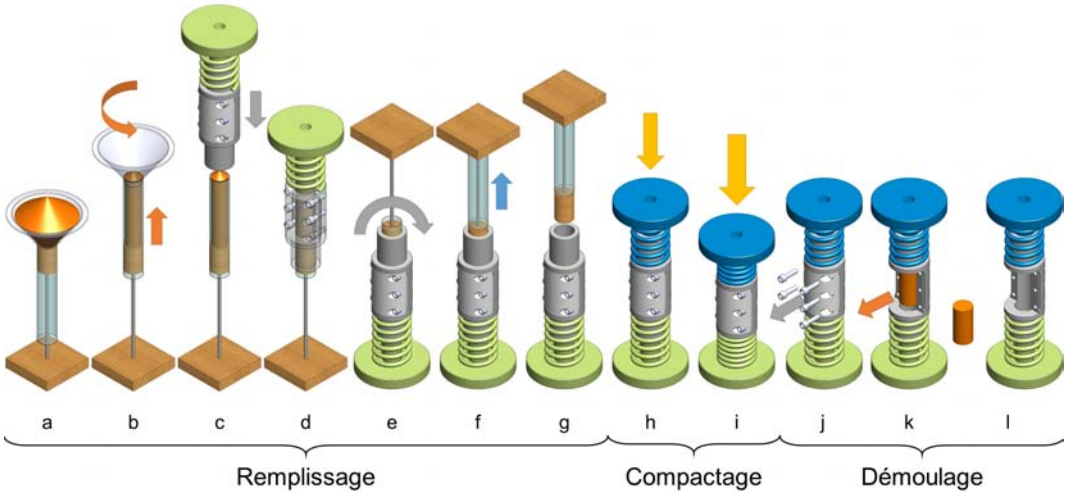


FIGURE 2.14 – Méthodologie de remplissage du moule.

Le remplissage du moule doit être réalisé de manière précautionneuse afin de garantir une bonne homogénéité de l'échantillon. Pour ce faire, la hauteur de chute de la terre foisonnée est maitrisée grâce à l'utilisation de plusieurs outils : un tube en plastique transparent, dont le fond est constitué d'un bouchon coulissant et maintenu

par une tige métallique fixée sur un socle, est rempli à l'aide d'un entonnoir **(a)**. A mesure que le tube est remonté, l'entonnoir, préalablement rempli avec la quantité de terre voulue, se vide progressivement **(b)**. Idéalement, la hauteur de terre foisonnée dans le tube est égale au double de la hauteur de l'échantillon compacté. L'entonnoir est ensuite ôté et le tube laissé à la verticale. Il est par la suite inséré dans le moule jusqu'au piston inférieur, lesquels sont maintenus verticalement à l'envers **(c)(d)**. Une fois l'ensemble retourné **(e)**, le tube en plastique est remonté en premier, en veillant à maintenir le bouchon afin d'éviter que la terre foisonnée ne soit emportée par le tube **(f)(g)**. Le piston supérieur peut alors être mis en place.

Une fois le moule rempli, il est placé sur la presse afin de compacter la terre jusqu'à obtenir la hauteur d'échantillon souhaitée **(h)(i)**. A la fin du compactage, le retrait des six vis **(j)** permet l'ouverture du capot et l'extraction de l'échantillon **(k)(l)**.

A noter, qu'avant toute utilisation du moule et entre la réalisation des échantillons, celui-ci est nettoyé à l'aide d'un goupillon et lubrifié avec environ 0,1mL d'huile de décoffrage.

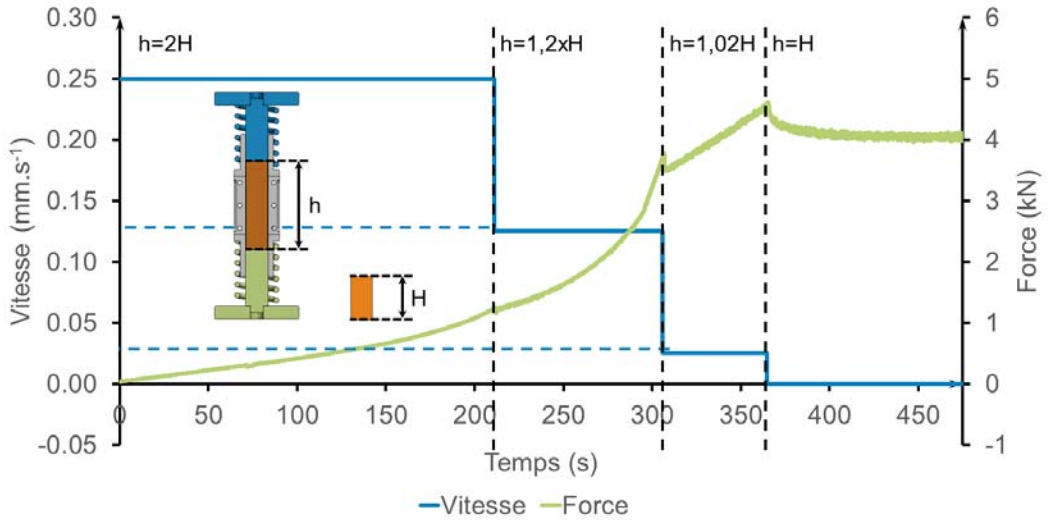


FIGURE 2.15 – Protocole de compactage.

Le protocole de compactage des échantillons, décrit dans la Figure 2.15, est inspiré du protocole utilisé par Myriam Olivier [45]. Il consiste à compacter en deux phases : une première phase, où la terre est encore très foisonnée et l'espace poral très important ; c'est principalement l'air qui est éjecté. La vitesse de compactage est alors très rapide (environ 0,25 $mm.s^{-1}$). Lors de la deuxième phase, les particules de terre viennent en contact les unes des autres, l'espace poral devient faible et l'eau est éjectée en dehors des pores. Pour cette raison, la vitesse de compactage est fortement réduite (environ 0,13 $mm.s^{-1}$), pour laisser le surplus d'eau s'éjecter hors du moule et ainsi limiter la contrainte de compactage.

Dans notre cas, compte tenu du moule et du faible jeu entre ses éléments, deux autres phases ont été ajoutées. Les deux premières phases sont identiques. La troisième, à 1,5 mm avant d'atteindre la hauteur d'échantillon souhaitée, la vitesse de compactage est encore réduite (0,03 mm.s^{-1}). La dernière phase consiste à maintenir la position de la presse jusqu'à la stabilisation de la force mesurée par la presse.

2.4 Vérification de l'homogénéité

Une étude de l'homogénéité a été effectuée à l'aide d'un gamma-densimètre au laboratoire de l'IFSTTAR de Nantes. Cette étude a permis la mesure des profils de densité sur la hauteur de l'échantillon. Comme illustré sur la Figure 2.16, ces mesures ont montré une bonne homogénéité.

A noter que les échantillons testés ont d'abord été réalisés dans la partie préliminaire de l'élaboration du protocole de réalisation des échantillons. A ce stade, la terre était introduite sans maitrise de la hauteur de chute, et sans application d'huile de décoffrage. Ceci correspond à l'appellation "ancien protocole", et la terre CRA avait été utilisée. Des échantillons réalisés avec le protocole décrit précédemment ("nouveau protocole") ont été testés pour toutes les terres. Les graphiques de la Figure 2.16 regroupent les mesures de densité tandis que le Tableau 2.7 présente les valeurs moyennes de densité ainsi que les écarts maximaux à la moyenne pour les différentes terres.

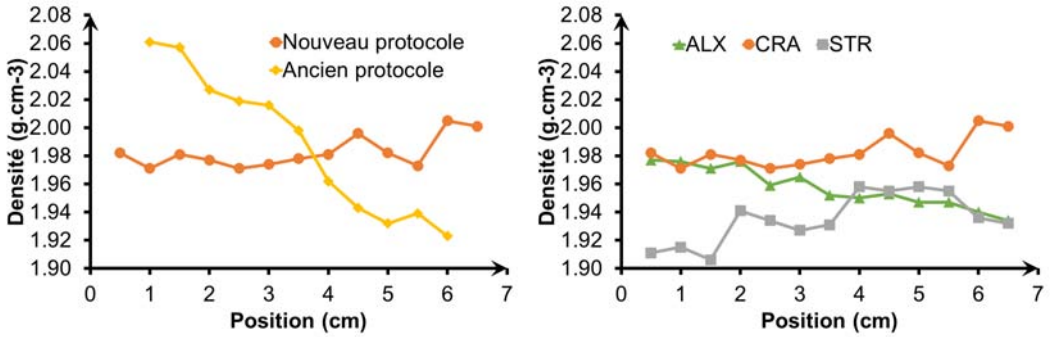


FIGURE 2.16 – Comparaison de l'homogénéité entre les deux protocoles de réalisation des échantillons pour la terre CRA ; mesures de la variation de la densité sur la hauteur de l'échantillon, pour les trois terres étudiées.

Les figures et le tableau précédents témoignent donc, à la fois de la bonne homogénéité des échantillons pour toutes les terres, et soulignent l'amélioration apportée par le nouveau protocole de réalisation des échantillons.

3 Conditionnement des échantillons

Afin d'assurer un contrôle de l'humidité relative, les échantillons sont conditionnés dans des boites hermétiques faites-maison, elles-mêmes stockées dans une chambre

	$\rho_{d,moy}$ (g.cm^{-3})	$\mathbf{E}_{max}$ (%)
CRA_{ancien}	1,99	3,6%
$CRA_{nouveau}$	1,98	1,1%
$ALX_{nouveau}$	1,96	0,9%
$STR_{nouveau}$	1,93	1,5%

TABLEAU 2.7 – Tableau récapitulatif de la répartition de densité des échantillons réalisés : densité moyenne et écart maximal à la moyenne.

climatique à température contrôlée à 24°C +/-2°C. L'humidité relative à l'intérieur des boites est régulée à l'aide de solutions salines d'après la norme NF EN ISO 12571 :2000, et à quatre humidités relatives (3%, 23%, 75% et 97%), et homogénéisées à l'aide de petits ventilateurs. La température et l'humidité relative sont contrôlées grâce à des capteurs HMP50 de marque Campbell Scientific, Inc, Logan, UT. Les échantillons ont été pesés deux fois par jour pour vérifier leur prise en eau. Une fois l'équilibre atteint (c'est-à-dire une masse variant de moins de 2% pendant une semaine), les échantillons sont testés.

Chapitre 3

Développement d'une cellule triaxiale à hygrométrie contrôlée

Contents

1 Présentation de la cellule triaxiale 66
2 Instrumentation de l'échantillon 68
2.1 Les capteurs 68
2.2 Le porte-capteur 69
2.2.1 Matériau 69
2.2.2 Assemblage 70
2.2.3 Mesure des déformations radiales 70
2.2.4 Mesure des déformations axiales 70
2.3 Acquisition des données 73
3 Protocole de mise en place de l'échantillon et son instrumentation 74
3.1 Préparation de l'échantillon 74
3.2 Mise en place du porte-capteur et de l'échantillon 75
4 Régulation de la cellule 75
4.1 Dispositif de régulation en température 75
4.2 Régulation en hygrométrie 76
4.2.1 Choix de la méthode d'imposition de la succion . 76
4.2.2 Générateur d'air humide : WetSys 78
4.3 Configuration du système hydraulique 78
5 Validation du dispositif expérimental 79
5.1 Effet de l'élancement 79
5.2 Essai triaxial sur échantillon étalon 80

Le chapitre précédent présente le gabarit des échantillons réalisés pour notre étude. Ce chapitre développe les différentes étapes de l'élaboration du dispositif permettant la mesure de leur comportement mécanique sous différents aspects.

1 Présentation de la cellule triaxiale

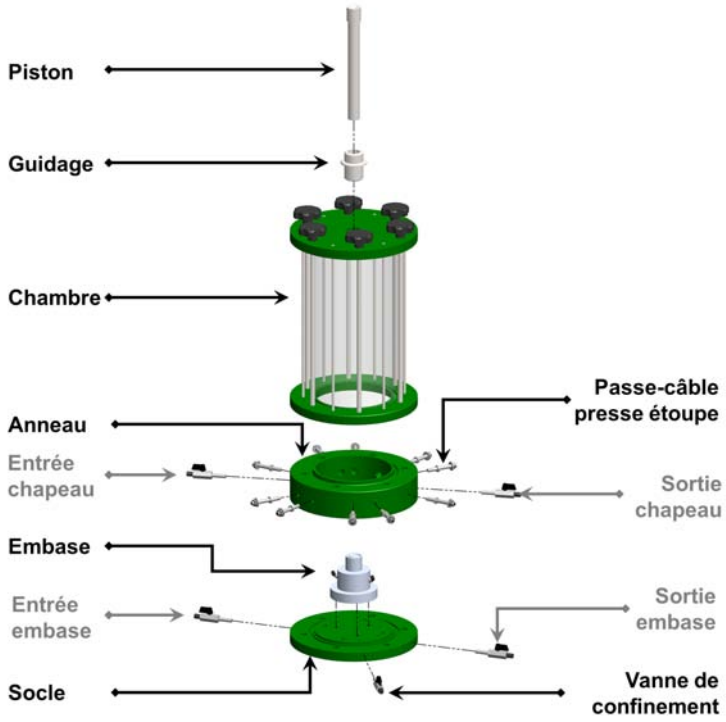


FIGURE 3.1 – Schéma de la cellule triaxiale.

La cellule triaxiale utilisée a été réalisée par la société GDS, et a été fournie avec un anneau pour l'instrumentation permettant le passage des câbles des capteurs (HR, T, déplacement, tuyauteries). L'embase a été usinée pour recevoir des échantillons de 3,5cm de diamètre, mais elle peut être changée pour pouvoir tester des échantillons de plus grand diamètre. La pression maximale de confinement à l'eau est de 1MPa. L'embase et le chapeau disposent d'un système de drainage pour pouvoir effectuer des essais drainés. Comme illustré sur le schéma de la Figure 3.1, l'axe permettant d'appliquer le déviateur est guidé par la chambre. Les biais de ce type de guidage sont connus et sont regroupés sur les schémas de la Figure 3.2.

Le schéma (**a**) décrit la situation parfaite : tous les éléments qui constituent la cellule triaxiale et l'échantillon sont parfaitement alignés ; aucun biais de mesure n'est dû à la géométrie de l'échantillon ni au défaut de la cellule. Les schémas (**b**)(**c**)(**d**) décrivent les désalignements dus à la cellule. La situation (**b**) est obtenue si, par

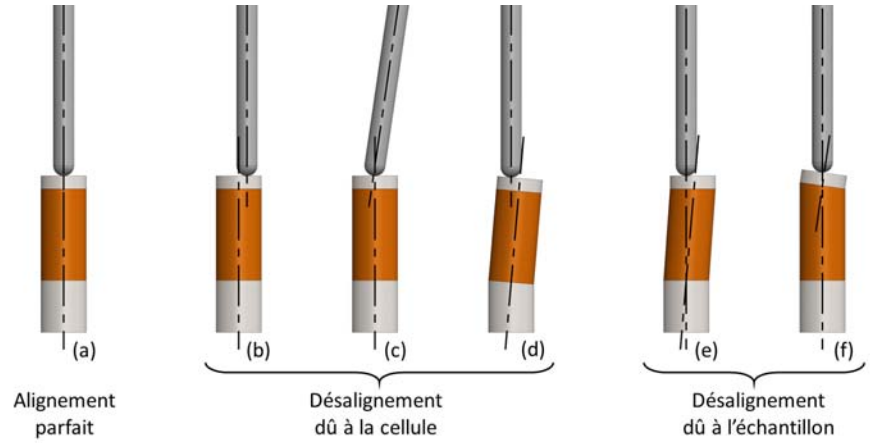


FIGURE 3.2 – Schéma des cas types de désalignement.

exemple, la chambre et le socle de la cellule sont désaxés à cause d'un jeu entre ces deux éléments ; la situation (**c**) est obtenue si le guidage du piston est trop court et/ou le jeu entre eux trop important ; la situation (**d**) est un cas probable si une pierre poreuse est placée entre l'embase et l'échantillon. Les schémas (**e**)(**f**) décrivent des désalignements dus à l'échantillon. Afin de remédier à ces défauts, un surfaçage est effectué soit par enlèvement (découpe + polissage) ou ajout de matière (surfaçage au soufre). Dans notre cas, le matériau terre ne peut être surfacé : le polissage n'est pas possible, et les surfaces doivent restées vierges pour pouvoir mener à bien les essais de transfert d'eau. Il convient alors de bien faire attention à la géométrie de l'échantillon dès sa réalisation.

Il est donc primordial que les échantillons soient le plus homogènes possible et aient une bonne géométrie afin que la mesure globale soit correcte pour en déduire le comportement global du matériau. D'autre part, il est impératif que le système qui applique les efforts le fasse de façon homogène pour ne pas initier des ruptures précoces du matériau.

Étant donné la cellule triaxiale utilisée, il est probable que l'on se trouve dans le cas "b" de la Figure 3.2. En effet, à la fois le socle, l'anneau et la chambre sont susceptibles d'être désaxés lors de leur mise en place. Il n'est cependant pas à exclure que la réalité soit un mélange de tous les cas présentés dans la Figure 3.2. De ce constat découle le protocole de mise en place de l'échantillon et des éléments de la cellule, qui sera traité dans une partie ultérieure.

Au-delà de ces précautions, la rotule formée entre le chapeau et le piston a été remplacée par le système schématisé dans la Figure 3.3 et photographié dans la Figure 3.4. Ce système permet d'avoir une liaison rotulée sans induire de déplacement parasite de l'échantillon. Le disque et le piston forment une rotule liée par une membrane élastique.

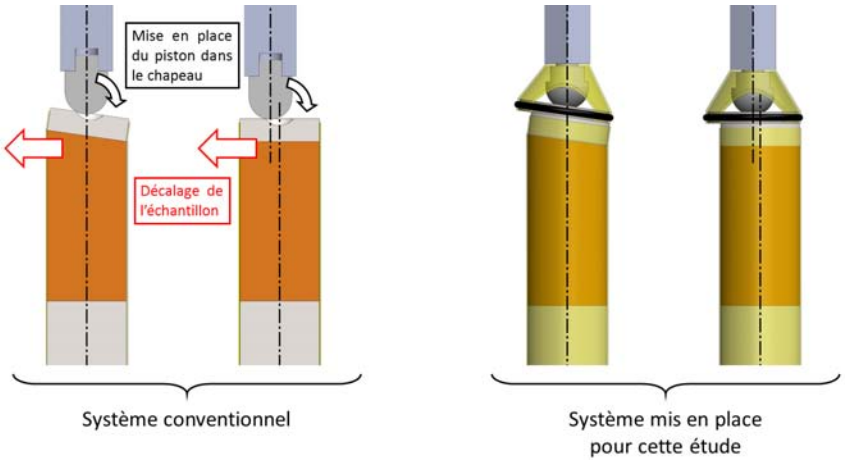


FIGURE 3.3 – Schéma du système conventionnel et de la rotule.



FIGURE 3.4 – Photo de la rotule utilisée.

2 Instrumentation de l'échantillon

2.1 Les capteurs

Les capteurs de déplacements retenus sont des capteurs sans contact 9U de la marque Kaman. Le conditionneur employé est un KDM-8206 de la même marque. Ces capteurs ont été choisis pour leur étanchéité à l'eau, leur sensibilité de 0,4 µm, de leur plage de mesure de 0 à 2mm et de l'absence de contact mécanique entre l'élément qui se déplace et le capteur. En effet, le capteur sans contact est constitué d'une bobine excitée par le conditionneur à une fréquence de 50kHz, générant ainsi un champ magnétique. Face à ce capteur est positionnée une cible, un matériau conducteur en aluminium ou en acier, qui va influer sur le champ magnétique. Cette modification se matérialise par une augmentation ou une diminution du courant électrique passant dans la bobine et ce en fonction de la distance séparant la cible du capteur. Le conditionneur mesure le courant et génère un signal +/- 10V proportionnel à la distance et facilement lisible par un périphérique d'acquisition.

Le capteur n'est pas influencé par son environnement (eau, poussière, gaz...) et par les autres matériaux non-conducteurs comme la membrane. Ainsi le capteur peut-être dans l'eau de la cellule et la cible contre l'échantillon à l'intérieur de la membrane. Par contre, il est influencé par la température, ce qui implique une régulation de la température dans la cellule triaxiale. D'autre part, la zone d'émission du capteur sans contact est large ce qui implique l'utilisation de large cible. Les cibles doivent avoir un diamètre de 2,5 à 3 fois le diamètre du capteur. Le capteur faisant 8mm de diamètre, on devait alors employer des cibles de 20 à 24 mm. Pour utiliser des cibles plus petites, un ré-étalonnage des capteurs a été nécessaire. La méthodologie de calibrage est donné pour chaque emploi des capteurs dans les paragraphes suivants.

2.2 Le porte-capteur

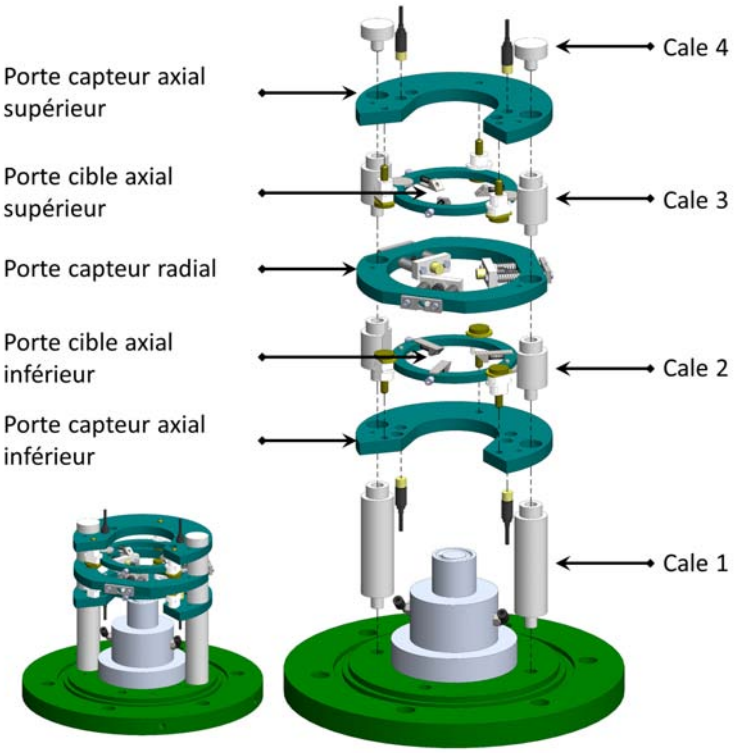


FIGURE 3.5 – Schéma éclaté des éléments du porte-capteur.

Avant de décrire les éléments qui constituent le porte-capteur, il est important d'indiquer le cahier des charges qui a aidé à sa conception représenté Figure 3.5.

2.2.1 Matériau

Le Polyoxyméthylène (POM) a été sélectionné. Ce matériau est suffisamment résistant mécaniquement et est également stable au contact de solutions aqueuses de

sel, ce qui est important dans le cadre de l'étude de l'impact des sels de déneigement sur le comportement mécanique du matériau terre. Il est également non conducteur, afin d'éviter toute interférence avec les capteurs sans contact.

En revanche, ce matériau présente un défaut, à savoir son coefficient de dilatation thermique. En effet, celui-ci est de 80 µdef.K^{-1} contre 14µdef.K^{-1} pour un acier inoxydable. Bien que les éléments en question soient de petite taille, une régulation de la température a été assurée lors des essais afin d'en minimiser les déformations.

2.2.2 Assemblage

Comme on peut le voir sur la Figure 3.5, le porte-capteur est un empilement successif de cales et de plateaux supportant les capteurs axiaux ou radiaux. Cette solution a été choisie pour 3 raisons. En premier lieu, il permet ainsi d'être démonté facilement afin de pouvoir étalonner les capteurs sur leur support. D'autre part, la hauteur des différents plateaux est ajustable aisément ce qui permet de pouvoir tester des échantillons de différentes hauteurs, et plus précisément de régler le support toujours dans le tiers central en remplaçant les différentes cales. Enfin, cette configuration peut permettre de monter le porte-capteur autour de l'échantillon, une fois ce dernier en place sur l'embase.

2.2.3 Mesure des déformations radiales

Les déformations radiales sont mesurées au moyen de 3 capteurs sans contact placés dans le plan perpendiculaire à l'axe de l'échantillon, espacés de 120°, et à mi-hauteur. Ainsi, la moyenne des déplacements supprime les déplacements de corps rigide et, en divisant par le rayon de l'échantillon, on obtient la déformation radiale. Le schéma de la Figure 3.6 représente le porte-capteur radial face à l'échantillon sur lequel est placée une cible en aluminium. La vis permet de caler initialement le porte-capteur à la bonne distance de l'échantillon de sorte que, durant l'essai, le déplacement de la cible reste dans la plage de mesure du capteur.

Les trois capteurs sans contact, employés pour la mesure des déplacements radiaux, sont étalonnés à l'aide d'une vis micrométrique et d'un élément en plastique usiné de sorte qu'il ait la forme de l'échantillon, ce dernier étant placé sur l'axe de la vis. Ainsi, l'étalonnage du capteur prend en compte la forme incurvée de la cible placée sur l'échantillon. La Figure 3.7 représente le système permettant l'étalonnage des capteurs.

2.2.4 Mesure des déformations axiales

Différentes techniques utilisant des capteurs sans contact sont présentes dans la littérature (cf Figure 3.8). Elles reposent généralement sur le même principe, à savoir mesurer les déplacements de cibles fixées sur un anneau entourant l'échantillon et suivant ses déplacements de déformation. Afin de s'assurer que les déplacements

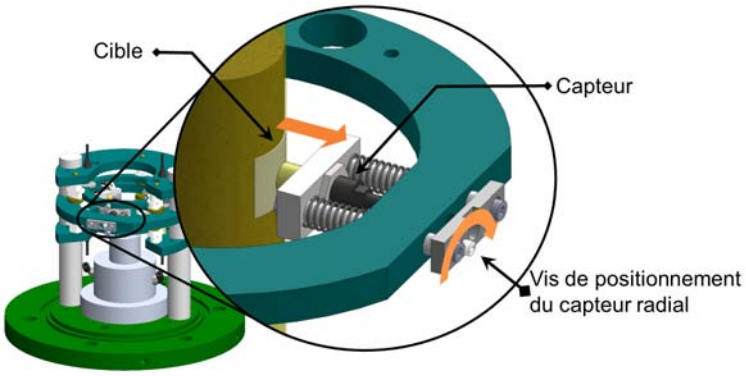


FIGURE 3.6 – Schéma zoomé sur le dispositif permettant le positionnement du capteur radial.

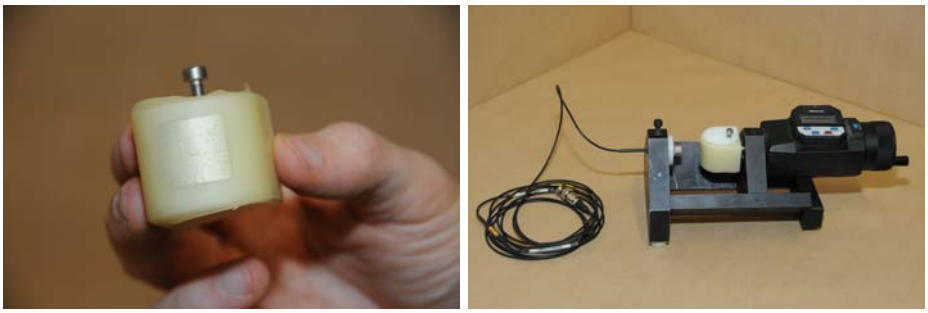


FIGURE 3.7 – Photo de la cible placée sur l'élément en plastique et de la vis micrométrique pour l'étalonnage des capteurs sans contact radiaux.

de l'anneau soient ceux de l'échantillon, différents dispositifs sont utilisés. Dans les deux cas, ils consistent à planter des éléments contondants (aiguilles, clous,...) directement dans l'échantillon, et donc à transpercer la membrane. Dans un des cas, les éléments contondants sont placés perpendiculairement à la surface de l'échantillon et supportent l'anneau. Dans l'autre cas, ils sont reliés à l'anneau par des fils tendus.

Ces dispositifs présentent des inconvénients pour notre cas d'étude :

— il est difficile de planter des éléments contondants dans de la terre compactée, d'autant plus que les échantillons étudiés sont de petite taille

— le perçage de la membrane fait perdre l'étanchéité, et un ajout de colle pour colmater la fuite est fastidieux et peut induire une rigidification locale du matériau.

— pour avoir un positionnement précis, ces dispositifs sont difficiles à mettre en place

Dans notre cas d'étude, le dispositif de mesure suit le même principe, mais différentes dispositions ont été prises afin de palier à ces inconvénients.

La mesure des déformations axiales est réalisée à l'aide de deux porte-cibles dont le déplacement est mesuré par quatre capteurs sans contact, eux-mêmes maintenus

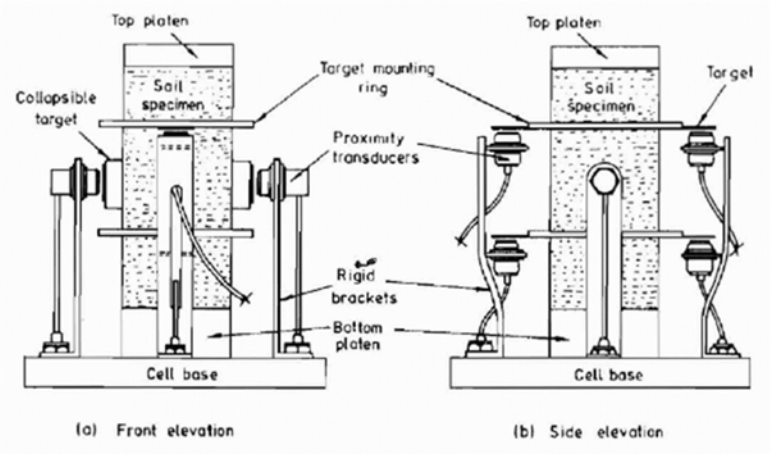


FIGURE 3.8 – Schématisation de montage des capteurs sans contact pour la mesure des déformations axiales et radiales, d'après [30].

par deux porte-capteurs. La Figure 3.9 illustre l'anneau porte-cible et le porte-capteur du bas ; afin de ne pas surcharger le schéma, les porte-capteurs et cibles du haut ne sont pas représentés (voir Figure 3.5).

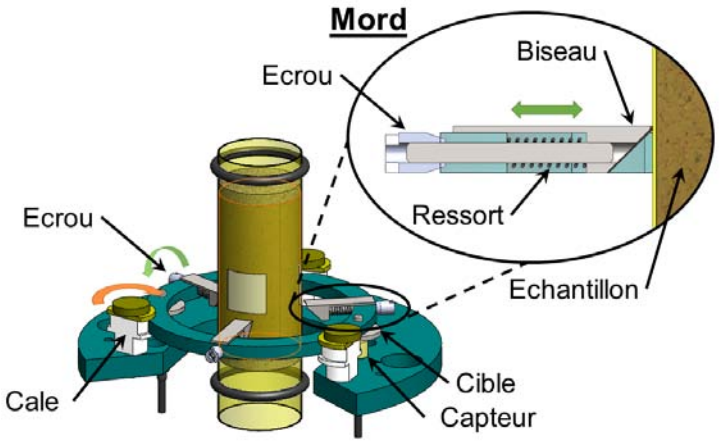


FIGURE 3.9 – Schéma du dispositif de placement et de maintien des capteurs pour la mesure des déformations axiales.

Chaque porte-cible est constitué d'un anneau traversé par trois tiges réparties à 120° l'une de l'autre. Pour chacune d'elles, leur terminaison est un mord biseauté dirigé vers l'échantillon selon un rayon de l'anneau. Chaque tige comporte un écrou de serrage et un ressort. L'écrou permet de reculer les mords pour agrandir l'espace central et permettre de placer l'échantillon plus aisément. Une fois l'échantillon en place, l'écrou est déserré et l'extension des ressorts permet aux mords de rentrer dans la membrane. L'échantillon et le porte-cible sont ainsi liés par adhérence. Le

porte-cible est ensuite libéré en tournant les trois cales (visibles sur la Figure 3.9). Les capteurs peuvent alors mesurer le déplacement des cibles, et donc du porte-cible, qui correspond aux déformations de l'échantillon.

Ces ressorts ont été dimensionnés de sorte que la force d'adhérence entre la membrane et les mords reprenne le poids du porte-cible. Avec ce dimensionnement, la force est insuffisante pour garder solidaires l'échantillon et le porte-cible pendant l'essai, du fait notamment des à-coups. Une entretoise a donc été ajoutée entre le mord et le ressort afin d'augmenter la force de poussée du ressort. Finalement, cette force a été évaluée à environ 1,35N lorsque les mords sont au contact de la membrane contre 0,75N auparavant.

Deux paires de capteurs sans contact sont placées sur des porte-capteurs et maintenues verticalement et orientées respectivement vers le bas et vers le haut, pour mesurer respectivement les déplacements du porte-cible supérieur et inférieur. Le porte-capteur axial maintient initialement le porte-cible à la bonne position à l'aide d'un jeu de cales rotatives. Les positions choisies pour les deux porte-cibles sont à des hauteurs de H/3 et 2H/3, H étant la hauteur de l'échantillon.

Finalement, lorsque l'échantillon est mis en place sur l'embase, les écrous permettent de libérer les tiges et de positionner les mords au contact avec la membrane. Ainsi, la jonction entre l'échantillon et le porte-cible est établie. Enfin, la rotation des cales permet de libérer le porte-cible du porte-capteur pour le démarrage de l'essai (illustré dans la Figure 3.9). Les capteurs sans contact mesurent le déplacement des cibles, qui correspondent aux déformations de l'échantillon. Les déformations relatives des deux paires de capteurs donnent accès aux déformations du tiers central, et donc aux déformations axiales de l'échantillon.

Les tiges pouvant coulisser le long de leur axe et, celui-ci étant contenu dans le même plan, le porte-cible n'est pas influencé par les déformations radiales de l'échantillon. Tous les échantillons testés sont munis du même système de mesure, lequel est placé à la même position et ce aisément. Enfin, les mords, bien que biseautés, ne coupent pas la membrane, ce qui nous permet aussi de gagner du temps de mise en place.

Les quatre capteurs sans contacts, employés pour la mesure des déplacements axiaux, sont étalonnés à l'aide d'une vis micrométrique. Le procédé d'étalonnage est le même que celui utilisé pour les capteurs radiaux. La Figure 3.10 représente le système permettant l'étalonnage de ces capteurs.

2.3 Acquisition des données

L'acquisition des données se fait via une carte d'acquisition National Instrument, qui récupère les signaux en -10V +10V correspondant aux différents capteurs sans contact. Ces informations sont traitées grâce au logiciel Labview, qui permet de convertir la tension en déplacement après lui avoir renseigner les courbes d'étalonnage des différents capteurs. Il permet également un affichage en direct des valeurs de déplacement, et une gestion des enregistrements.

Ces données enregistrées sont ensuite traitées sous Excel.

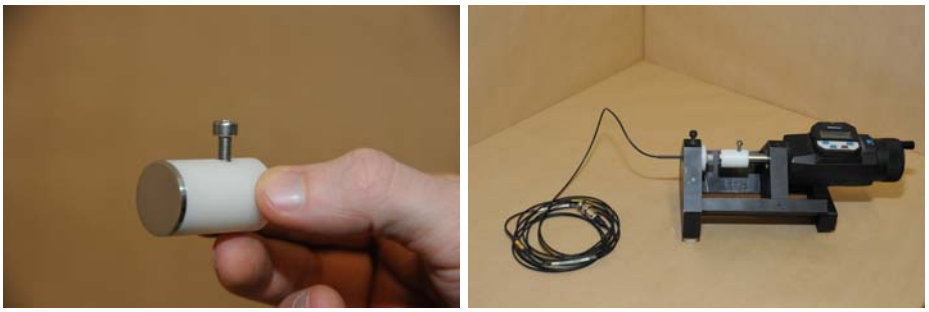


FIGURE 3.10 – Photo de la cible et de la vis micrométrique pour l'étalonnage des capteurs sans contact axiaux.

3 Protocole de mise en place de l'échantillon et son instrumentation

3.1 Préparation de l'échantillon

L'ensemble des photos de la Figure 3.11 décrit les différentes étapes de préparation de l'échantillon avant un essai.

Les cibles radiales sont des rectangles en papier aluminium. Afin de s'assurer de leur bon positionnement, un pochoir en plastique transparent (**a**) maintenu à l'aide d'élastiques, permet de dessiner au crayon l'emplacement des cibles (**b**). Un second élément en plastique est utilisé pour plaquer la cible en aluminium contre l'échantillon et ainsi éviter l'utilisation d'une colle quelconque (**c**)(**d**). La membrane, sur laquelle a été tracée l'emplacement de l'échantillon (**i**), est enroulée autour du piston du moule (**e**)(**f**). L'échantillon est ensuite posé sur le piston et la membrane relevée en prenant soin de ne pas déplacer les cibles, toujours maintenues par l'élément en plastique (**g**). Une fois les cibles recouvertes, cet élément est glissé délicatement hors de la membrane (**h**). A noter qu'à ce stade, l'ensemble échantillon+membrane est retiré du pied du piston pour être ensuite placé sur l'embase de la cellule triaxiale. Avant cela, deux pierres poreuses de même diamètre que l'échantillon sont accolées de part et d'autre à l'intérieur de la membrane (**i**).

La Figure 3.12 présente les différents accessoires placés autour de l'échantillon pendant un essai. L'échantillon, sur lequel ont été placées les cibles, la membrane et les pierres poreuses tel que décrit précédemment, est placé sur l'embase de la cellule triaxiale. Afin de s'assurer que l'échantillon est bien positionné dans l'axe, les mesures des capteurs radiaux doivent être égales. A ce moment là, le vide est fait entre l'échantillon et la membrane, à l'aide d'une pompe à vide, de manière à pouvoir insérer les joints toriques et le chapeau.

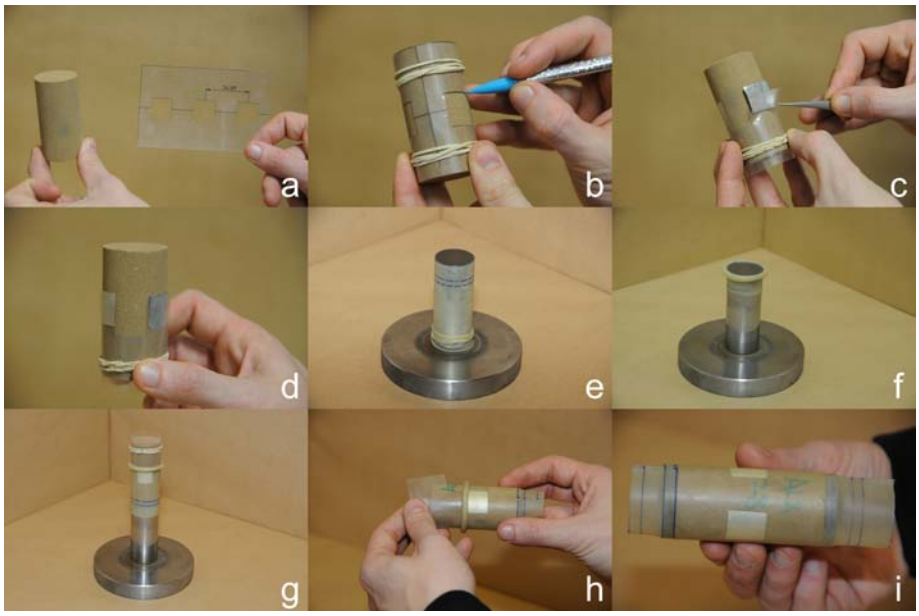


FIGURE 3.11 – Protocole de mise en place des cibles et de la membrane autour de l'échantillon.

3.2 Mise en place du porte-capteur et de l'échantillon

Nous savons que le chapeau de la cellule est susceptible d'être décalé de telle sorte que l'axe de la cellule soit également décalé de l'embase. Le chapeau a donc été modifié pour reprendre ce défaut. Cependant, l'échantillon peut également lui aussi être décalé de son embase. Il est donc nécessaire de mettre au point un protocole de mise en place de l'échantillon. Pour ce faire, un échantillon étalon en aluminium de diamètre 3,5 est utilisé et ajusté sur l'embase. Les vis permettent le placement des porte-capteurs radiaux, qui vont être placés de manière à ce qu'ils affichent tous les trois la même distance.

Enfin, cette méthodologie garantit un placement identique pour tous les échantillons testés.

4 Régulation de la cellule

4.1 Dispositif de régulation en température

Les essais effectués dans cette étude sont menés à température contrôlée. La pièce dans laquelle sont effectués les essais est régulée à 20°C, mais possède des variations de l'ordre de +/-2°C, ce qui peut amener à des risques de condensation, dans les hautes humidités relatives. Les essais sont donc réalisés à une température supérieure à la température de la pièce, c'est-à-dire à 30°C.

Deux boites chaudes ont été réalisées à l'ENTPE : une permettant la régulation

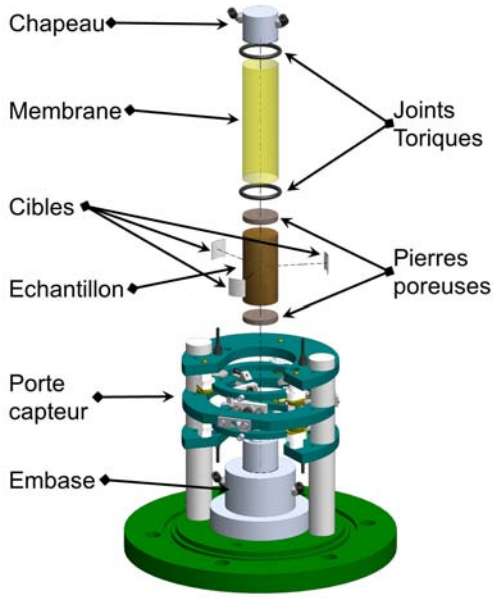


FIGURE 3.12 – Schéma éclaté de l'échantillon et de ses accessoires : pierres poreuses, cibles, membrane, joints toriques, chapeau.

de la presse et de la cellule, l'autre pour le stockage des échantillons. Les dispositifs de régulation en température sont différents pour chacune des boites. En effet, les essais triaxiaux sont assez courts (30 min de préparation et 1h d'essai), il est donc nécessaire d'avoir une régulation rapide de la température. En revanche, on accède moins souvent à la boite de stockage.

Un PID a été utilisé pour la régulation de l'étuve et un tout ou rien pour la boite de stockage. Le PID a pour but de réaliser une régulation sans dépassement de la température de consigne.

Deux types de porte ont été conçus en fonction de la durée des essais : une porte en plexiglas peut-être placée sur l'étuve lors des essais de gonflement (plusieurs jours) (Figure 3.13(a)) ou une bâche permettant l'accès à la cellule à l'intérieur de l'étuve tout en maintenant la température à 30°C ; lors des essais courts d'environ 30min (Figure 3.13(b))

4.2 Régulation en hygrométrie

4.2.1 Choix de la méthode d'imposition de la succion

Différentes techniques existent pour imposer une succion (i.e. une pression capillaire) déterminée, et sont nécessaires afin de pouvoir couvrir toute la gamme de variation de cette grandeur dans les sols non-saturés. Ces techniques ont été décrites précisémment dans [19] et reprises par [22].

— *contrôle par plaque tensiométrique* : une dépression est exercée sur l'eau de

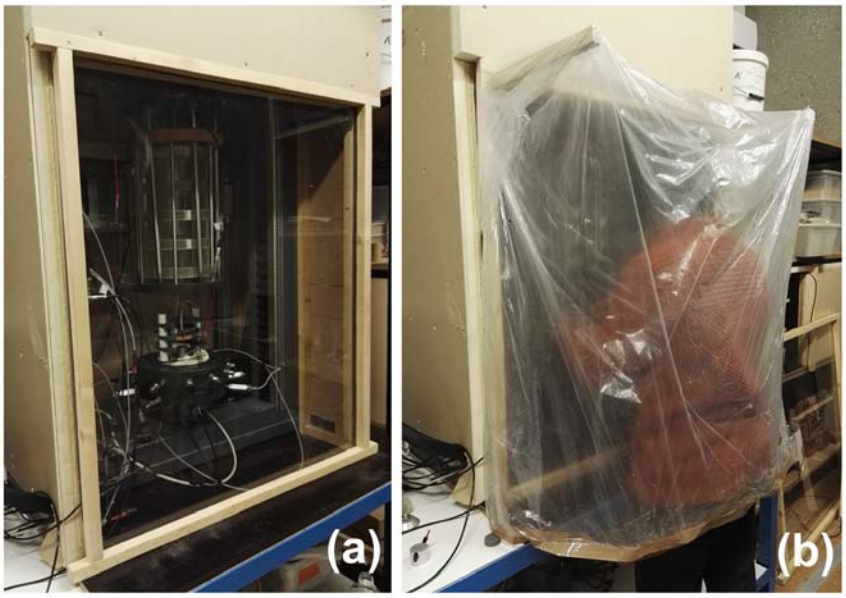


FIGURE 3.13 – Photographies des deux types de porte suivant la durée des essais : (a) porte rigide en plexiglas ; (b) bâche en plastique.

l'échantillon en utilisant un tube en U, qui est relié à un réservoir à hauteur variable, et à une pierre poreuse saturée au-dessous de l'échantillon. Ce système est efficace aux petites succions (de 0 à 10kPa).

