

# Etude de l'interaction sol-fondation sous l'effet du retrait/gonflement à l'aide d'un nouveau dispositif développé en laboratoire

Junior EPOH, Angèle DABIRET, Lamis MAKKI, Sahar HEMMATI, Myriam DUC, Philippe REIFFSTECK

Laboratoire GERS-SRO, Université Gustave Eiffel, Champs-sur-Marne, France

## RESUME

En France, le changement climatique (CC) a intensifié la fréquence et l'ampleur des canicules et des sécheresses estivales, avec des impacts significatifs sur les sols argileux. Ces derniers subissent des cycles de retrait-gonflement causant d'importants dégâts aux bâtiments et représentant la première cause d'indemnisation liée aux catastrophes naturelles. La présente étude s'inscrit dans le cadre du projet REMED RGA financé par l'ADEME et doit contribuer au développement de solutions innovantes pour réduire la vulnérabilité des bâtiments légers en agissant tant sur les sols que sur les structures. Pour cela, un dispositif expérimental innovant simulant les interactions sol-fondation sous cycles de séchage/humidification a été développé en laboratoire. Le dispositif permet de tester plusieurs scénarios simulant les effets du CC en procurant des informations sur l'évolution de la capacité portante des sols en fonction du chargement imposé. L'un des scénarios a été testé en faisant baisser la teneur en eau du sol. Les premiers essais réalisés sur l'argile verte de Romainville montrent l'intérêt du dispositif à fournir des paramètres d'entrée pour une modélisation numérique d'un système de fondation.

**Mots-clefs** Changement climatique, Retrait-gonflement, Interaction sol-fondation, Capacité portante.

## I. INTRODUCTION

Si la sécheresse peut avoir des conséquences de grande ampleur comme en 1976 où l'armée en France a été mobilisée, (INA, 2022), l'histoire du retrait-gonflement des argiles (RGA) sur le territoire français n'en demeure pas moins celle d'une lente prise de conscience d'un phénomène complexe, mais dont les conséquences peuvent s'avérer dramatiques. Bien que les connaissances scientifiques aient considérablement progressé, le défi reste entier : adapter le bâti existant et prévenir les futurs dommages liés à ce phénomène. La loi ELAN, adoptée en 2018, impose la réalisation d'une étude géotechnique avant la vente d'un terrain constructible ou la construction d'une maison sur un sol sensible au retrait-gonflement (aléa moyen ou fort) toutefois les mesures prises semblent insuffisantes pour endiguer les pathologies liées à ce phénomène. En effet, si l'article 68 de cette loi contribue à réduire la sinistralité pour les constructions neuves, il ne s'applique pas aux bâtiments existants, qui représentent pourtant la majorité des structures touchées lors des épisodes de sécheresse. De manière générale, les normes actuelles ne comportent

pas de prescriptions suffisamment efficaces pour endiguer le phénomène. L'épisode de sécheresse survenu en 2022 a remis en lumière l'ampleur du problème qui à l'heure actuelle affecte en aléa moyen ou fort environ 10,7 millions de maisons individuelles sur les 19,8 millions que compte le parc résidentiel français (MRN, 2024).

La nécessité d'une gestion efficace des risques liés au RGA pour garantir la durabilité des ouvrages reste un objectif prioritaire. Comprendre et prédire le comportement des sols argileux soumis à ces variations climatiques est essentiel pour développer des solutions adaptées et durables. Parmi les solutions, la réhydratation des sols sous fondation via un géodrain pour limiter les variations hydriques du sol et de facto ses variations volumétriques, a été étudiée par Djeran-Maigre I. et al., (2015). D'autres travaux ont repris ce principe notamment la solution MACH (maison confortée par humidification) développée par Mathon et al. (2018). D'autres solutions préventives pour les constructions neuves mais aussi existantes qui soient accessibles, peu coûteuses et applicables doivent aussi être développées. C'est donc cette nécessité qui a conduit à une mobilisation accrue des chercheurs et le lancement de plusieurs projets dont « Initiative Sécheresse » (CCR, 2023). Ce travail est réalisé dans le cadre du projet ADEME REMED RGA (2024-2028) financé par l'état dans le cadre du plan France 2030 opéré par l'ADEME. Le but de ce dernier est de développer de nouvelles stratégies de prévention et de remédiation du phénomène RGA avec la mise au point d'un dispositif expérimental inédit conçu pour étudier les interactions sol-fondation sous l'effet des cycles de séchage-humidification. Le développement de ce dispositif sous la forme d'un poinçon équipé de capteurs doit permettre de reproduire en laboratoire les conditions réelles auxquelles sont soumis les sols ce qui permettra de mieux comprendre les mécanismes du RGA et puis d'élaborer des stratégies de prévention adaptées. Les premiers essais réalisés sur l'argile verte de Romainville confirment la pertinence de cette approche pour fournir des paramètres à introduire dans des modèles numériques développés via COMSOL multiphysics par exemple.

Cet article présente la conception, la mise en œuvre et les premiers résultats obtenus avec ce dispositif. Après, la présentation des caractéristiques géotechniques et mécaniques du sol étudié, le principe et les éléments du modèle réduit seront présentés ainsi que les résultats des premiers essais.

## II. CARACTERISATION DU SOL TESTE

Le matériau testé est un sol reconstitué par mélange en laboratoire et dont la composition a été sélectionnée à la suite d'une étude préalable menée sur différents mélanges d'argile verte de Romainville (collectée sur un chantier en Ile de France) et de sable de Fontainebleau broyé désigné sous le nom de « millisil » et portant la référence NE 34 (SIBELCO, 2024). L'argile verte a été prélevée, séchée à 40°C pendant plus d'une semaine en étuve puis concassée au broyeur giratoire à l'aide de billes d'alumine. Cette réduction à l'état de poudre permet un mélange homogène avec le sable fin de Fontainebleau. Un broyeur mélangeur a ensuite permis de créer un mélange homogène constitué de 70% d'argile et de 30% de sable. Cette composition a été retenue pour sa meilleure représentativité des phénomènes de retrait gonflement des sols argileux tels que rencontrés sur les zones d'exposition forte/moyen à cet aléa. Les quantités nécessaires pour l'expérimentation ont été préparées en incorporant dans chaque kilogramme de sol reconstitué

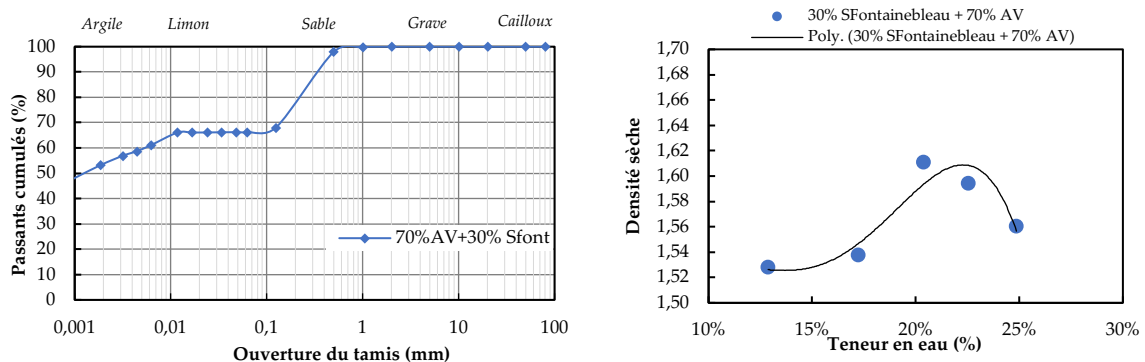
préalablement séché à 105° pendant 24h, la quantité d’eau requise pour atteindre la teneur en eau souhaitée correspondant à l’optimum Proctor du mélange (“NF EN ISO 17892-1,” 2014). Cette procédure a été adoptée afin d’apporter une bonne homogénéité au mélange. Le matériau une fois humidifié est placé dans des sachets hermétiques et laissé au repos pendant 24h dans une chambre froide avant d’être testé.