— *contrôle par "translation d'axes"* : il s'agit de mettre l'échantillon au contact d'une pierre poreuse immergée dans une eau à pression atmosphérique, et à l'intérieur d'une cloche dont la pression est contrôlée. L'échantillon est alors placé sous pression jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Cette technique permet d'atteindre des succions maximales de 1,5 MPa.
— *contrôle par solution osmotique* : l'échantillon de sol est placé dans une solution de PEG (polyéthylène glycol), et recouvert d'une membrane semi-perméable. Celle-ci se laisse traverser par l'eau, mais fait barrière aux PEG, de trop grande taille. La succion ainsi imposée est proportionnelle à la concentration en PEG de la solution. Des succions jusqu'à 12MPa peuvent être atteintes.
— *technique de contrôle par phase vapeur* : elle consiste à placer un échantillon dans une atmosphère confinée à humidité relative contrôlée, et imposée par des solutions salines saturées. Basée sur la relation de Kelvin, elle doit se faire à température constante. Elle permet d'obtenir une large gamme de succions, mais nécessite un temps important d'équilibrage en fonction de l'humidité relative et de la taille de l'échantillon.

C'est cette dernière technique qui a été utilisée, avec quelques modifications. Ce système consiste à faire circuler de l'air à humidité relative donnée et imposée par une

solution saline saturée, et à l'injecter dans l'échantillon au moyen d'une pompe. Ici l'air humide sera aussi injecté dans l'échantillon mais sera produit par un générateur d'air humide de marque WetSys.

4.2.2 Générateur d'air humide : WetSys

Le générateur d'air humide fonctionne entre 0%HR et 95%HR à un débit constant allant de 2 à 50ml/min, et de la température ambiante jusqu'à 50°C. Dans le Tableau 3.1 est indiquée la précision du matériel.

Bien qu'étant placé dans une salle climatisée, le générateur ne peut fonctionner correctement à 20°C. En effet, la température dans la pièce varie de +/- 2°C et si le générateur fournit un air humide de 95%RH à 20°C, il y aura des risques importants de condensation dans les capillaires, étant donné que la température de rosé est de 19,2°C. Pour cette raison, SETARAM a mis au point une gaine chauffante pour qu'entre le générateur et le système fourni en air humide, il n'y ait pas de condensation. La cellule triaxiale est alors placée dans une boite à température contrôlée de 30°C. Ainsi à cette température bien au-delà de la température de rosée et de la température de la pièce (20°C), il n'y aura plus de risque de condensation et le générateur n'aura aucun mal à se stabiliser.

Humidité relative	ambiant - 50°C 50°C - 70°C	5-95%HR 5-90%HR
Profil de commande	constante HR, escalier rampe	
Débit	1-50 ml/min soit 0,02-3 l/h	
Autonomie	>1000 h à 70°C, 90%HR, 20 ml/min	
Exactitude	+/- 1,5%HR +/- 0,3°C	
Stabilité	+/- 0,3%HR	

Tableau 3.1 – Récapitulatif des caractéristiques du générateur d'air humide WetSys.

4.3 Configuration du système hydraulique

Sur la Figure 3.14 sont représentées les différentes configurations dans lesquelles le système peut être utilisé afin de réaliser des essais ou de conditionner un échantillon avant un essai. La configuration **(1)** permet de faire traverser un air plus ou moins humide à l'intérieur de l'échantillon. La configuration **(2)** permet d'imposer un certain flux d'air sur les faces inférieure et supérieure de l'échantillon. Enfin, la configuration **(3)** permet d'aspirer l'air contenu à l'intérieur de l'échantillon afin de s'assurer que, une fois sous vide, la membrane soit parfaitement collée à la surface de l'échantillon, et ainsi permettre l'installation du système de mesure sans que l'échantillon ne bouge.

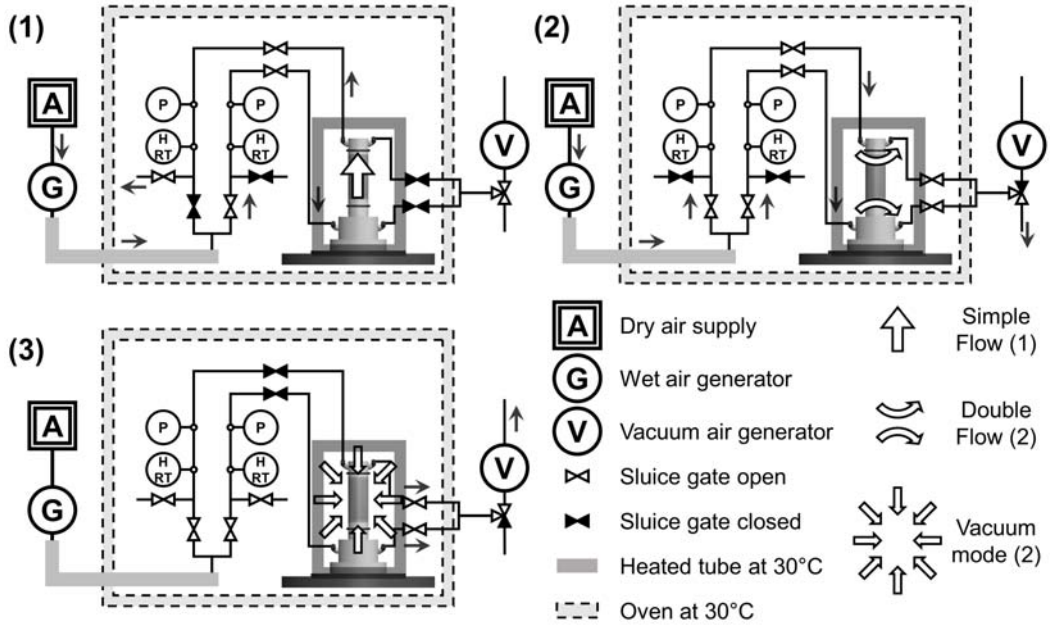


FIGURE 3.14 – Description des différentes configurations du système hydraulique.

5 Validation du dispositif expérimental

5.1 Effet de l'élancement

Le frettage augmente, entre autres, la résistance à la compression des échantillons du fait des effets de bord. Pour y remédier, des techniques consistant à positionner, entre l'échantillon testé et un support en téflon, une membrane graissée du côté du téflon. Ainsi, les effets de frettage sont réduits. Une autre méthode consiste à tester des échantillons avec un fort élancement.

Dans notre cas, l'utilisation d'une pierre poreuse était nécessaire pour les essais de retrait / gonflement. Il n'était donc pas possible de placer une interface qui aurait pour but de limiter les effets de bords. Des études [15] montrent qu'en utilisant des échantillons avec un élancement supérieur ou égal à deux, il n'était pas nécessaire d'utiliser une interface. Des essais ont donc été effectués sur des échantillons avec un élancement de 2 et des échantillons avec un élancement de 2,4. Les résultats des essais sont présentés dans la Figure 3.15. Les échantillons ont été réalisés avec la terre de CRA à une densité de 1,97 g.cm^{-3} et à une teneur en eau de 11%. D'autre part, ils ont été stockés et équilibrés à 20°C et 50%HR.

On peut constater que la résistance à la compression du matériau est plus importante (de l'ordre de 3%) sur les échantillons avec un élancement de 2 par rapport à ceux ayant un élancement de 2,4. Cette augmentation peut être considérée comme négligeable et, pour cette raison, l'étude porte sur les échantillons avec un élancement de 2, plus simples à réaliser à partir du moule utilisé.

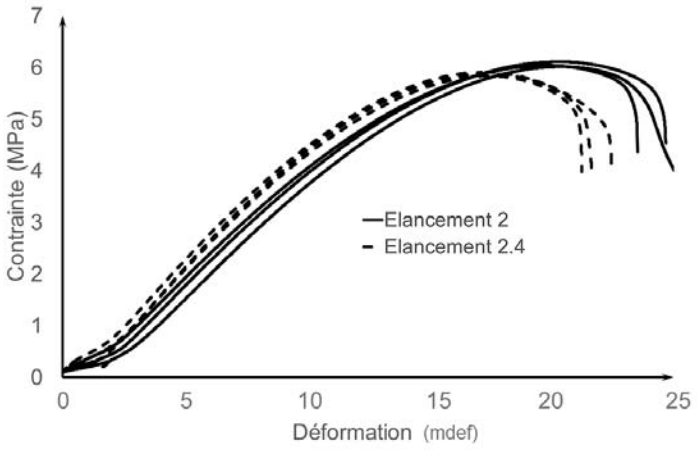


FIGURE 3.15 – Impact de l'élancement sur le comportement mécanique.

Dans cette étude préliminaire, on peut déjà constater la bonne répétabilité des mesures de la résistance à la compression avec une variation autour de la moyenne inférieure à 0,5%. Ces résultats confortent notre démarche pour la suite de l'étude.

5.2 Essai triaxial sur échantillon étalon

Pour valider le système de mesure, nous avons effectué un essai sur un matériau avec ses caractéristiques mécaniques connues, usiné avec les mêmes dimensions que les échantillons testés et avec le même protocole de mise en place. Le matériau utilisé est un plexiglas Altuglas(r) CN, son module d'élasticité est de 3,3 GPa et son coefficient de Poisson de 0,39. Ce matériau a été choisi pour son comportement élastique mais aussi pour sa raideur proche de celle du matériau terre. L'échantillon a été sollicité en compression avec des cycles de chargement / déchargement à 3 niveaux de contraintes de compression. Afin d'améliorer le contact entre l'échantillon et les porte-cibles, l'essai a été réalisé avec une pression de confinement de 1bar. Le premier cycle est réalisé deux fois entre 0,2 et 0,3MPa ; le second cycle trois fois entre 0,2 et 1 MPa ; le troisième cycle trois fois entre 0,2 et 2 MPa. Les courbes contrainte/déformation radiale en fonction de la déformation axiale sont présentées dans la Figure 3.16.

Chargement	**0,2 - 0,3 MPa**		**0,2 - 1 MPa**			**0,2 - 2 MPa**		
Cycle	1	2	3	4	5	6	7	8
ν (-)	0,40	0,46	0,37	0,38	0,39	0,39	0,39	0,40
E (MPa)	3,99	4,34	3,81	3,74	3,72	3,72	3,70	3,73

TABLEAU 3.2 – Coefficient de Poisson et module d'Young obtenus lors des différents cycles sur l'échantillon étalon de plexiglas.

On peut constater que le système de mesure permet bien de mesurer les déformations de l'échantillon étalon testé car les résultats obtenus sont linéaires et réversibles,

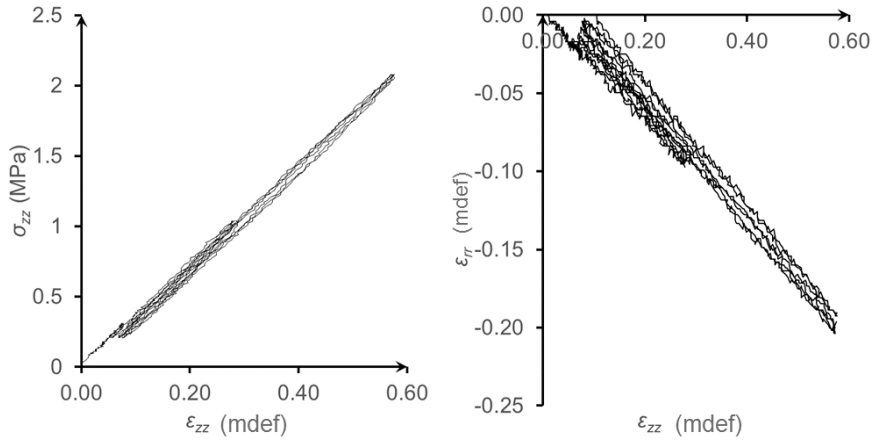


FIGURE 3.16 – Mesure de la contrainte et de la déformation radiale en fonction de la déformation axiale sur un échantillon étalon de plexiglas.

ce qui est en cohérence avec l'élasticité du matériau. De plus, on peut constater que le coefficient de Poisson médian mesuré est égal à celui indiqué par le constructeur du matériau à savoir 0,39 (cf. Tableau 3.2). Quant au module d'Young, il est de 3,73 MPa ce qui est 13% supérieur à celui proposé par le constructeur. Cette différence pourrait provenir d'une augmentation du module d'Young du matériau avec la pression de confinement.

Conclusion

Le dispositif expérimental ainsi construit et dont la fiabilité a été vérifiée peut désormais être utilisé pour mener à bien différentes études, développées dans les chapitres suivants.

Chapitre 4

Essais triaxiaux

Contents

1 Variables et caractéristiques de chargement 84
1.1 Variables étudiées 84
1.2 Description du protocole d'essai 85
1.3 Récapitulatif des échantillons 87
2 Résultats et discussion 87
2.1 Répétabilité des résultats 87
2.2 Paramètres mécaniques mesurés 90
2.2.1 Résistance à la compression 90
2.2.2 Module d'Young 92
2.2.3 Effet de la température 92
2.2.4 Effet de la sorption 94
2.3 Évolution des paramètres mécaniques avec le chargement . 95
2.3.1 Module d'Young 95
2.3.2 Coefficient de Poisson 95
2.3.3 Déformation résiduelle 96
2.4 Angle de frottement et cohésion 96

Ce chapitre a pour objectif d'étudier quantitativement le comportement mécanique de différentes terres non stabilisées utilisées dans les constructions en terre, et plus précisément, d'identifier les principales tendances globales, chacune d'elles étant étudiée en considérant l'impact de l'humidité relative, de la pression de confinement et de la température. Dans ce but, des essais triaxiaux avec et sans cycle de chargement et à différentes humidités relatives, pressions de confinement et températures ont été réalisés. Pendant les essais, les déformations axiales et radiales ont été mesurées grâce à des capteurs sans contact de manière à obtenir avec précision les paramètres élastiques (module d'Young et coefficient de Poisson), la résistance à la compression, les déformations résiduelles et les variations volumiques, et ce pour toutes les configurations testées.

1 Variables et caractéristiques de chargement

1.1 Variables étudiées

Les essais présentés ici sont des essais triaxiaux drainés. Il convient alors de définir, dans un premier temps, les conventions de signes, les variables utilisées ainsi que les équations permettant de mesurer les déformations axiales, radiales et volumique. Dans un second temps, les différents types de chargement. Les contraintes de compression ainsi que les contractions sont définies comme positives (convention de signe de la mécanique des sols).

Le schéma de la Figure 4.1 synthétise la mesure des déformations axiales et radiales, l'application des contraintes de confinement p et déviatorique q [2].

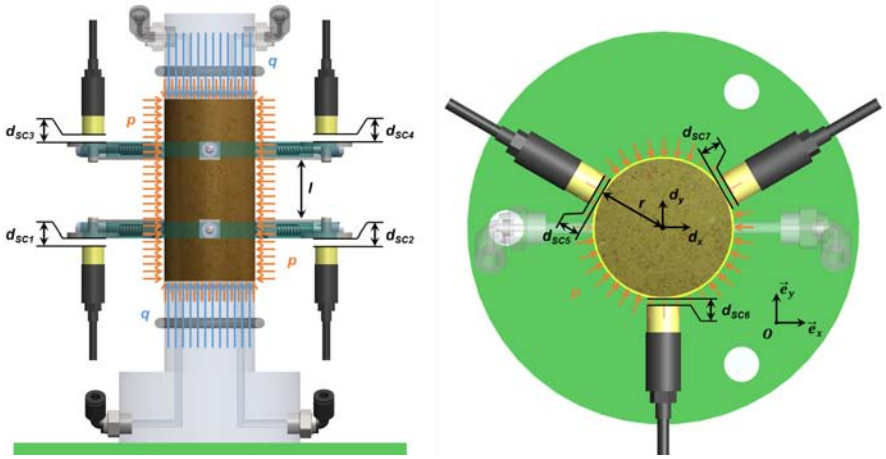


FIGURE 4.1 – Vues de face et du dessus de l'essai triaxial.

Les quatre capteurs axiaux mesurent les déformations axiales selon l'équation suivante :

$$\varepsilon_z = \frac{1}{l}\left(\frac{\Delta d_{SC3} + \Delta d_{SC4}}{2} - \frac{\Delta d_{SC1} + \Delta d_{SC2}}{2}\right) \tag{4.1}$$

où $\Delta d_{SCi} = d_{SCi} - d^0_{SCi}$, avec d_{SCi} les longueurs définies dans le schéma de la Figure 4.1 et d^0_{SCi} ces mêmes longueurs à l'état initial.

Les mesures des déplacements du bas et du haut s'effectuent par deux paires de capteurs et permettent d'annuler la distorsion de l'échantillon due à une hétérogénéité du matériau.

Les trois capteurs radiaux mesurent les déformations radiales selon l'équation suivante :

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta d_{SC5} + \Delta d_{SC6} + \Delta d_{SC7}}{3} \tag{4.2}$$

La contrainte déviatorique q est appliquée sur la surface de l'échantillon par le chapeau, qui est lui-même appuyé par la presse via un piston. On calcule cette contrainte grâce à l'équation suivante :

$$q = \frac{F}{S} \tag{4.3}$$

Avec
F [N] : force appliquée sur la surface supérieure de l'échantillon
S [m^2] : section actuelle de l'échantillon telle que

$$S = \frac{S_0}{(1+\varepsilon_r)^2} \tag{4.4}$$

avec S_0 [m^2] : section initiale de l'échantillon

Enfin, les déformations volumiques ε_v sont calculées via les déformations locales (radiales et axiales) selon l'équation suivante :

$$\varepsilon_v = \varepsilon_z + 2\varepsilon_r \tag{4.5}$$

1.2 Description du protocole d'essai

Deux types de chargements ont été réalisés pour chaque terre, chaque humidité relative, chaque pression de confinement et chaque température, comme illustré dans la Figure 4.2. Le premier type de chargement est un test de compression classique : chargement à vitesse constante jusqu'à la rupture. Ceci permet de mesurer la contrainte déviatorique maximale, notée q_{max} dans la suite de ce chapitre. Le deuxième type de chargement consiste à charger et décharger successivement avec un niveau de contrainte déviatorique croissant, respectivement 20%, 40%, 60% et 80% de q_{max} ; où q_{max} est la contrainte déviatorique maximale obtenue dans le premier type d'essai sans cycle, pour chaque terre, chaque humidité relative, chaque pression de confinement et chaque température. Les cycles sont supposés ne pas avoir d'influence sur la résistance à la compression. De plus, le comportement du matériau est supposé linéaire et élastique pendant les cycles. Cette hypothèse est classiquement admise pour les sols et est utilisée dans la plupart des modèles élasto-plastiques. Par conséquent, ce deuxième type de chargement permet de mesurer les deux paramètres élastiques

présents dans la loi de Hooke, c'est-à-dire le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν, ainsi que leurs variations avec la contrainte axiale maximale appliquée sur l'échantillon. Ces derniers sont alors estimés selon les expressions suivantes :

$$E = \frac{\Delta q^{cycle}}{\Delta \varepsilon_z^{cycle}} \quad ; \quad -\nu = \frac{\Delta \varepsilon_r^{cycle}}{\Delta \varepsilon_z^{cycle}} \tag{4.6}$$

où Δq^{cycle}, $\Delta \varepsilon_z^{cycle}$, et $\Delta \varepsilon_r^{cycle}$ sont les différences en termes de contraintes axiales, de déformations axiales et de déformations radiales entre l'état de chargement axial maximal et minimal d'un cycle.

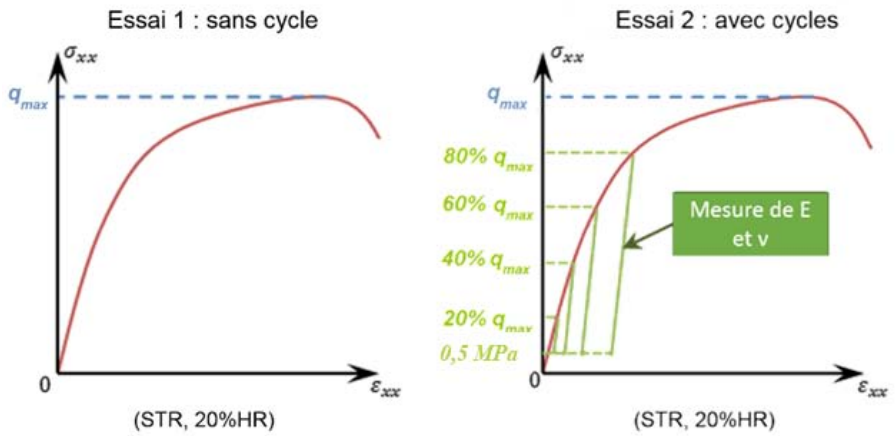


FIGURE 4.2 – Les deux types de chargement dans le plan contraintes / déformations.

Les chargements ont été appliqués en imposant un taux de déplacement axial constant égal à 2 µm.s^{-1} en chargement et déchargement. Cette vitesse de chargement, qui est 10 fois inférieure à celle préconisée par la norme XP-P13-901, a été imposée par la fréquence de capture des caméras stéréoscopiques utilisées dans le chapitre 6. Avant chaque essai, un pré-chargement jusqu'à 200 kPa a été appliqué pour la mise en place de l'échantillon.

Les premiers cycles (20% et 40% de q_{max}) sont répétés 3 fois afin d'évaluer les variations des modules d'élasticités de chaque boucle. La détermination du module d'Young et du coefficient de Poisson est une régression linéaire de toute la boucle de décharge et de recharge. La décharge jusqu'à 200 kPa permet d'évaluer les déformations résiduelles à la fin de chaque cycle.

Après chaque essai, l'échantillon est pesé et séché à 105°C afin d'obtenir sa teneur en eau.

Dans cette partie sont également étudiés les impacts de l'humidité relative (23%RH, 75%RH, 97%RH à 30°C) et de la pression de confinement (1 bar et 6 bar) sur les trois terres ALX, CRA et STR. De plus, des essais ont été effectués à une température de 21°C à deux humidités relatives différentes (75%HR et 97%HR) et à une pression de confinement de 1 bar. La première pression de 1 bar est celle qui permet à la fois

d'assurer le fonctionnement du dispositif et d'être au plus près des conditions d'essais de compression simple afin d'effectuer des comparaisons avec les mesures présentées par la suite. Afin d'amplifier les effets dus au confinement, la deuxième pression a été choisie égale à 6 bar. Il n'y a pas eu d'essai avec des pressions de confinement intermédiaires par manque de temps et d'échantillons. Les températures d'essais correspondent aux températures de régulation de la salle d'essai (21°C) et de l'étuve (30°C).

1.3 Récapitulatif des échantillons

Au vu du grand nombre d'échantillons, une méthode d'appellation a été appliquée. Le nom générique des échantillons est établi comme suit :

$$X - HR - T - p - c - n \tag{4.7}$$

X : nom de la terre ($X = STA$, CRA ou ALX)
HR : humidité relative d'équilibrage en %
T : température du test
p : pression du test
c : type de test ("ac" pour avec cycles et "sc" pour sans cycle).
n : numéro de l'échantillon

Les Tableaux 4.1 et 4.2 regroupent le nombre d'échantillons dans chaque catégorie, respectivement pour la terre ALX et les terres CRA et STR. A noter que les cases grisées sont un exemple illustratif d'appellation d'un échantillon : ALX-23%-30°C-6b-sc-0.

Terre	**ALX**													
HR	97%				75%				23%				97%	75%
T	30°C												21°C	
Pression	1bar		6bar		1bar		6bar		1bar		6bar		1bar	
Cycles	sc	ac	sc	ac	sc	ac	sc	ac	sc	ac	sc	ac	ac	
N°	0	1 ; 2	0	1	0	1 ; 2	0	1	0	1 ; 2	0	1	1 ; 2	1 ; 2
Nombre	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	2

Tableau 4.1 – Tableau récapitulatif des échantillons de la terre ALX.

2 Résultats et discussion

2.1 Répétabilité des résultats

Durant la campagne d'essais, les échantillons suivant ont été testés : 27 échantillons de la terre CRA, 19 de la terre ALX et 24 de la terre STR.

Dans l'ensemble, la répétabilité des mesures est bonne, comme en témoignent les essais à 30°C sur les échantillons ALX confinés à 1bar, dont les résultats sont regroupés sur la Figure 4.3. Sur cette figure sont représentés, en haut, les contraintes en

Terres	CRA & STR													
HR	97%				75%				23%				97%	75%
T	30°C												21°C	
Pression	1bar		6bar		1bar		6bar		1bar		6bar		1bar	
Cycles	sc	ac	sc	ac	sc	ac	sc	ac	sc	ac	sc	ac	ac	
N°	0	1 ; 2	0	1 ; 2	0	1 ; 2	0	1 ; 2	0	1 ; 2	0	1 ; 2	1 ; 2	1 ; 2
Nombre	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	2

TABLEAU 4.2 – Tableau récapitulatif des échantillons des terres CRA et STR.

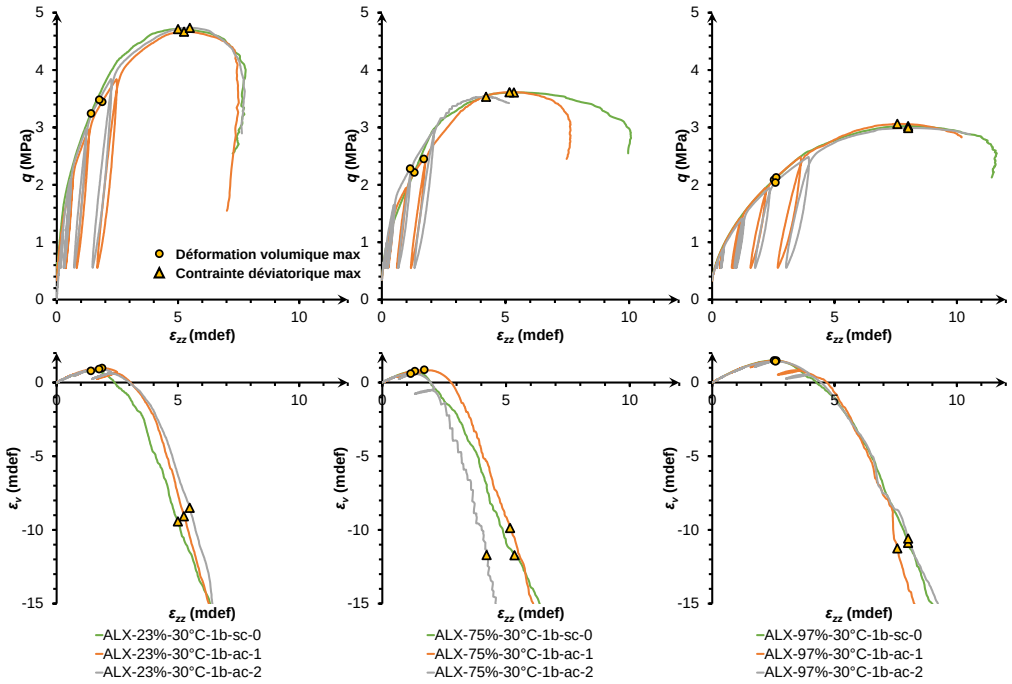


FIGURE 4.3 – Résultats d'essais en contraintes/déformations axiales et déformations volumiques/déformations axiales pour les échantillons ALX à 30°C et 1bar.

fonction des déformations axiales, et en bas, les déformations volumiques en fonction des déformations axiales, pour les différentes humidités relatives d'équilibre 23%HR, 75%HR et 97%HR.

Des marqueurs "rond" et "triangle" ont également été insérés afin de représenter les points majeurs suivant :

— lorsque la déformation volumique maximale est atteinte, un "rond" est représenté dans les plans contraintes/déformations axiales et déformations volumiques/déformations axiales

— lorsque la contrainte maximale est atteinte, un "triangle" est représenté dans les plans sus-cités.

Pour une même humidité relative d'équilibre, on peut remarquer que ces courbes

se superposent, ce qui dénote de la bonne répétabilité des essais. D'autant plus que les marqueurs "rond" et "triangle" sont relativement bien regroupés.

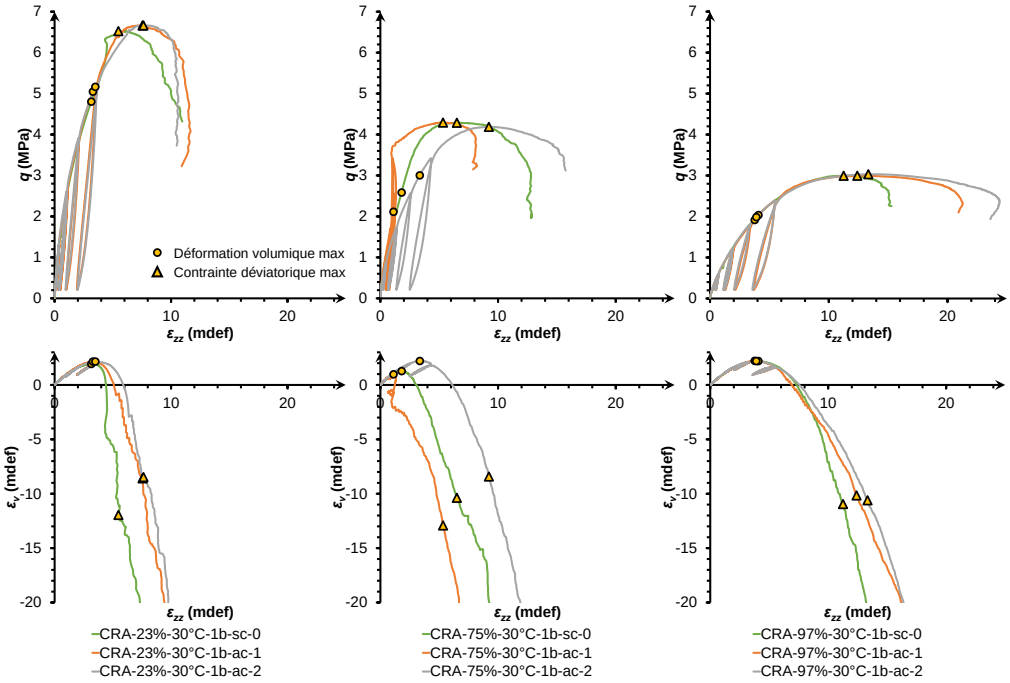


FIGURE 4.4 – Résultats d'essais en contraintes/déformations axiales et déformations volumiques/déformations axiales pour les échantillons CRA à 30°C et 1bar.

En revanche, quelques courbes montrent des anomalies de mesure, pouvant être dues à la mise en place du porte-capteur et/ou une hétérogénéité des échantillons (la densité a été vérifiée précédemment, mais l'équilibrage a pu être différent), sachant qu'il est difficile de dissocier les deux. Des exemples sont regroupés dans la Figure 4.4, qui correspondent aux essais sur des échantillons de la terre CRA, conditionnés à 30°C et confinés à 1bar. Sur les essais à 75%HR, on peut voir que les courbes ne sont pas superposées :

— sur l'échantillon CRA-75%-30°C-1b-ac-1, la déformation axiale augmente puis diminue à partir du troisième cycle. Ceci s'explique par le fait que le porte-cible du bas n'était pas bien désengagé des cales du porte-capteur.

— sur les échantillons CRA-75%-30°C-1b-sc-0 et CRA-75%-30°C-1b-ac-2, l'interprétation est difficile et il n'est pas possible d'identifier précisément l'origine de l'anomalie.

Dans les rares cas où les essais n'ont pas été répétables (3 essais, 2 pour la terre CRA et 1 pour STR), nous avons exclus les résultats qui nous semblaient aberrants par comparaison avec les résultats obtenus aux autres humidités relatives. Par exemple, il paraitrait logique que les déformations volumiques maximales des échantillons CRA-75%-30°C-1b soient comprises entre celles des échantillons CRA-25%-

30°C-1b et CRA-97%-30°C-1b, ce qui n'est le cas que pour l'échantillon CRA-75%-30°C-1b-ac-2. Les deux autres échantillons (CRA-75%-30°C-1b-sc-0 et CRA-75%-30°C-1b-ac-1) n'ont donc pas été pris en compte. Dans tous les cas, les résistances à la compression déduites de tous ces essais conduisent à une variabilité de 0,06 MPa, soit environ 1,4% ce qui est remarquable.

2.2 Paramètres mécaniques mesurés

2.2.1 Résistance à la compression

La Figure 4.5 regroupe l'ensemble des résistances à la compression atteintes pour l'ensemble des essais. Ces points sont les moyennes des résistances à la compression d'un lot d'une terre, à une humidité relative, à une température et à une pression de confinement données.

Le premier résultat concerne la répétabilité des essais où l'écart-type relatif maximum est de 3%, obtenu pour le lot d'échantillons CRA équilibrés à 97%HR, à 30°C et à une pression de confinement de 6 bar. La médiane de l'écart-type relatif est inférieur à 1% et ce pour toutes les terres. Il est à noter que ces résistances mesurées sont à la fois obtenues sur des échantillons testés sans cycles mais aussi avec cycles. Du fait d'un écart-type relatif très faible, on peut donc en déduire que les cycles ont peu d'influence sur la résistance à la compression.

De façon générale, on constate que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de l'humidité relative. Cette observation est en accord avec les données déjà publiées dans la littérature sur le matériau terre [43][10][44][33][37].

A une pression de confinement de 1 bar, on constate que les terres de CRA et STR obtiennent les mêmes résistances à la compression pour toutes les humidités relatives. Les résistances à la compression d'ALX sont globalement plus faibles avec des valeurs de 4,7 MPa à 23%HR et 3,4 à 75%HR ; ces résistances à la compression étant respectivement inférieures de 2 et 1,2 MPa à celles obtenues pour CRA et STR. Il est cependant intéressant de constater qu'à 97%HR les terres de ALX, CRA et STR ont relativement les mêmes résistances à la compression avec un écart par rapport à la moyenne de 7%.

A une pression de confinement de 6 bar, toutes les terres ont la même résistance à la compression pour 75%HR et 97%HR, avec un écart par rapport à la moyenne de résistance à la compression respectivement de 3% et 5%. A 23%HR, la résistance à la compression d'ALX est de 7,2 MPa, soit 2 MPa plus faible que CRA et STR.

On constate une relation linéaire entre la résistance à la compression et l'humidité relative. En effet, si on rassemble les essais effectués avec la terre de CRA à 21°C qui a été testée à 43%HR (essai issu de l'étude sur l'impact du confinement), 75%HR et 97%HR ainsi que les essais à 30°C à 23%HR, 75%HR et 97%HR la régression linéaire sur ces 6 points donne un R^2 de 0,98. Dans le plan résistance à la compression / teneur en eau, la relation entre les deux est plus complexe.

On peut voir que la diminution de la résistance à la compression avec l'humidité relative diffère entre les terres. CRA et STR perdent respectivement 56% et 52% de

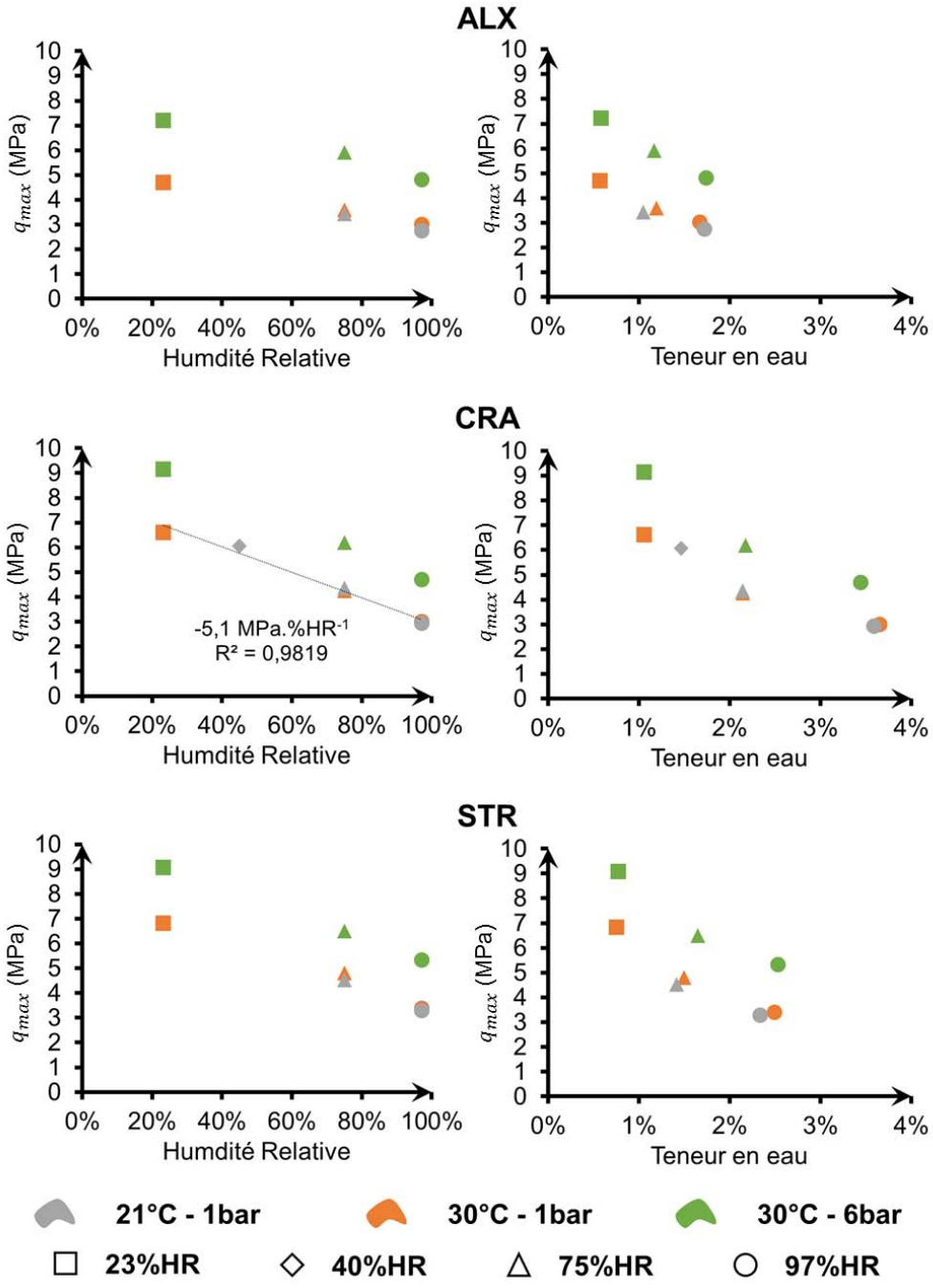


FIGURE 4.5 – Résistance à la compression en fonction de l'humidité relative et de la teneur en eau, pour chacune des terres étudiées, et chaque pression de confinement.

leur résistance à compression entre 23%HR et 97%HR alors qu'ALX ne perd que 32%

de sa capacité. Le confinement n'a pas d'influence sur cette diminution.

2.2.2 Module d'Young

Le module d'Young peut être calculé sur l'ensemble de la boucle de décharge et de recharge et dans ce paragraphe nous nous intéressons au module d'Young obtenu lors de la première boucle à 20% de la résistance à la compression. L'écart relatif à la moyenne maximum est de 6%, obtenu lors du premier cycle sur les échantillons de CRA équilibrés à 97%HR. En moyenne sur tous les résultats, l'écart relatif est inférieur à 2%, ce qui dénote d'une bonne répétabilité des échantillons.

Le module d'Young représenté dans la Figure 4.6 diminue avec l'augmentation de l'humidité relative et ce de façon linéaire. Cette fois-ci, le module d'Young est significativement plus grand pour la terre ALX que les terres CRA et STR mais ces valeurs restent relativement proches pour toutes les humidités relatives. Comme pour la résistance à la compression, la terre d'ALX a son module d'Young qui se dégrade moins avec l'humidité relative, avec une réduction de 47%, par rapport à CRA et STR qui voient leur module diminuer de 62%. La pression de confinement augmente globalement le module d'Young mais cela est moins contrasté que pour la résistance à la compression.

2.2.3 Effet de la température

Dans ce paragraphe, nous allons nous intéresser à l'influence de la température de l'essai sur la mesure des paramètres mécaniques. Les échantillons de la terre CRA ont été testés à 21°C et 30°C. Le Tableau 4.3 regroupe les valeurs de la résistance à la compression, le module d'Young et la déformation axiale à la rupture pour les essais réalisés aux trois humidités relatives, à une pression de confinement de 1bar, et en désorption.

	q_{max} (MPa)			**E** (GPa)			$\varepsilon_{zz}^{q_{max}}$ (mdef)		
HR	30°C	21°C	diff	30°C	21°C	diff	30°C	21°C	diff
23%	6,80	6,80	0%	4,4	4,5	-3%	6,9	8,3	-20%
75%	4,30	4,05	5%	2,5	2,5	-1%	7,0	7,7	-10%
97%	3,00	2,75	9%	1,6	1,6	0%	12,3	11,6	6%

Tableau 4.3 – Comparaison de l'influence de la température sur la résistance à la compression, le module d'Young et la déformation axiale à la rupture pour les échantillons de la terre CRA en désorption.

Les données regroupées révèlent que lorsque l'humidité relative augmente, la différence entre les deux températures augmente pour la résistance à la compression et diminue pour le module d'Young ; la résistance à la compression à 30°C est toujours supérieure à celle à 21°C, quelle que soit l'humidité relative d'équilibrage. En ce qui concerne le module d'Young, pas de variation significative n'est observée. Malgré

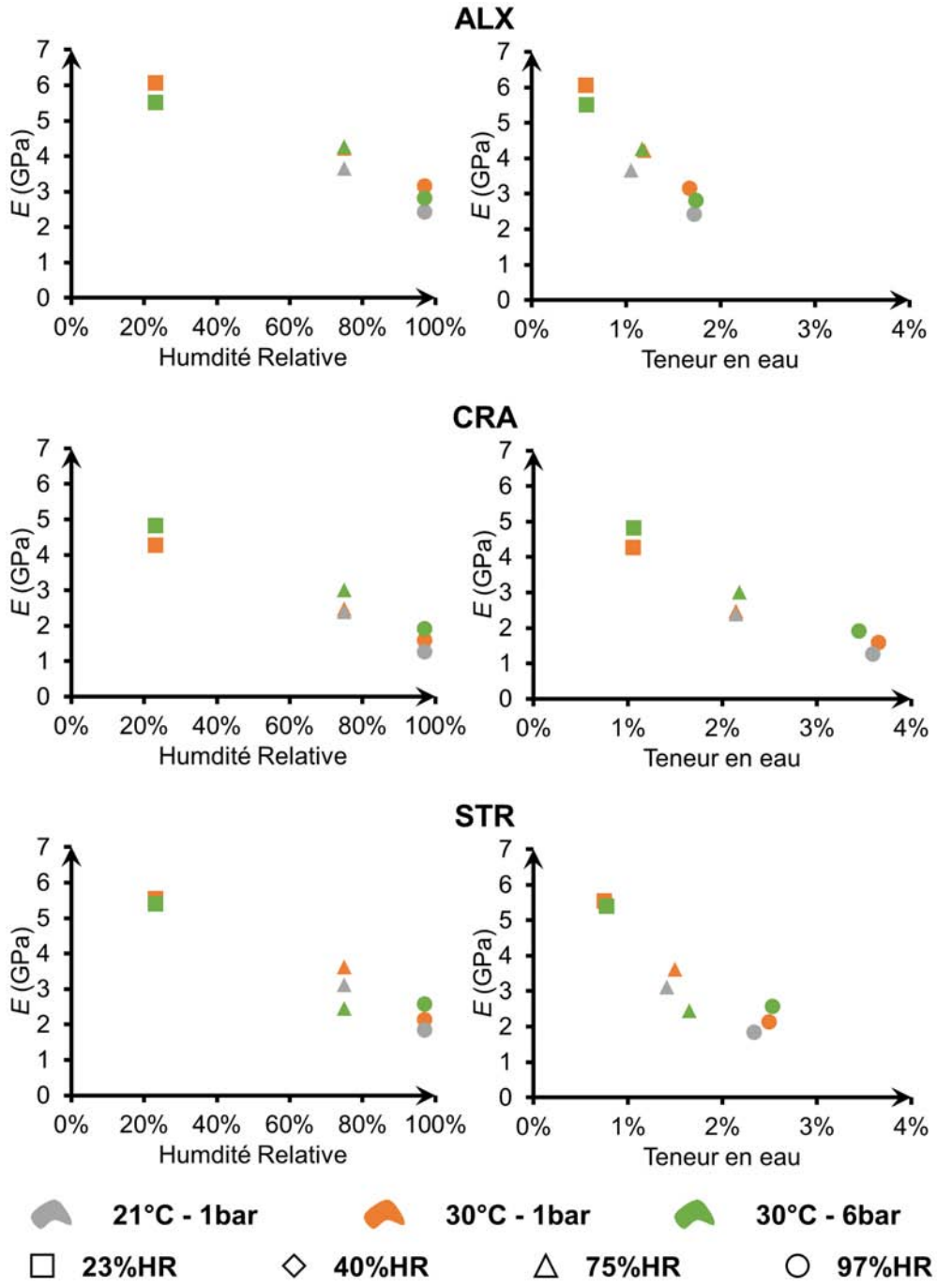


FIGURE 4.6 – Module d'Young en fonction de la l'humidité relative et de la teneur en eau évalués lors de la décharge et la recharge à 20%.

tout, l'écart entre les deux températures est toujours inférieur à 9%, avec une valeur moyenne de 3%.

En conclusion, compte-tenu de ces données, la température ne semble pas avoir une grande influence sur les paramètres mécaniques mesurés ici. Cependant, une étude plus approfondie, qui n'a pu être menée à bien faute de temps et en raison de limitations techniques, reste nécessaire afin de pouvoir apporter une conclusion catégorique. Elle pourrait étudier des températures plus basses, jusqu'à 0°C, voire des températures négatives. Quoiqu'il en soit, dans la suite de l'exploitation des résultats, seuls les essais à 30°C seront considérés.

2.2.4 Effet de la sorption

Dans ce paragraphe, nous allons nous intéresser à l'influence de la sorption sur les mesures des paramètres mécaniques : des essais en sorption et en désorption ont été réalisés sur des échantillons de la terre CRA, à 21°C et 1bar, pour différentes humidités relatives. Les résultats sont regroupés dans le Tableau 4.4.

	$\mathbf{w}_L$ (%)			q_{max} (MPa)			**E** (GPa)			$\varepsilon_{zz}^{q_{max}}$ (mdef)		
HR	sorp.	des.	diff	sorp.	des.	diff	sorp.	des.	diff	sorp.	des.	diff
75%	2,14	2,32	8%	4,35	4,05	7%	2,4	2,5	-3%	9,1	7,7	-18%
97%	3,59	3,77	5%	2,94	2,75	7%	1,3	1,6	-21%	14,2	11,6	-22%

TABLEAU 4.4 – Comparaison de l'influence de la sorption sur la teneur en eau, la résistance à la compression, le module d'Young et la déformation axiale à la rupture pour les échantillons de la terre CRA, à 21°C.

Tout d'abord, une justification s'impose en ce qui concerne le choix de traiter comme référence le cas de la désorption. En effet, cette dynamique apparait plus naturelle en considérant les conditions naturelles dans lesquelles un véritable mur en terre serait amené à évoluer. En effet, après sa construction, le matériau est saturé en eau et sèche très lentement pour atteindre une teneur en eau plus basse, autour de laquelle elle va évoluer avec les saisons ; à condition qu'il n'y ait pas de pathologie.

Ensuite, nous pouvons remarquer qu'en sorption, la résistance à la compression augmente par rapport à la désorption mais conserve la dynamique de diminution vis-à-vis de l'augmentation de l'humidité relative. Cette différence est d'environ 7%. En sorption, le module d'Young diminue par rapport à la désorption tout en conservant la même dynamique que la résistance à la compression au regard de l'humidité relative. Cette différence est de 3% à 75%HR mais atteint 21% à 97%HR, avec une très bonne répétabilité (chaque essai ayant été triplé). Enfin, on constate une grosse variation (en moyenne 20%) de la déformation axiale à la rupture entre les échantillons en sorption et ceux en désorption. Ce résultat est valable pour toutes les humidités relatives. Il faut cependant savoir que cette mesure de déformation axiale, qui s'est faite sur 3 échantillons pour chaque cas, n'était pas particulièrement répétable : écart relatif entre ces trois échantillons de respectivement 18%, 20% et 8% pour les essais à 23%HR, 75%HR et 97%HR. La variation constatée entre la sorption et la désorption

est donc du même ordre de grandeur que l'incertitude de mesure des déformations axiales à la rupture.

Il ne peut donc qu'être conclu que le matériau semble légèrement plus résistant en sorption qu'en désorption mais semble déformable, bien que la teneur en eau en sorption soit plus faible de celle en désorption.

2.3 Évolution des paramètres mécaniques avec le chargement

Sur les Figures 4.8 et 4.9 sont récapitulées les valeurs des modules d'Young, coefficients de Poisson ainsi que l'évolution des déformations axiales résiduelles pour chaque terre, humidité relative et pression de confinement. Les résultats expérimentaux exposés dans cette étude soulignent l'influence du stockage d'humidité relative sur le comportement mécanique du matériau, étant donné que le comportement global semble être différent d'une terre à l'autre.

2.3.1 Module d'Young

Ces différences sont bien illustrées par l'évolution du module d'Young sécant pendant un cycle de chargement/déchargement en fonction de la contrainte axiale maximale atteinte précédemment, comme reporté dans les graphiques supérieurs des Figures 4.8 et 4.9.

Les résultats obtenus pour les échantillons de ALX, CRA, STR sont en accord avec l'étude présentée dans [10], où une réduction globale du module d'Young (c'est-à-dire de l'endommagement) avec une augmentation de la contrainte axiale est observée. Cette variation est de l'ordre de 40% entre le premier cycle à 20% et le quatrième à 80% et il est intéressant de constater que la nature de la terre testée ainsi que l'humidité relative n'ont pas d'influence sur l'évolution du module d'Young avec le taux de chargement. On constate également que l'augmentation de 1bar à 6bar de la pression de confinement augmente le module d'Young pour CRA et STR d'environ 20%, et a tendance à le diminuer d'environ 10% pour ALX.

Pour les chargements à 20% et 40% de q_{max}, les cycles ont été triplés pour chaque humidité relative. On constate que les modules d'Young pour chacun de ces trois cycles, représentés sur les Figures 4.8 et 4.9, se superposent. On peut néanmoins remarquer une légère augmentation (d'environ 2%) des modules d'Young des cycles 2 et 3 par rapport au cycle 1.

2.3.2 Coefficient de Poisson

Les coefficients de Poisson ont été évalués de la même manière que les modules d'Young : régression linéaire sur tout le cycle décharge/recharge. Lors du premier cycle, du fait des faibles déformations, la valeur du coefficient de Poisson n'est pas exploitable. Cependant, en ce qui concerne les cycles 2, 3 et 4, les résultats sont assez répétables, avec une erreur maximale de 10%.

Dans ce premier paragraphe, seul le cycle 2 est exploité. On peut voir que le coefficient de Poisson est très faible pour toutes les terres avec un minimum de 0,05

obtenu à 23%HR sur CRA, et un maximum de 0,15 sur cette même terre à 97%HR. On peut également constater que l'humidité relative a un impact sur le coefficient de Poisson, plus ou moins important selon la terre. Pour CRA, le coefficient de Poisson augmente de 200% entre les échantillons équilibrés à 23%HR et 97%HR, alors que cette augmentation n'est que de 70% et 30% respectivement pour STR et ALX. Il est intéressant de constater que les trois terres tendent vers un même coefficient de Poisson à 97%HR, d'environ 0,14+/-0,01 en moyenne.

En considérant tous les cycles, on peut remarquer qu'ils augmente la valeur du coefficient de Poisson de 50%+/-9% entre les cycles 2 et 3, et augmente de 150%+/-30% entre les cycles 2 et 4. Cependant, aucune tendance ne se dégage ni selon la terre, ni selon l'humidité relative. Enfin, la pression de confinement, passant de 1bar à 6bar, augmente globalement de 50% le coefficient de Poisson, quels que soient la terre, l'humidité relative ou le cycle.

2.3.3 Déformation résiduelle

La déformation résiduelle semble suivre la même dynamique que l'évolution du coefficient de Poisson : lorsque que le niveau de contrainte augmente, la déformation résiduelle augmente également.

A 23%HR, ALX et CRA ont des déformations résiduelles plus importantes que STR, valant respectivement 0,13 mdef et 0,08 mdef (avec 1mdef= 1mm.m^{-1}). Ces déformations augmentent cependant plus rapidement pour CRA que pour ALX lorsque l'humidité relative augmente, atteignant 0,49 mdef pour CRA et 0,35 mdef pour ALX à 97%HR. STR voit aussi augmenter ses déformations résiduelles mais celles-ci n'atteignent que 0,25 mdef.

Les déformations résiduelles augmentent significativement avec le chargement : elles sont multipliées par 10 entre le premier cycle à 20% de q_{max} et le dernier cycle à 80% de q_{max}, et ce quelle que soit l'humidité relative d'équilibre. Quel que soit le taux de chargement, les déformations résiduelles restent les plus faibles pour STR et les plus importantes pour CRA. Bien que CRA ait une teneur en argile aussi importante que celle de STR et la même densité, ce comportement plus plastique du matériau CRA pourrait s'expliquer par l'activité plus importante de ses argiles. Enfin, en ce qui concerne les trois répétitions des cycles aux taux de chargement de 20% et 40%, pour toutes les terres et humidités relatives, les déformations résiduelles augmentent de 5% entre le cycle 1 et le cycle 2 et de 10% entre le cycle 1 et le cycle 3.

Le passage de la pression de confinement de 1bar à 6bar augmente les déformations résiduelles de 150% en moyenne pour tous les cycles, toutes les terres et toutes les humidités relatives.

2.4 Angle de frottement et cohésion

A l'aide des essais à différentes pressions de confinement et en supposant que le comportement à la rupture du matériau suit une loi de type de Mohr-Coulomb, on a pu calculer l'angle de fortement interne et la cohésion apparente de chaque terre

aux différentes humidités relatives. Pour obtenir ces coefficients, nous avons tracé les tangentes aux cercles de Mohr à la rupture pour les contraintes de confinement de 1bar et 6bar. Chaque essai étant triplé, neuf paires de coefficients c cohésion et φ_{int} angle de frottement interne, ont été déterminées pour chaque terre et à chaque humidité relative. Les valeurs moyennes des coefficients sont reportées en Figure 4.7 et les droites correspondantes en Figure 4.10.

On peut constater que l'angle de frottement diminue avec l'humidité relative, quelle que soit la terre. Cependant, ces variations restent faibles avec une diminution maximale de 4° entre l'angle de frottement pour les échantillons équilibrés à 23%HR et ceux à 97%HR, dont les moyennes respectives des angles atteignent 59° et 55°. On peut également remarquer que l'erreur maximale faite sur la mesure de cet angle de frottement est de +/-1° pour STR, mais en moyenne de +/-0,5°.

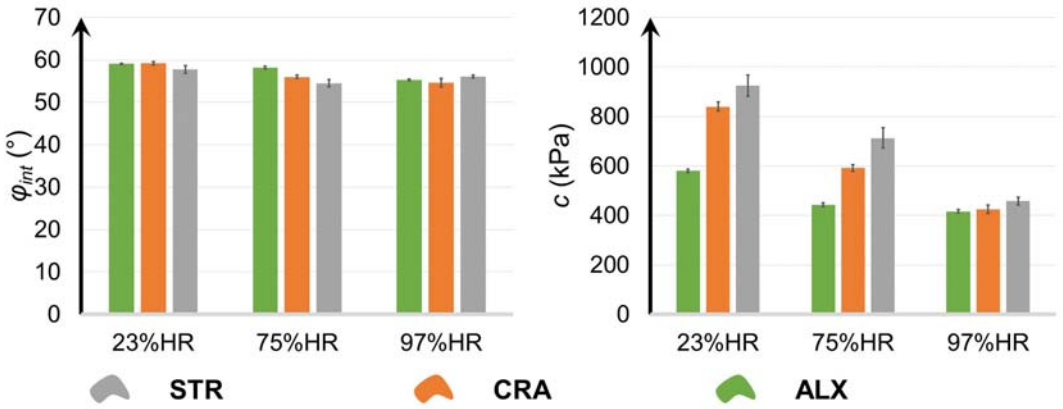


FIGURE 4.7 – Valeurs de l'angle de frottement et la cohésion pour chaque terre et chaque humidité relative.

La cohésion diminue également avec l'humidité relative, mais les variations sont cette fois plus importantes et plus marquées selon les terres.

Pour la terre d'ALX, la cohésion est plus faible que celle des autres terres avec une cohésion maximale de 580 kPa à 23%HR contre 840 kPa et 920 kPa respectivement pour CRA et STR à la même humidité relative. En revanche, la cohésion de ALX varie moins avec l'humidité relative avec une diminution de 28% entre 23%HR et 97%HR, contre des diminutions de 50% pour les terres de CRA et STR. Cela étant, les trois terres tendent vers une même cohésion de 435 kPa à 97%HR.

Ces différences entre les terres pourraient s'expliquer par la teneur et le type d'argiles présentes dans les terres : ALX contient 9% d'argiles contre 17% et 15% respectivement pour CRA et STR. Pour des humidités relatives faibles (jusqu'à 75%HR), la cohésion dans la matrice granulaire est due aux liaisons électrochimiques des argiles : ALX ayant moins d'argiles que CRA et STR, cette terre a une plus faible cohésion ; le potentiel capillaire d'ALX est moins important que celui de CRA et STR. La différence entre STR et CRA pour 23%HR et 75%HR pourrait provenir :

— soit, du type d'argiles de CRA. Celles-ci seraient légèrement plus actives que

celles de STR, ce qui se manifeste par une plus grande teneur en eau pour une même humidité relative et qui confère alors une cohésion plus faible ;

— soit, de la quantité d'argiles légèrement trop importante. En effet, comme l'a montré Gelard dans [26], il existerait une teneur en argiles optimale conduisant à la meilleure cohésion d'une matrice granulaire donnée. On pourrait supposer que les 17% d'argiles de CRA soient supérieurs à cette valeur optimale. Cette explication constitue une des possibilités mais il faudrait plus d'études pour pouvoir conclure.

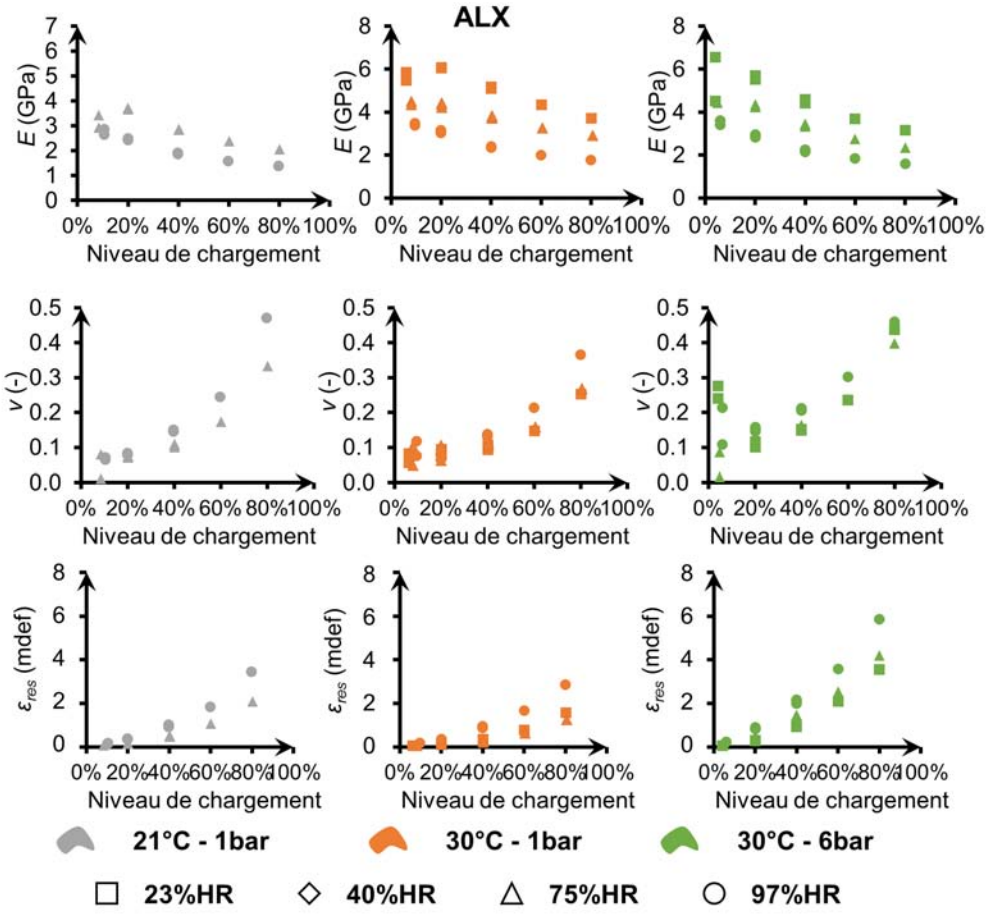


FIGURE 4.8 – Évolution du module d'Young, du coefficient de Poisson et des déformations résiduelles en fonction du niveau de chargement pour la terre ALX.

Conclusion

Pour conclure, tout d'abord sur le dispositif expérimental : il a permis de mesurer correctement les paramètres mécaniques voulus, et ce avec une bonne répétabilité. A

noter que cette bonne répétabilité des résultats est également à imputer à une bonne répétabilité dans la réalisation des échantillons, au travers du moule et de son mode opératoire. Des problèmes ont toutefois été remarqués pour les premières mesures, qui ont permis à l'expérimentateur d'améliorer la mise en place de l'essai au fur et à mesure.

Concernant les résultats des mesures sur les matériaux, on a pu constater différents phénomènes :

Une température variant de 23°C à 30°C ne semble pas avoir d'influence sur le comportement mécanique de ces matériaux.

Le conditionnement des échantillons en sorption ou en désorption ne semble pas avoir d'influence sur la mesure des paramètres mécaniques, ou du moins les différences constatées sont du même ordre de grandeur que la précision des mesures.

La présence d'eau influence fortement le comportement mécanique, dont l'importance varie d'une terre à l'autre. Tout d'abord, la résistance à la compression diminue avec l'humidité relative, quel que soit le matériau ; relativement proche pour CRA et STR, elle est plus faible pour ALX. Ensuite, la variation du module d'Young suit la même dynamique par rapport à l'humidité relative, mais il est dans ce cas proche pour STR et ALX, mais plus faible pour CRA. A noter que le module d'Young ne varie pas avec l'augmentation de la pression de confinement. Le coefficient de Poisson est faible quelle que soit la terre, et l'humidité relative tend à l'augmenter. A noter que dans les hautes humidités relatives, les coefficients des trois terres tendent vers la même valeur. Les déformations résiduelles augmentent avec l'humidité relative et sont plus importantes pour ALX et CRA, que pour STR. Enfin, l'angle de frottement et la cohésion diminuent avec l'humidité relative : la cohésion est plus forte pour CRA et ALX, mais tend vers la même valeur à haute humidité relative.

Le comportement mécanique dépend également du niveau de chargement : la variation du module d'Young avec l'augmentation du niveau de chargement diminue et cette diminution n'est pas influencée par le type de terre ni par leur état hydrique. Le coefficient de Poisson augmente avec le chargement sans qu'une tendance particulière n'émerge vis-à-vis des matériaux ou de leur état hydrique. Les déformations résiduelles sont multipliées par dix pour un niveau de chargement allant de 20 à 80% de q_{max} pour toutes les terres et toutes les humidités relatives.

De manière générale, la variation de ces paramètres mécaniques pour les différentes terres semble plus corrélée à la teneur en argiles qu'à leur activité. En effet, la terre CRA et STR ont la même teneur en argiles, mais celles de CRA possèdent une activité plus forte. En ce qui concerne la cohésion et la résistance à la compression, elles sont proches pour CRA et STR, alors que celles-ci sont plus faibles pour ALX. La capacité du matériau CRA à capter l'eau, plus forte que celle d'ALX et de STR, expliquerait son module d'Young plus faible, quelle que soit l'humidité relative.

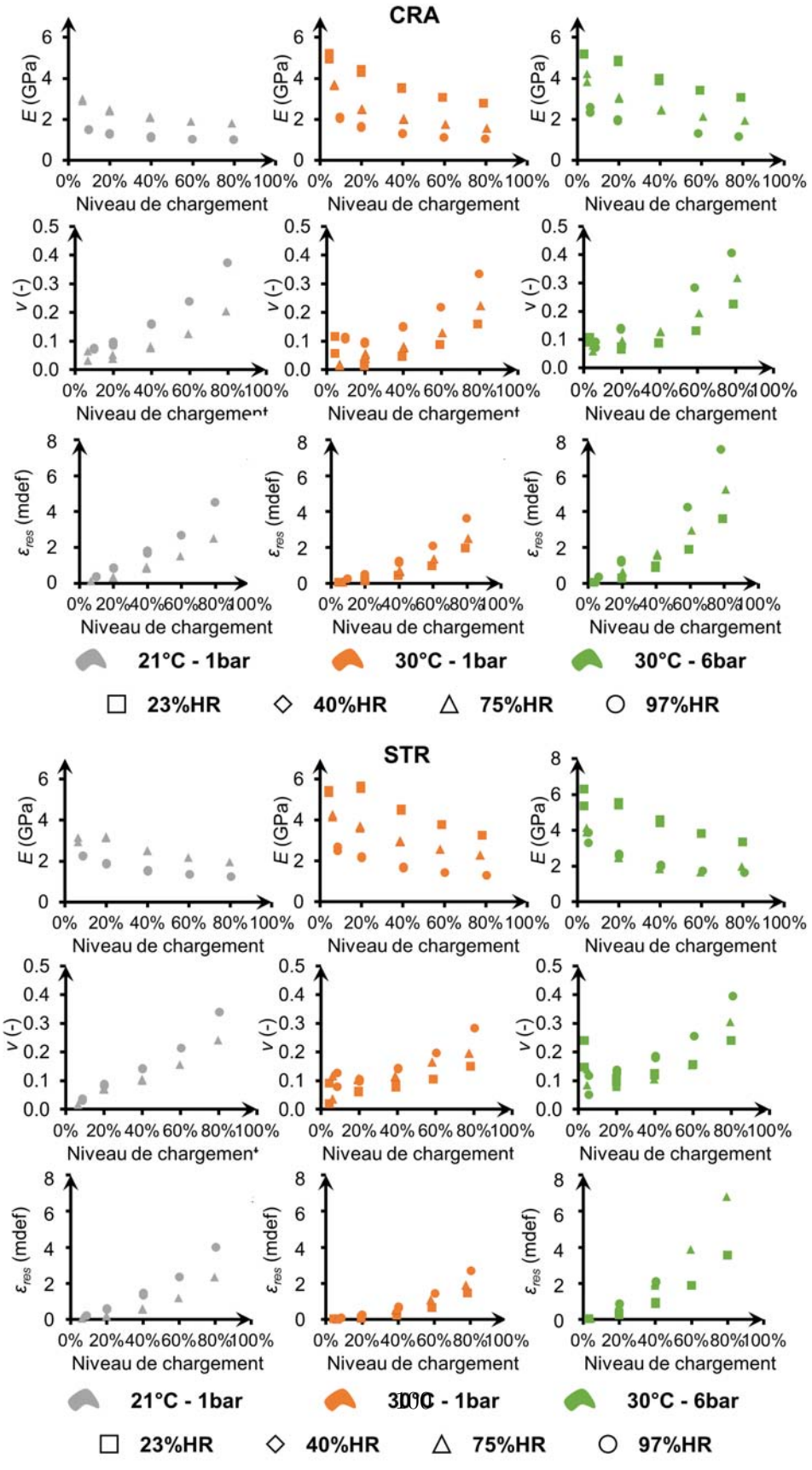


FIGURE 4.9 – Évolution du module d'Young, du coefficient de Poisson et des déformations résiduelles en fonction du niveau de chargement pour les terres CRA et STR.

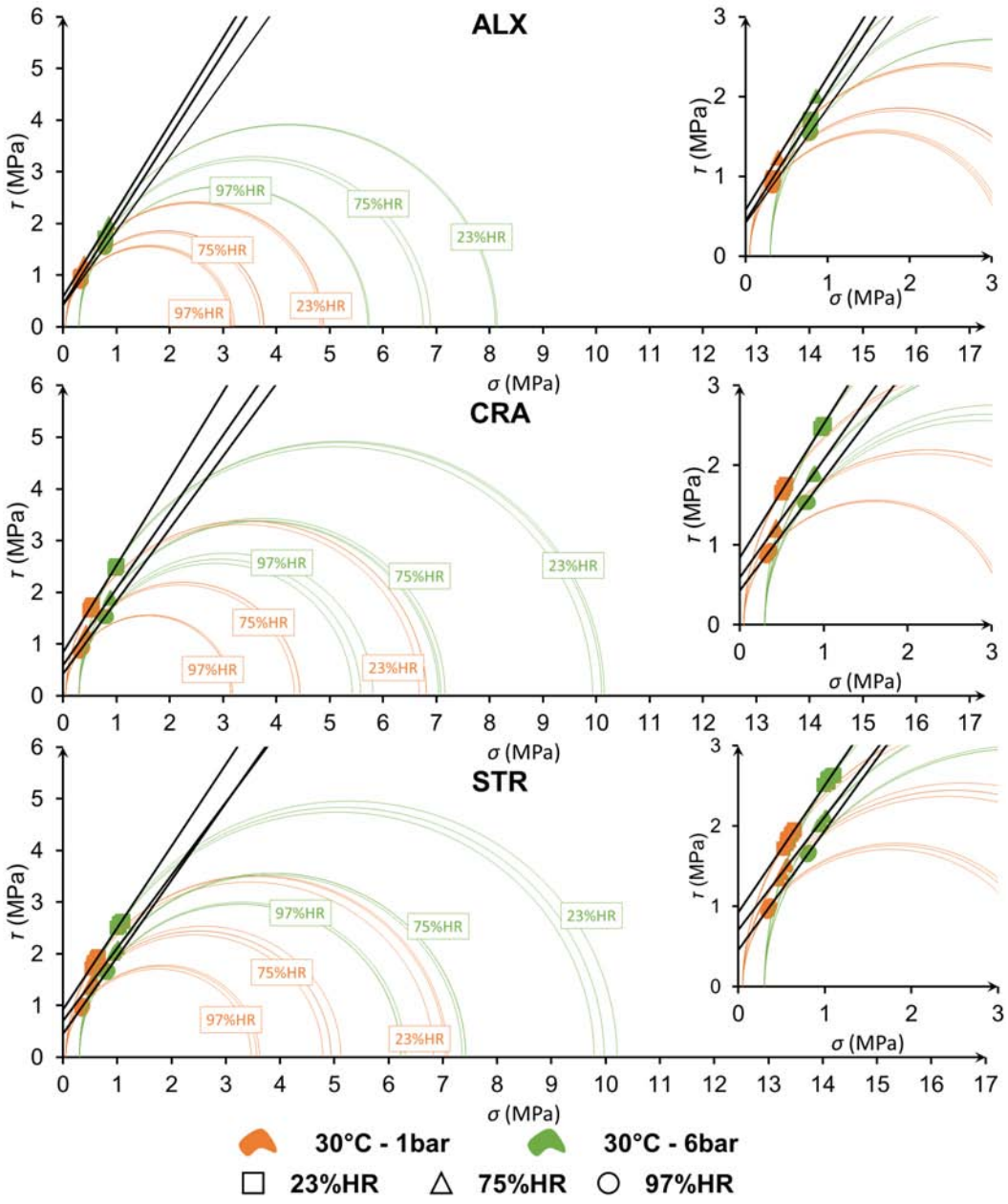


FIGURE 4.10 – Cercles de Mohr et droites de Mohr Coulomb.

Chapitre 5

Essais de gonflement et leur exploitation numérique

Contents

1 Estimation de l'état hydrique de l'échantillon 105
1.1 Équation de la conservation de masse 105
1.1.1 Équation de conservation de masse de gaz 106
1.1.2 Équation de conservation de la masse de vapeur . 107
1.1.3 Équation de conservation de la masse de liquide . 108
1.1.4 Récapitulatif du système d'équations 109
1.2 Implémentation dans COMSOL 109
2 Essais à la coupelle sèche : perméabilité à la vapeur . . 110
2.1 Dispositif expérimental 110
2.2 Résultats 111
2.3 Conclusion 113
3 Essais à écoulement forcé : perméabilité intrinsèque . . 114
4 Essais de gonflement sous gradient hygroscopique 115
4.1 Essais sur la terre CRA 115
4.1.1 Protocole d'essai 115
4.1.2 Mesures du transport hydrique 116
4.1.3 Déformations 117
4.2 Essais sur la terre STR 118
4.2.1 Protocole d'essai 120
4.2.2 Mesures du transport hydrique 120
4.2.3 Déformations 120
5 Modélisation des transferts hydriques et loi de gonflement 121
5.1 Implémentation dans COMSOL 121
5.1.1 L'échantillon 121
5.1.2 Les conditions aux limites 122
5.2 Paramètres d'entrée 124

5.3 Validation du modèle 125
5.4 Gonflement et comparaison 127

Dans cette partie, le transport hydrique dans les échantillons de terre crue est étudié à travers un essai où l'air humide traverse l'échantillon à l'aide d'un générateur d'air humide WetSys de SETARAM.

Cet essai possède l'avantage de réduire le temps d'équilibrage. En effet, le transport de vapeur se fait à la fois par diffusion et par advection. En revanche, cette méthode possède également un désavantage ; à savoir que la pression totale dans l'échantillon n'est pas constante. L'air humide, qui rentre au bas de l'échantillon, est sous pression ; à débit fixé cette pression dépend de la perméabilité à l'air de l'échantillon. L'air en sortie, c'est-à-dire au haut de l'échantillon, est à pression atmosphérique. On a donc un gradient de pression entre l'entrée et la sortie. Les conséquences sont multiples : d'un point de vue mécanique, la contrainte effective de l'échantillon n'est pas constante ; d'un point de vue hydrique, en régime stationnaire, la pression de vapeur n'est pas homogène sur la hauteur de l'échantillon, car elle augmente avec la pression totale de gaz. Il en découle un gradient d'humidité relative au sein de l'échantillon.

Dans un premier temps, les équations qui régissent le transport hydrique de l'air humide dans le matériau seront exprimées. Ces équations seront implémentées dans un logiciel de calcul aux éléments finis : COMSOL Multiphysics. Une confrontation entre les résultats expérimentaux et théoriques permettra de valider le modèle. Enfin, nous pourrons expliciter les déformations mesurées en pratique à l'aide d'un modèle de transport. Ces essais sont effectués sur 3 terres différentes, et leur comportement seront comparés.

1 Estimation de l'état hydrique de l'échantillon

1.1 Équation de la conservation de masse

Dans les prochains paragraphes, nous allons détailler les équations qui nous permettent de modéliser les essais présentés dans les paragraphes précédents. Pour cela nous devons faire un certain nombre d'hypothèses. L'essai est considéré comme isotherme, et les variations de températures dues aux changements de phase de l'eau sont négligées. Les degrés de saturation explorés dans cet essai sont très faibles ; pour cette raison nous considérerons que les transports d'eau liquide sont négligeables. Enfin, bien que l'échantillon se déforme par retrait ou gonflement lors de ces essais, nous supposons que les variations de volumes ont un impact négligeable sur le transport hydrique, on négligera donc les variations de la porosité et de la masse volumique sèche du matériau.

Les variables principales sont l'humidité relative φ et la pression de gaz p_G. Ces variables principales s'imposent du fait les grandeurs mesurées lors de ces essais.

1.1.1 Équation de conservation de masse de gaz

La forme locale de l'équation de la conservation de masse du gaz est :

$$\frac{\partial m_G}{\partial t} = -\underline{\nabla} \cdot \underline{q_G} + \dot{m}_{\to V} \tag{5.1}$$

Avec :
m_G [kg.m^{-3}] : masse de gaz par unité de volume
$\underline{q_G}$ [kg.m^{-2}.s^{-1}] : vecteur flux de masse de gaz
$\dot{m}_{\to V}$ [kg.m^{-3}.s^{-1}] : masse d'eau crée par unité de volume par unité de temps, due au phénomène de changement de phase
$\dot{m}_{\to V} > 0$: évaporation $L \to V$
$\dot{m}_{\to V} < 0$: condensation $V \to L$

Dans le cas d'un matériau homogène isotrope et en négligeant l'effet de la pesanteur, la loi de Darcy permet d'exprimer $\underline{q_G}$ comme :

$$\underline{q_G} = -\rho_G k_{rG} \frac{k}{\eta_G} \underline{\nabla} p_G \tag{5.2}$$

Avec :
k_{rG} [-] : coefficient de perméabilité relative au gaz avec $k_{rG} \in [0; 1]$
k [m^2] : perméabilité intrinsèque au matériau
η_G [m.s^{-2}] : viscosité du gaz égale à 1,85.10^{-5} à 30°C

En combinant les équations (5.1) et (5.2), et en supposant que le gaz est un gaz parfait, on obtient :

$$\frac{\partial m_G}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot \left(p_G \frac{M_G}{RT} k_{rG} \frac{k}{\eta_G} \underline{\nabla} p_G \right) + \dot{m}_{\to V} \tag{5.3}$$

Intéressons-nous à présent au membre de gauche de l'équation 5.3. La masse de gaz par unité de volume peut être exprimée de la façon suivante :

$$m_G = \phi_G \, \rho_G \tag{5.4}$$

avec $\phi_G = (1 - S_r)\phi$.

Le volume poreux est à la fois partagé par le gaz et l'eau liquide : $\phi = \phi_L + \phi_G$. Via l'isotherme de sorption / désorption, obtenue expérimentalement, nous avons alors une relation entre la teneur en eau liquide w_L en fonction de l'humidité relative φ. On peut donc en déduire l'espace ϕ_L en utilisant l'expression de la saturation S_r de l'équation (1.2) :

$$\phi_L = S_r \, \phi \qquad \Rightarrow \qquad \phi_L = w_L(\varphi) \frac{\rho_d}{\rho_L} \tag{5.5}$$

On a alors :

$$\phi_G = \phi - w_L(\varphi)\frac{\rho_d}{\rho_L} \tag{5.6}$$

En dérivant (5.4), en remplaçant ϕ_G par l'expression (5.6) et en supposant que la porosité ϕ ne varie pas au court du temps, on a :

$$\frac{\partial m_G}{\partial t} = -p_G\frac{M_G}{RT}\frac{\rho_d}{\rho_L}\frac{\partial w_L(\varphi)}{\partial \varphi}\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{M_G}{RT}\left(\phi - w_L(p_V)\frac{\rho_d}{\rho_L}\right)\frac{\partial p_G}{\partial t} \tag{5.7}$$

Avec :
M_G [kg.mol^{-1}] : masse molaire du gaz

Ainsi, des équations (5.3) et (5.7), nous déduisons l'équation qui régit le comportement de la phase gazeuse dans notre milieu. Dans le paragraphe suivant, nous nous intéressons aux équations qui régissent le comportement de la vapeur d'eau.

1.1.2 Équation de conservation de la masse de vapeur

L'équation locale de conservation de la masse de vapeur est :

$$\frac{\partial m_V}{\partial t} = -\underline{\nabla} \cdot \rho_V \underline{V_V} + \dot{m}_{\to V} \tag{5.8}$$

Avec : m_V [kg.m^{-3}] : masse de vapeur par unité de volume
ρ_V [kg.m^{-3}] : masse volumique de la vapeur d'eau
$\underline{V_V}$ [m.s^{-1}] : vitesse moyenne apparente des particules de vapeur dans l'unité de volume

La vitesse moyenne apparente des particules de vapeur est due à deux phénomènes : la diffusion des molécules de vapeur au sein du mélange air-vapeur et le mouvement d'ensemble par l'advection de la phase gazeuse lors de sa migration au sein du réseau poreux. La diffusion peut être modélisée par la loi de Fick, qui peut s'écrire sous la forme suivante [20] :

$$\underline{V_V} - \underline{V_G} = D\left(-\frac{\underline{\nabla}\,\varphi}{\varphi} + \frac{\underline{\nabla}\,p_G}{p_G}\right) \tag{5.9}$$

Avec :
D [m^2.s^{-1}] : coefficient de diffusion de la vapeur dans le gaz
$\underline{V_G}$: vitesse moyenne des particules de gaz

Pour faire intervenir la loi de Fick dans l'expression (5.8), nous la réécrivons de la façon suivante :

$$\frac{\partial m_V}{\partial t} = -\underline{\nabla}\left(\rho_V\left(\underline{V_V} - \underline{V_G} + \underline{V_G}\right)\right) + \dot{m}_{\to V} \tag{5.10}$$

En introduisant (5.2) et (5.9) dans (5.10) et en supposant la vapeur d'eau comme un gaz parfait on a :

$$\frac{\partial m_V}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot \left[\varphi \, p_V^{sat} \, \frac{M_{H_2O}}{RT} \left(D \left(\frac{\underline{\nabla} \varphi}{\varphi} - \frac{\underline{\nabla} p_G}{p_G} \right) + k_{rG} \frac{k}{\eta_G} (\underline{\nabla} p_G) \right) \right] + \dot{m}_{\to V} \quad (5.11)$$

Développons à présent le membre de gauche $\frac{\partial m_V}{\partial t}$:

$$\frac{\partial m_V}{\partial t} = \frac{\partial (\rho_V \phi_G)}{\partial t} \quad ; \quad \frac{\partial m_V}{\partial t} = \rho_V \frac{\partial \phi_G}{\partial t} + \phi_G \frac{\partial \rho_V}{\partial t} \quad (5.12)$$

En procédant de la même manière que pour le gaz, on obtient :

$$\frac{\partial m_V}{\partial t} = -p_V^{sat} \, \varphi \, \frac{M_{H_2O}}{RT} \frac{\rho_d}{\rho_L} \frac{\partial w_L(\varphi)}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + p_V^{sat} \frac{M_{H_2O}}{RT} \left(\phi - w_L(\varphi) \frac{\rho_d}{\rho_L} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (5.13)$$

Ainsi, des équations (5.11) et (5.13), nous déduisons l'équation du comportement de la vapeur d'eau dans notre milieu. Dans le paragraphe suivant, nous nous intéresserons aux équations qui régissent le comportement de l'eau liquide, ce qui nous permet *in fine* d'exprimer $\dot{m}_{\to V}$ en fonction des variables principales.

1.1.3 Équation de conservation de la masse de liquide

L'équation locale de conservation de la masse de liquide est :

$$\frac{\partial m_L}{\partial t} = -\underline{\nabla} \cdot \underline{q_L} - \dot{m}_{\to V} \quad (5.14)$$

Avec :
$\underline{q_L}$ [kg.m^{-2}.s^{-1}] : vecteur courant de masse de liquide

L'écoulement de liquide étant supposé nul ici, l'expression (5.14) devient simplement :

$$\frac{\partial m_L}{\partial t} = -\dot{m}_{\to V} \quad (5.15)$$

Intéressons-nous au membre de gauche de l'équation (5.15) :

$$\frac{\partial m_L}{\partial t} = \frac{\partial \rho_d w_L(\varphi)}{\partial t} \quad (5.16)$$

Soit en exprimant cette dernière équation avec les variables d'état φ et p_G, on obtient finalement :

$$\frac{\partial m_L}{\partial t} = \rho_d \frac{\partial w_L(\varphi)}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (5.17)$$

Nous avons désormais une expression de $\dot{m}_{\to V}$. Dans le prochain paragraphe, nous récapitulons les équations qui sont ensuite implémentées dans le logiciel aux éléments finis.

1.1.4 Récapitulatif du système d'équations

Le système d'équations obtenu est le suivant :

$$\underline{\nabla}\cdot\left[p_G\frac{M_G}{RT}\,k_{rG}\frac{k}{\eta_G}\underline{\nabla}\,p_G\right]= \left[\left(-p_G\frac{M_G}{RT}\frac{\rho_d}{\rho_L}+\rho_d\right)\frac{\partial w_L(\varphi)}{\partial\varphi}\right]\frac{\partial\varphi}{\partial t}+\left[\frac{M_G}{RT}\left(\phi-w_L(\varphi)\frac{\rho_d}{\rho_L}\right)\right]\frac{\partial p_G}{\partial t} \quad (5.18)$$

$$\underline{\nabla}\cdot\left[p_V^{sat}\frac{M_V}{RT}D\underline{\nabla}\varphi+\varphi\,p_V^{sat}\frac{M_V}{RT}\left(-D\frac{1}{p_G}+k_{rG}\frac{k}{\eta_G}\right)\underline{\nabla}p_G\right]= \left[\left(-\varphi\,p_V^{sat}\frac{M_V}{RT}\frac{\rho_d}{\rho_L}+\rho_d\right)\frac{\partial w_L(\varphi)}{\partial\varphi}+p_V^{sat}\frac{M_V}{RT}\left(\phi-w_L(\varphi)\frac{\rho_d}{\rho_L}\right)\right]\frac{\partial\varphi}{\partial t} \quad (5.19)$$

1.2 Implémentation dans COMSOL

COMSOL Multiphysics est un code de calcul aux éléments finis utilisé pour des problèmes physiques ou d'applications en ingénierie. L'interface permet au logiciel d'être utilisé pour des champs d'étude et des disciplines très divers. De nombreux modules sont préalablement intégrés pour différentes applications telles que l'électricité, la mécanique, la chimie, ... Ces interfaces permettent un couplage aisé entre les différents phénomènes physiques dans un même modèle.

Ce logiciel semble adapté pour implémenter et développer notre modèle. L'implémentation du modèle est décrite dans les paragraphes suivants.

Le système aux dérivées partielles est résolu en utilisant COMSOL Multiphysics, via l'interface "PDE" (Équations aux Dérivées Partielles) et plus précisément à travers la forme "coefficient" proposée par le logiciel :

$$\underline{\underline{e_a}}\frac{\partial^2\underline{u}}{\partial t^2}+\underline{\underline{d_a}}\frac{\partial\underline{u}}{\partial t}+\underline{\nabla}\cdot\left(-\underline{\underline{c}}\,\underline{\nabla}\,\underline{u}-\underline{\underline{\alpha}}\,\underline{u}+\underline{\gamma}\right)+\underline{\underline{\beta}}\cdot\underline{\nabla}\,\underline{u}+a\underline{u}=0 \quad (5.20)$$

Compte tenu du système d'équations développé dans les paragraphes précédents, nous obtenons l'équation arrangée de COMSOL suivante :

$$\begin{bmatrix}d_{a11} & d_{a12}\\ d_{a21} & d_{a22}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\frac{\partial\varphi}{\partial t}\\ \frac{\partial p_G}{\partial t}\end{bmatrix}+\underline{\nabla}\cdot\left(-\begin{bmatrix}c_{11} & c_{12}\\ c_{21} & c_{22}\end{bmatrix}\underline{\nabla}\begin{bmatrix}\varphi\\ p_G\end{bmatrix}\right)=0 \quad (5.21)$$

Avec les équations correspondantes pour chaque coefficient, on a :

$$
\begin{aligned}
d_{a11} &= \left(-\varphi\, p_V^{sat}\, \frac{M_V}{RT}\frac{\rho_d}{\rho_L} + \rho_d\right)\frac{\partial w_L(\varphi)}{\partial \varphi} + p_V^{sat}\frac{M_V}{RT}\left(\phi - w_L(\varphi)\frac{\rho_d}{\rho_L}\right)\\
d_{a12} &= 0\\
d_{a21} &= \left(-p_G\frac{M_G}{RT}\frac{\rho_d}{\rho_L} + \rho_d\right)\frac{\partial w_L(\varphi)}{\partial \varphi}\\
d_{a22} &= \frac{M_G}{RT}\left(\phi - w_L(\varphi)\frac{\rho_d}{\rho_L}\right)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
c_{11} &= p_V^{sat}\,\frac{M_V}{RT}D\\
c_{12} &= \varphi\, p_V^{sat}\,\frac{M_V}{RT}\left(-\frac{D}{p_G} + k_{rG}\frac{k}{\eta_G}\right)\\
c_{21} &= 0\\
c_{22} &= p_G\frac{M_G}{RT}\,k_{rG}\frac{k}{\eta_G}
\end{aligned}
$$

Ce système d'équation met en évidence la nécessité de connaître les perméabilités apparentes au gaz et à la vapeur d'eau. La mesure de ces deux paramètres est décrite dans les sections suivantes.