*A. Identification géotechnique*

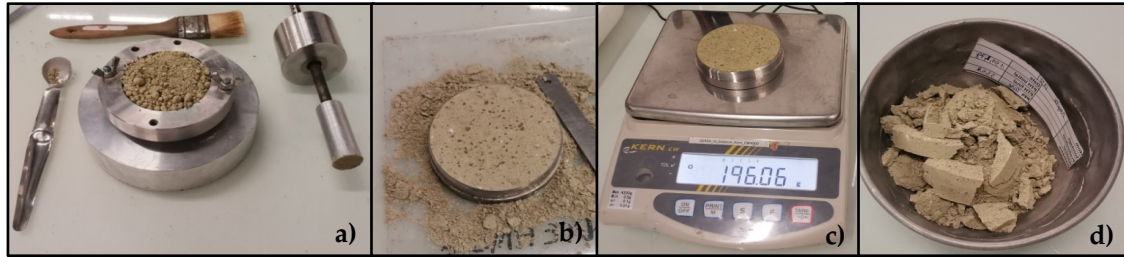
L’étude géotechnique du sol révèle une forte proportion de fines. Par ailleurs, le sol ayant été reconstitué à partir d’argile pure et de sable normalisé, la courbe granulométrique présente des paliers marqués dans les plages de tailles de grains non couvertes par ces deux fractions, traduisant l’absence de particules intermédiaires (FIGURE 1). La classification GTR (IDRRIM Institut Des Routes, 2024), basée sur la valeur de bleu et les limites d’Atterberg, positionne ce sol en classe F2, correspondant à des argiles plastiques (TABLEAU 1). Le compactage est effectué à l’aide d’une mini dame Proctor, en appliquant une énergie équivalente à celle utilisée dans l’essai Proctor normal (Ferber et al., 2009) sur des échantillons à cinq teneurs en eau différentes (FIGURE 2), a mis en évidence une densité sèche de l’ordre de 1.6 et une teneur en eau optimale élevée de 21%, illustrant le fort pouvoir absorbant de ces matériaux argileux. Ces propriétés sont particulièrement pertinentes pour l’étude des sols sous fondations, où les phénomènes de retrait-gonflement influencent directement la stabilité des ouvrages. Ce matériau est donc adapté pour analyser les interactions sol-fondation dans un contexte de dessiccation et d’humidification.

**TABLEAU 1. Caractérisation du sol testé**

Essai	Norme	Paramètre	Valeur
Analyse granulométrique	NF EN ISO 17892-4 (2018)	Particules < 63µm (Par sédimentation)	66 %
		Particules < 63µm	66 %
Limites d’Atterberg	NF EN ISO 17892-12 (2018)	Limite de liquidité $w_L$	55 %
		Limite de retrait $w_P$	22 %
		Indice de plasticité $I_P$	33
Valeur de bleu	NF EN 17542-3 (2022)	Valeur de bleu $V_{bs}$	5,5 meq/100g
Proctor normal (E=0.6MJ/m <sup>3</sup> )	NF P94-093 (2014)	Teneur en eau optimale $w_{opt}$	21 %
		Densité sèche optimale $Y_d$	1,6



**FIGURE 1. A gauche : courbe granulométrique ; A droite : courbe de compactage du mélange.**



**FIGURE 2.** Dispositif de compactage à la mini dame Proctor : a) sol mis en place dans la mini dame ; b) échantillon après compactage ; c) mesure de la masse humide ; d) échantillon étuvé

### B. Propriétés mécaniques et hydriques

L'étude des propriétés hydromécaniques du sol préparé à l'optimum Proctor décrit son comportement face aux sollicitations verticales et aux variations hydriques.

Les échantillons ont été soumis à des essais de compressibilité, de gonflement libre et de retrait (**TABLEAU 2**).

La contrainte de préconsolidation correspond à la plus grande pression qu'a subit un sol au cours de son histoire. L'essai œdométrique révèle une pression de préconsolidation de 200 kPa après le compactage avec l'énergie de compactage Proctor normal, ce qui peut influencer sa réponse sous charge (**FIGURE 3.a**).

La courbe de gonflement montre que le matériau présente une déformation importante sous faible charge, avec un potentiel de gonflement libre axial de 8.9% et une pression de gonflement équivalente à 130 kPa, obtenue en imposant un chargement croissant sur l'éprouvette qui subit le gonflement libre (**FIGURE 3.b**). La pression de gonflement correspond au chargement permettant de bloquer la déformation de gonflement du sol et donc de retrouver le volume initial de l'éprouvette (volume avant gonflement).

D'autre part, l'analyse du retrait met en évidence une forte variation volumique du sol lors de la dessiccation atteignant 11.6% et une limite de retrait de l'ordre de 12,5%, confirmant sa sensibilité aux variations hydriques (**FIGURE 4.a et 4.b**). Ces résultats soulignent la pertinence de ce matériau d'un point de vue mécanique pour l'étude du comportement des sols d'assise de fondations face au retrait gonflement des argiles.

**TABLEAU 2.** Propriétés mécaniques du sol testé

Essai	Norme	Paramètre	Valeur
Compressibilité	XP P94-091 (1995)	Indice de gonflement $C_s$	0,0015
		Indice de compression $C_c$	0,243
		Contrainte de préconsolidation $\sigma'_p$	200 kPa
Gonflement libre	ASTM D4546-21 (1985)	Amplitude de gonflement $\epsilon_g$	8,93%
		Pression de gonflement $\sigma_g$	130kPa
Retrait	XP P94-060-2, (1997)	Limite de retrait $w_r$	12,5 %
		Déformation de retrait $\epsilon_r$	11,6 %

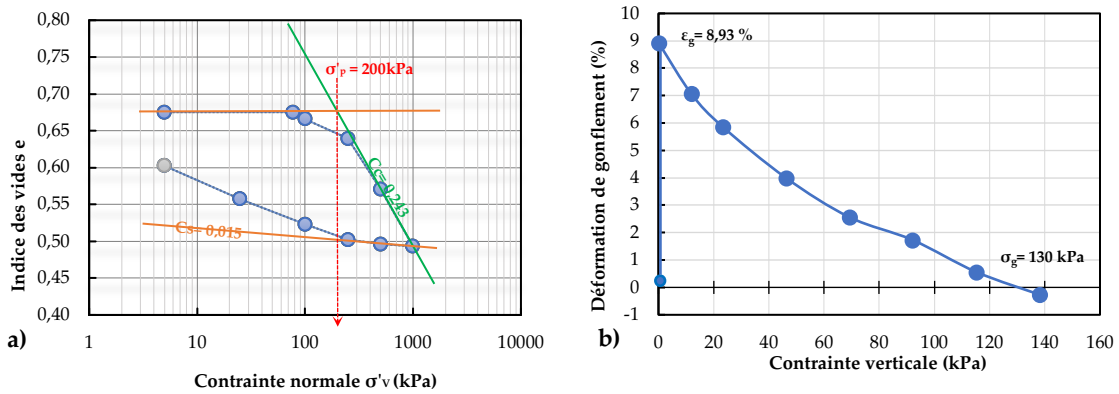


FIGURE 3. a) : courbe de compressibilité ; b) : courbe de gonflement

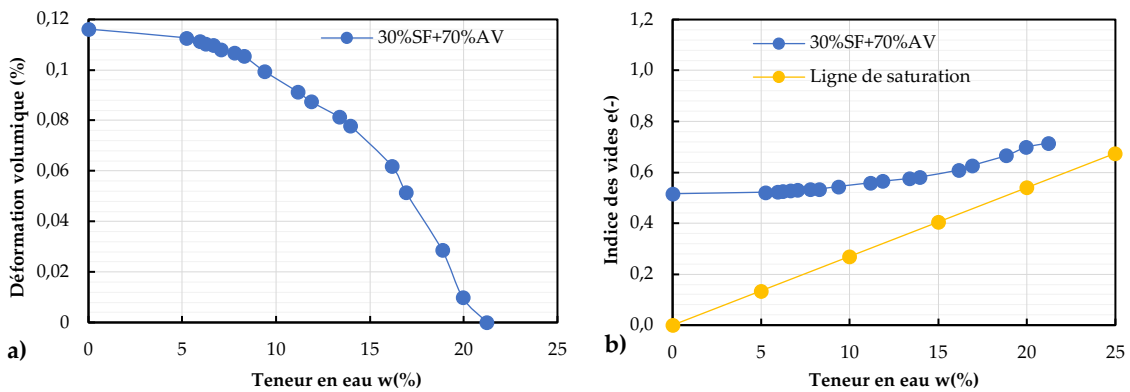


FIGURE 4. Courbes de retrait : a) relation entre la teneur en eau et la déformation volumique b) relation entre la teneur en eau et l'indice des vides (courbe d'état)