2 Essais à la coupelle sèche : perméabilité à la vapeur

La détermination du coefficient de diffusion de la vapeur d'eau D introduit dans l'équation de conservation de la masse de vapeur, est réalisée suivant le protocole de la norme NF EN ISO 12572. L'objectif ici est d'obtenir un flux constant de vapeur au travers d'un échantillon dont chacune des faces est exposée à une humidité relative différente et constante.

2.1 Dispositif expérimental

Pour cela, pour chaque type de terre (STR, CRA et ALX), un ruban adhésif d'aluminium a été placé sur la circonférence d'un échantillon de 3,5 cm de diamètre et 7 cm de haut. Ce ruban a permis de découper l'échantillon en deux morceaux de différentes tailles sans qu'il n'y ait d'éclats. Les tailles des deux parties d'échantillon sont de 1,7 cm et 2,7 cm. D'autre part, sur les couvercles de deux boites de conservation étanches, est percé un trou du diamètre de l'échantillon afin qu'il y soit introduit. Enfin, les boîtes sont remplies de silica gel et refermées par leur couvercle respectif, équipées de leur échantillon. La Figure 5.1 représente les deux coupelles sèches pour chaque type de terre. A noter que l'étanchéité est renforcée par du silicone sur le pourtour de l'échantillon et entre le couvercle et la boîte.

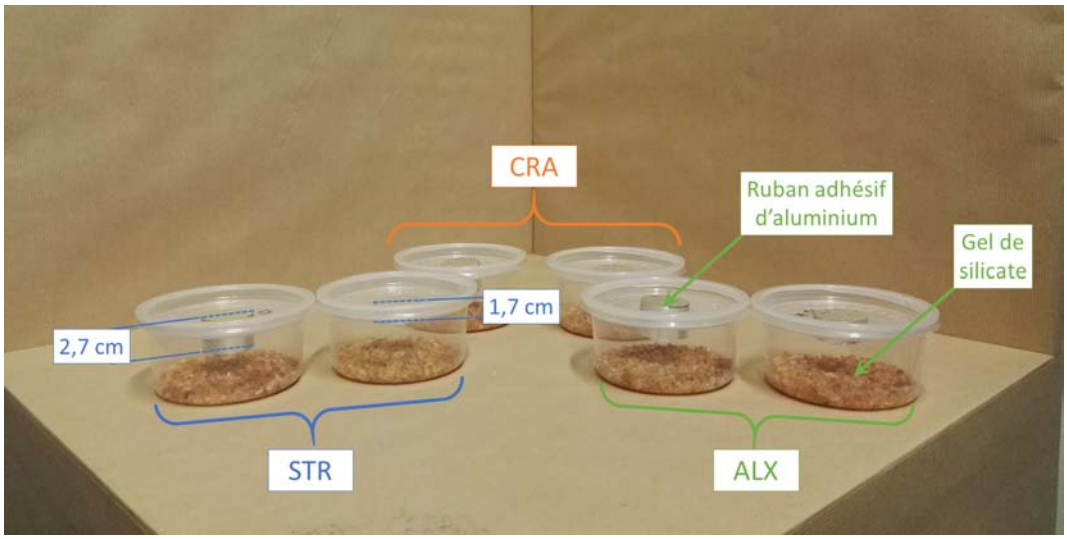


FIGURE 5.1 – Photo des boîtes utilisées pour mesurer le coefficient de diffusion à la vapeur D.

La face inférieure de l'échantillon est au contact d'un air avec une humidité relative de 3%HR. Les boîtes sont ensuite introduites dans une chambre climatique de la marque Ineltec où l'humidité et la température sont maintenues constantes à 70%HR et 23°C, et dont l'air est au contact de la face supérieure de l'échantillon. Les humidités relatives étant différentes de part et d'autre, un flux de vapeur traverse alors l'échantillon. L'humidité étant plus faible à l'intérieur de la boite qu'à l'extérieur, la masse de silica gel va augmenter au cours du temps. Cette prise de masse sert ensuite pour calculer D.

2.2 Résultats

La variation de masse avec le temps montre trois comportements différents. Le premier correspond à l'étape où le flux de vapeur est dissipé par condensation dans l'échantillon. La seconde étape correspond au régime quasi-stationnaire où le flux de vapeur est constant. Le dernier apparaît quand le silica gel est saturé et que sa masse ne peut plus augmenter.

La Figure 5.2 montre les variations de masse pour les différentes terres et les différentes épaisseurs d'échantillon de ALX, CRA et STR. On constate qu'il y a bien une phase transitoire, d'environ 1j, le régime permanent s'établit ensuite. La phase où le silica gel se sature n'a pas été enregistrée. Le taux de variation de masse $\Delta m/\Delta t$ a été évalué entre le jour 1 et 7.

Les calculs sont réalisés dans un premier temps en accord avec la norme EN ISO 12572 (CEN 2001). Le taux de variation de masse est donné par les résultats expérimentaux depuis les graphiques précédents, qui est ensuite utilisé pour calculer

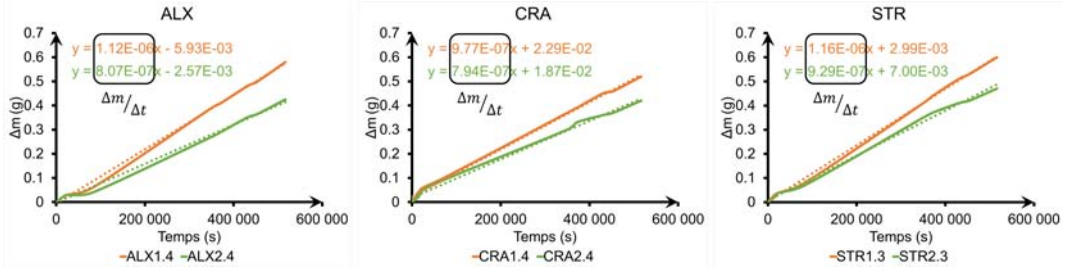


FIGURE 5.2 – Variation de masse en fonction du temps des coupelles sèches pour les terres ALX, CRA et STR pour des épaisseurs d'échantillon de 1,4 cm et 2,4 cm.

la résistance équivalente brute, R_{brut}, grâce à la relation suivante :

$$R_{brut} = \frac{e}{\delta_{brut}} = \frac{S\Delta p_v}{\Delta m/\Delta t} \tag{5.22}$$

avec :
e [m] : épaisseur de l'échantillon
S [m^2] : surface de l'échantillon au contact de l'air
Δp_V [Pa] : différence de pression de vapeur de part et d'autre de l'échantillon

La norme propose une correction de la perméabilité à la vapeur en prenant en compte la résistance de la lame d'air entre le silica gel et la partie inférieure de l'échantillon. Cette correction est normalement recommandée quand la couche d'air possède une épaisseur inférieure à 0,2 m. Dans ce cas, la résistance totale à la diffusion de la vapeur, s'exprime sous la forme :

$$R_{lame} = \frac{e}{\delta_{lame}} + \frac{e_a}{\delta_a} \tag{5.23}$$

avec :
e_a [m] : épaisseur de la lame d'air
δ_a [$kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$] : résistance à la diffusion de la vapeur dans l'air, égale à 2.10^{-10}

Une autre correction, dite "beta" et proposée par [50], consiste à tenir compte de la résistance à la diffusion de la vapeur sur la surface supérieure de l'échantillon, qui dépend notamment des conditions de ventilation de la chambre climatique utilisée pendant l'équilibrage des échantillons. En supposant que l'état de surface de tous les échantillons soit le même, cette résistance est la même pour tous les échantillons dont le conditionnement s'est fait simultanément, et en particulier pour les échantillons de différentes épaisseurs. En imaginant un échantillon d'épaisseur nulle, la résistance à la diffusion de la vapeur mesurée serait alors la somme des résistances de la lame d'air et de la surface supérieure. Le coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur évoluant linéairement avec l'épaisseur de l'échantillon, la mesure sur des échantillons

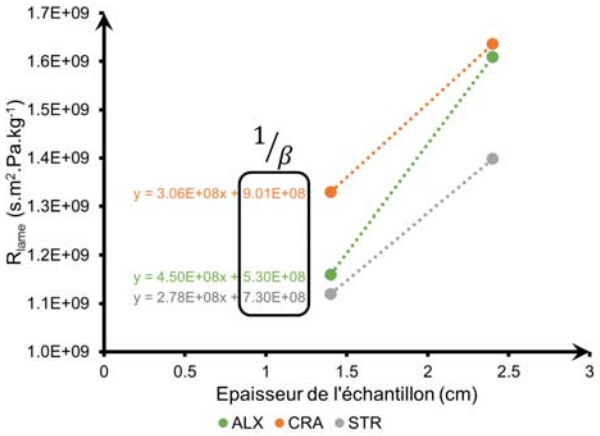


FIGURE 5.3 – Détermination graphique de la correction beta à appliquer, pour chaque terre.

de différentes épaisseurs donne accès à la correction beta à appliquer. Le graphique de la Figure 5.3 décrit la détermination graphique de ce coefficient.

Dans ce cas, la résistance totale à la diffusion de la vapeur, s'exprime sous la forme :

$$R_{tot} = \frac{e}{\delta_\beta} + \frac{e_a}{\delta_a} + \frac{1}{\beta} \tag{5.24}$$

dont on peut extraire la valeur de δ_β.

Les coefficients δ_{brut}, δ_{lame} δ_β sont récapitulés dans le Tableau 5.1. Ils représentent respectivement les coefficients brut sans corrections, avec la correction de la lame d'air et avec la correction beta. Les valeurs correspondantes sont également renseignées dans le Tableau 5.1.

A partir des valeurs des coefficients D_{moy} pour chaque terre, les valeurs de coefficients de diffusion à la vapeur, tels qu'exprimés dans les équations de conservation de la section précédente, peuvent être calculés selon la formule suivante :

$$D = D_{moy}\frac{RT}{M_v} \tag{5.25}$$

2.3 Conclusion

Les résultats précédents témoignent des différences de comportement entre les trois terres vis-à-vis de la diffusion de la vapeur : tandis que CRA et STR présentent un coefficient de diffusion très proche, celui de ALX est un peu plus faible.

	ALX		**CRA**		**STR**		Unités
e	0,014	0,024	0,014	0,024	0,014	0,024	m
D_{brut} x10^{-11}	1,2	1,5	1,1	1,5	1,2	1,6	kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}
e_{air}	0,026	0,016	0,026	0,016	0,026	0,016	m
β x10^{-9}	1,9		1,1		1,4		kg.m^{-2}.s^{-1}.Pa^{-1}
D_β x 10^{-11}	2,8	2,4	4,7	3,7	5,0	3,9	kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}
D_{moy}x 10^{-11}	2,6		4,2		4,5		kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}
D x 10^{-6}	3,6		5,8		6,1		m^2.s^{-1}

TABLEAU 5.1 – Tableau des valeurs brutes de D et corrigées pour les terres ALX, CRA et STR pour les échantillons de 1,4 cm et 2,4 cm.

D'autre part, il est intéressant de remarquer la variation des différents coefficients avant et après prise en compte des corrections : ceux-ci sont beaucoup plus importants après correction (entre 2 et 3 fois plus), ce qui implique que, sans elle, la diffusivité du matériau est sous-estimée.

3 Essais à écoulement forcé : perméabilité intrinsèque

Ce paragraphe traite de d'essai à écoulement forcé à l'aide de la cellule triaxiale. Après un bref rappel du système utilisé et de sa configuration, des essais sur des échantillons sont présentés : dans un premier temps, les échantillons confectionnés avec la terre de CRA puis ceux confectionnés avec la terre de STR.

La mise en place de l'échantillon est identique à celle présentée dans le chapitre précédent. La Figure 5.4 permet de se rendre compte de l'essai réalisé avec la position des vannes, l'écoulement de l'air au travers de l'échantillon ainsi que les termes employés pour la description des essais.

L'essai consiste ainsi à injecter de l'air sec (humidité relative inférieure à 3%) avec un débit volumique d'entrée constant égal à 50 mL.min^{-1}. A ce niveau d'humidité, on suppose que le matériau est sec et donc sans gradient de saturation, ainsi que la perméabilité relative au gaz k_{rG} est homogène et égale à 1. La perméabilité intrinsèque du matériau peut donc être calculée à partir des pressions mesurées en entrée et en sortie, selon l'équation suivante (obtenue à partir de la loi de Darcy et en prenant en compte la compressibilité du gaz) :

$$k = \frac{2QH\eta_G}{S} \frac{p_e(0)}{p_e(0)^2 - p_s(0)^2} \tag{5.26}$$

Avec :

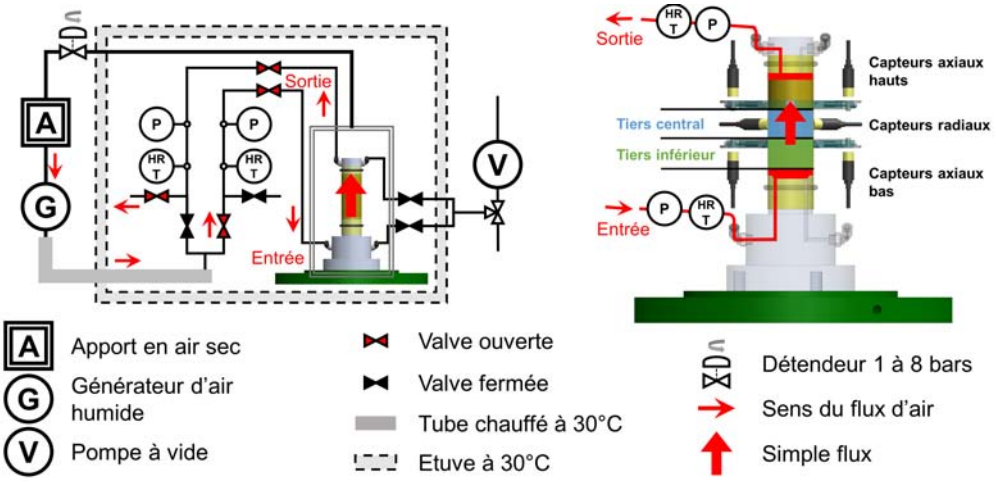


FIGURE 5.4 – Schéma du flux traversant et les termes employés pour la description des résultats.

Q [ml.min^{-1}] : débit d'air entrant, égal à 50ml.min^{-1}
H [mm] : hauteur de l'échantillon, égale à 70mm
S [cm^2] : surface de l'échantillon au contact de l'arrivée d'air, égale à 9,62 cm^2
$P_e(0)$ [bar] : pression d'entrée d'air, mesurée au début de l'essai
$P_s(0)$ [bar] : pression de sortie d'air, mesurée au début de l'essai

Les résultats obtenus sont reportés au Tableau 5.2.

4 Essais de gonflement sous gradient hygroscopique

4.1 Essais sur la terre CRA

Nous avons testés trois échantillons fabriqués avec la terre de CRA, dénommés CRA25, CRA26 et CRA27. On décrira seulement les résultats de l'échantillon CRA25, les graphiques correspondant aux échantillons CRA 26 et 27 étant détaillés en annexes. L'échantillon CRA25 a été préalablement équilibré à l'aide de silica gel, ce qui correspond à une humidité relative d'environ 3%HR, et stocké dans une étuve maintenue à 30°C.

4.1.1 Protocole d'essai

Le protocole d'essai consiste à faire traverser l'échantillon par un air humide à 3%HR à 30°C pendant 8 jours. Cette première phase permet d'avoir un régime stationnaire établi. La consigne d'humidité relative est ensuite changée à 90%HR à 30°C pendant 10 jours. Tout au long de l'essai, l'échantillon est confiné à 1,5 bar.

4.1.2 Mesures du transport hydrique

La Figure 5.5 représente l'évolution avec le temps des humidités relatives mesurées en entrée et en sortie. L'échantillon étant préalablement équilibré à environ 3%HR, on constate qu'en sortie, cet air chassé de l'échantillon est très sec pendant les 2 premiers jours, de t = -8j à t = -6j. L'humidité relative mesurée en sortie augmente ensuite pendant 1 jour puis se stabilise à 3,9%HR. A t = 0j, la commande du WetSys passe de 5%HR à 90%HR, ce que l'on vérifie en mesurant la valeur de l'humidité relative entrante. On remarque d'ailleurs la vitesse de stabilisation du générateur à 8h. En sortie, il faut attendre t = 0,8j avant de voir la mesure de l'humidité relative sortante augmenter. L'humidité relative augmente jusqu'à t = 5j pour atteindre une humidité relative sortante égale à 61%HR, qui est bien inférieure à l'HR d'entrée.

Si le gradient de pression au sein de l'échantillon est aisément visualisable, il l'est moins pour la pression de vapeur. Ce résultat peut être retrouvé analytiquement via les équations (5.18) et (5.19), en considérant les hypothèses suivantes :

— la perméabilité à l'air $k\frac{k_{rG}}{\eta_G}$ est indépendante de la teneur en eau, nommée ensuite K
— le phénomène de diffusion est nettement plus lent que celui d'advection ($\frac{D}{p_G} << K$), ce dernier étant donc négligé
— l'essai présentant un axe de symétrie, on peut le modéliser par un objet à une dimension

De ces hypothèses et en régime stationnaire, les expressions de p_G et φ^2 tirées des équations (5.18) et (5.19) sont, pour $x \in [0; H]$:

$$p_G = \sqrt{\frac{1}{H}\left((p_G^s)^2 - (p_G^e)^2\right)x + (p_G^e)^2} \tag{5.27}$$

$$\varphi^2 = (\varphi^e)^2\left(\frac{(p_G^s)^2 - (p_G^e)^2}{(p_G^e)^2 H}x + 1\right) \tag{5.28}$$

Avec :
p_G^s [Pa] : pression de gaz en sortie de l'échantillon
p_G^e [Pa] : pression de gaz en entrée de l'échantillon
φ^e [-] : humidité relative appliquée en entrée
La démonstration est détaillée en annexe.
En H, l'humidité relative en sortie φ^s est égale à :

$$\varphi^s = \varphi^e \frac{p_{atm}}{p_G^e} \tag{5.29}$$

Le second graphique présenté dans la Figure 5.5 indique les pressions de l'air entrant et sortant. La pression entrante est constante et égale à 132kPa pour t < 0j. A t=0, la pression augmente et devient constante et égale à 138 kPa à t=5j. En utilisant cette valeur, la relation (5.29) donne l'humidité relative en sortie égale à 65%, ce qui est très proche de la valeur mesurée (égale à 61%). Le débit d'entrée étant constant, l'évolution de la pression d'entrée peut être attribuée à la prise en eau de l'échantillon et donc à la réduction de sa perméabilité relative au gaz.

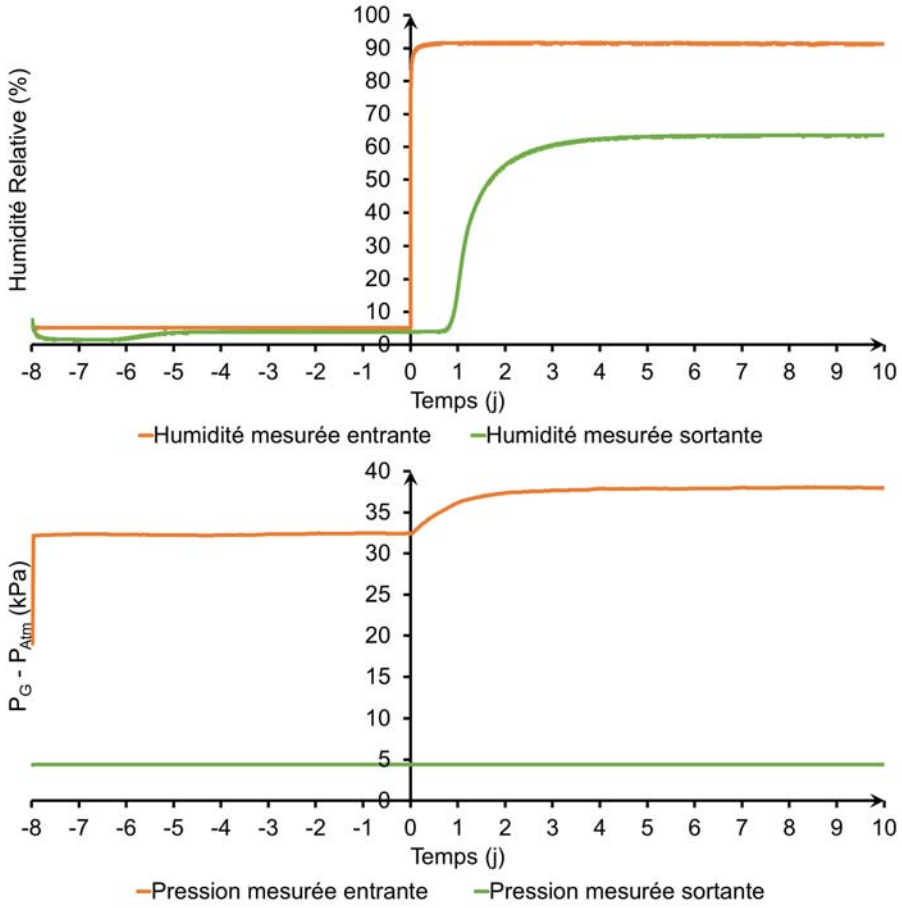


FIGURE 5.5 – Évolution de l'humidité relative et de la pression en entrée et en sortie de l'échantillon CRA 25 au cours du temps.

4.1.3 Déformations

Avant de confronter ces résultats avec les résultats numériques, observons l'évolution des déplacements au travers de la Figure 5.6.

De t=-8j à t=-6j, les déplacements axiaux augmentent puis diminuent. Cela peut s'expliquer par un ensemble de phénomènes. Premièrement, on constate, au regard de la Figure 5.7, une évolution non négligeable de la température dans la cellule. Elle est initialement (t=-8j) proche de la consigne à 29,8°C puis augmente rapidement jusqu'à 30,2°C puis diminue pour se stabiliser à 29,9°C. Le plastique utilisé pour le porte-capteur est sensible aux variations de température et compte-tenu de l'élancement de ces éléments, la dilatation et la contraction sont mesurées par les capteurs sans contact. On peut aussi voir dans la Figure 5.6 que les déplacements radiaux se stabilisent au bout de 5j contre 2j pour les capteurs axiaux. Ce phénomène peut s'expliquer par la déformation des cibles en aluminium, très fines : par la pression de

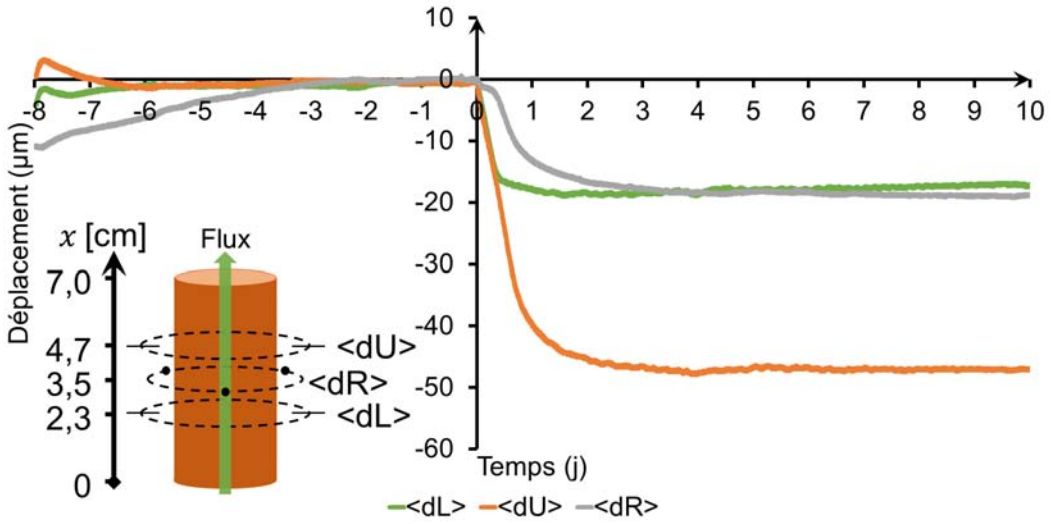


FIGURE 5.6 – Évolution des déplacements moyens mesurés par les capteurs axiaux et radiaux lors de l'essai sur l'échantillon CRA 25. <dL> est la moyenne des déplacements mesurés par les capteurs axiaux SC1 et SC2. <dU> est la moyenne des déplacements mesurés par les capteurs axiaux SC3 et SC4. <dR> est la moyenne des déplacements des capteurs radiaux SC5, SC6 et SC7.

confinement sur la membrane contre l'échantillon, la cible pénètre doucement dans l'échantillon jusqu'à se stabiliser. A t > 0j, on mesure les déplacements dus au gonflement du matériau. Les déplacements axiaux inférieurs et supérieurs évoluent dans un premier temps ensembles. A t=0,35j, la moyenne des déplacements axiaux inférieurs se stabilise pour s'équilibrer autour de 17 µm au bout de 2j ; les déplacements axiaux supérieurs, quant à eux, augmentent pour se stabiliser à t = 5j à environ 47 µm. Ce décalage temporel s'explique par un front de gonflement qui évolue du bas vers le haut de l'échantillon. Tant que le front reste localisé à une distance inférieure à 2,6cm de l'embase, les déplacements axiaux des capteurs supérieurs et inférieurs sont égaux. Une fois que ce front dépasse le premier tiers de l'échantillon, les déplacements mesurés par les capteurs du bas se stabilisent pendant que ceux du haut augmentent encore.

Une critique peut être faite au regard de la Figure 5.8 qui montre que les déformations axiales et radiales ne sont pas égales au cours du temps. Cela pourrait indiquer une anisotropie du matériau, mais également un problème de glissement du porte-cible du bas qui, nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, mesure des déplacements plus faibles que ceux attendus.

4.2 Essais sur la terre STR

Nous avons également testé un échantillon fabriqué avec la terre de STR. Il a été préalablement équilibré à l'aide de silica gel, qui correspond à une humidité relative

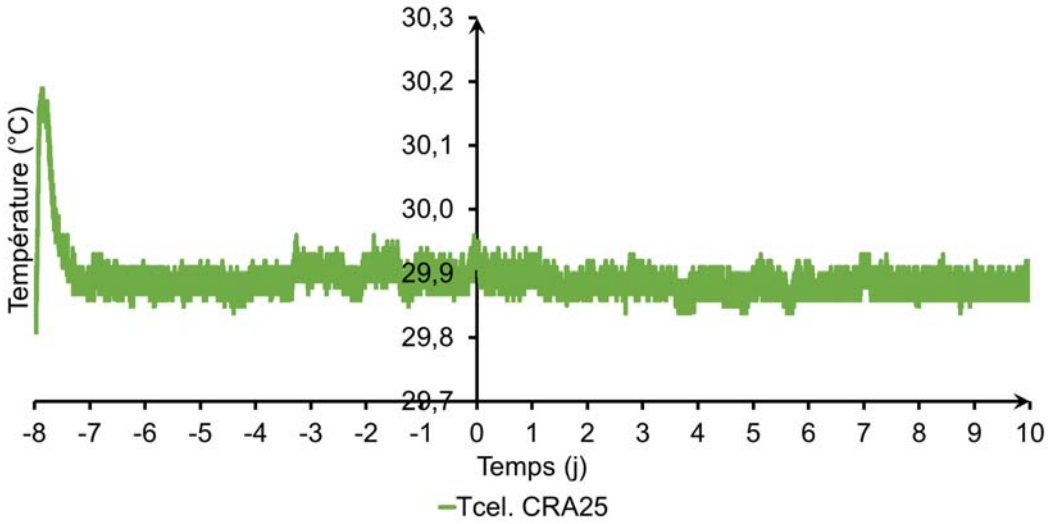


FIGURE 5.7 – Évolution de la température au cours du temps dans la cellule pour l'essai de gonflement de CRA25.

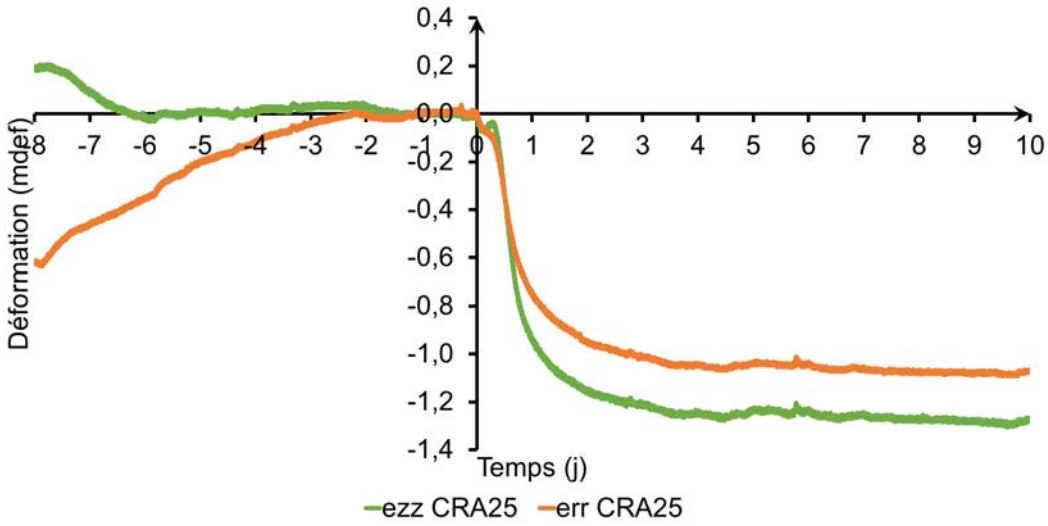


FIGURE 5.8 – Évolution des déformations axiales et radiales de l'échantillon CRA 25 au cours du temps.

d'environ 3%HR et stocké dans une étuve maintenue à 30°C. Tout au long de l'essai, l'échantillon est confiné à 1,5 bar.

4.2.1 Protocole d'essai

Le protocole d'essai consiste à faire traverser l'échantillon par un air humide proche de 0%HR à 30°C pendant 5 jours, air sec fourni par l'assécheur d'air. Cette première phase permet d'avoir un régime stationnaire établi. La consigne d'humidité relative est ensuite changée à 90%HR à 30°C pendant 8 jours. L'échelle temporelle des graphiques est intentionnellement celle de l'essai de CRA25 facilitant ainsi la comparaison entre les deux essais.

4.2.2 Mesures du transport hydrique

La Figure 5.9 présente les variations d'humidité relative en entrée et en sortie. A t=-5j, on peut voir que l'échantillon est initialement équilibré à 3%HR et la consigne du générateur d'air humide proche de 0%HR. L'humidité relative en sortie diminue jusqu'à t=-3j et se stabilise à 1,3%HR.

A t=0j, la consigne du WetSys passe de 0%HR à 90%HR. On constate des ressauts sur le niveau d'entrée de l'humidité de l'air. Cet évènement est dû au fonctionnement du WetSys. La consigne à t<0j étant de 0%HR, l'humidificateur d'air n'est donc pas en fonctionnement. En passant la consigne à 90%HR, une vanne s'ouvre pour amener de l'air dans l'humidificateur. Une dépression dans les conduites, visible sur le graphique 5.9, semble donc avoir perturbé l'asservissement du générateur. Le générateur n'étant pas capable de gérer la transition entre une consigne de 0%HR à humidité plus forte. Cette consigne est depuis proscrite.

Au regard de la surpression atteinte lors de cet essai (voir Figure 5.9), on peut conclure que l'échantillon de STR est plus perméable que celui de CRA. En effet, la surpression est de 32,5 kPa pour l'échantillon de CRA et de 12,3kPa pour l'échantillon de STR. Cette perméabilité plus forte implique un niveau d'humidité relative en sortie plus important que pour l'échantillon de CRA, de 74%HR contre 61%HR. Ces résultats peuvent facilement être retrouvés grâce à l'équation (5.29), à partir des pressions de gaz d'entrée mesurées pour chaque essai.

4.2.3 Déformations

La Figure 5.10 montre l'évolution des déplacements haut et bas ainsi que les déplacements radiaux. Comme pour l'échantillon de CRA, on constate que les déplacements axiaux haut et bas se stabilisent en 2 jours. De même, pour les déplacements radiaux, ils se stabilisent au bout de 5 jours pour les deux types de terre. On constate aussi que la dépression due au changement de consigne du WetSys, a eu un léger impact sur les déplacements radiaux. Cela est d'autant plus visible sur la mesure des déformations radiales et axiales de la Figure 5.11. Cependant, l'amplitude de ces déplacements induits reste suffisamment faible pour être négligée.

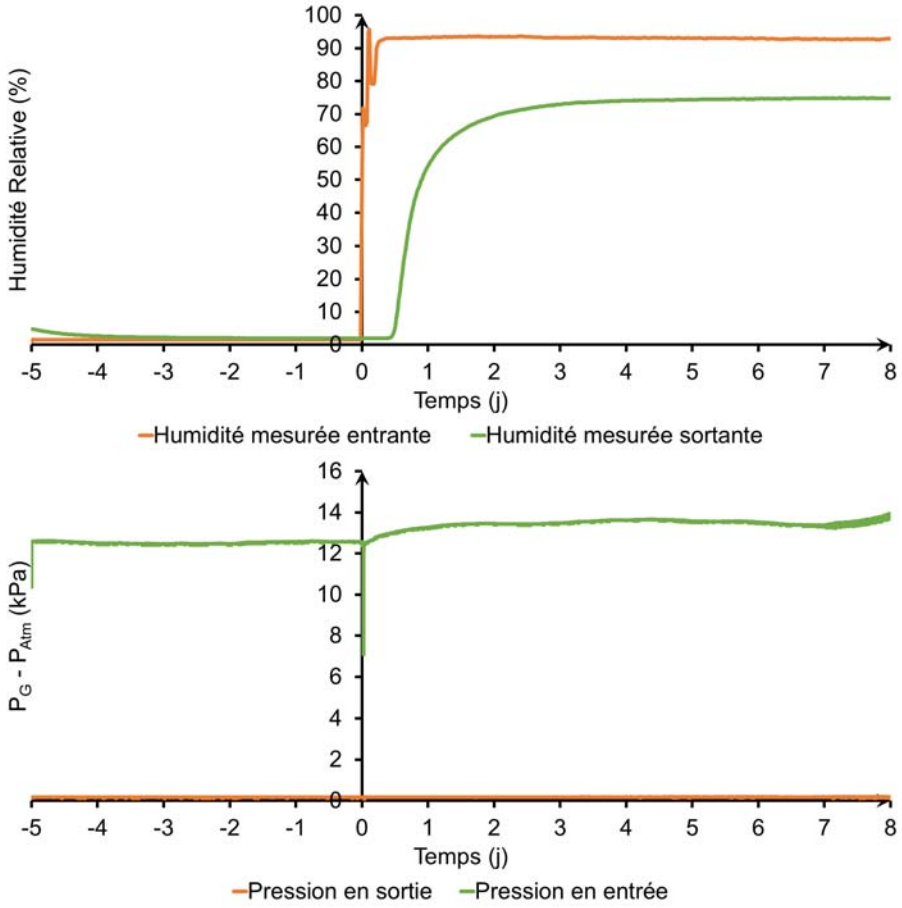


FIGURE 5.9 – Évolution de l'humidité relative et de la pression en entrée et en sortie de l'échantillon STR 15 au cours du temps.

5 Modélisation des transferts hydriques et loi de gonflement

5.1 Implémentation dans COMSOL

5.1.1 L'échantillon

L'échantillon de l'essai peut être modélisé en une dimension, étant donné que les surfaces latérales sont aux contacts de la membrane, les pressions de vapeur et d'air sont celles du milieu. Le milieu est donc modélisé en un segment représentant la hauteur de l'échantillon avec un maillage très fin de 140 éléments de 0,5 mm.

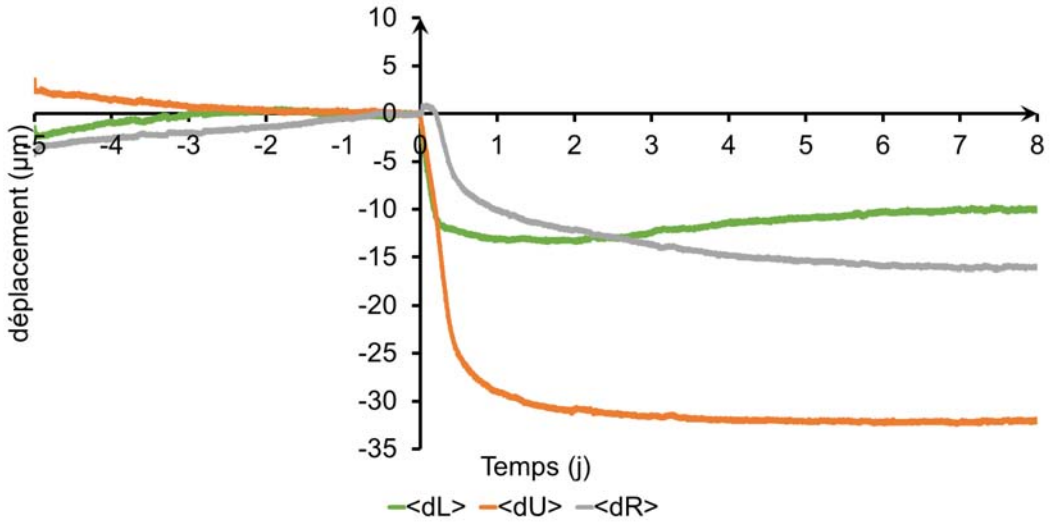


FIGURE 5.10 – Évolution des déplacements moyens mesurés par les capteurs axiaux et radiaux lors de l'essai sur l'échantillon STR 15. <dL> est la moyenne des déplacements mesurés par les capteurs axiaux SC1 et 2. <dU> est la moyenne des déplacements mesurés par les capteurs axiaux SC3 et 4. <dR> est la moyenne des déplacements des capteurs radiaux SC5, SC6 et SC7.

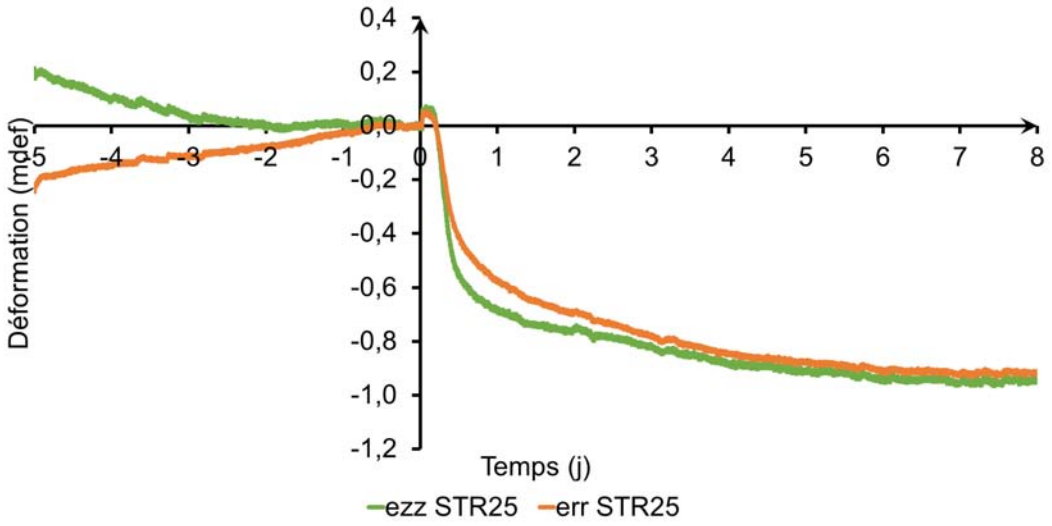


FIGURE 5.11 – Évolution des déformations axiales et radiales de l'échantillon STR 15 au cours du temps.

5.1.2 Les conditions aux limites

Les conditions aux limites de la simulation sont introduites en accord avec les mesures expérimentales et sont représentées Figure 5.12, où l'on impose un flux d'air

humide à débit constant. Une condition aux limites de type Neumann est utilisée. L'expression de ces conditions sont :

- en entrée selon $\underline{n_E}$:

$$\begin{bmatrix} \underline{q_{Ve}} \cdot \underline{n_E} \\ \underline{q_{Ge}} \cdot \underline{n_E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q/S\rho_{Ve} \\ Q/S\rho_G \end{bmatrix} \tag{5.30}$$

- en sortie selon $\underline{n_S}$:

$$\begin{bmatrix} \underline{q_{Vs}} \cdot \underline{n_S} \\ \underline{q_{Gs}} \cdot \underline{n_S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\pi r^4}{8SL}\frac{\rho_V}{\eta_G}(p_G - p_{atm}) \\ -\frac{\pi r^4}{8SL}\frac{\rho_G}{\eta_G}(p_G - p_{atm}) \end{bmatrix} \tag{5.31}$$

Avec :

L [m] : longueur du capillaire d'échappement de l'air en sortie, égale à 3m

r [mm] : rayon du capillaire d'échappement de l'air en sortie, égal à 0,5mm

ρ_{Ve} [kg.m^{-3}] : masse volumique de la vapeur d'eau imposée par la mesure de l'humidité relative en entrée

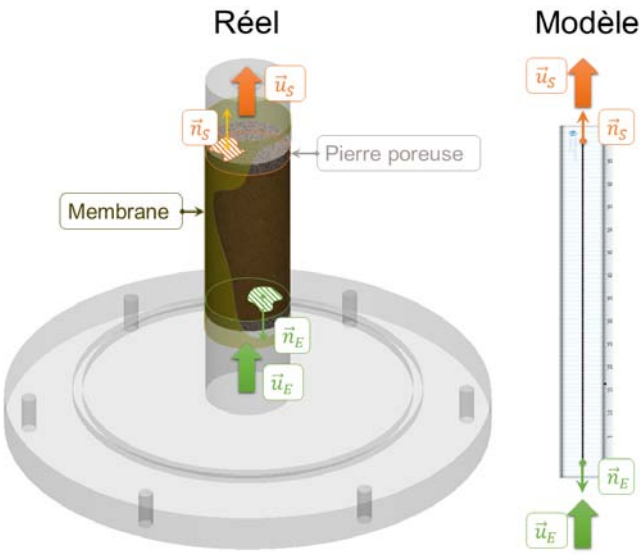


FIGURE 5.12 – Représentation de l'essai du flux traversant avec sa modélisation sur COMSOL.

Le flux volumique de gaz entrant est connu et imposé par le générateur d'air humide. La condition aux limites pour la vapeur est un flux massique de vapeur, égal au flux volumique de gaz pondéré par la masse volumique de vapeur, connue grâce à l'humidité relative mesurée en entrée. La condition aux limites pour le gaz, est un flux massique de gaz, égal au flux volumique de gaz pondéré par la masse volumique de gaz déterminée par la pression du gaz calculée par le modèle.

L'air en sortie de l'échantillon n'est pas directement en contact avec l'air ambiant. Un capillaire de 3m de long et 0,5mm de rayon est raccordé au chapeau. Ainsi, la

pression de gaz en sortie de l'échantillon est imposée par la pression atmosphérique et le débit de l'air au travers du capillaire, nous choisissons d'utiliser une expression du type Poiseuille. La condition aux limites pour la vapeur est le flux volumique de gaz sortant pondéré par la masse volumique de la vapeur.

A noter que l'expression de type Poiseuille n'est pas rigoureusement adaptée étant donné que le gaz n'est pas un fluide incompressible. En revanche, la Figure 5.5 montre que la variation de pression entre l'entrée du capillaire et la sortie n'est que de 5%. En première approximation, cette formulation est acceptable.

5.2 Paramètres d'entrée

Les paramètres d'entrée utilisés sont ceux mesurés sur les terres correspondantes. Ils sont au nombre de quatre : isotherme de sorption, coefficient de diffusion de vapeur, densité, perméabilité à l'air. Le Tableau 5.2 récapitule les valeurs pour chaque terre.

	CRA	**STR**	Unités
sorption	Figure 2.8		
densité	1,97	1,95	$g.cm^{-3}$
ϕ	0,27	0,28	-
D	$5{,}8.10^{-6}$	$6{,}1.10^{-6}$	$m^2.s^{-1}$
k	$4{,}7.10^{-14}$	$9{,}7.10^{-14}$	m^2
S_{res}	11,0	3,7	%
λ	2	10	-
k_{rG}	calculée Corey		

TABLEAU 5.2 – Tableau récapitulatif des paramètres d'entrée pour chacune des terres.