### III. DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET FONCTIONNEMENT DU MODELE REDUIT

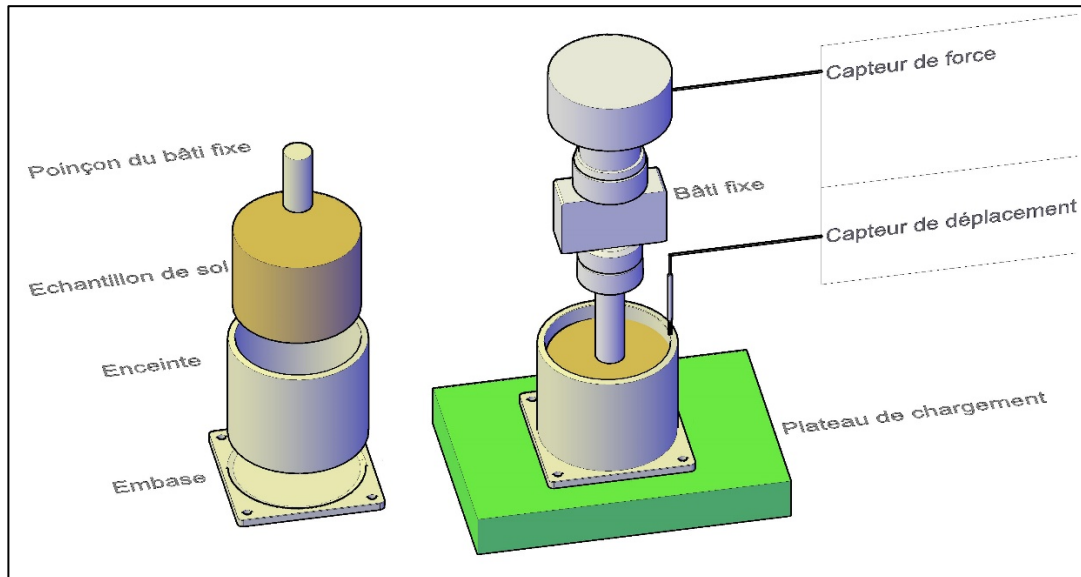
Le dispositif expérimental développé permet d'appliquer au sol diverses sollicitations hydriques et mécaniques pour simuler les phénomènes se produisant in situ sous fondation lors de séchage-humidification. Il doit permettre à terme de :

- mesurer/calculer les paramètres de type succion, déformation, teneur en eau sous chargement afin d'alimenter des calculs numériques et simuler des cas réels,
- mieux comprendre l'interaction sol fondation et l'évolution de la capacité portante des sols sous sollicitations hydriques.

#### A. Description du modèle réduit

Le dispositif, décrit sur la FIGURE 5 et dont les dimensions sont précisées en annexe (Annexe 1), est constitué d'une enceinte (c'est un conteneur cylindrique de 15x15 cm en acier inoxydable rigide dans lequel est mis en place le sol testé). Cette enceinte est conçue pour contenir les efforts générés par le sol sans subir de déformation), d'un bâti de chargement (une presse), d'un capteur de force disposé sur la poutre du bâti relié directement à un poinçon appliquant la contrainte sur le sol, d'un capteur de déplacement permettant de mesurer l'enfoncement du poinçon dans le sol, et d'une

centrale d'acquisition permettant de collecter en temps réel et en continu toutes les données expérimentales mesurées.



**FIGURE 5.** Éléments constitutifs du modèle réduit

Davantage de précisions sur ses dimensions sont présentées en annexe.

#### *B. Fonctionnement et mise en place du modèle réduit*

Le sol mis en place dans l'enceinte est compacté à l'optimum Proctor Normal selon les spécifications de la norme NF P94-093 (2014). L'ensemble est placé sur le plateau mobile du bâti de chargement et une membrane polymère est ensuite installée à la surface de l'enceinte pour réduire les échanges hydriques avec l'air ambiant. L'essai est programmé à l'aide du logiciel de contrôle, de mesure et d'acquisition des données SCM3000 de la société Microtest SA (Microtest SA, 2010).

Trois essais ont été réalisés :

- Essais de chargement à déplacement imposé : la valeur du déplacement total imposé qui est de 5 mm est atteinte au bout d'une durée de 5 heures (correspond à 10 paliers de 30 min) ;
- Essai de chargement par paliers : la valeur du chargement total imposé qui est de 1 MPa est atteinte au bout de dix paliers de chargement égaux de 74 N et d'une durée de 30 min chacun ;
- Retrait après chargement imposé : le chargement de 350 kPa imposé est atteint au bout de 4 paliers d'une durée de 30 min chacun, et la charge est ensuite maintenue constante sur 5 jours en enlevant la membrane à la surface.

## **IV. RESULTATS ET DISCUSSION**

L'analyse des trois essais permet de :

- déterminer la réponse du sol sous différentes conditions de chargement et de déformation, mettant en évidence son comportement mécanique différencié selon les sollicitations appliquées,

- déterminer le tassement supplémentaire lors d'un retrait sous un palier de chargement donné (inférieur à la charge de fluage).