L'évolution de la perméabilité relative au gaz k_{rG} en fonction de la saturation s'exprime selon la loi de Corey [19] :

$$k_{rG} = (1 - S_e)^2 \cdot (1 - S_e^{\frac{2+\lambda}{\lambda}}) \tag{5.32}$$

où λ [-] est un paramètre dépendant de la distribution de taille de pores, et S_e [-] est la saturation équivalente, égale à :

$$S_e = \frac{S_r - S_{res}}{1 - S_{res}} \tag{5.33}$$

avec :
S_r [-] : saturation en eau
S_{res} [-] : saturation résiduelle en eau

La saturation résiduelle est évaluée numériquement de manière à faire correspondre la pression d'entrée calculée avec celle mesurée, la validation du modèle se faisant alors sur la réponse en humidité relative en sortie.

5.3 Validation du modèle

Une confrontation entre le modèle et les mesures expérimentales est réalisée. La vérification du modèle se fait en deux temps. Dans un premier temps, on vérifie que les pressions de gaz mesurée et calculée sont identiques pour la valeur de S_r utilisée. Dans un second temps, on regarde si le modèle est capable de reproduire l'évolution de l'humidité relative en sortie, à partir de l'humidité relative en entrée.

La Figure 5.13 représente l'évolution pendant l'essai des pressions en entrée et en sortie de l'échantillon, mesurées et calculées numériquement. On constate bien que les pressions sont égales en tout t.

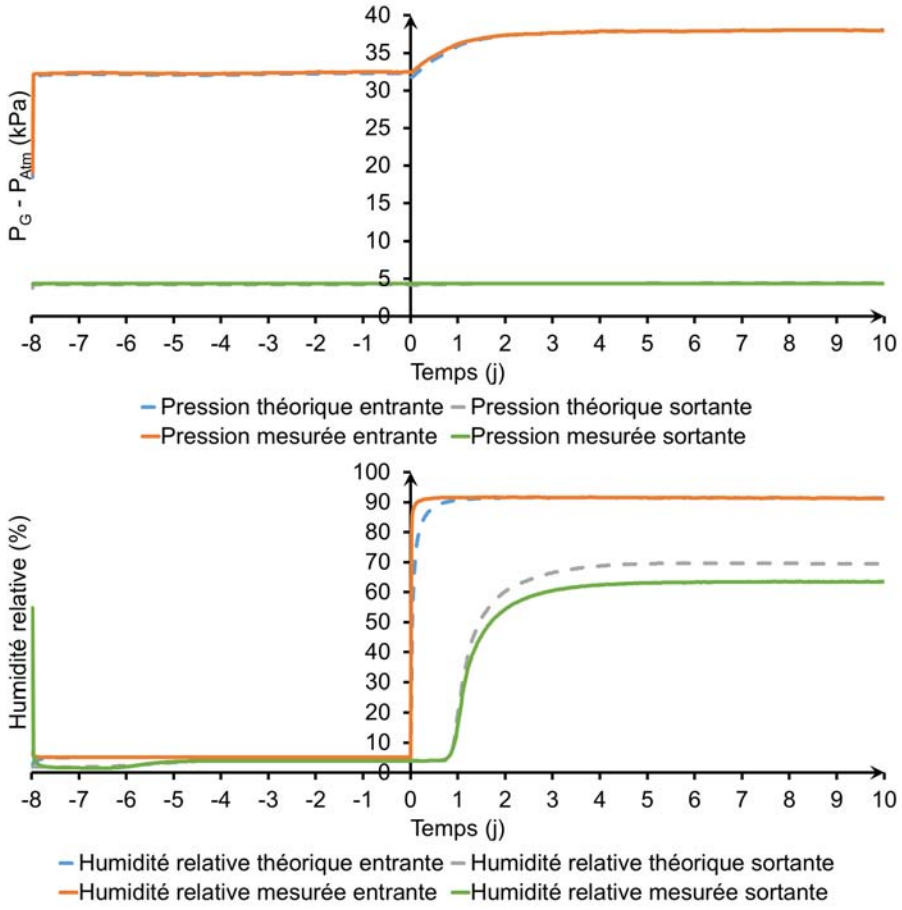


FIGURE 5.13 – Évolution des pressions et de l'humidité relative en entrée et en sortie de l'échantillon CRA 25 au cours du temps, mesurées et calculées numériquement.

Sur la Figure 5.13 sont également représentées les mesures des humidités relatives entrantes et sortantes, ainsi que les variations calculées par la modélisation. On remarque que la simulation reproduit correctement les mesures expérimentales en sortie. L'écart relatif moyen est de 5%. A noter que pour les deux autres échantillons, les

écarts relatifs sont de 8% pour l'essai sur CRA26 et de 6% pour l'essai sur CRA27. On remarque que les résultats sont meilleurs pour les essais sur les échantillons CRA25 et CRA27 que sur CRA26 (Figure 5.14). Les paramètres qui ont changés entre CRA26 et les deux autres essais sont : la pression de confinement (de 1 bar au lieu de 1,5 bar) et l'humidité relative d'équilibre avant t = 0 j (de 10%HR au lieu de 5%HR). Le second paramètre ne devrait pas avoir d'influence sur la dynamique de prise en eau de l'échantillon lors de l'essai.

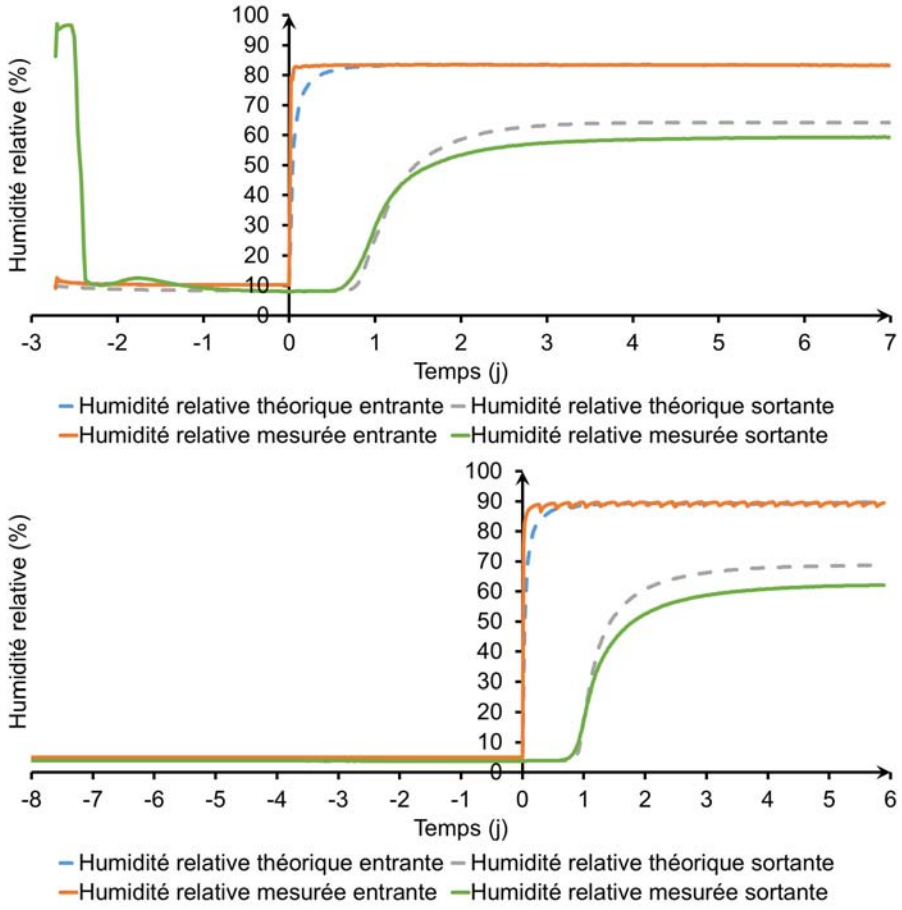


FIGURE 5.14 – Évolution de l'humidité relative en entrée et en sortie de l'échantillon CRA 26 et CRA 27 respectivement au cours du temps, mesurée et calculée numériquement.

Le modèle donne des résultats satisfaisants avec un écart relatif à la moyenne d'environ 5 à 8% par rapport aux résultats expérimentaux. Cependant, on constate que l'humidité relative modélisée en sortie est systématiquement supérieure à celle mesurée. Ce problème pourrait être dû à la membrane ou aux connexions des capillaires à l'intérieur de la cellule. En effet, le capteur de température placé dans la cellule est aussi un capteur d'humidité relative et on remarque que l'humidité relative

augmente suite au changement de consigne à t = 0j. Il est alors possible qu'il y ait un échange entre l'air de la cellule et l'air de l'échantillon. L'air apporté dans la cellule étant très sec - la source d'air sec maintient la pression de confinement, voir Figure 5.4 - la vapeur d'eau de l'échantillon migre vers un volume où la pression de vapeur y est plus faible. Cette hypothèse pourrait être vérifiée par une modélisation avec une géométrie en 2D axi-symétrique, avec une partie représentant l'échantillon et une autre simulant la membrane accolée à l'échantillon. Par manque de données, cela n'a pas été étudié mais, malgré ces désagréments, les résultats restent satisfaisants.

La même validation est réalisée sur l'échantillon de terre STR. Comme en témoigne la Figure 5.15, les mêmes observations peuvent être faites par rapport à l'évolution de l'humidité relative en entrée et sortie de l'échantillon au cours du temps. On constate toujours un écart entre l'humidité relative calculée et celle mesurée en sortie de l'échantillon, mais cette fois plus importante que pour les échantillons de CRA. L'écart est de 6,5%HR.

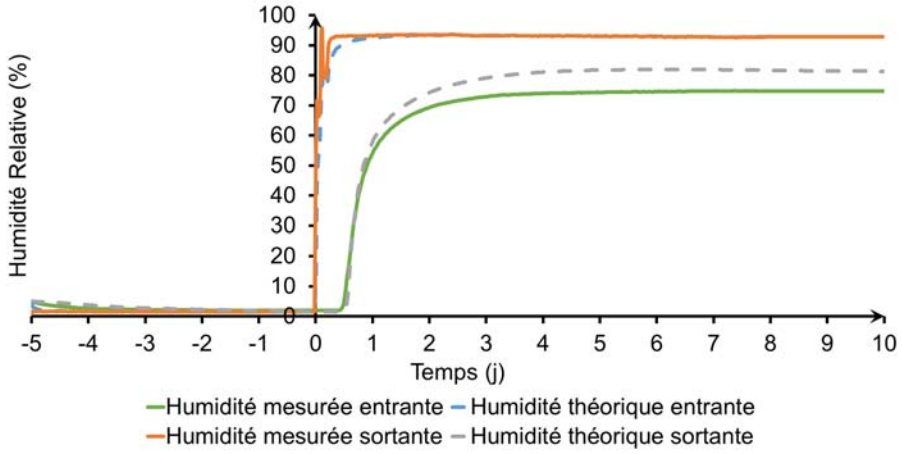


FIGURE 5.15 – Évolution de l'humidité relative en entrée et en sortie de l'échantillon STR au cours du temps, mesurée et calculée numériquement.

Par rapport à la modélisation numérique, des écarts relatifs moyens de 10% pour STR sont constatés. Cette modélisation sur ce matériau semble moins adéquate.

5.4 Gonflement et comparaison

Après avoir vérifié que le modèle était capable de reproduire la répartition de l'humidité relative dans l'échantillon (vérification faite dans ses parties haute et basse), nous allons utiliser cette répartition pour étudier les mesures de déformations volumiques en fonction de l'état hydrique. Pour cela, le modèle permet de calculer l'humidité relative et la teneur en eau moyenne dans le tiers central de l'échantillon. La Figure 5.16 représente les déformations volumiques en fonction de l'humidité relative et de la teneur en eau pour les trois échantillons de CRA et l'échantillon de STR.

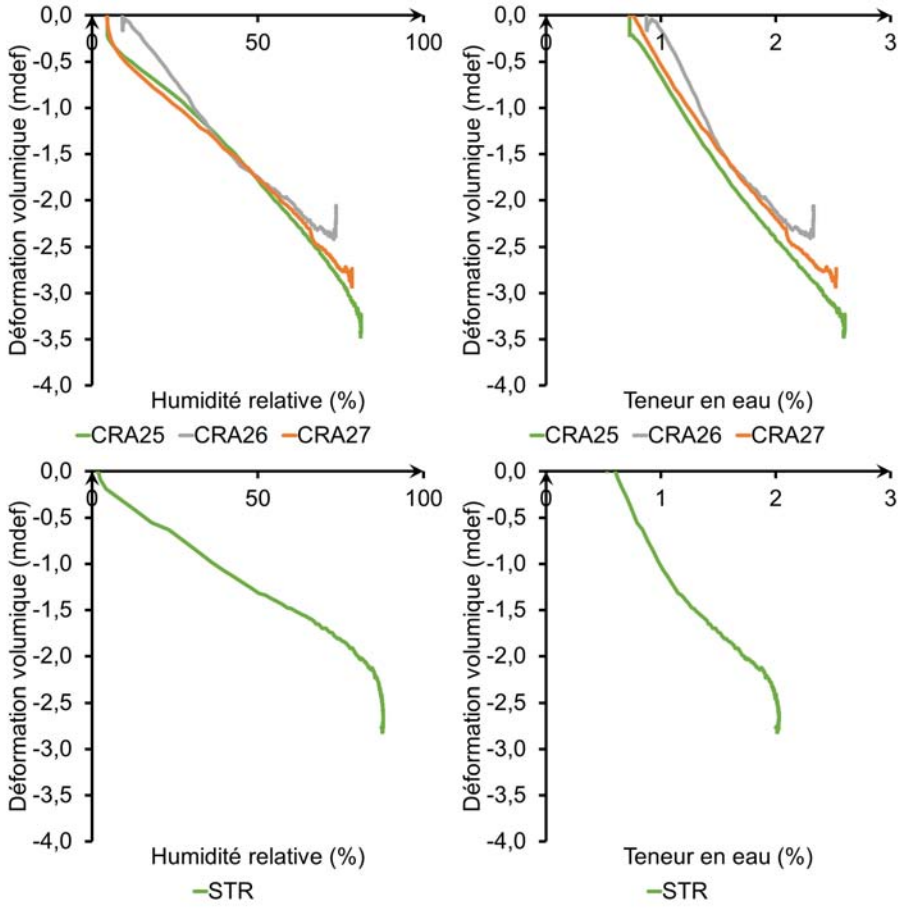


FIGURE 5.16 – Déformation volumique en fonction de l'humidité relative et de la teneur en eau dans le tiers central des échantillons de CRA 25, 26 et 27 ainsi que STR.

On remarque que les déformations entre les trois échantillons semblent être les mêmes, avec un petit décalage pour CRA26. Celui-ci semble dû à l'état hydrique du matériau au début de l'essai, qui n'est pas de 3%HR comme pour CRA25 et CRA27 mais de 10%HR. Les déformations volumiques semblent évoluer linéairement, aussi bien avec l'humidité relative que la teneur eau.

Le gonflement de l'échantillon de STR semble également être une fonction linéaire de l'humidité relative et de la teneur en eau.

Au regard des courbes des Figures 5.16, la terre CRA montre un plus fort gonflement que la terre STR. Dans l'intervalle allant de 10%HR à 70%HR, commun à tous les essais, on a un gonflement des échantillons de CRA de 2µm.mm^{-1} à 2,3µm.mm^{-1} et pour l'échantillon de STR un gonflement de 1µm.mm^{-1} en valeur absolue.

D'autre part, on a pu voir que le gonflement semble suivre une loi linéaire avec l'humidité relative et la teneur en eau. Cette information pourrait nous aider à dé-

velopper un modèle simple pour caractériser le gonflement du matériau.

Conclusion

On a pu voir d'une part que le système était capable de modifier l'état hydrique du matériau et, d'autre part, que le modèle était capable d'obtenir des résultats semblables à l'expérimental sans ajustement spécifique des paramètres. On a pu constater une déformation volumique de l'échantillon après une évolution du niveau d'humidité interne du matériau, et ce de façon répétable pour les échantillons de CRA. En comparant ces résultats avec la terre de STR, on constate une relation directe entre l'humidité relative et la déformation volumique.

Chapitre 6

Essais de compression simple

Contents

1 Description des échantillons 132
1.1 Réalisation des BTC 132
1.2 Réalisation des échantillons cylindriques 133
1.3 Contrôle de l'état hydrique des échantillons 134
2 Mesure de déformations par corrélation d'images 135
2.1 Description du système de mesures 135
2.2 Préparation des échantillons 136
2.3 Validation de la mesure 137
3 Description des essais et résultats 139
3.1 Caractéristiques de chargement 139
3.2 Résultats bruts 139
3.2.1 Tests sans cycle 139
3.2.2 Tests avec cycles de chargement 139
3.2.3 Mesure des paramètres mécaniques 142
4 Comparaison avec les essais triaxiaux 143

Cette étude a été menée dans la continuité de l'objectif général de la thèse, à savoir de caractériser le comportement mécanique de trois matériaux utilisés pour la construction en pisé, et plus particulièrement l'impact de l'eau sur ce comportement. Dans ce chapitre en revanche, des échantillons plus grands ont été considérés afin d'étudier les effets d'échelle sur les observations faites au Chapitre 4.

Les échantillons testés ont été carottés dans des BTC. Le protocole de réalisation de ces échantillons est développé dans la première partie de ce chapitre.

Le dispositif expérimental élaboré précédemment étant adapté aux petits échantillons, il a fallu mettre au point un autre dispositif pour les mesures. Ce dispositif reste plus sommaire que celui conçu au cours de cette thèse pour les échantillons de plus petite taille. Lors de la réalisation des essais, les déformations axiales et radiales ont été mesurées grâce à des capteurs sans contact et un système de corrélation d'images de manière à obtenir avec précision les paramètres élastiques (module d'Young et coefficient de Poisson), la résistance à la compression, les déformations résiduelles et les variations volumiques, et ce pour toutes les configurations testées. La description du dispositif de mesure est détaillée dans la deuxième partie de ce chapitre.

Enfin, les résultats des essais de compression simples sont présentés, et mis en relation avec les tendances observées au Chapitre 4.

1 Description des échantillons

Comme on a pu le lire dans la littérature [39], les essais mécaniques sur des échantillons réalisés au Proctor, conduisent à une variation de la densité sur toute la hauteur de l'échantillon, expliquant ainsi le phénomène de stratification. Cette hétérogénéité rend impossible de considérer l'échantillon testé comme un volume élémentaire représentatif du pisé (taille des hétérogénéités trop grande devant la taille de l'échantillon). Pour cette raison, cette méthode de fabrication d'échantillons n'a pas été utilisée pour notre étude

Une autre solution envisageable a été de fabriquer des échantillons à l'aide d'une presse à BTC, qui permet une compaction quasi-statique et un double compactage. En limitant la hauteur de l'échantillon, on s'assure d'un gradient de densité faible sur toute sa hauteur. Seulement, la forme parallélépipédique du BTC s'est révélée problématique par la présence d'imperfections de surface (notamment de parallélisme des faces), et les effets de bord ajoutent des inconnues au système.

Afin d'avoir une meilleure maitrise de la géométrie des échantillons, il a été choisi de carotter des échantillons cylindriques dans les BTC.

1.1 Réalisation des BTC

Les blocs de terre prélevés sur site ont été concassés et séchés à température et humidité relative ambiantes. La terre a ensuite été tamisée à 10 mm, humidifiée à l'humidité relative voulue et mélangée dans un malaxeur. La phase de tamisage n'a

pas été réalisée pour CRA et STR car la taille de leurs particules n'excédait pas 10 mm. Pour ces deux terres, les tests en laboratoire sont donc plus représentatifs du matériau sur site.

On désirait dans un premier temps réaliser des BTC avec la même densité sèche que les murs où la terre avait été prélevée. Cependant, les valeurs in-situ de la densité des terres étaient trop faibles pour être reproduites avec la presse à BTC. La densité considérée est alors l'optimum BTC, qui correspond à la densité sèche la plus élevée (voir détails de la procédure en Annexe D).

Ces valeurs optimales pour chacune des terres sont regroupées dans le Tableau 6.1. Dans les paragraphes suivants, tous les matériaux testés le sont à leur teneur en eau et densité optimales.

Terres	**ALX**	**CRA**	**STR**
Teneur en eau optimale (%)	9	11	11
Poids de fabrication (kg)	9	8,8	8,8
Densité sèche ($g.m^{-3}$)	1,98	1,97	1,95
Porosité estimée (%)	25,3	25,7	26,4

Tableau 6.1 – Caractéristiques des optimum BTC de terre tamisée à 10mm.

1.2 Réalisation des échantillons cylindriques

De nombreux travaux publiés montrent l'importance de la forme des échantillons et de la nature de leur interface avec la presse [28][15][44][34]. Dans [15], des échantillons cylindriques montrent une résistance à la compression plus faible que les échantillons prismatiques. Cependant, la comparaison de ces résultats reste difficile car l'aire de contact entre l'échantillon et la presse n'est pas la même. Malgré tout, Hall and Djerbib [28] recommandent l'utilisation d'un coefficient pondérateur pour réduire la résistance à la compression des échantillons prismatiques afin qu'elle corresponde à celle mesurée sur les échantillons cylindriques.

Concernant l'interface, il n'existe pas de consensus sur les bénéfices d'ajouter du caoutchouc ou un morceau de bois entre l'échantillon et la presse. En effet, selon [15][44], une telle interface améliorerait la répétabilité des tests, tandis que [27] souligne l'occurrence d'endommagements localisés près de l'interface. Dans tous les cas, l'influence de cette interface supplémentaire devient négligeable lorsque l'élancement de l'échantillon (c'est-à-dire la longueur divisée par le diamètre) est supérieur ou égal à 2. En conséquence, en considérant un élancement supérieur à 2, les tests de compression simple ont été réalisés sans composant d'interface et sur des échantillons cylindriques.

Quatre échantillons cylindriques ont été extraits de chaque BTC suivant le schéma reporté dans la Figure 6.1. Avant le carottage, les BTC ont été séchés à 50°C de sorte que la consistance du matériau soit suffisamment importante pour que l'usinage n'altère pas la surface de l'échantillon. D'autre part, le carottage a été effectué en prenant soin que la couronne effleure la surface du BTC, permettant ainsi l'évacuation

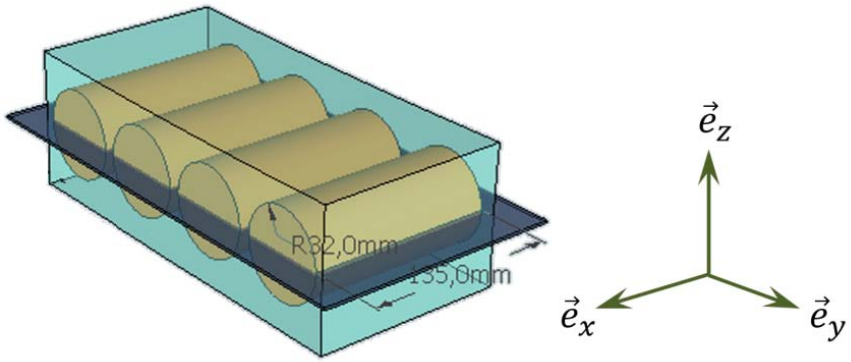


FIGURE 6.1 – BTC et ses échantillons cylindriques.

de la terre pulvérisée, ce qui est primordial pour obtenir une bonne tenue de la surface de l'échantillon une fois carotté. La Figure 6.2 illustre cette mise en œuvre.

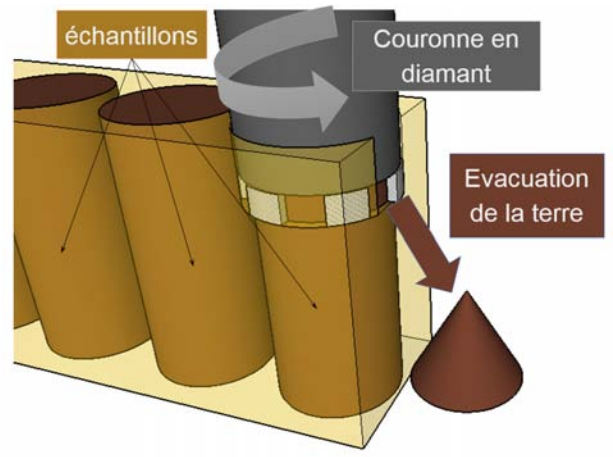


FIGURE 6.2 – Principe de réalisation des échantillons cylindriques sur BTC.

Les échantillons ainsi obtenus ont un diamètre de 64,4 mm et une longueur de 140 mm, ce qui correspond à un élancement de 2,17. Leurs surfaces inférieure et supérieure sont planes et perpendiculaires à l'axe de l'échantillon. Finalement, 35 échantillons ont été réalisés : 13 avec la terre STR, 11 avec la terre ALX et 11 avec la terre CRA.

1.3 Contrôle de l'état hydrique des échantillons

Les essais de compression simple n'ont pas été réalisés dans un environnement contrôlé en humidité relative et ont duré en moyenne 30 minutes. Par conséquent, il a été nécessaire de vérifier l'évolution de la teneur en eau des échantillons. Cependant, les échantillons ayant été testés jusqu'à la rupture, il n'était pas possible de contrôler

directement leur perte ou gain d'eau du début à la fin de l'essai. Pour ce faire, la variation en masse d'échantillons de référence a été mesurée, conditionnés à la même humidité relative et soumis aux mêmes conditions que durant un essai (c'est-à-dire avec les capteurs et les lumières). La variation de masse relative la plus importante a été une diminution d'environ 5% de la masse totale présente dans l'échantillon, obtenue pour la terre STR conditionnée à 95%HR. D'après les isothermes de sorption, cela mène à une incertitude d'environ 2% en termes d'humidité relative, ce qui reste acceptable.

2 Mesure de déformations par corrélation d'images

2.1 Description du système de mesures

Les essais de compression simple ont été réalisés avec une presse électromagnétique (Z020TN, Zwick Roell, Ulm, Germany). La précision de ses capteurs est d'environ 20N en contrainte et 0,018 µm en déplacement.

Les mesures de déformation axiales ont été réalisées par méthode de corrélation d'images à l'aide de deux paires de caméras (système 1 et système 2 sur la Figure 6.4) permettant l'acquisition de deux images par seconde. Comme représenté dans la Figure 6.4, l'angle entre chaque paire de caméra était égal à 120°, tandis que l'angle entre les deux caméras d'une même paire était de 32°. La distance entre les caméras et l'échantillon est de 35 mm. Ce dispositif permet une précision théorique de 0,8 µm dans l'axe des déplacements. Les caractéristiques du système optique sont fournies dans le Tableau 6.2.

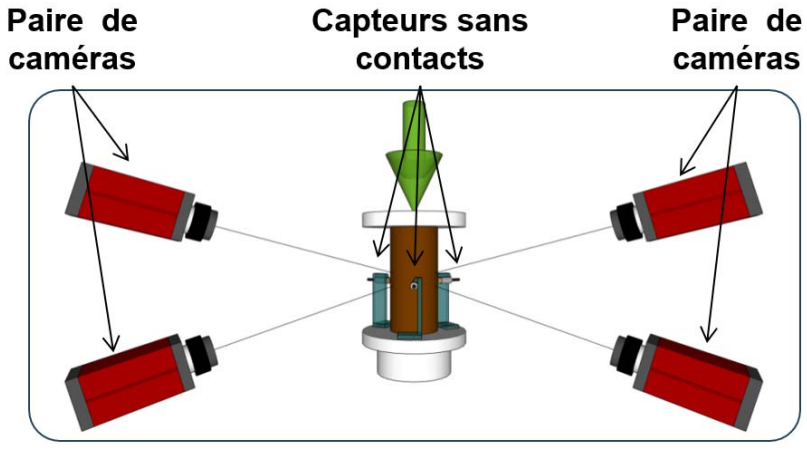


FIGURE 6.3 – Schéma de l'agencement géométrique des caméras.

Il a été nécessaire d'utiliser une lentille avec une faible ouverture de diaphragme (16) afin d'améliorer la profondeur de champ, étant donné que la surface à observer était cylindrique. Cette petite ouverture requière alors des projecteurs puissants et un temps d'exposition d'environ 80 ms.

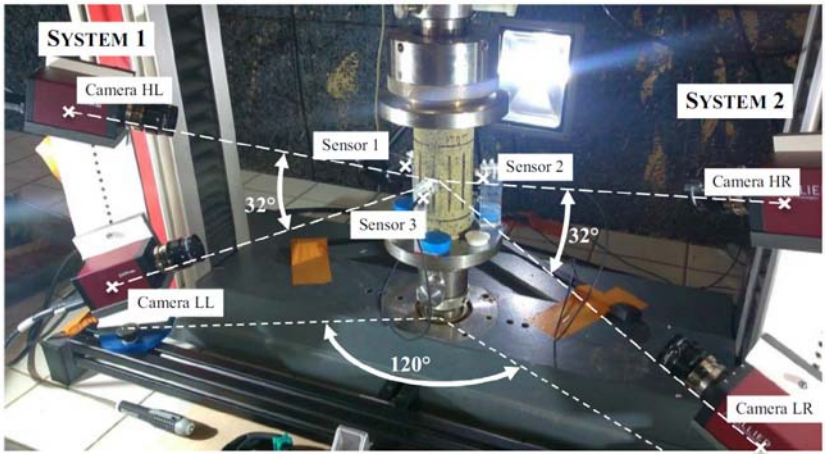


FIGURE 6.4 – Photo de l'agencement géométrique des caméras.

CAMÉRA		LENTILLE	
Marque	Allied division technologies	**Marque**	Schneider
Modèle	Pike F42-1B/C	**Modèle**	2.0/28-0901
Résolution	4,2 MPixel	**Distance focale**	28 mm
Largeur de pixel	7,4 µm	**Ouverture du diaphragme**	16

TABLEAU 6.2 – Caractéristiques du système optique.

2.2 Préparation des échantillons

La surface des échantillons a été mouchetée avec une bombe de peinture noire. La corrélation d'images est réalisée à l'aide du logiciel commercial Vic-3D *Correlated Solutions*. Le logiciel utilise une grille composée de carrés identiques qui contiennent de 10 à 20 tâches (voir Figure 6.6) et suit le déplacement de leur centre et la déformation autour, d'une image à l'autre. Les tâches doivent être aussi petites que possible mais, en même temps, assez grandes pour être détectées par la caméra (c'est-à-dire d'une taille supérieure à 25 µm, ce qui correspond à 3 pixels). En effet, plus les tâches sont petites, plus les mesures de déformation et de déplacement sont précises [47].

La taille des carrés de la grille peut être programmée manuellement ou définie par le logiciel. Trois tailles (26 px^2, 54px^2 (déterminé par le logiciel) et 108 px^2) ont été étudiées et ont donné des valeurs de déformation similaires.

Par conséquent, il peut être intéressant d'étudier l'impact de cette taille sur la mesure des déformations. Trois tailles ont alors été choisies : 26 px^2, 54px^2 (déterminé par le logiciel) et 108 px^2. L'aspect global des déformations axiales est similaire d'un cas sur l'autre (certains champs de déformation étant tout de même plus précis que d'autres).



FIGURE 6.5 – Outils nécessaires au mouchetis et à la calibration pour la corrélation d'images.

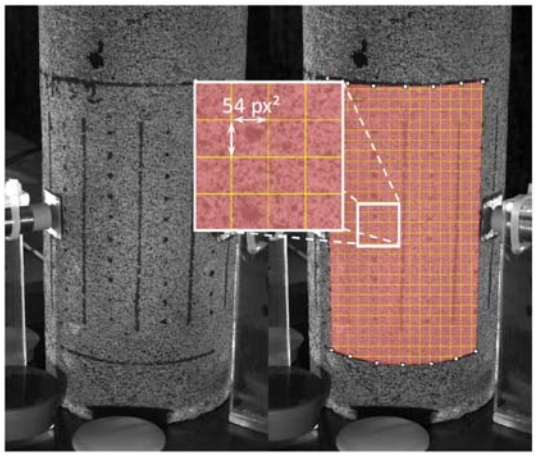


FIGURE 6.6 – Mouchetis à la surface de l'échantillon à gauche, maillage défini par Vic-3D à droite.

2.3 Validation de la mesure

Un exemple de champ de déplacements selon l'axe vertical (z) calculé avec le système de corrélation d'images est représenté dans la Figure 6.7, où les deux paires de caméras sont représentées. Le champ de déplacements est représenté sur les deux tiers de la surface de l'échantillon pendant toute la durée de l'essai. Deux points, formant un extensomètre numérique, ont été placés pour mesurer la déformation de l'échantillon. La déformation axiale moyenne est calculée à partir de la moyenne des quatre extensiomètres numériques représentés dans la Figure 6.7.

Une bonne corrélation est constatée entre les champs de déplacements mesurés par les deux paires de caméras (système 1 et système 2). En effet, le prolongement des lignes d'iso-déplacement données par le système 1 recoupent celles données par le système 2.

Afin de valider la capacité du dispositif de corrélation d'images à mesurer avec précision les déformations axiales d'échantillons en terre, la relation contraintes /

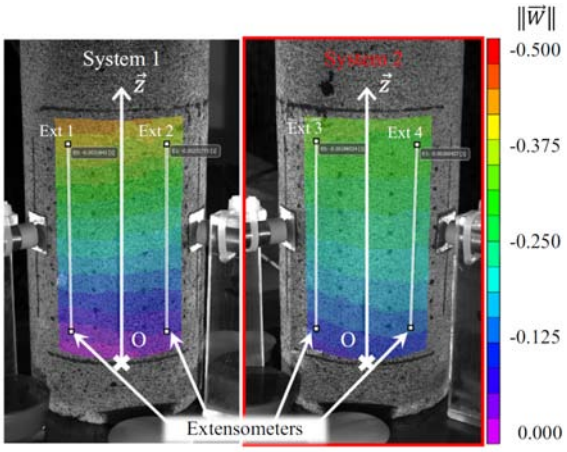


FIGURE 6.7 – Image prise par chaque caméra et la corrélation d'images pour chaque système donnant le champ de déplacement vertical à 1MPa sur un échantillon de STR équilibré à 75%HR.

déformations obtenue avec le système de corrélation d'images pendant un essai de compression simple a été comparée avec celle déterminée par trois extensomètres positionnés dans le tiers central de l'échantillon pendant le même essai (les valeurs des extensomètres étant considérées comme celles de référence). Le résultat de cette comparaison est représenté dans la Figure 6.8, et confirme que les déformations mesurées par le système de corrélation d'images sont presque les mêmes que celles mesurées avec les extensomètres.

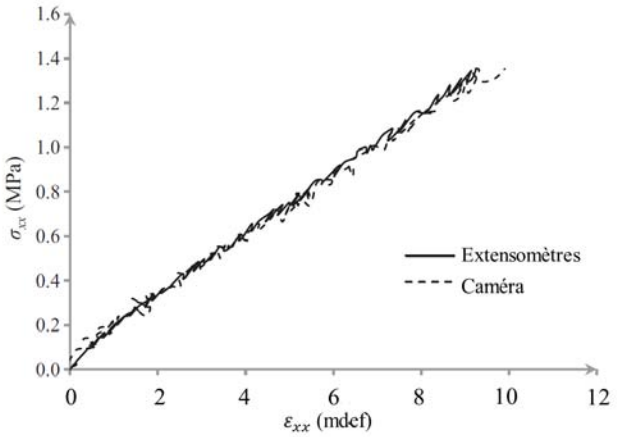


FIGURE 6.8 – Comparaison entre les déformations axiales mesurées par les extensomètres et ceux déduites de la corrélation d'images.

Cependant, la précision des déplacements radiaux n'était pas suffisante pour déterminer précisément les déformations radiales par différentiation. Ces dernières ont

été mesurées avec trois capteurs sans contact (9U Kamma, Colorado Springs, USA), ayant une résolution de 0,4 µm et une gamme allant de 0 à 4 mm. Comme illustré dans la Figure 6.4, les capteurs ont été placés à 120° les uns des autres autour de l'échantillon. Les cibles des capteurs sont de petits disques en aluminium, collés sur les échantillons avec de la graisse de silicone.

3 Description des essais et résultats

3.1 Caractéristiques de chargement

Les deux types de chargement décrits précédemment (avec et sans cycle) ont été réalisés pour les trois terres étudiées et pour différentes humidités relatives (25%HR, 75%HR et 95%HR).

Les chargements ont été appliqués en imposant un taux de déplacement axial constant égal à 0,002 $mm.s^{-1}$ en chargement et déchargement. Le taux de chargement a été choisi de manière à prendre au moins 200 images pendant le premier cycle de chargement/déchargement. Avant chaque essai, un pré-chargement jusqu'à 0,05 MPa a été appliqué pour la mise en place de l'échantillon. Il a été choisi de façon à être bien inférieur à la résistance à la compression des matériaux testés (aux alentours de 1 MPa).

3.2 Résultats bruts

Etant donné la similitude des observations faites sur ces essais, en comparaison avec la description détaillée des essais triaxiaux, uniquement les résultats bruts sont présentés ici. L'analyse complète de ces essais, indépendamment des essais triaxiaux, peut être trouvée dans l'article intitulé "Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material" et publié par *Construction and Building Materials* [12].

3.2.1 Tests sans cycle

Les résultats des essais de compression simple sans cycle pour les échantillons de terre STR sont reportés dans la Figure 6.9. L'évolution de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale est donnée dans la Figure 6.9A et l'évolution de la déformation volumique en fonction de la déformation axiale dans la Figure 6.9B. De la même manière, les résultats pour les échantillons de terres CRA et ALX sont reportés dans les Figures 6.10 et 6.11.

3.2.2 Tests avec cycles de chargement

Comme mentionné précédemment, l'objectif des cycles de chargement/déchargement est de déterminer les paramètres élastiques (module d'Young et coefficient de Poisson) ainsi que leur dépendance avec l'humidité relative et la contrainte axiale maximale subie par l'échantillon. Par conséquent, il est tout d'abord nécessaire de vérifier que

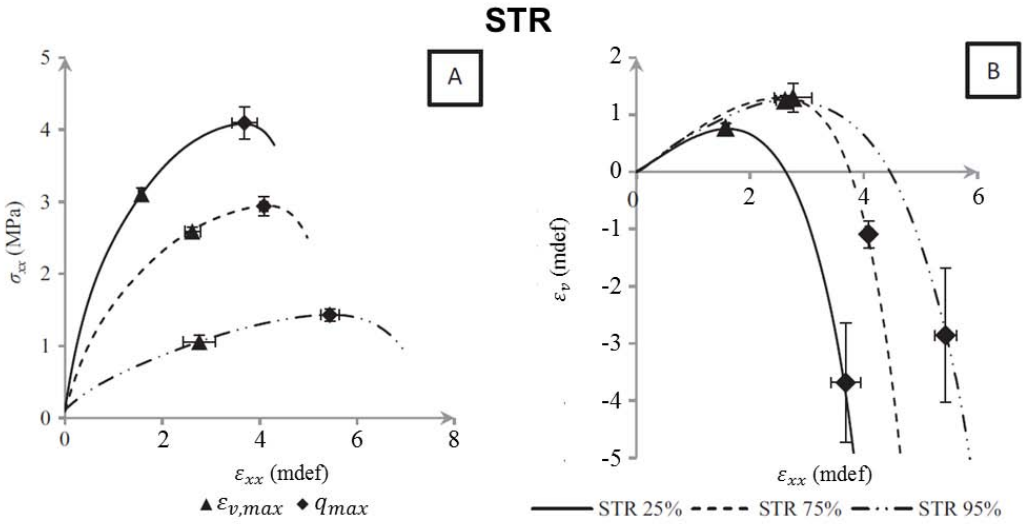


FIGURE 6.9 – Évolution de la contrainte axiale (A) et la déformation volumique (B) pour STR et les écarts-types respectifs calculés sur 3 échantillons. "q_{max}" correspond au point où la contrainte maximum est atteinte, et "$\varepsilon_{v,max}$" correspond au point où la déformation volumique maximum est atteinte.

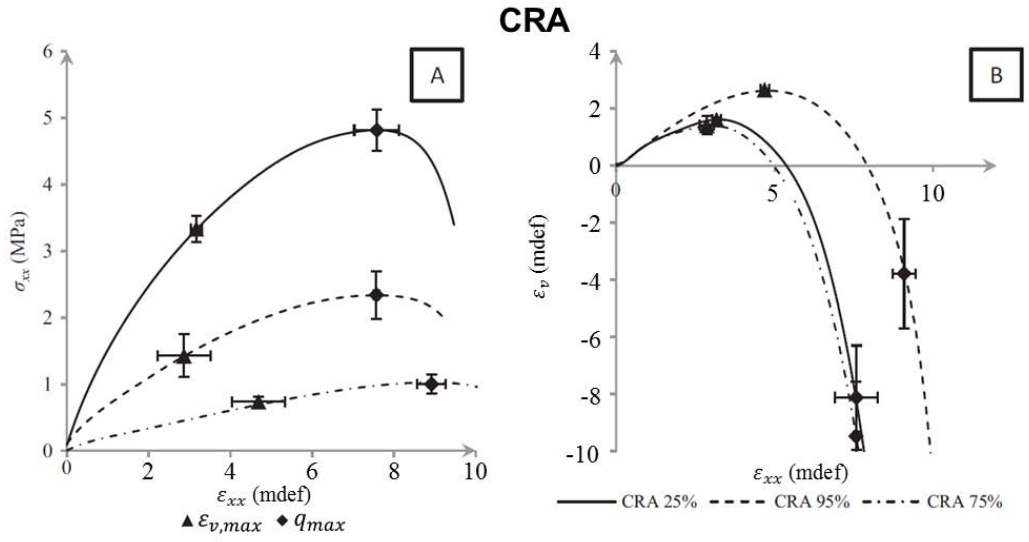


FIGURE 6.10 – Évolution de la contrainte axiale (A) et la déformation volumique (B) pour CRA et les écarts-types respectifs calculés sur 3 échantillons. "q_{max}" correspond au point où la contrainte maximum est atteinte, et "$\varepsilon_{v,max}$" correspond au point où la déformation volumique maximum est atteinte.

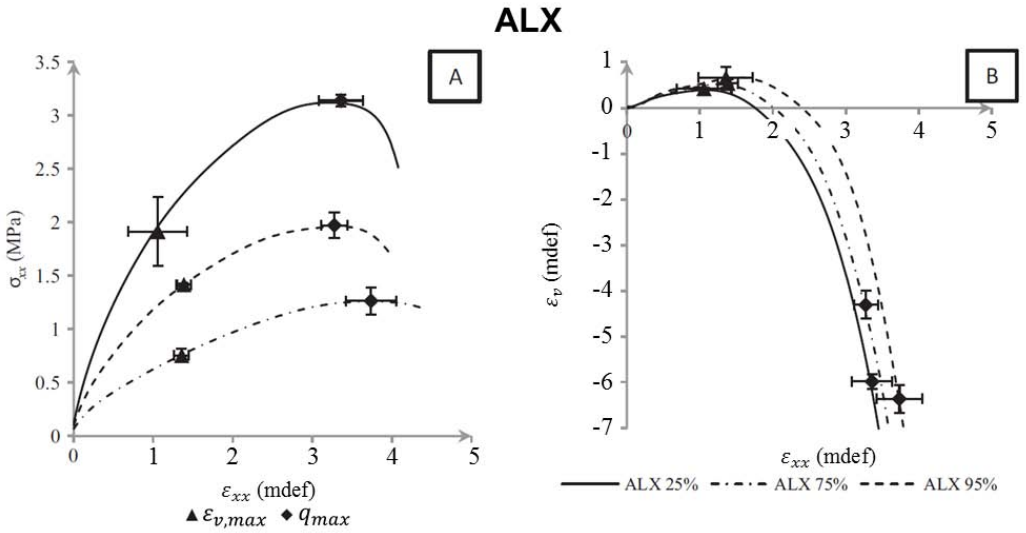


FIGURE 6.11 – Évolution de la contrainte axiale (A) et la déformation volumique (B) pour ALX et les écarts-types respectifs calculés sur 3 échantillons. "q_{max}" correspond au point où la contrainte maximum est atteinte, et "$\varepsilon_{v,max}$" correspond au point où la déformation volumique maximum est atteinte.

le comportement du matériau est linéaire élastique pendant les cycles. Les résultats pour les échantillons de terre STR conditionnés à 25%HR sont représentés dans la Figure 6.12. La même tendance est observée pour tous les autres échantillons.