- Essai de chargement à déplacement imposé - courbe orange :

Un déplacement total fixé à 5 mm a entraîné une contrainte maximale de 1 MPa. Cette valeur de déplacement est supérieure à la valeur de rupture conventionnelle définie par la norme concernant les fondations superficielles (NF P94-261, 2013) (10% de la largeur de la fondation = 3 mm), la valeur de la contrainte mesurée pour un déplacement imposé de 5 mm est de l'ordre de 1 MPa (0,74 kN) ; Lors de la réalisation de l'essai, la rupture n'est pas atteinte à 5 mm (courbe orange),

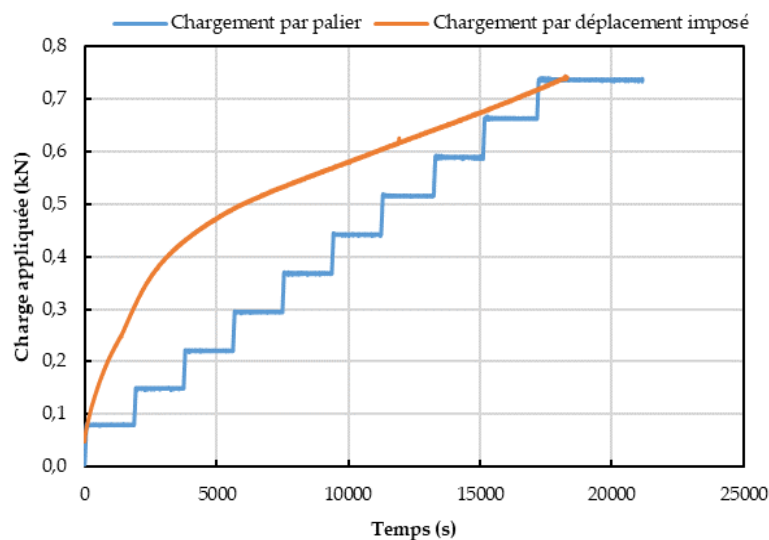
- Essai de chargement par palier - courbe bleue :

L'application progressive d'une charge totale de 0,74 kN a conduit à un tassement maximal de 3,28 mm, de même ordre de grandeur du tassement conventionnelle. Cette valeur met en évidence la différence de réponse du sol selon le type de l'essai de chargement réalisé par déplacement ou par palier.