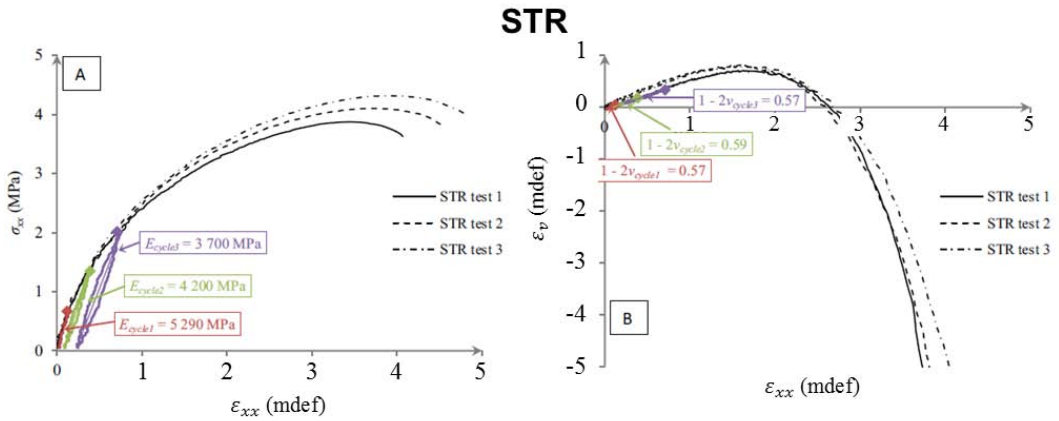


FIGURE 6.12 – Évolution de la contrainte axiale (A) et la déformation volumique (B) en fonction de la déformation axiale pendant les cycles de chargement/déchargement pour STR à 25%HR.

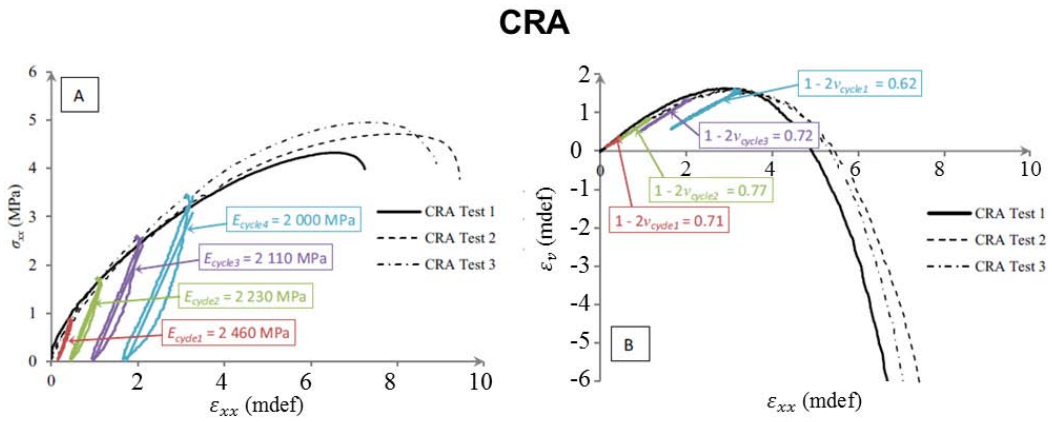


FIGURE 6.13 – Évolution de la contrainte axiale (A) et la déformation volumique (B) en fonction de la déformation axiale pendant les cycles de chargement/déchargement pour CRA à 25%HR.

3.2.3 Mesure des paramètres mécaniques

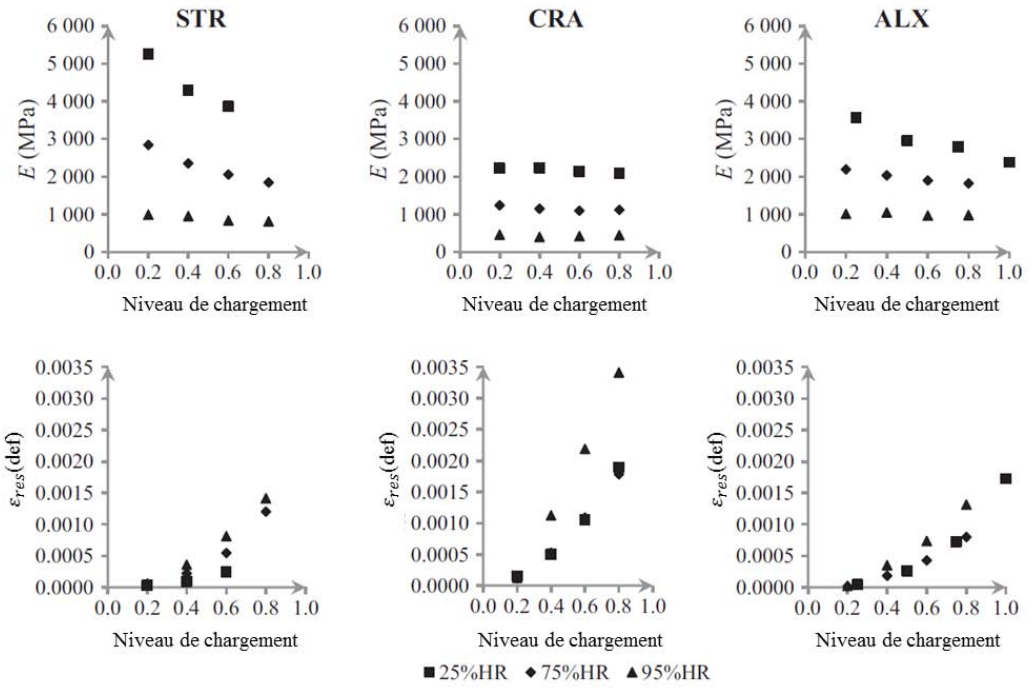


FIGURE 6.14 – Modules d'Young (en haut) et déformations résiduelles (en bas) en fonction du niveau de chargement. "ε_{res}" correspond à la déformation résiduelle à la fin du déchargement.

L'évolution du module d'Young sécant pendant un cycle de chargement/déchargement en fonction de la contrainte axiale maximale atteinte précédemment est reportée dans les graphiques supérieurs de la Figure 6.14.

Les évolutions des déformations résiduelles avec le niveau de chargement sont reportées dans les graphiques inférieurs de la Figure 6.14.

La Figure 6.15 illustre les relations linéaires existantes entre la résistance à la compression et le module d'Young pour les différentes terres.

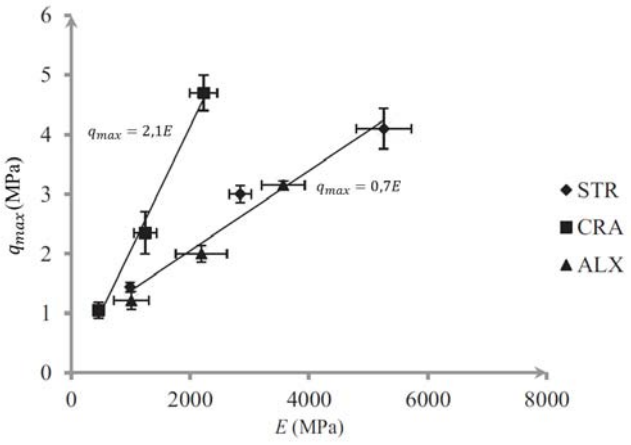


FIGURE 6.15 – Résistance à la compression en fonction du module d'Young évalué pendant le premier cycle.

Les variations de la résistance mécanique et de la déformabilité en fonction de l'humidité relative (et de la teneur en eau), obtenues pour chaque terre, sont regroupées sur la Figure 6.16A pour la résistance à la compression et 6.16B pour le module d'Young.

4 Comparaison avec les essais triaxiaux

Un certain nombre de tendances de comportement et d'hypothèses a été relevé dans ce chapitre qu'il convient de mettre en perspective avec les résultats des essais triaxiaux du Chapitre 4, notamment ceux réalisés à la pression de confinement de 1bar.

Tout comme les essais de compression simple, les essais triaxiaux montrent une forte dépendance du matériau avec l'humidité relative. La contrainte à la rupture et le module d'Young diminuent avec l'augmentation de l'humidité relative. De même, le matériau est dans un premier temps contractant puis dilatant ; la rupture se produit toujours lorsque que le matériau est dilatant.

De manière générale, les essais de compression simple et les essais triaxiaux montrent des tendances similaires, mais lorsque l'on regarde de plus près, des di-

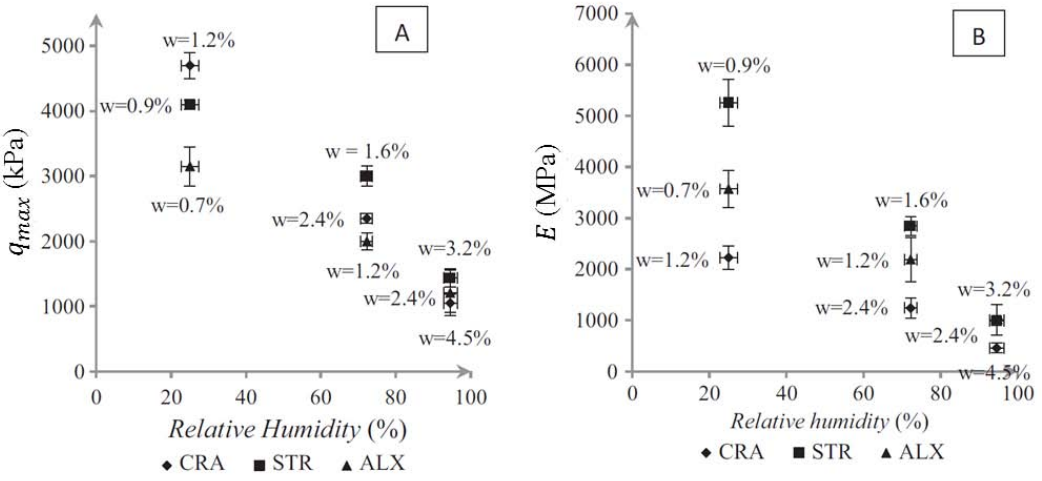


FIGURE 6.16 – Variations de la résistance à la compression (A) et du module d'Young (B) évalués pendant le premier cycle (20% de q_{max} en fonction de l'humidité relative.

vergences existent. Les résultats en termes de déformations résiduelles et de modules d'Young lors du troisième cycle pour les trois terres et les trois humidités relatives, et ce pour les deux types d'essais, sont regroupés dans le Tableau 6.3.

	triaxial		**compression simple**	
	ε_{res}	E	ε_{res}	E
ALX-97%	1,7	2000	0,7	970
CRA-97%	2,1	1120	2,1	420
STR-97%	1,4	1440	0,8	840
ALX-75%	0,6	3280	0,4	1900
CRA-75%	1,4	1750	1,1	1100
STR-75%	1,1	2570	0,5	2060
ALX-23%	0,8	4340	0,4	2790
CRA-23%	1,0	3080	1,1	2140
STR-23%	0,7	3780	0,2	3860

TABLEAU 6.3 – Récapitulatif des résultats obtenus avec les essais triaxiaux (1bar) et les essais de compression simple, déformation résiduelle (mdef) et module d'Young (MPa).

A l'issue des essais de compression simple, on peut distinguer deux types de comportements se caractérisant par des déformations résiduelles plus importantes et des modules d'Young plus faibles pour CRA, en comparaison avec les deux autres terres. Les essais triaxiaux montraient également cette tendance, mais de manière moins marquée en raison de déformations résiduelles plus importantes pour les terres

STR et ALX. En outre, alors que le module d'Young de CRA variait avec le niveau de chargement lors des essais triaxiaux, ce n'est plus le cas pour les essais de compression simple (voir Figure 6.14). En fait, seuls les modules d'Young des échantillons de STR sont du même ordre de grandeur pour les deux essais ; ceux des échantillons de CRA et ALX sont nettement inférieurs pour les essais de compression simple que pour les essais triaxiaux.

	23%		**75%**		**97%**	
	th.	mes.	th.	mes.	th.	mes.
ALX	4,2	3,1	3,1	2,0	2,6	1,3
CRA	6,1	4,7	3,9	2,3	2,7	1,0
STR	6,4	4,1	4,4	2,0	2,9	1,4

Tableau 6.4 – Récapitulatif des résistances à la compression (MPa) déduites des essais triaxiaux (1bar) et celles obtenues avec les essais de compression simple.

Le Tableau 6.4 récapitule les résistances à la compression obtenues lors des essais de compression simple (*mes.*), comparées aux résistances à la compression calculées grâce à l'angle de frottement et à la cohésion mesurés lors des essais triaxiaux (*th.*). On constate une nette différence entre ces résistances à la compression pour toutes les terres et toutes les humidités relatives.

Des explications de toutes ces divergences pourraient être :

— les essais de compression simple ont été effectués sur un axe perpendiculaire à l'axe de compactage des échantillons alors que les essais triaxiaux ont été effectués dans l'axe de compactage.

— la "détérioration" des échantillons suite au carottage dans les BTC n'a pas pu être évaluée, et peut avoir une influence importante.

— les différences de taille des échantillons (d'un facteur 8 en terme de volume) peuvent avoir une influence qui n'a, elle non plus, pas pu être quantifiée

— dans une moindre mesure, les différences de tamisage (10mm contre 2mm) peuvent conduire à un comportement différent. A noter que cela pourrait être vrai pour ALX du fait de sa granulométrie de départ, mais moins pour CRA et STR.

A noter que des essais de compression simple ont été réalisés sur les échantillons confectionnés avec le moule, par Longfei XU dans le cadre de sa thèse, et les résultats sont cohérents avec les résultats des essais triaxiaux. Les différences constatées ici sont donc bien dues à une différence dans les échantillons testés.

Conclusion générale

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à la partie liante du matériau terre utilisé pour la construction, et à l'évolution de ses propriétés mécaniques avec les variations d'humidité relative de l'environnement.

Pour réaliser cette étude, un banc d'essai a été conçu. Le temps d'équilibrage à une humidité relative donnée a été un paramètre important pour son dimensionnement et ce critère a fixé les dimensions des échantillons, ce qui a conduit à la conception/réalisation d'un moule spécifique permettant la fabrication d'échantillons cylindriques de 7cm de haut pour un diamètre de 3,5cm. Afin de pouvoir faire traverser un flux d'air humide à l'intérieur d'un échantillon, il était nécessaire de le confiner dans une membrane de cellulose, ce qui a requis l'utilisation d'une cellule triaxiale. Pour garantir les mesures précises des déformations axiales et radiales, cette cellule a été équipée de capteurs sans contact, maintenus par un porte-capteur conçu et réalisé sur mesure. Enfin, afin de travailler à température constante, la cellule triaxiale et la presse ont été placées dans une étuve régulée à 30°C.

Ce dispositif nous a permis de réaliser des essais triaxiaux à plusieurs pressions de confinement sur des échantillons équilibrés à plusieurs humidités relatives. Ces essais ont mis en évidence :

- le fort impact de l'humidité relative sur le comportement mécanique du matériau, aussi bien au niveau des modules élastiques, de la résistance, que des déformations plastiques.
- le fort impact de la pression de confinement sur la résistance du matériau et son faible impact sur les modules élastiques.
- l'apparition de déformations plastiques même pour un faible chargement (dès 20% de q_{max}), et en particulier pour les fortes humidités.
- un comportement quasi-élastique linéaire lors de cycles de charge / décharge, même à fort chargement.
- le faible impact de la température entre 23°C et 30°C.
- la quantification des variations volumiques (gonflement) induites par des variations d'humidité relative au sein du matériau.

Plus généralement, les résultats obtenus dans cette thèse ont permis de mettre en évidence l'importance de spécifier clairement les conditions en humidité de l'essai afin de pouvoir interpréter les valeurs de résistance et de modules élastiques obtenus.

Il est d'autre part nécessaire d'obtenir l'isotherme de sorption/désorption de manière très précise, ce qui implique une définition claire de l'état sec du matériau. En outre, si l'utilisation d'une approche élastique linéaire est possible pour l'étude de cycles de chargement/déchargement, l'estimation des déformations du matériau lors de sa mise en œuvre (premier chargement) devra prendre en compte les phénomènes inélastiques (plasticité, endommagement). Enfin, des variations dimensionnelles sont à prévoir en raison des variations d'humidité relative au sein de matériau ; l'amplitude de ces variations semblant dépendre du type de terre étudiée.

D'autre part, l'utilisation du dispositif a permis d'identifier plusieurs pistes d'amélioration.

Bien que les essais montrent une bonne répétabilité, une amélioration du porte-cible est envisageable pour limiter d'éventuels problèmes de glissement. On a pu voir au travers de certains essais que le porte-cible du bas avait obtenu des déplacements plus faibles que ceux attendus. Ceci pourrait s'expliquer, d'une part, par le comportement même du matériau face à cette sollicitation, mais d'autre part, également, par un glissement du porte-cible. Ce défaut pourrait être amélioré en affûtant les mords de sortes qu'ils pénètrent dans la membrane sans la couper.

Il serait aussi intéressant de bien identifier la nature du problème sur les déplacements des cibles radiales. Avant de placer des cibles plus épaisses, il pourrait être judicieux de placer, entre la cible et l'échantillon, un carré en feuille plastique. Ce carré serait suffisamment rigide pour ne pas pénétrer dans le matériau, suffisamment malléable pour prendre la forme de l'échantillon, et peu adhérent pour ne pas empêcher la déformation de la circonférence du matériau.

On a remarqué un décalage entre l'humidité relative mesurée et celle modélisée en sortie de l'échantillon. Avant de remettre en question le modèle, un essai simple pour valider la diffusion de la vapeur d'eau au travers de l'échantillon, serait de placer du papier aluminium entre l'échantillon et la membrane. L'aluminium étant un matériau imperméable, il empêcherait la diffusion de la vapeur d'eau au travers de la membrane. Avec cela, il faudrait prévoir un remplacement de tous les raccords rapides par des raccords à olive pour supprimer tout risque de fuite.

Enfin, certains essais n'ont pas pu être exploités : les portes-cibles ont mal été désengagés de leurs cales, ce qui a faussé les mesures. Une opération de ré-usinage des cales et des montants du porte-capteur, Figure 6.17, pourrait améliorer significativement la mise en place du matériel tout en s'assurant d'une bonne mesure des déformations.

Concernant les mesures réalisées sur les différentes terres, et de manière à pouvoir établir un lien plus direct entre les compositions et les comportements mécaniques, une perspective serait de reconstituer des matériaux à partir de quantités contrôlées d'argiles de différents types et en proportions variables.

Pour conclure sur les essais de gonflement et la modélisation des flux d'air humide,

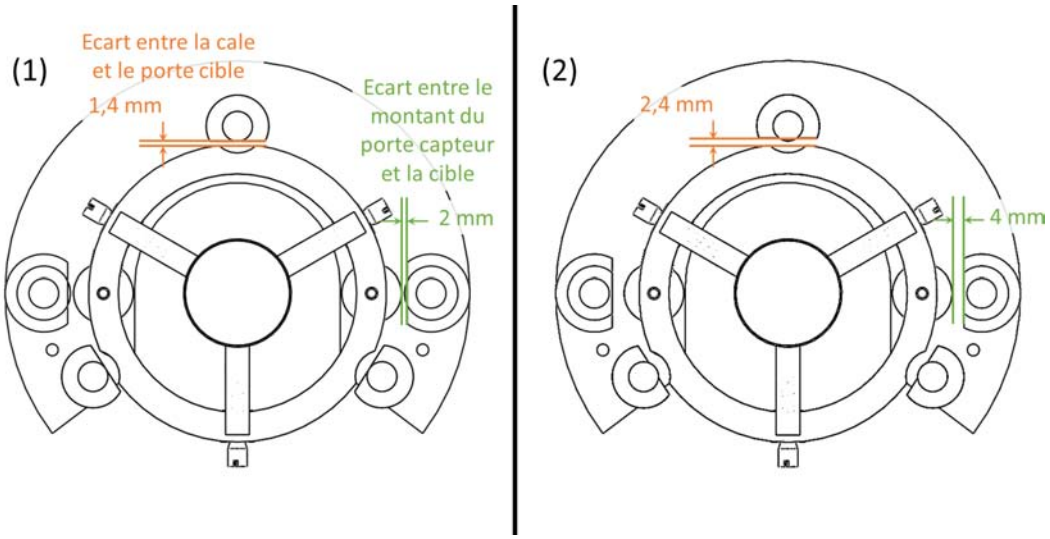


FIGURE 6.17 – (1) état actuel du porte-capteur avec 1,4 mm entre les cales et le porte cible et de 2 mm entre les cibles et les montants (2) situation après alésage de 1 mm sur les cales et de 2 mm sur les montants.

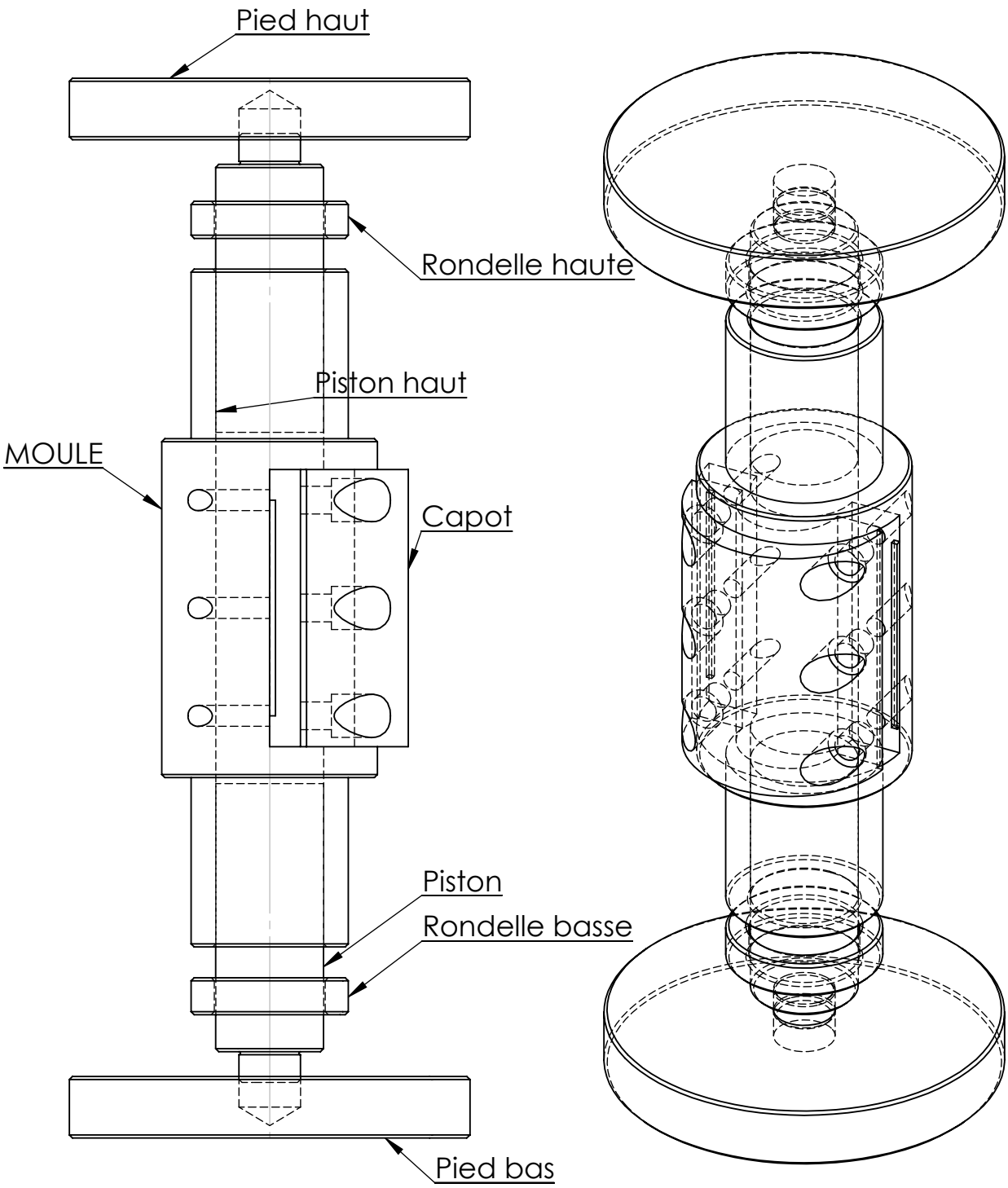
on peut voir que la modélisation reproduit assez bien les mesures expérimentales, mais qu'il subsiste toujours un écart variable selon le type de terre. Comme il a été proposé auparavant, l'essai avec la feuille d'aluminium permettrait de nous indiquer l'origine de l'écart constaté.

Annexes

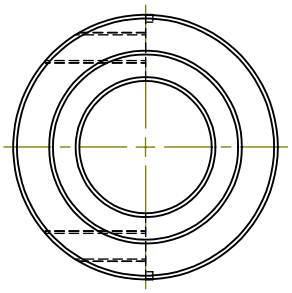
Annexe A

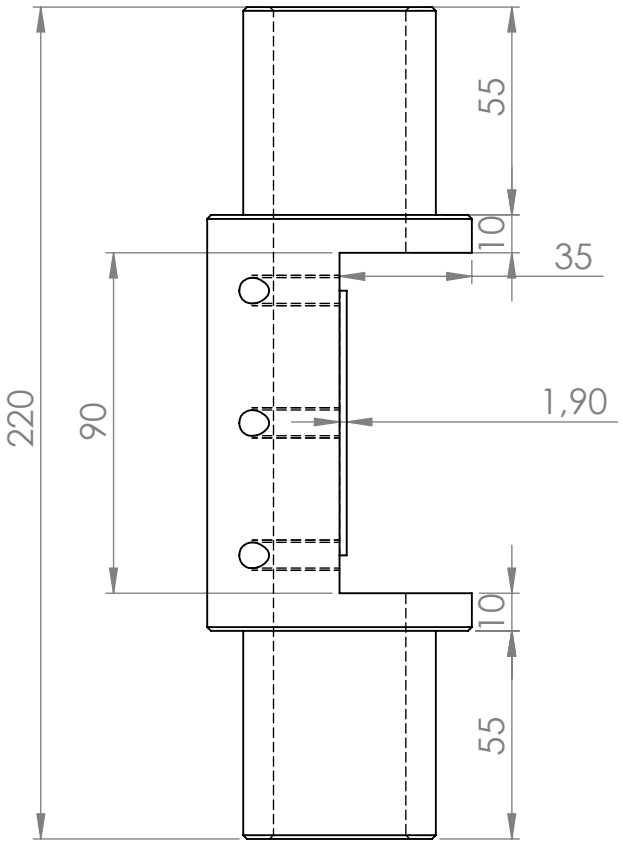
Plans détaillés des pièces usinées

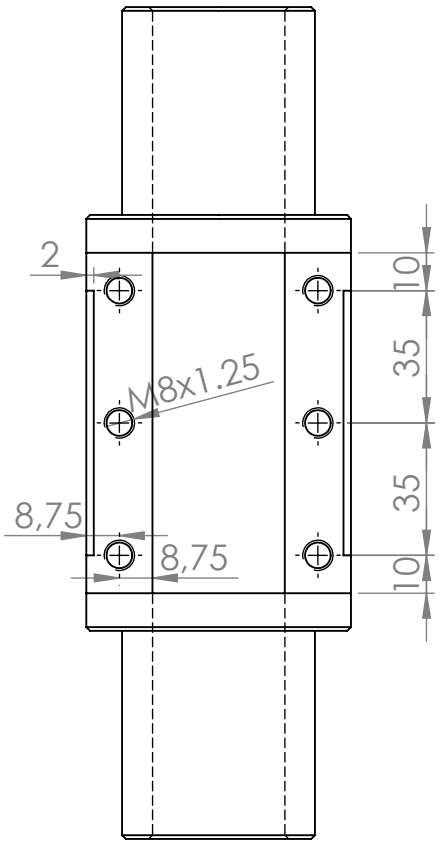
L'annexe présentée ici repend les plans du moule, ainsi que des porte-capteurs et porte-cibles tels qu'ils ont été transmis à l'entreprise chargée de l'usinage.

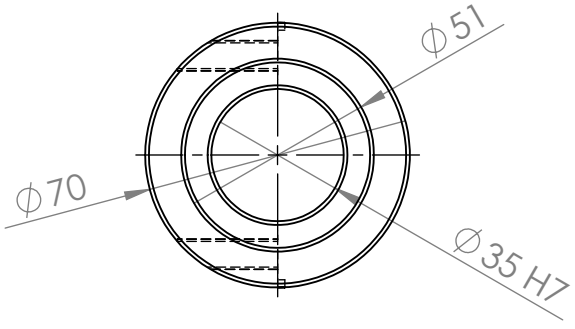


SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION: Chromage sur la surface des pistons et l'intérieur du moule	CASSER LES ANGLES VIFS Sauf les angles des pistons	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION		
	NOM	SIGNATURE	DATE			TITRE:
AUTEUR	Champiré		13/11/13			
VERIF.						
APPR.						
FAB.						
QUAL.				MATERIAU: Le type d'acier n'a pas encore été sélectionné		No. DE PLAN Prototype éclaté A4
				MASSE:		ECHELLE:1:2 FEUILLE 1 SUR 1

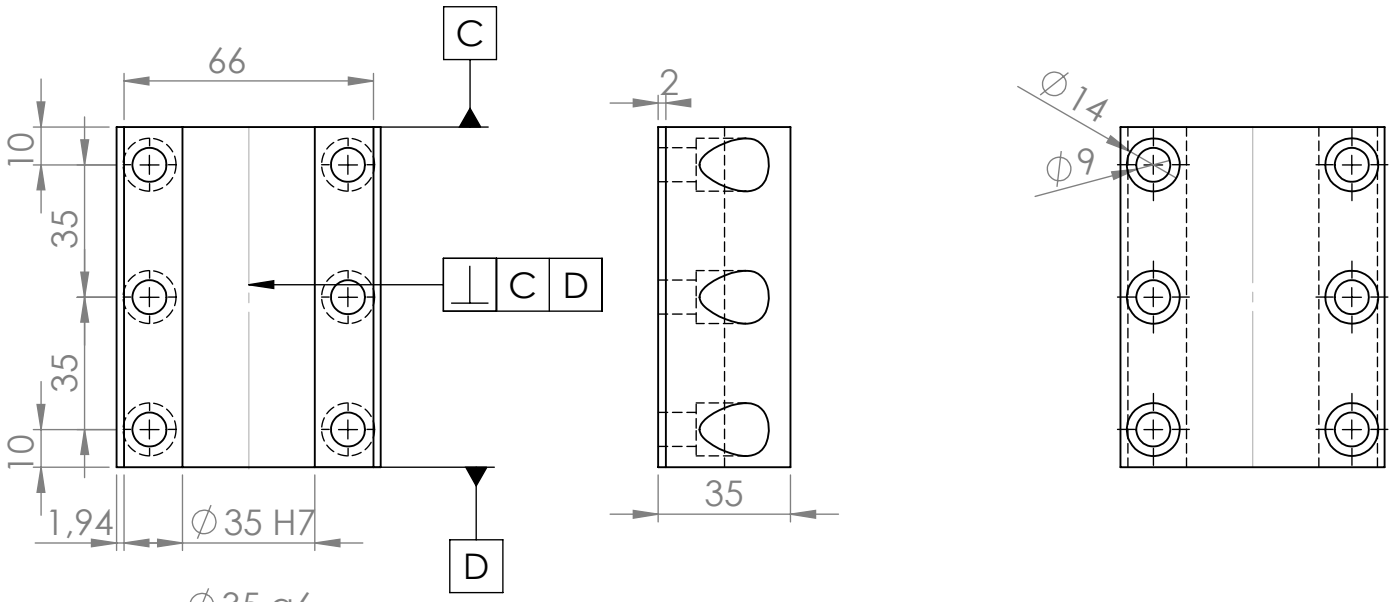


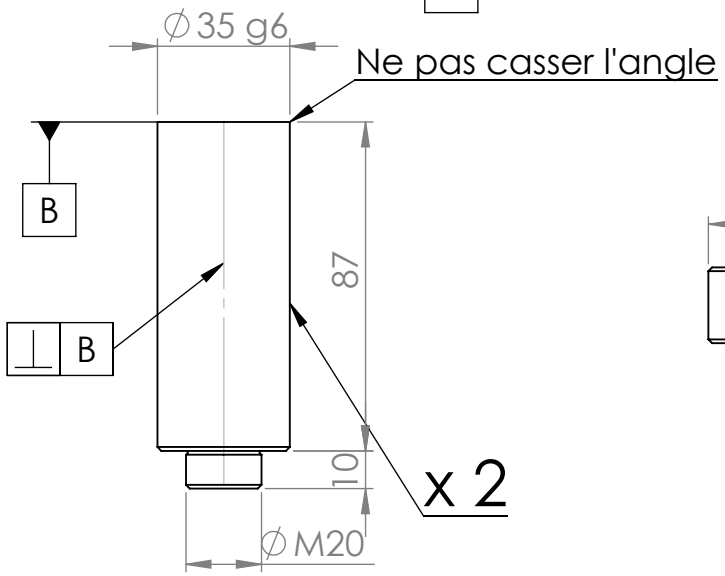


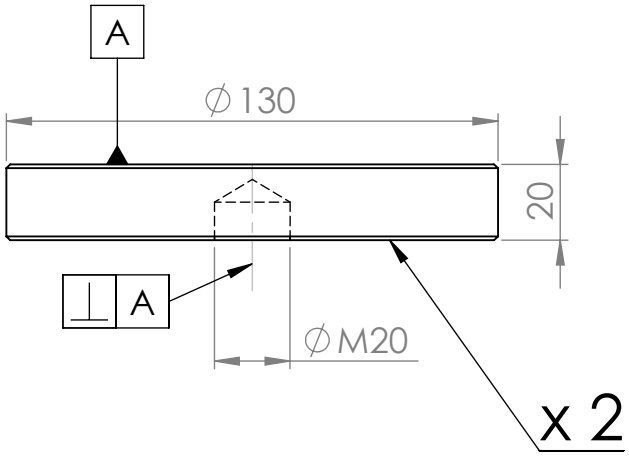


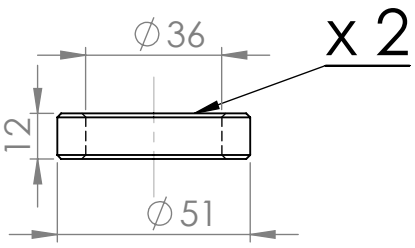


SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION: Chromage de l'intérieur du Moule		CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION	
	NOM	SIGNATURE	DATE	TITRE:		
AUTEUR	Champiré		13/11/13			
VERIF.						
APPR.						
FAB.						
QUAL.				MATERIAU: Le type d'acier n'a encore été sélectionné	No. DE PLAN Prototype - Moule	A4
				MASSE:	ECHELLE:1:2	FEUILLE 1 SUR 1

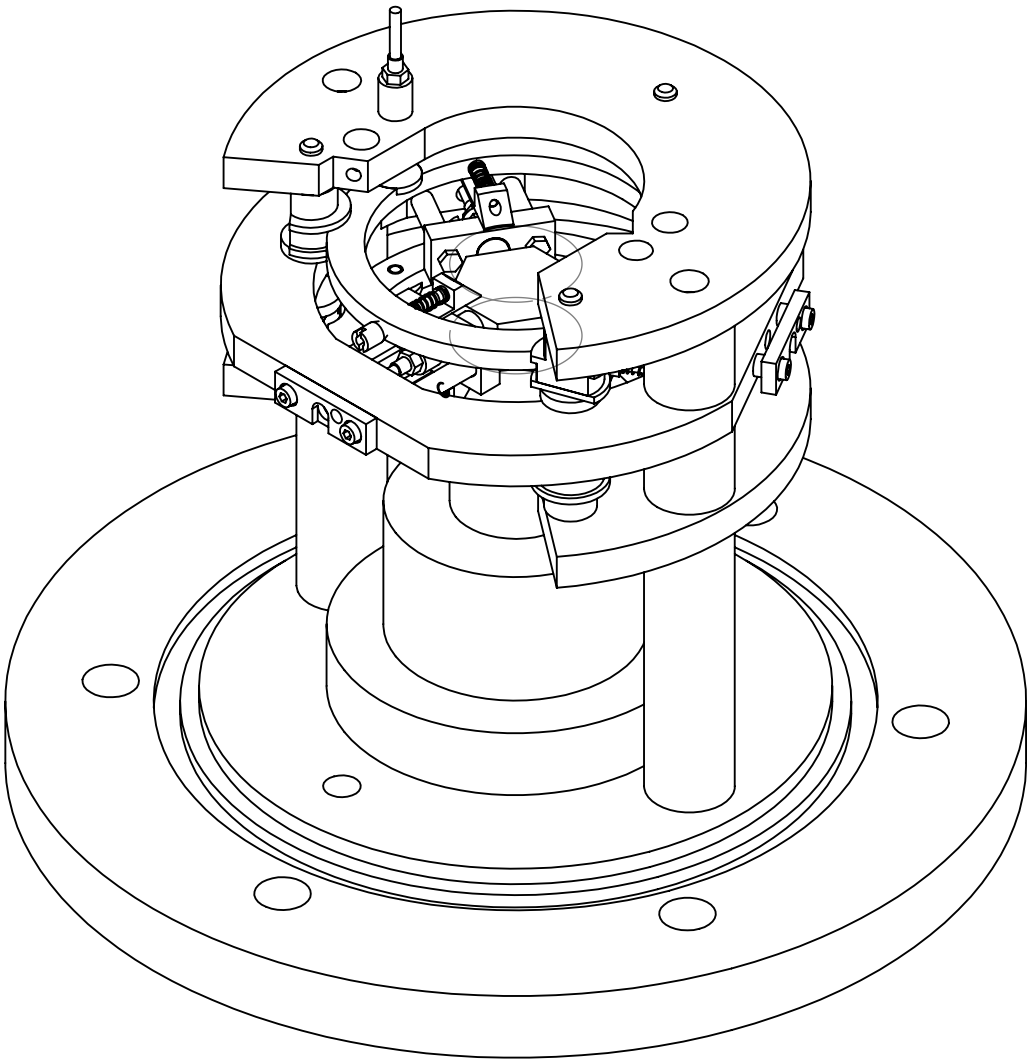








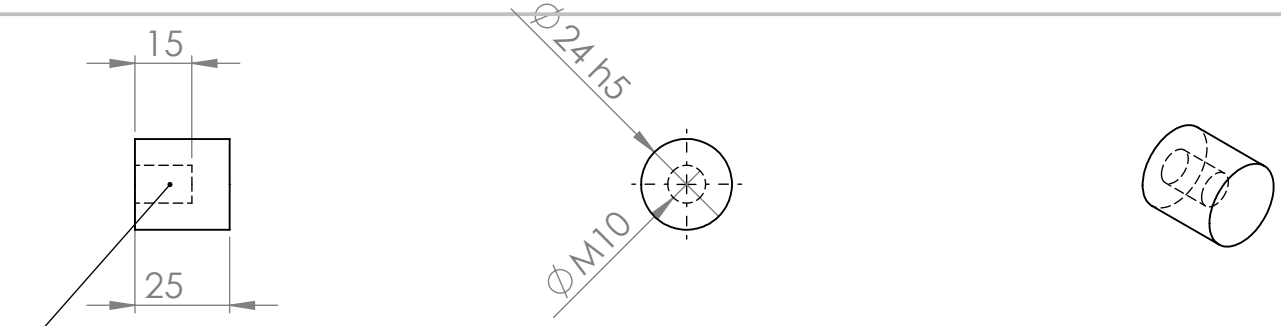
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION: chromage sur la surface du piston chromage de l'intérieur du capot	CASSER LES ANGLES VIFS Sauf pour les pistons	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION		
	NOM	SIGNATURE	DATE			TITRE:
AUTEUR	Champiré		13/11/13			
VERIF.						
APPR.						
FAB.						
QUAL.				MATERIAU: Le type d'acier n'a pas encore été selectionné		No. DE PLAN
						Prototype - autres pièces
						A4
					ECHELLE:1:2	FEUILLE 1 SUR 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION		
	NOM	SIGNATURE	DATE				TITRE:
AUTEUR							
VERIF.							
APPR.							
FAB.							
QUAL.				MATERIAU:			No. DE PLAN
				MASSE:	ECHELLE:1:10	FEUILLE 1 SUR 1	

Plan Porte capteur V5

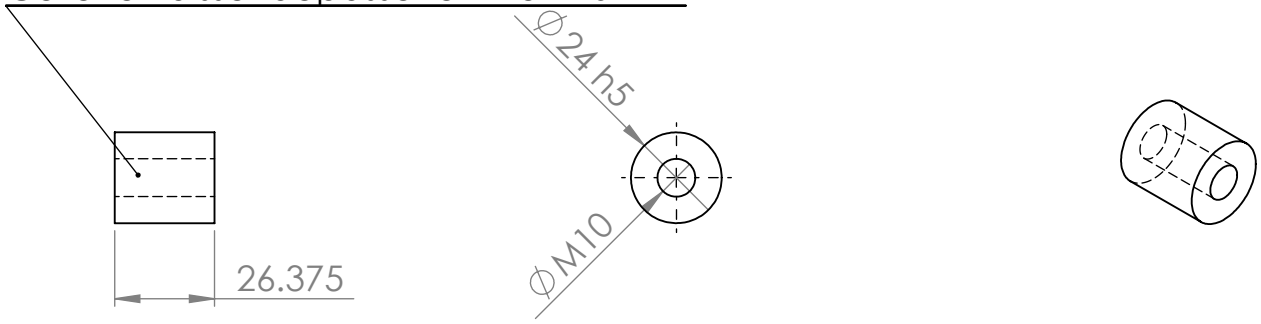
A4



Coller et laisser dépasser environ 16 mm

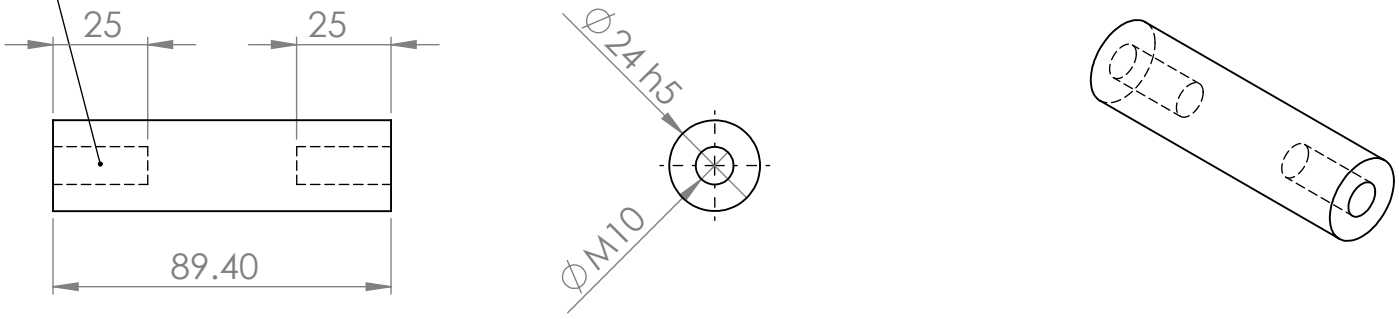
x2 plastique

Coller et laisser dépasser environ 16 mm

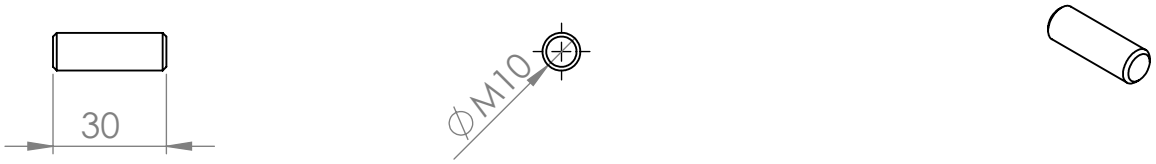


x4 plastique

Coller et laisser dépasser 8 mm

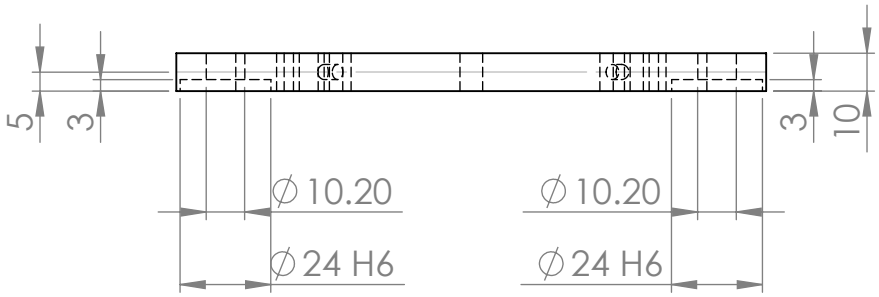


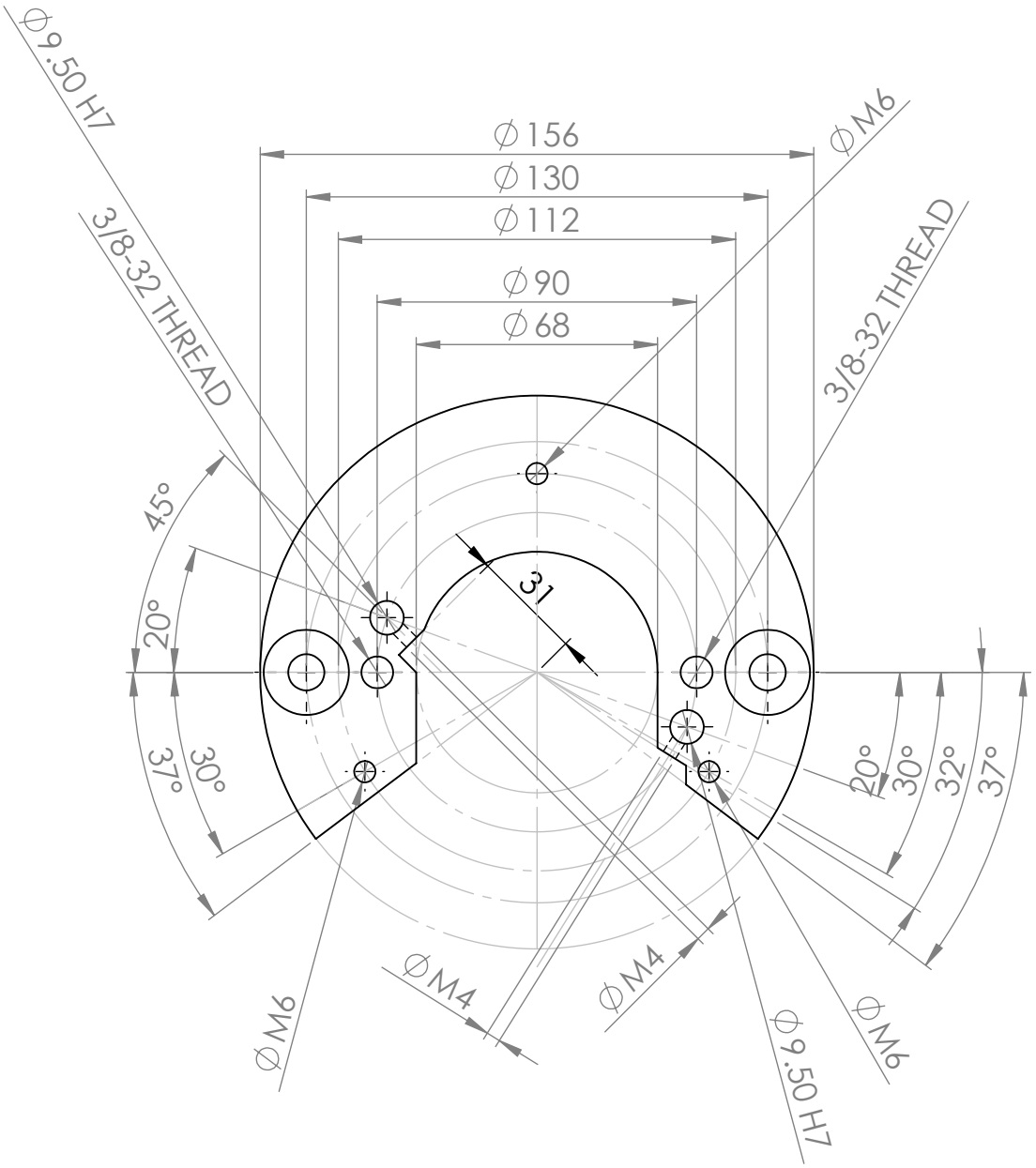
x2 plastique



x8 acier inoxydable

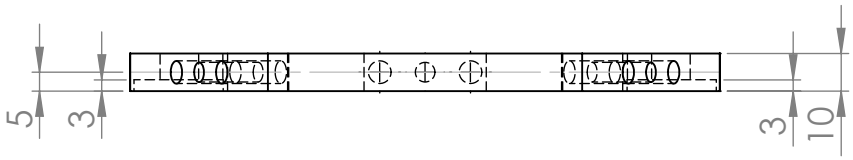
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS			NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION
	NOM	SIGNATURE	DATE			TITRE:	
AUTEUR						Piles	
VERIF.							
APPR.							
FAB.							
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN	A4
						Plan Porte capteur V5	
				MASSE:		ECHELLE:1:2	FEUILLE 1 SUR 1

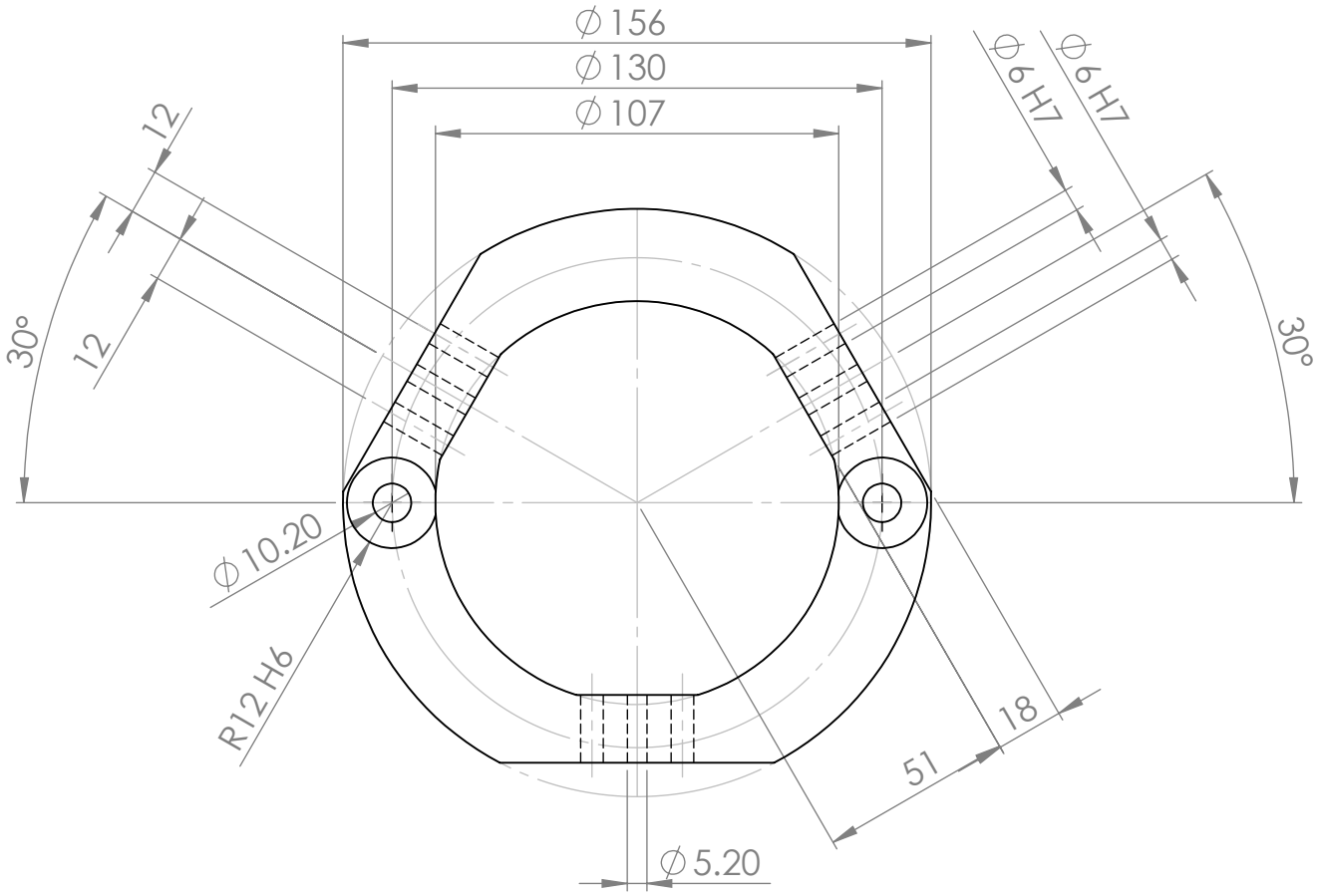




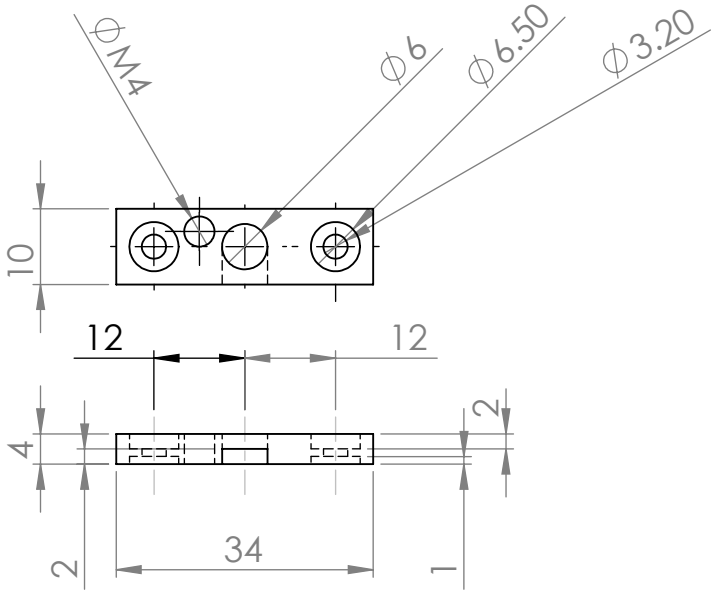
x2 plastique

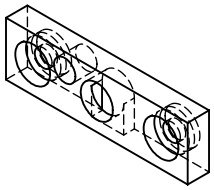
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION	
	NOM	SIGNATURE	DATE	TITRE:		
AUTEUR				Anneau capteurs axiaux		
VERIF.						
APPR.						
FAB.						
QUAL.				MATERIAU:	No. DE PLAN	A4
					Plan Porte capteur V5	
				MASSE:	ECHELLE:1:5	FEUILLE 1 SUR 1



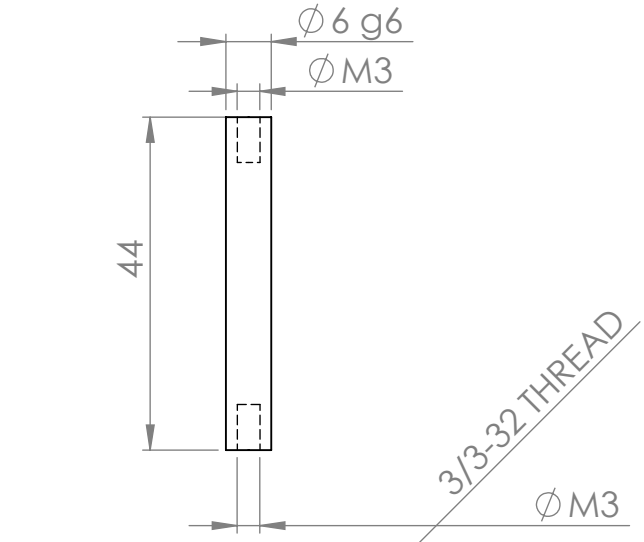


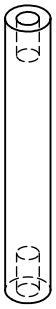
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION	
	NOM	SIGNATURE	DATE	TITRE:		
AUTEUR				Anneau capteurs radiaux		
VERIF.						
APPR.						
FAB.						
QUAL.				MATERIAU:	No. DE PLAN	A4
					Plan Porte capteur V5	
				MASSE:	ECHELLE:1:5	FEUILLE 1 SUR 1



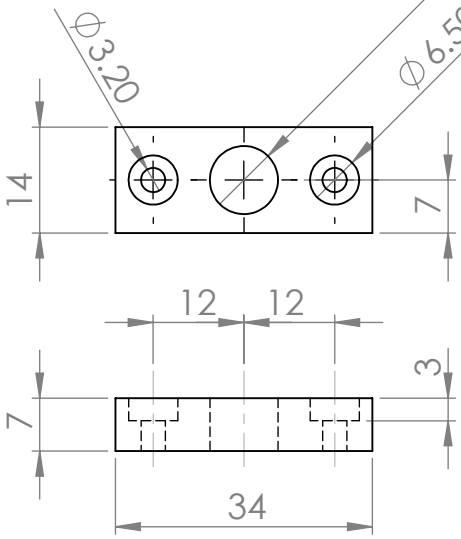


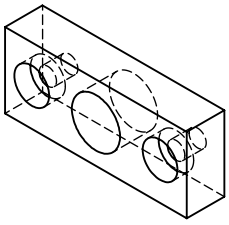
x3 acier inoxydable





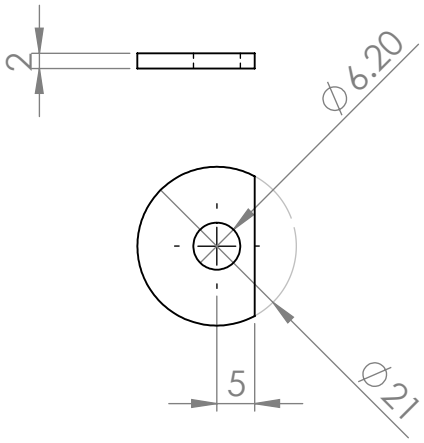
x6 Plastique

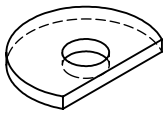




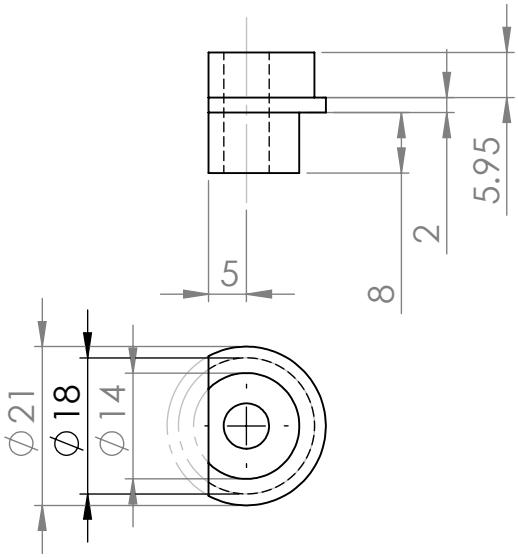
x3 Plastique

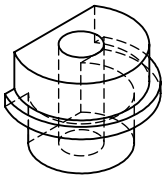
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
	NOM	SIGNATURE	DATE				TITRE:
AUTEUR							
VERIF.							
APPR.							
FAB.							
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN	A4
						Plan Porte capteur V5	
				MASSE:		ECHELLE:2:1	FEUILLE 1 SUR 1





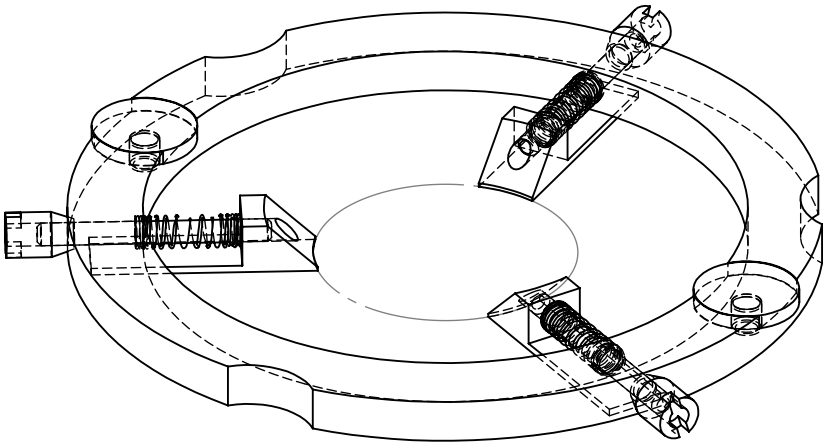
x6 acier inoxydable





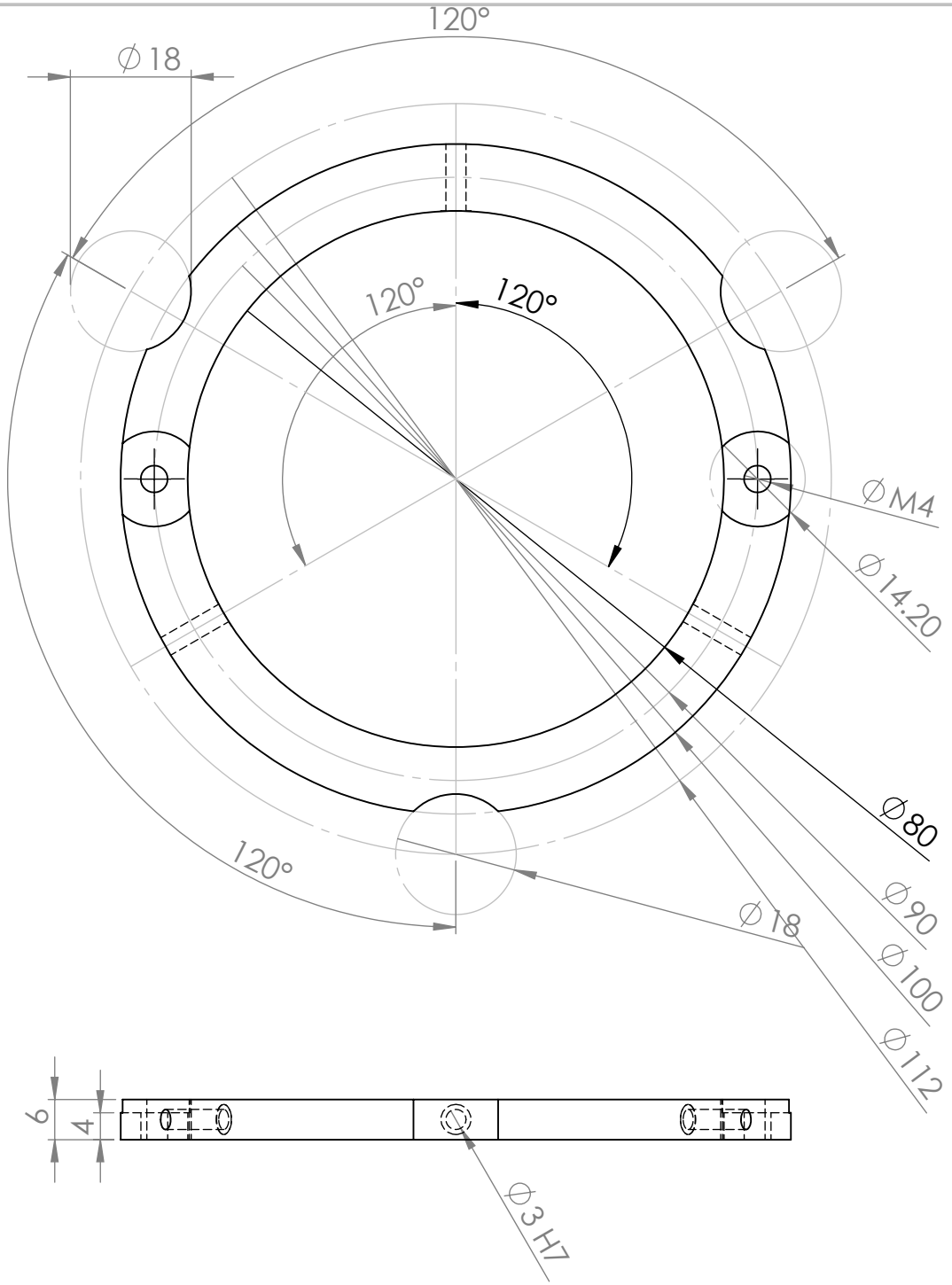
x6 Plastique

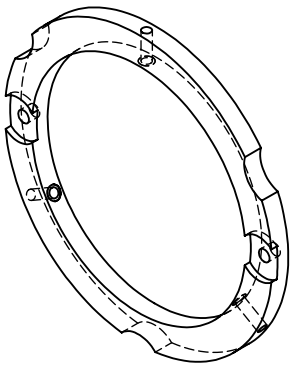
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION
	NOM	SIGNATURE	DATE			TITRE:	
AUTEUR						Positionneur	
VERIF.							
APPR.							
FAB.							
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN	A4
						Plan Porte capteur V5	
				MASSE:		ECHELLE:2:1	FEUILLE 1 SUR 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION	
	NOM	SIGNATURE	DATE				TITRE:
AUTEUR							
VERIF.							
APPR.							
FAB.							
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN	A4
				MASSE:		ECHELLE:1:2	FEUILLE 1 SUR 1

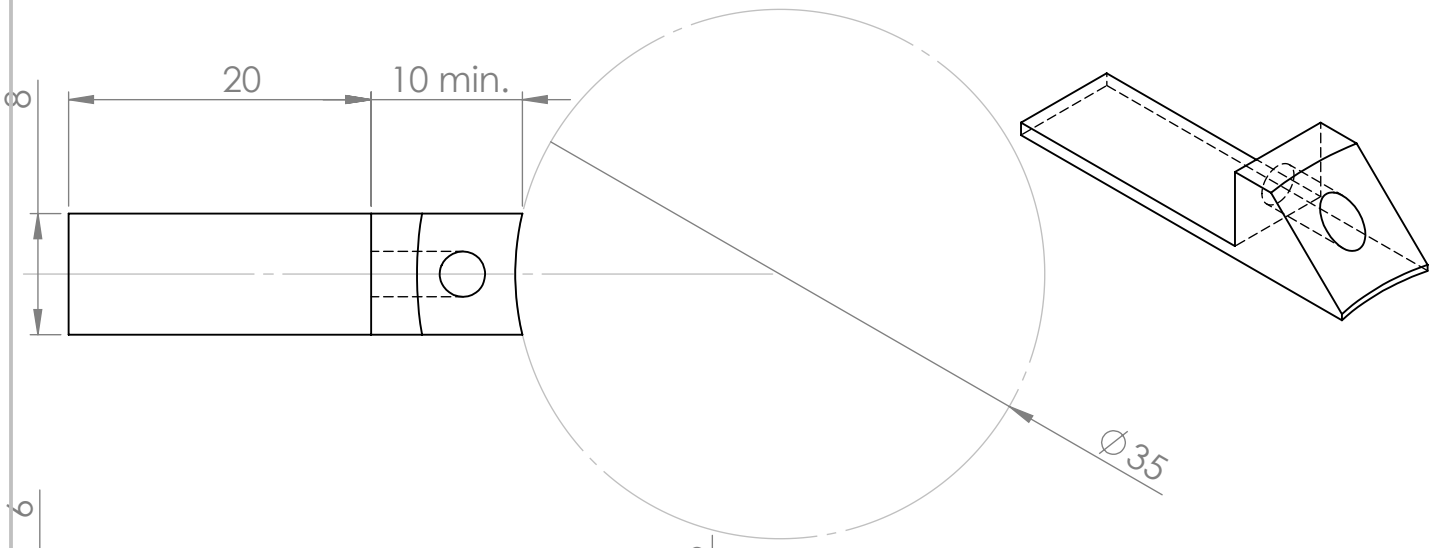
Plan Porte capteur V5

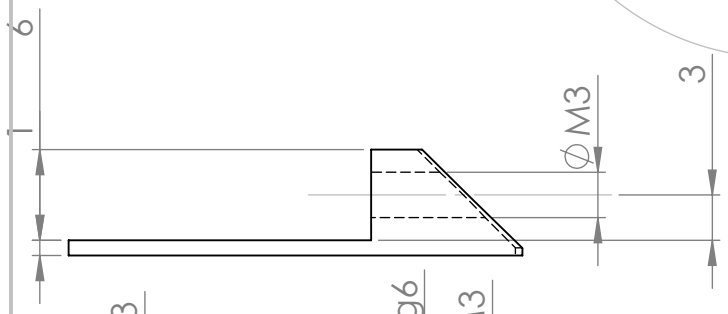




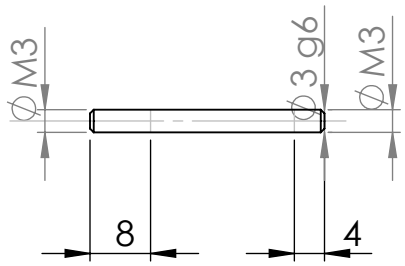
x2 Plastique

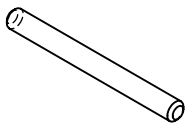
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION
	NOM	SIGNATURE	DATE			TITRE:
AUTEUR						Anneau porte cibles
VERIF.						
APPR.						
FAB.						
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN: Plan Porte capteur V5
						A4
				MASSE:	ECHELLE:1:2	FEUILLE 1 SUR 1



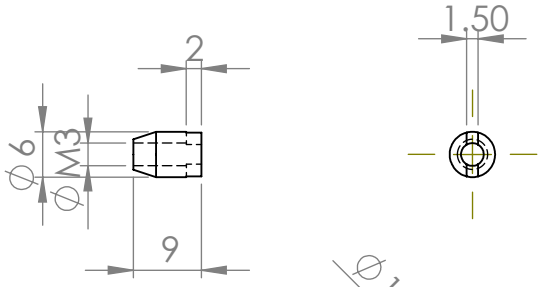


x6 acier inoxydable
si possible en plastique



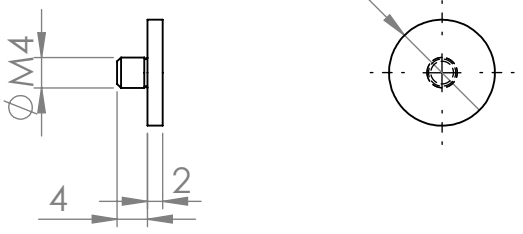


x6 acier inoxydable
si possible en plastique





x6 acier inoxydable





x4 acier inoxydable
x4 aluminium

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION
	NOM	SIGNATURE	DATE				
AUTEUR						TITRE:	
VERIF.							
APPR.							
FAB.							
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN	A4
						Plan Porte capteur V5	
				MASSE:		ECHELLE:2:1	FEUILLE 1 SUR 1

Vis sans tête hexagonale nylon :

Diamètre M4 longueur 8 mm en 5 exemplaires

Diamètre M4 longueur 6 mm en 5 exemplaires

Vis à tête moletée large nylon :

Diamètre M6 longueur 30 mm en 6 exemplaires

Vis DIN 933 Nylon :

Diamètre M3 longueur 10 mm en 6 exemplaires

Vis CHC DIN 912 :

Diamètre M3 longueur 10 mm en 6 exemplaires

6 Ressorts portes cibles inoxydables :

En 6 exemplaires
Diamètre intérieur min 3 mm
Diamètre extérieur max 5 mm
Le ressort comprimé à 13 mm doit développer ~40g de poussée

6 Ressorts capteurs radiaux inoxydables :

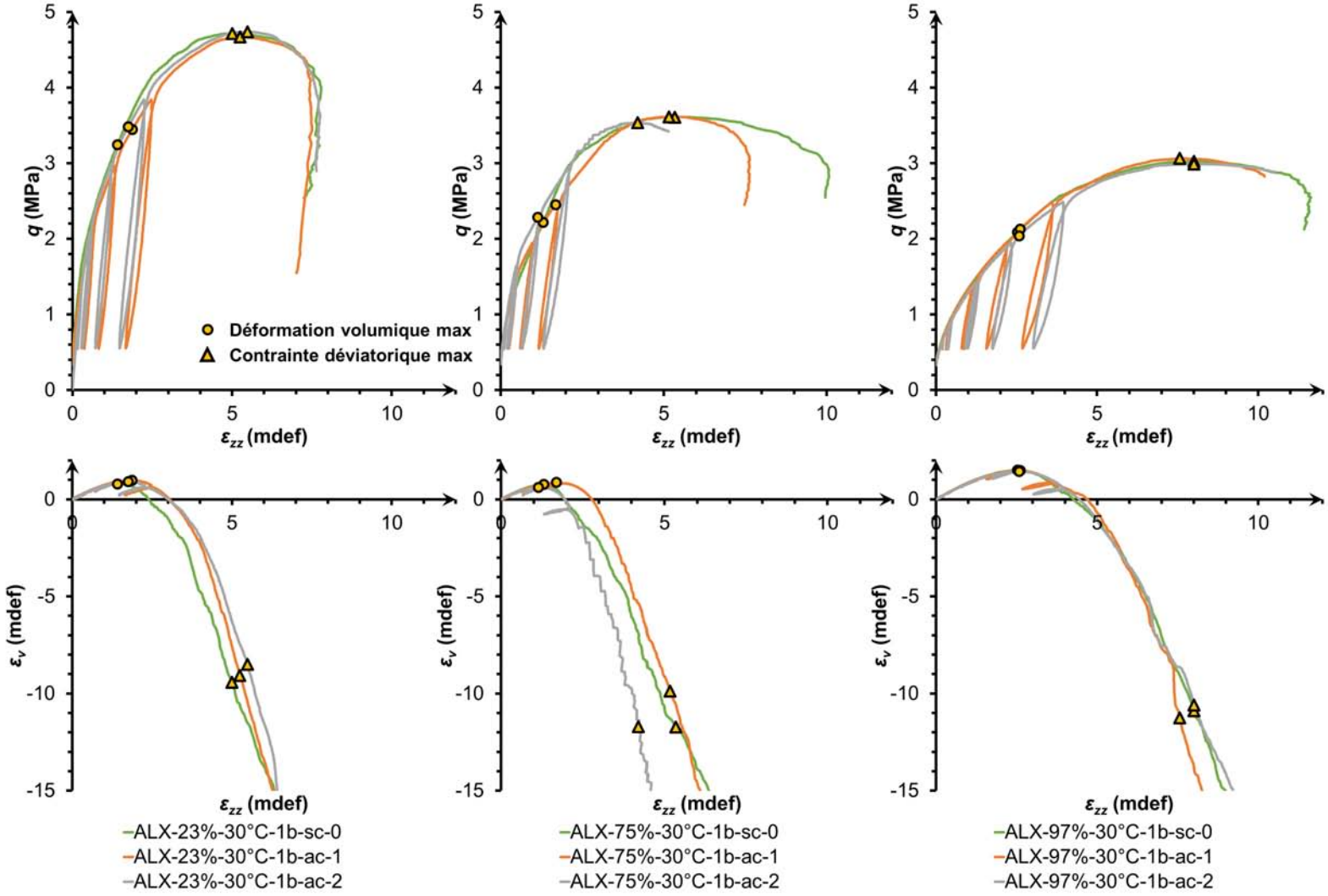
En 6 exemplaires
Diamètre intérieur min 6 mm
Diamètre extérieur max 8 mm
La longueur à vide et la raideur sont à définir

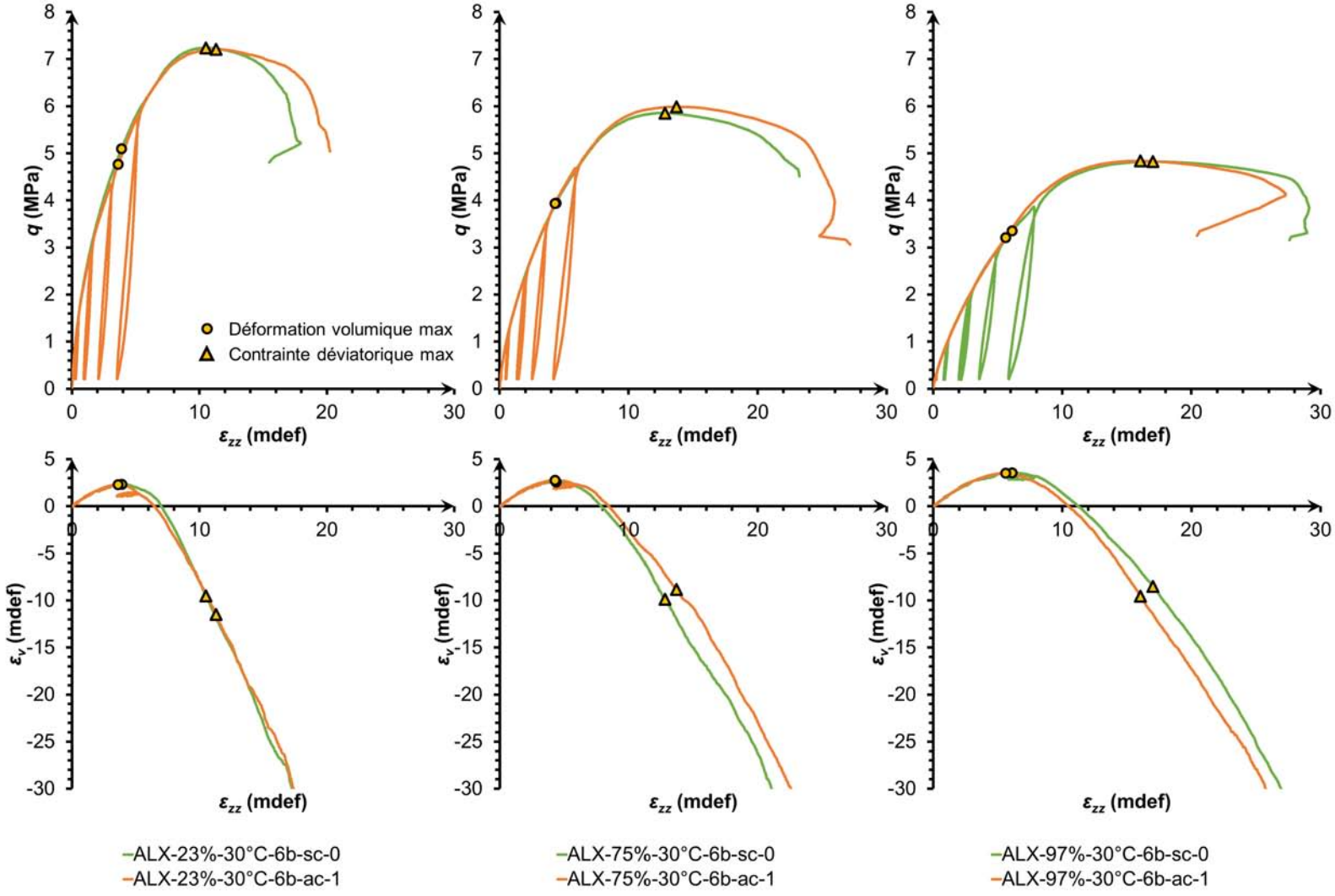
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION	
	NOM	SIGNATURE	DATE			TITRE:
AUTEUR						
VERIF.						
APPR.						
FAB.						
QUAL.				MATERIAU:	No. DE PLAN	A4
					Plan Porte capteur V5	
				MASSE:	ECHELLE:2:1	FEUILLE 1 SUR 1

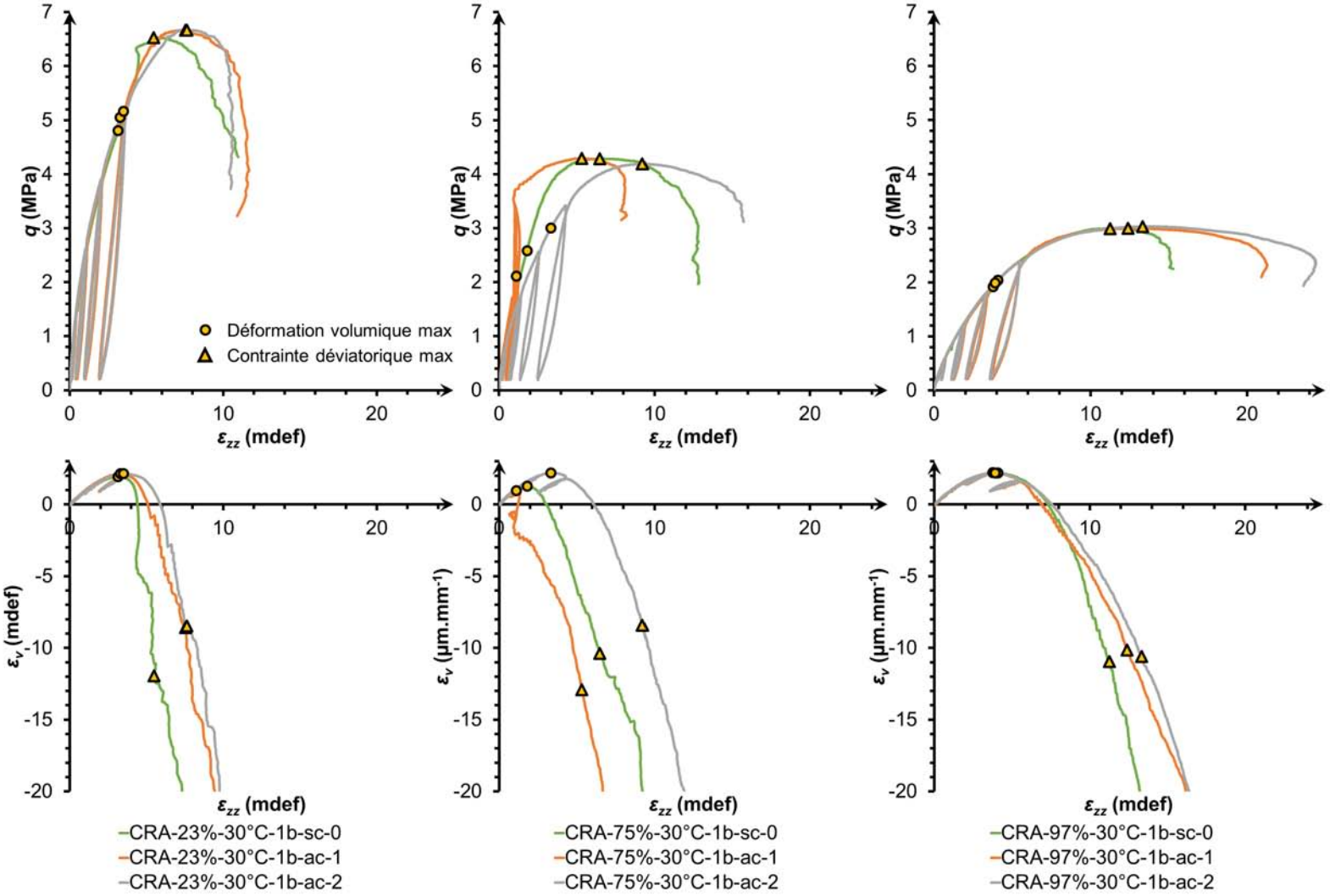
Annexe B

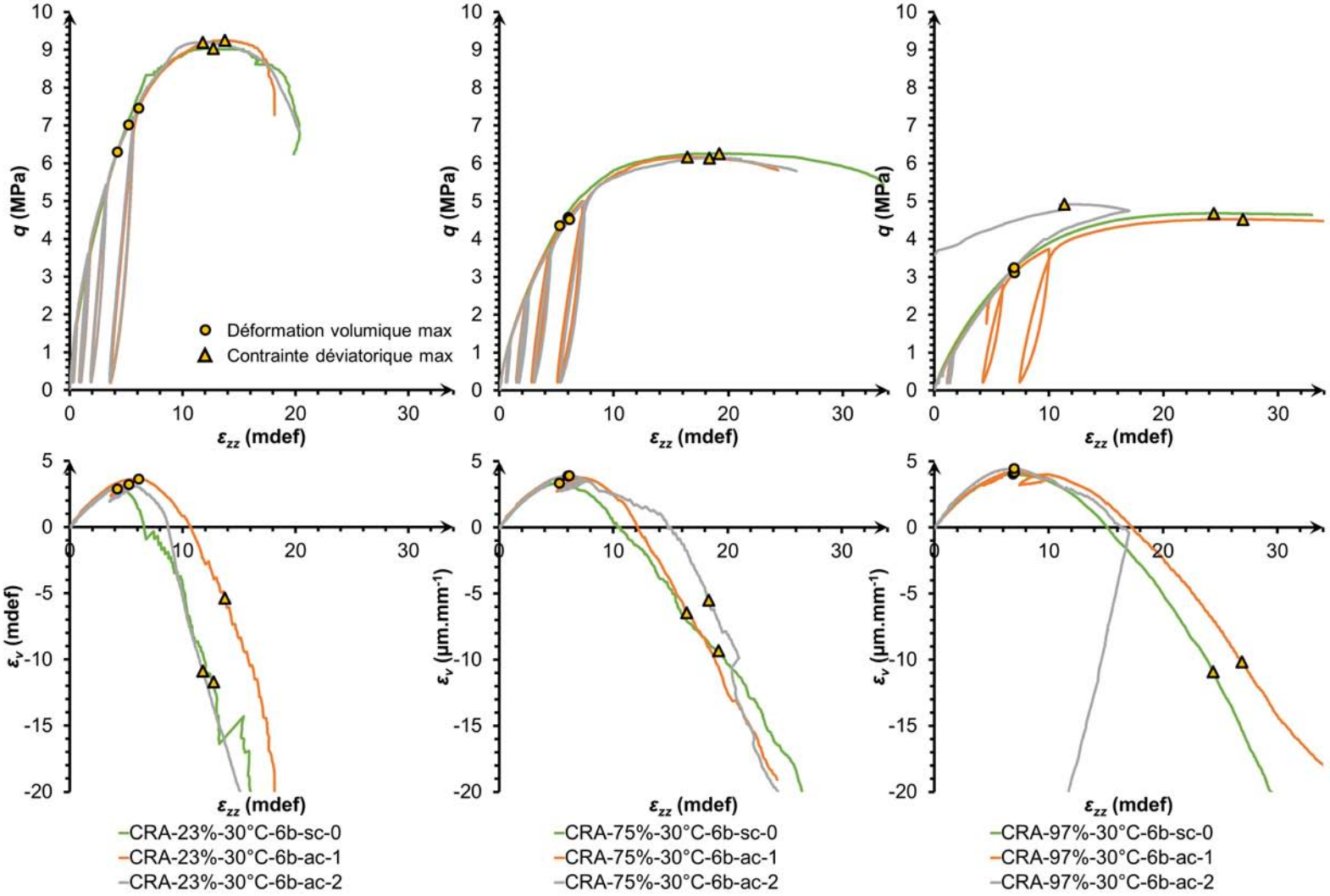
Résultats détaillés des essais triaxiaux

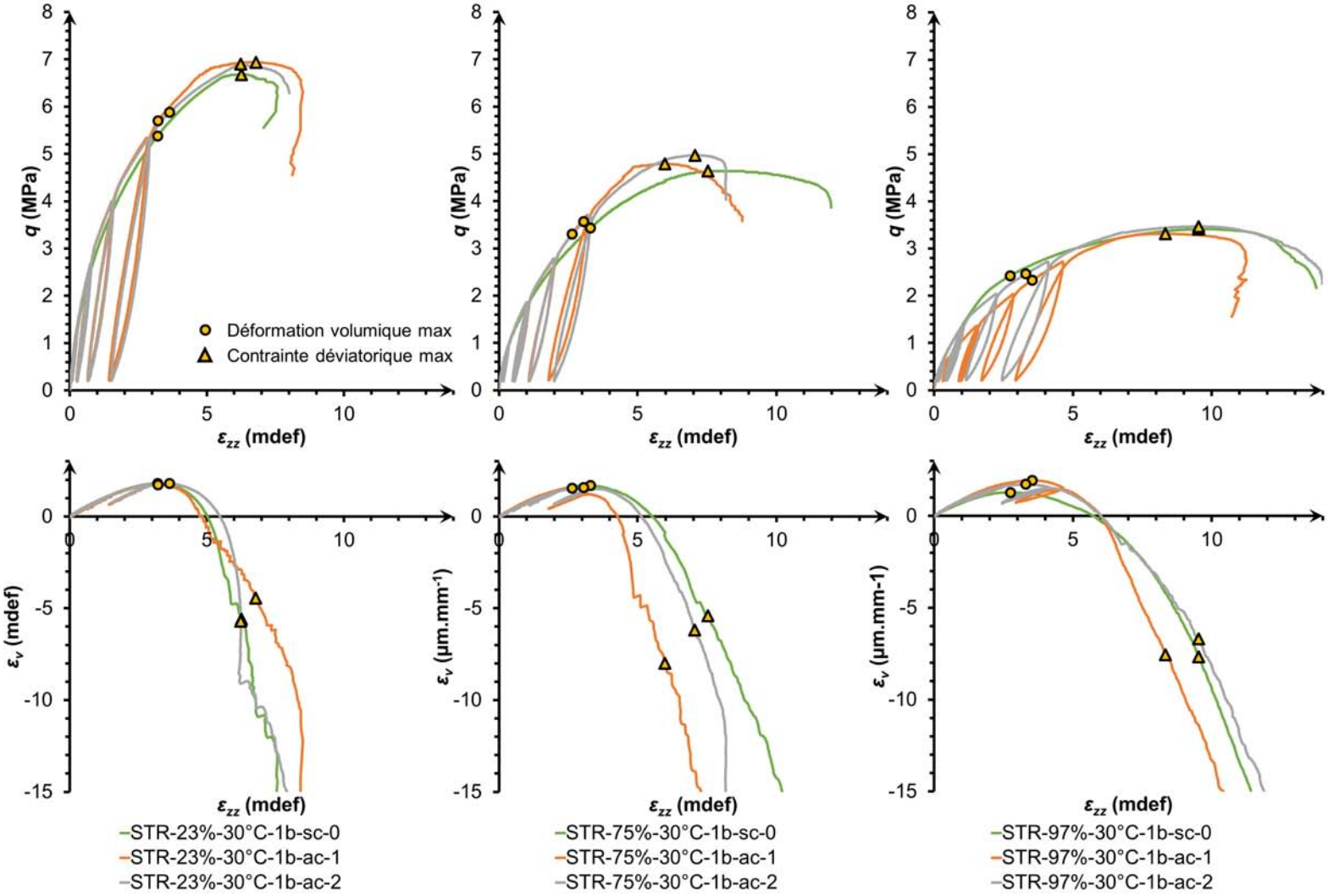
Les graphiques suivant reprennent l'ensemble des résultats des essais triaxiaux, sur tous les échantillons testés.

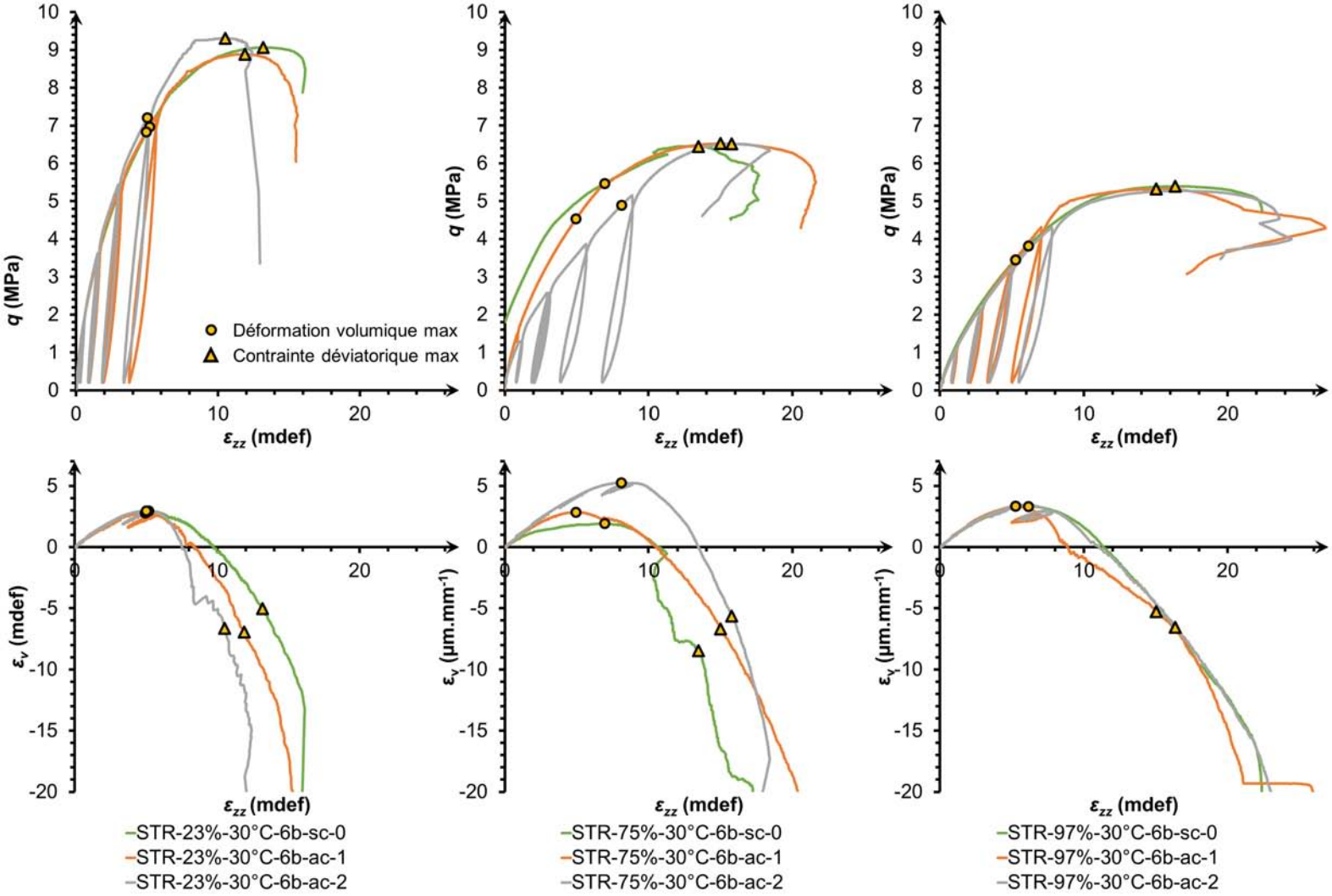

q (MPa)
εzz (mdef)
εv (mdef)
Déformation volumique max
Contrainte déviatorique max
ALX-23%-30°C-1b-sc-0
ALX-23%-30°C-1b-ac-1
ALX-23%-30°C-1b-ac-2
ALX-75%-30°C-1b-sc-0
ALX-75%-30°C-1b-ac-1
ALX-75%-30°C-1b-ac-2
ALX-97%-30°C-1b-sc-0
ALX-97%-30°C-1b-ac-1
ALX-97%-30°C-1b-ac-2

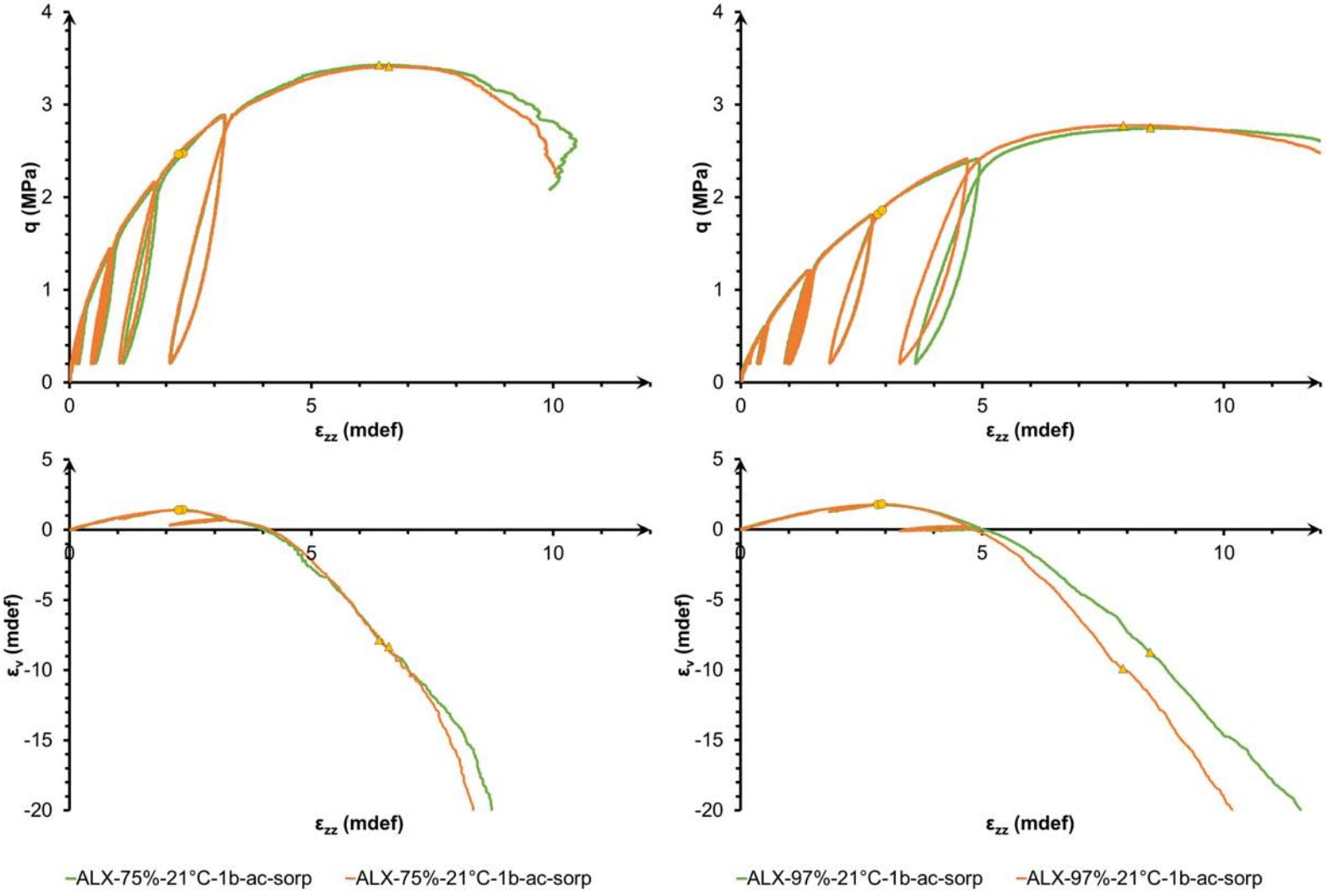

q (MPa)
ε_zz (mdef)
ε_v (mdef)
Déformation volumique max
Contrainte déviatorique max
ALX-23%-30°C-6b-sc-0
ALX-23%-30°C-6b-ac-1
ALX-75%-30°C-6b-sc-0
ALX-75%-30°C-6b-ac-1
ALX-97%-30°C-6b-sc-0
ALX-97%-30°C-6b-ac-1

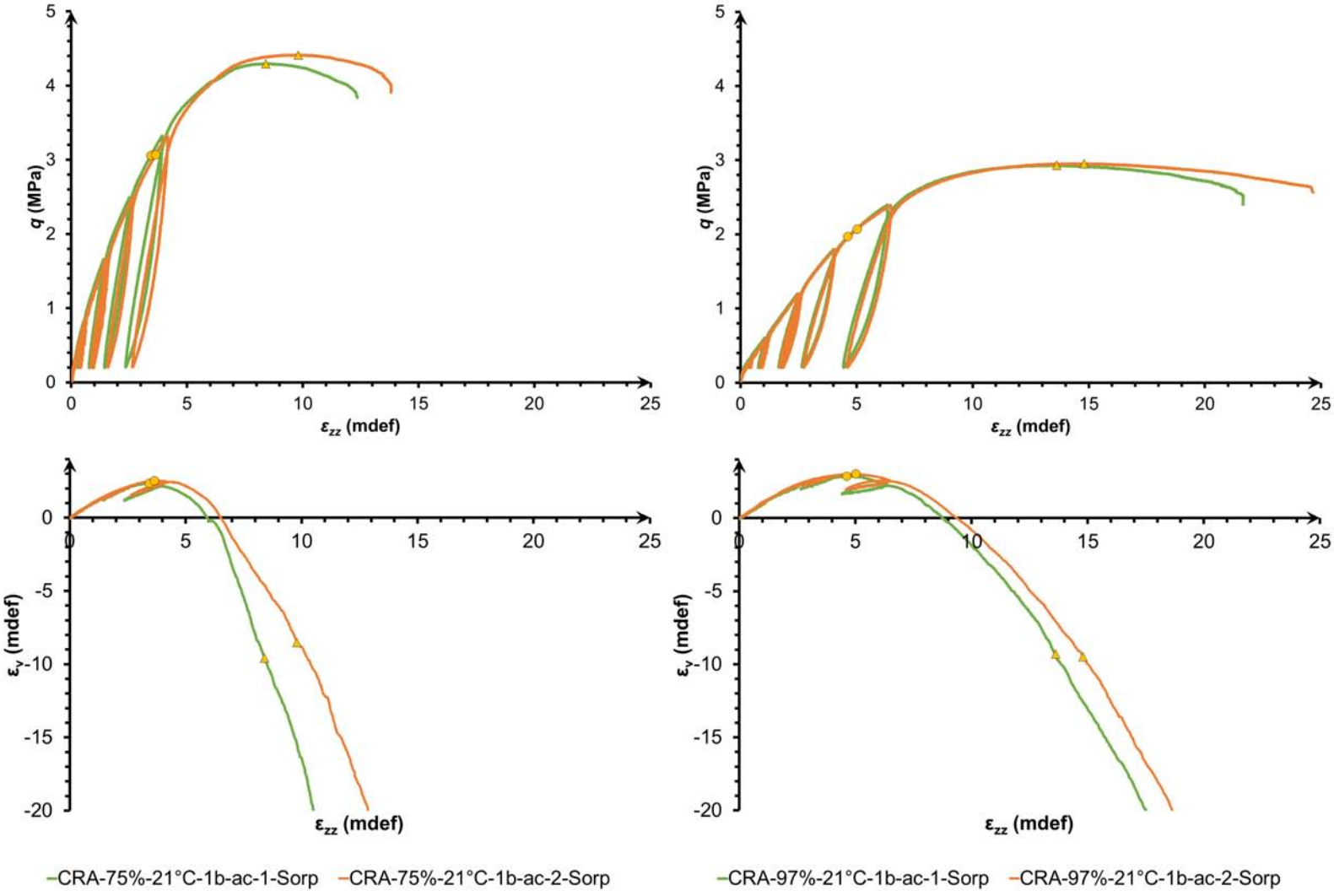

q (MPa)
εzz (mdef)
Déformation volumique max
Contrainte déviatorique max
εv (mdef)
εv (µm.mm-1)
CRA-23%-30°C-1b-sc-0
CRA-23%-30°C-1b-ac-1
CRA-23%-30°C-1b-ac-2
CRA-75%-30°C-1b-sc-0
CRA-75%-30°C-1b-ac-1
CRA-75%-30°C-1b-ac-2
CRA-97%-30°C-1b-sc-0
CRA-97%-30°C-1b-ac-1
CRA-97%-30°C-1b-ac-2

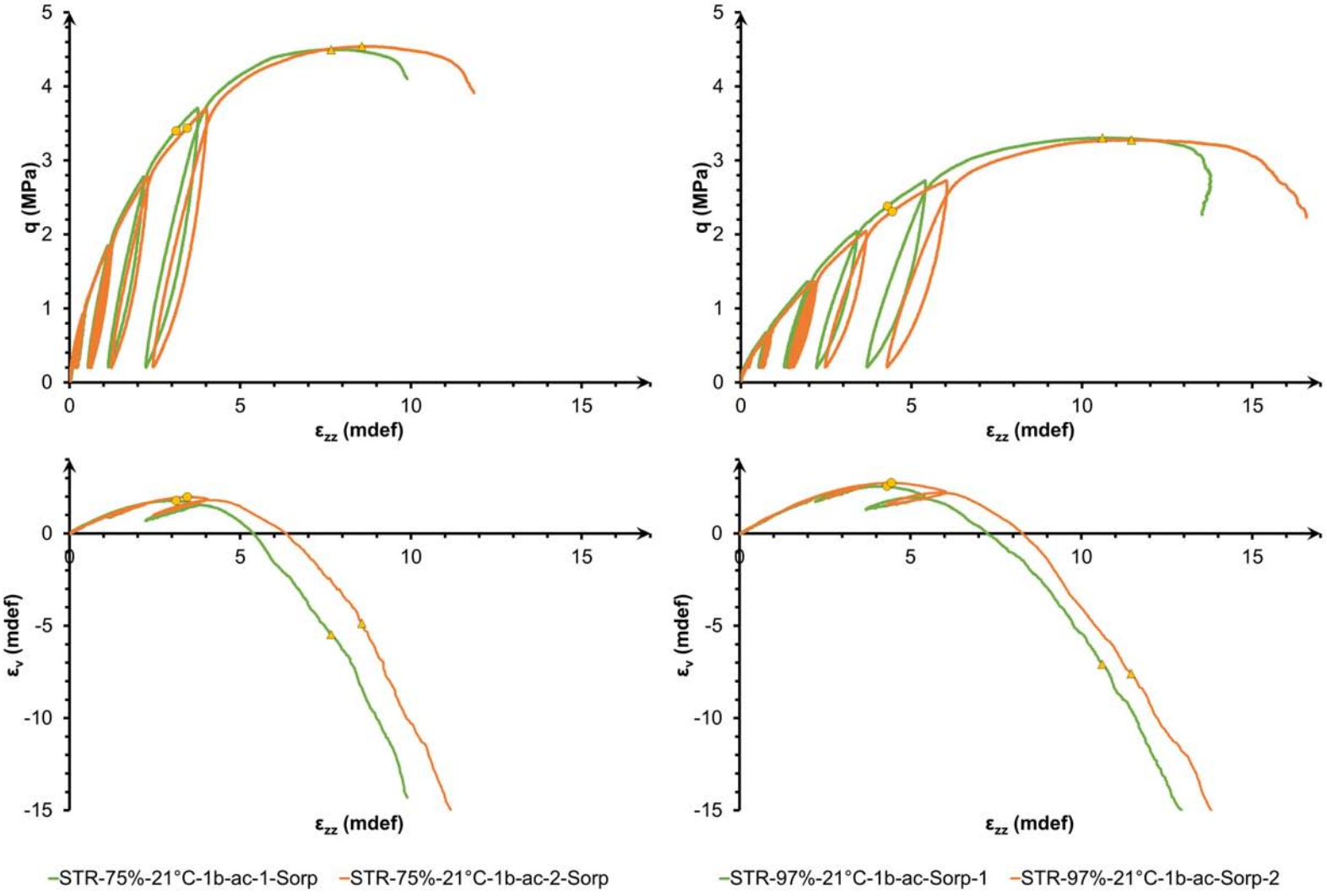

q (MPa)
εzz (mdef)
Déformation volumique max
Contrainte déviatorique max
εv (mdef)
εv (µm.mm-1)
CRA-23%-30°C-6b-sc-0
CRA-23%-30°C-6b-ac-1
CRA-23%-30°C-6b-ac-2
CRA-75%-30°C-6b-sc-0
CRA-75%-30°C-6b-ac-1
CRA-75%-30°C-6b-ac-2
CRA-97%-30°C-6b-sc-0
CRA-97%-30°C-6b-ac-1
CRA-97%-30°C-6b-ac-2

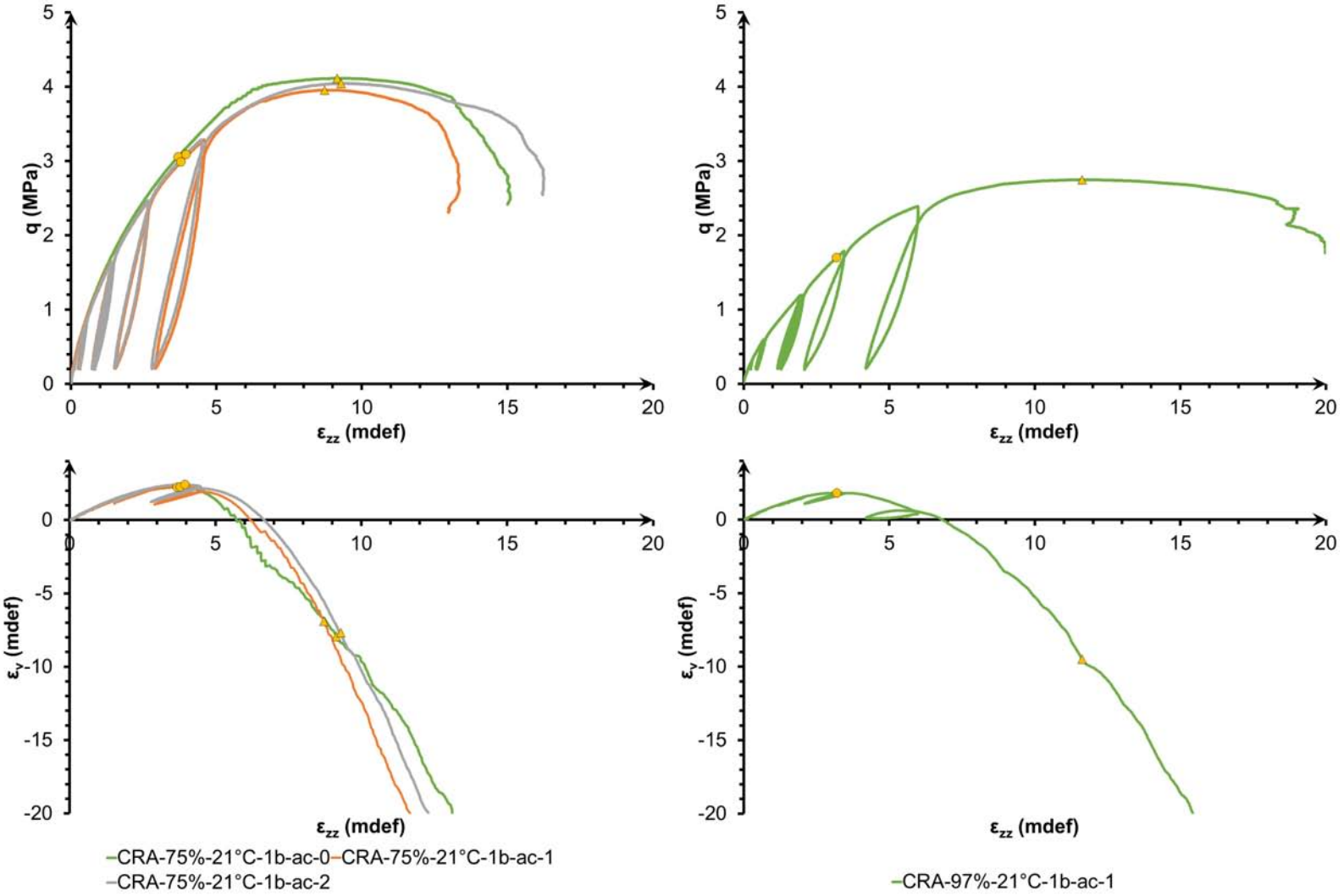

q (MPa)
εzz (mdef)
Déformation volumique max
Contrainte déviatorique max
εv (mdef)
εv (µm.mm-1)
STR-23%-30°C-1b-sc-0
STR-23%-30°C-1b-ac-1
STR-23%-30°C-1b-ac-2
STR-75%-30°C-1b-sc-0
STR-75%-30°C-1b-ac-1
STR-75%-30°C-1b-ac-2
STR-97%-30°C-1b-sc-0
STR-97%-30°C-1b-ac-1
STR-97%-30°C-1b-ac-2

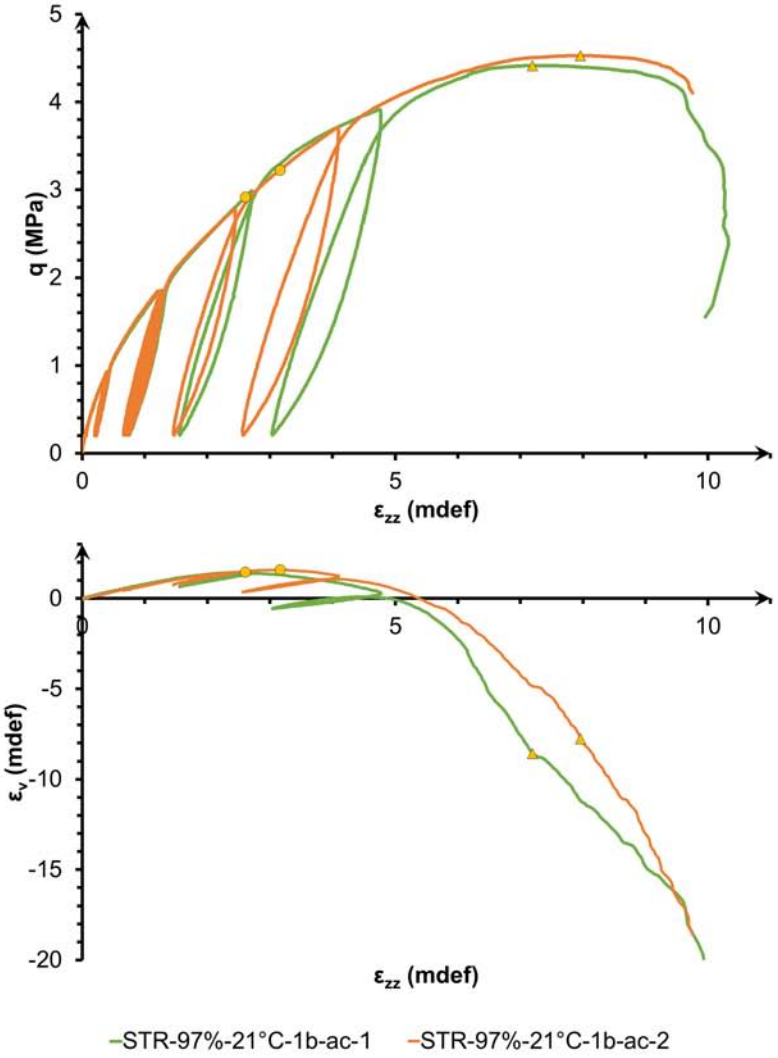

q (MPa)
εzz (mdef)
Déformation volumique max
Contrainte déviatorique max
εv (mdef)
εγ (µm.mm-1)
STR-23%-30°C-6b-sc-0
STR-23%-30°C-6b-ac-1
STR-23%-30°C-6b-ac-2
STR-75%-30°C-6b-sc-0
STR-75%-30°C-6b-ac-1
STR-75%-30°C-6b-ac-2
STR-97%-30°C-6b-sc-0
STR-97%-30°C-6b-ac-1
STR-97%-30°C-6b-ac-2


q (MPa)
εzz (mdef)
εv (mdef)
ALX-75%-21°C-1b-ac-sorp
ALX-75%-21°C-1b-ac-sorp
ALX-97%-21°C-1b-ac-sorp
ALX-97%-21°C-1b-ac-sorp


q (MPa)
εzz (mdef)
εv (mdef)
CRA-75%-21°C-1b-ac-1-Sorp
CRA-75%-21°C-1b-ac-2-Sorp
CRA-97%-21°C-1b-ac-1-Sorp
CRA-97%-21°C-1b-ac-2-Sorp


q (MPa)
εzz (mdef)
εv (mdef)
STR-75%-21°C-1b-ac-1-Sorp
STR-75%-21°C-1b-ac-2-Sorp
STR-97%-21°C-1b-ac-Sorp-1
STR-97%-21°C-1b-ac-Sorp-2


q (MPa)
εzz (mdef)
εv (mdef)
CRA-75%-21°C-1b-ac-0
CRA-75%-21°C-1b-ac-1
CRA-75%-21°C-1b-ac-2
CRA-97%-21°C-1b-ac-1


q (MPa)
ε_{zz} (mdef)
ε_v (mdef)
ε_{zz} (mdef)
STR-97%-21°C-1b-ac-1
STR-97%-21°C-1b-ac-2

Annexe C

Note de calculs

L'annexe présentée ici établit une démonstration évoquée dans le développement du modèle du Chapitre 5, à savoir celle prouvant la présence d'un gradient de pression de vapeur.

La conservation de la masse de gaz conduit à :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(p_G \frac{M_G}{RT} K \frac{\partial p_G}{\partial x}\right) = \frac{\partial m_G}{\partial t} = 0 \tag{C.1}$$

Dans la mesure où p_G varie peu, il est considéré comme constant. L'équation précédente peut être réduite à :

$$\frac{\partial^2 p_G}{\partial x^2} p_G + \left(\frac{p_G}{\partial x}\right)^2 = 0 \tag{C.2}$$

En intégrant par rapport à x, on obtient :

$$p_G \frac{\partial p_G}{\partial x} = A \tag{C.3}$$

Ce qui implique que p_G soit de la forme :

$$p_G^2 = 2Ax + B \tag{C.4}$$

Au regard des condition aux limites en $x = 0$, $p_G = p_G^e$ en $x = H$, $p_G = p_{atm}$ ainsi :

$$B = (p_G^e)^2; A = \frac{1}{2H}\left(p_{atm}^2 - (p_G^e)^2\right) \tag{C.5}$$

avec :
p_G^e [Pa] : pression en entrée de l'échantillon
H [m] : la hauteur de l'échantillon
p_{atm} [Pa] : la pression atmosphérique appliqué en sortie
L'expression en tout x de p_G est alors de la forme :

$$p_G = \sqrt{\frac{1}{H}\left(p_{atm}^2 - (p_G^e)^2\right) x + (p_G^e)^2} \tag{C.6}$$

et sa dérivée par rapport à x s'exprime comme suit :

$$\frac{\partial p_G}{\partial x} = \frac{1}{2H} \frac{p_{atm}^2 - (p_G^e)^2}{\sqrt{\frac{1}{H}\left(p_{atm}^2 - (p_G^e)^2\right) x + (p_G^e)^2}} = \frac{1}{2H} \frac{p_{atm}^2 - (p_G^e)^2}{p_G} \tag{C.7}$$

La conservation de la masse de la vapeur conduit à :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{p_{V\,sat} M_v}{RT} D \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \varphi \frac{p_{V\,sat} M_v}{RT} K \frac{\partial p_G}{\partial x}\right] = \frac{\partial m_V}{\partial t} = 0 \tag{C.8}$$

ce qui se simplifie par :

$$D\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\varphi K \frac{\partial p_G}{\partial x}\right) = 0 \tag{C.9}$$

L'absence de diffusion en régime stationnaire annule le premier terme ; le second se développe sous la forme :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} K \frac{\partial p_G}{\partial x} + \varphi K \frac{\partial^2 p_G}{\partial x^2} = 0 \tag{C.10}$$

En utilisant l'équation C.2, on obtient :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} K \frac{\partial p_G}{\partial x} - \frac{\varphi K}{p_G}\left(\frac{\partial p_G}{\partial x}\right)^2 = 0 \tag{C.11}$$

et sachant que $\partial p_G / \partial x$, on a :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} K - \frac{\varphi K}{p_G} \frac{\partial p_G}{\partial x} = 0 \tag{C.12}$$

En remplaçant les expressions des équations C.6 et C.7 :

$$\frac{\partial \varphi}{\varphi} = \frac{p_{atm}^2 - (p_G^e)^2}{2} \frac{\partial x}{\left(p_{atm}^2 - (p_G^e)^2\right) x + (p_G^e)^2} = 0 \tag{C.13}$$

L'intégration nous donne :

$$ln\left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right) = -\frac{1}{2} ln\left(\left(p_{atm}^2 - (p_G^e)^2\right) x + (p_G^e)^2\right) \tag{C.14}$$

et

$$\left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^2 = \left(p_{atm}^2 - (p_G^e)^2\right) x + (p_G^e)^2 \tag{C.15}$$

En $x = 0$, $\varphi = \varphi^e$ et ainsi $\varphi_0^2 = \frac{(\varphi^e)^2}{(p_G^e)^2}$. En remplaçant dans l'équation précédente :

$$\varphi^2 = (\varphi^e)^2 \left(\frac{p_{atm}^2 - (p_G^e)^2}{(p_G^e)^2 H} x + 1\right) \tag{C.16}$$

Annexe D

Protocole détaillé de réalisation des BTC

Pour la réalisation des BTC, le protocole utilisé est illustré dans la Figure D.1 et est conforme à la procédure développée par Morel et Mesbah [41].

Les BTC sont réalisés suivant cette procédure avec une presse manuelle à double compactage. En particulier, pour déterminer la teneur en eau optimale, des BTC à 5 teneurs en eau différentes (9%, 11%, 13% et 15%) et avec différentes quantités de matériau (de 8,6 à 9,2 kg avec un pas de 0,2 kg) ont été réalisés. Parmi eux, le couple optimal de teneur en eau/ quantité de matériau est celui qui donne la densité sèche maximale.

Pour illustration, dans la suite de cette partie, le développement de la démarche se focalise sur la terre STR.

Nom	**9%**	**11%**	**13%**	**15%**
Teneur en eau (%)	8,9	10,8	13,1	15,4
Masse humide (kg)	8,6	8,8	8,8	9,1
Masse sèche (kg)	7,90	7,94	7,78	7,89
Longueur (mm)	295	295	295	295
Largeur (mm)	140	140	140	140
Hauteur (mm)	103	102	103	105
Densité sèche ($kg.m^{-3}$)	1856	1885	1829	1818
Nombre d'échantillons	1	8	2	2

Tableau D.1 – Densité sèche des BTC réalisés pour la terre STR.

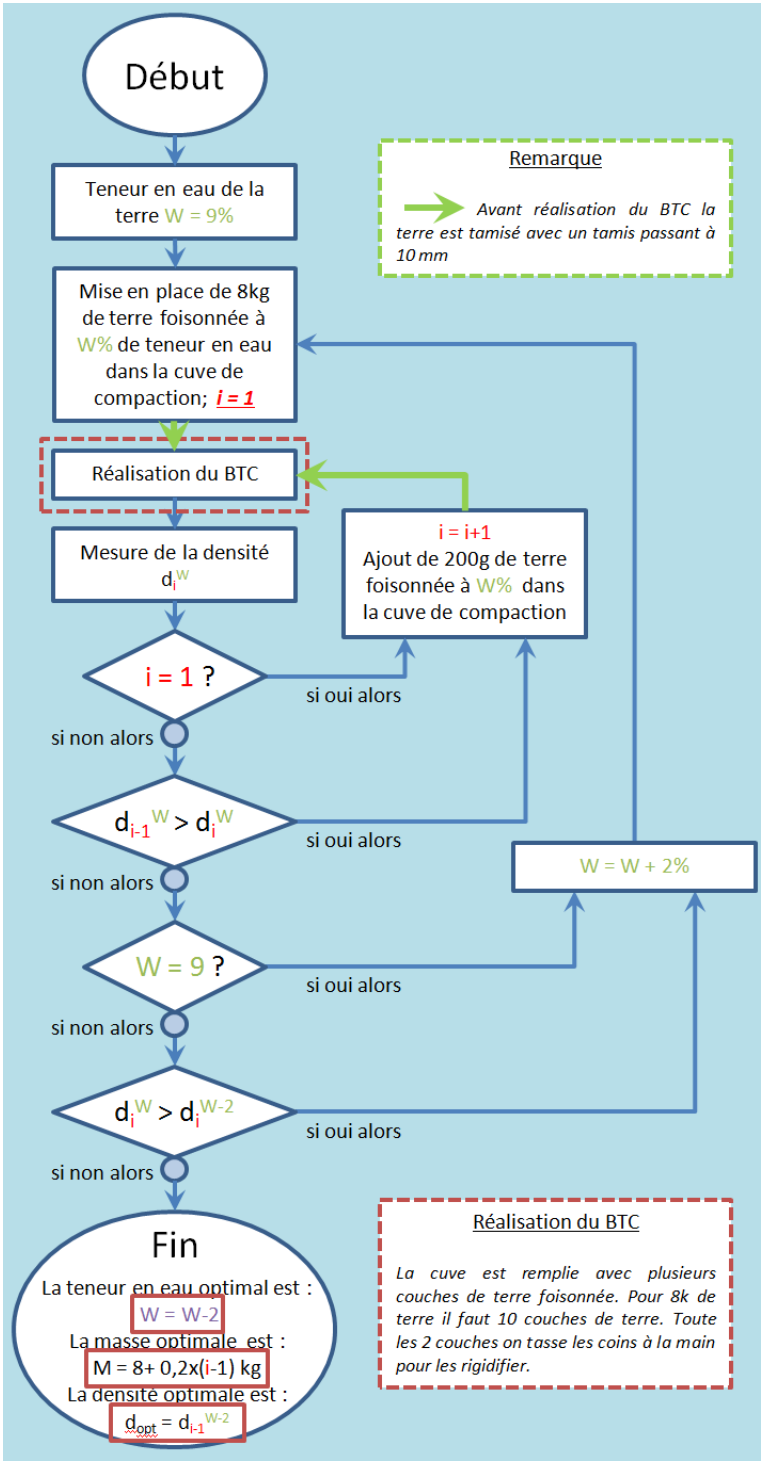


FIGURE D.1 – Protocole pour obtenir l'optimum BTC.

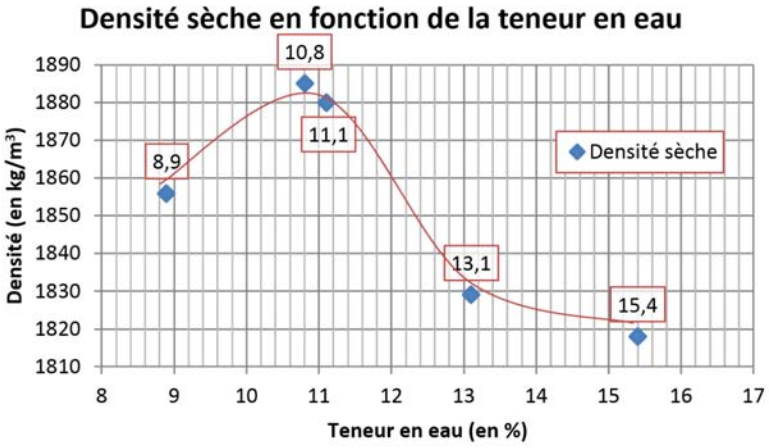


FIGURE D.2 – Détermination de l'optimum BTC pour la terre STR : évolution de la densité sèche en fonction de la teneur en eau de fabrication.

Bibliographie

[1] Karin Adalberth. Energy use in four multi-family houses during their life cycle. *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings*, 1 :1–20, 1999.

[2] ADEME. Déchets Edition 2015. Technical report, 2015.

[3] AFNOR. NF EN ISO 12572.pdf. Technical report.

[4] AFNOR. Compressed Earth Blocks for walls and partitions : definitions - specifications - test methods - delivery acceptance conditions. 2001.

[5] Dorothée Alex. Petit guide des Architectures en pisé à Lyon. Technical report, ENSAL, Lyon, 2011.

[6] Jean-Emmanuel Aubert, Alain Marcom, Priscia Oliva, and Pauline Segui. Chequered earth construction in south-western France. *Journal of Cultural Heritage*, page 6, 2014.

[7] G.E Blight. Effective stress evaluation for unsaturated soils. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 93(2) :125–148, 1967.

[8] A.W Bruno, D. Gallipoli, C Perlot, and J Mendes. Mechanical behaviour of hypercompacted earth for building construction. *Materials and Structures*, 50(2) :160, 2017.

[9] Q B Bui. *Stabilité des structures en pisé : durabilité, caractéristiques mécaniques - Thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées, Lyon.* PhD thesis, 2008.

[10] Quoc-Bao Bui, Jean-Claude Morel, Stéphane Hans, and Peter Walker. Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials*, 54 :163–169, 2014.

[11] F Bullen and B Boyce. Strength and durability of rammed earth walls for domestic and commercial construction. In *Proceedings of the ninth asian regional conference on soil mechanics and foundation engineering*, pages 209–212, Bangkok, 1991. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics abstracts.

[12] Florian Champiré, Antonin Fabbri, Jean-claude Morel, Henry Wong, and Fionn Mcgregor. Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material. *Construction and Building Materials*, 110 :70–78, 2016.

[13] Florian Champiré, Lucile Soudani, Antonin Fabbri, Jean-Claude Morel, Monika Woloszyn, Henry Wong, Anne-Cécile Grillet, and Stéphane Cointet. Le pisé , un atout pour la transition énergétique dans le bâtiment. In *Forum franco-suisse sur la transition énergétique dans le bâtiment*, page 1, Lyon, France, 2014. Université de Lausanne.

[14] J.S.J Cheah, Pete Walker, Andrew Heath, and T.K.K.B Morgan. Evaluating shear test methods for stabilised rammed earth. In *Proceedings of Institution of Civil Engineers, Construction Materials*, pages 325–334, 2012.

[15] Daniela Ciancio and Joshua Gibbings. Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed earth samples. *Construction and Building Materials*, 28(1) :294–304, 2012.

[16] Collectif FFB. *Règles professionnelles pour la mise en oeuvre des enduits sur supports composés de terre crue.* Recherche et développement métier, 2012.

[17] B Contet. Caractérisation du comportement hygrothermique du pisé - Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Vaulx-en-Velin. Technical report, 2012.

[18] AC Corbin and C. E. Augarde. Investigation into the shear behavior of rammed earth using shear box tests. In *1st ICBBM Conference*, pages 93–98, Clermont Ferrand, France, 2015.

[19] A T Corey. The interrelation between gas and oil relative permeabilities. *Producers Monthly 19*, 19 :38–41, 1954.

[20] Olivier Coussy. *Poromechanics.* John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England, 2004.

[21] H Guillaud CRATerre, H.Houben. *Traité de construction en Terre.* Parenthèse edition, 2006.

[22] Yu-Jun Cui and Pierre Delage. L'eau dans les sols non saturés. *Techniques de l'ingérieur - Construction*, 1(C301) :0–20, 2000.

[23] M K Dixit, J L Fernandez-Solis, S Lavy, and C H Culp. Identification of parameters for embodied energy measurement : A literature review. *Energy and Buildings*, (42) :1238–1247, 2010.

[24] Michel Dysli. *Le gel et son action sur les sols et les fondations.* Ppur press edition, 1991.

[25] Ranime El Nabouch. *Comportement mécanique des murs en pisé soumis à la poussée progressive.* PhD thesis, Université de Savoie Mont Blanc, 2017.

[26] David Gelard. *Identification et caractérisation de la cohésion interne du matériau terre dans ses conditions naturelles de conservation.* PhD thesis, 2005.

[27] A. Hakimi, N. Yamani, and H. Ouissi. Rapport : Résultats d'essais de résistance mécanique sur échantillon de terre comprimée. *Materials and Structures*, 29(December) :600–608, 1996.

[28] Matthew Hall and Youcef Djerbib. Rammed earth sample production : context , recommendations and consistency. *Construction and Building Materials*, 18 :281–286, 2004.

[29] Matthew R. Hall, Rick Lindsay, and Meror Krayenhoff. *Modern earth buildings - Materials, engineering, construction and applications*. Woodhead, Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi, 2012.

[30] C.C. Hird and P.C.Y Yung. The Use of Proximity Transducers for Local Strains Measurments in Triaxial Tests. *Geotechnical Testing Journal*, 4(12) :292–296, 1989.

[31] H Houben and H Guillaud. *Earth Construction : A Comprehensive Guide (Earth Construction)*. Intermediate Technology Publications, London, 1994.

[32] P Jaquin. *Analysis of Historic Rammed Earth Construction*. PhD thesis, Dissertation, Durham University, 2008.

[33] P. Jaquin, D. G. Toll, D. Gallipoli, and C. E. Augarde. The strength of unstabilised rammed earth materials. *Géotechnique*, 59(5) :487–490, jan 2009.

[34] K Krefeld. Effect of shape of specimen on the apparent compressive strength of brick masonry. *Philadelphia, USA : Proceedings of the American Society of Materials*, 1938.

[35] D.M. Lilley and J Robinson. Ultimate strength of rammed earth walls with openings. In Thomas Telford, editor, *Proceedings of the ICE - Structures and Buildings*, pages 278–287, London, 1995.

[36] Vasilios Maniatidis and Peter Walker. *A Review of Rammed Earth Construction*. Number May. 2003.

[37] Lorenzo Miccoli and Daniel V Oliveira. Static behaviour of rammed earth : experimental testing and finite element modelling. *Materials and Structures*, page 14, 2014.

[38] Gernot Minke. *Building with earth*. Birkhäuser, 2006.

[39] Vincent Mollion. Etude de l'influence de l'eau sur les propriétés mécaniques du pisé. pages 1–115, 2009.

[40] M.O.P.T. Ministerio de Fomento. *Bases para el diseño y construccion con tapial*. 1992.

[41] J C Morel, A Mesbah, H Houben, and V Rigassi. *Compressed earth blocks, testing procedures*. ARSO, Belgium, 2000.

[42] J C Morel, A Mesbah, M Oggero, and P Walker. Building houses with local materials : means to drastically reduce the environmental impact of construction. *Building and Environment*, 36 :1119–1126, 2001.

[43] H. Nowamooz and C. Chazallon. Finite element modelling of a rammed earth wall. *Construction and Building Materials*, 25(4) :2112–2121, apr 2011.

[44] M Olivier. *Le matériau terre, compactage, comportement, application aux structures en blocs de terre*. PhD thesis, Dissertation, ENTPE, Université de Lyon, 1994.

[45] Myriam Olivier. *Le matériau terre : compactage, comportement, application aux structures en blocs de terre*. PhD thesis, 1994.

[46] R. Pusch and R. N. Yong. *Microstructure of smectite and engineering performance*. 2006.

[47] Hubert W. Schreier, Michael A. Sutton, and Jean-José Orteu. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. Springer Science+Business Media, New-York, 2009.

[48] Catarina Thormark. A low energy building in a life cycle — its embodied energy , energy need for operation and recycling potential. *Building and Environment*, 37 :429–435, 2002.

[49] UNESCO. Site historique de Lyon, 1998.

[50] O Vololonirina, M Coutand, and B Perrin. Characterization of hygrothermal properties of wood-based products – Impact of moisture content and temperature. *Construction and Building Materials2*, 63 :223–233, 2014.

[51] W. F. Woodruff and a. Revil. CEC-normalized clay-water sorption isotherm. *Water Resources Research*, 47(11) :n/a–n/a, 2011.