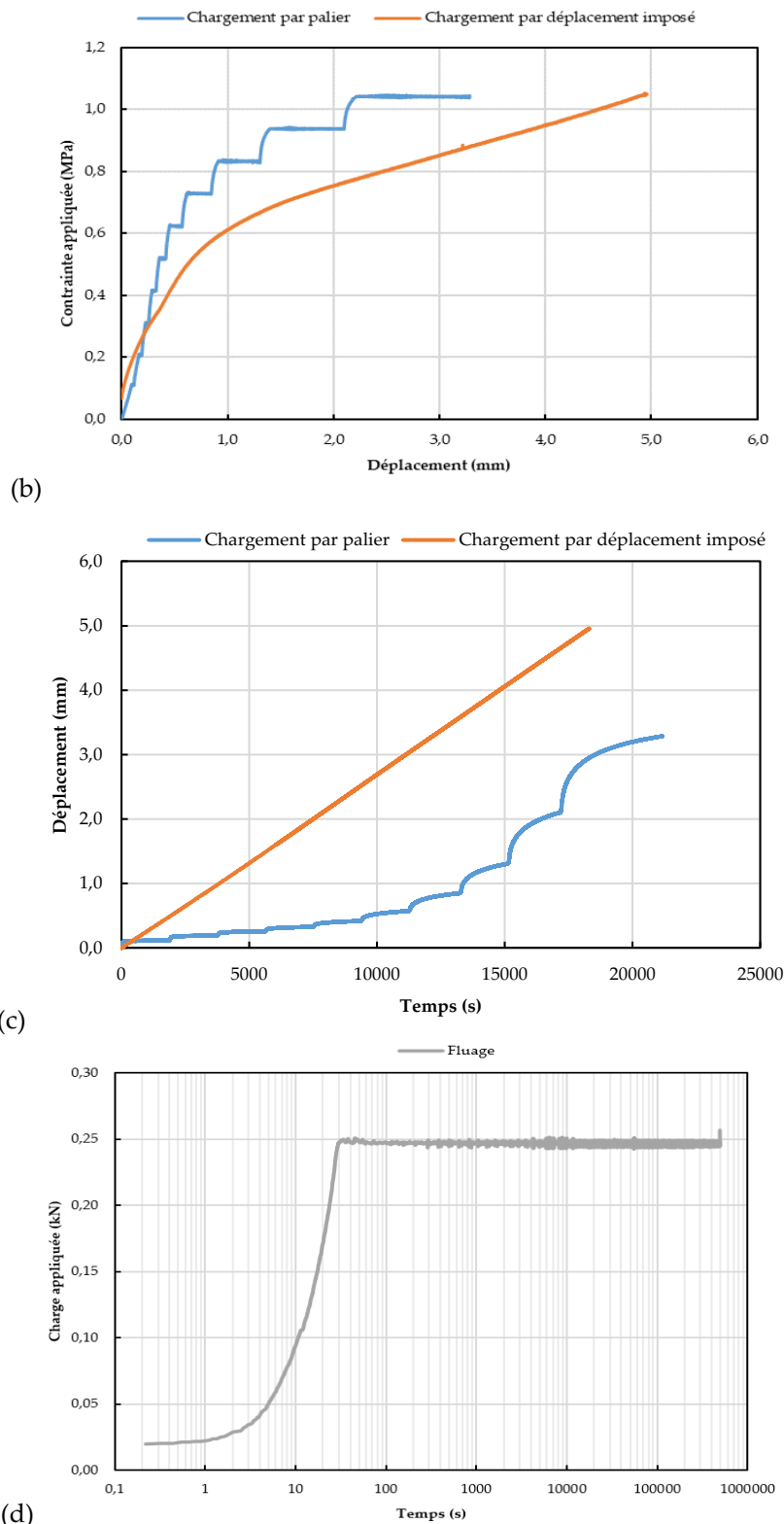
- Retrait après chargement imposé - courbe grise :

Après l'application d'un chargement initial de 350 kPa, inférieure à la charge de fluage déterminé par l'essai de chargement par palier ( $\approx 500$  kPa), un tassement supplémentaire de 4 mm dû au retrait du sol a été mesuré après cinq heures de séchage. Cette valeur est supérieure à la valeur conventionnelle de la rupture définie par la norme NF P 94-261, et présente un comportement typique des matériaux argileux sensibles au phénomène de retrait-gonflement.

Ces résultats montrent une différence de réponse de sol selon le type d'essai de chargement réalisé, ainsi que la nécessité de déterminer l'évolution de la portance du sol lors de retrait afin de la prendre en compte pour le dimensionnement des fondations superficielles fondées sur les sols argileux sensibles au retrait-gonflement.



(a)



**FIGURE 6.** (a) Courbe d'évolution du chargement en fonction du temps, (b) Courbe contrainte-déplacement, (c) Courbe d'évolution du déplacement en fonction du temps (d) Courbe de chargement sous retrait

## V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail portant sur l'étude de l'interaction sol -fondation a permis de mettre en exergue le potentiel de représentativité du dispositif développé. Les premiers résultats établissent sa capacité à traiter différentes sollicitations hydromécaniques et à dégager des conclusions qui peuvent améliorer les connaissances sur le comportement des sols d'assise des fondations face au retrait-gonflement des argiles. Le dispositif ainsi que les essais qu'il permet de réaliser seront simulés grâce à un modèle numérique, permettant une comparaison directe entre les résultats expérimentaux et numériques ; la modélisation permettra également de balayer un plus large de champ de possibilités. Des tests de répétabilité de la méthode ainsi que la mise en place de nouveaux scénarios sont entre autres, les prochaines étapes de ces travaux.

## REFERENCES

- ASTM D4546-21 Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils, 1985.
- CCR, 2023. RAPPORT FINANCIER. Caisse Centrale de Réassurance. <https://www.ccr.fr/-/ccr-rapport-financier-2023>
- Djeran-Maigre I., Pothier C., Vacherie S., 2015. Solution constructive testée sur démonstrateur pour limiter l'impact du retrait gonflement sur le bâti léger, Actes du Symposium International SEC 2015, Champs-sur-Marne, pp. p351–p371.  
[https://www.ifsttar.fr/fileadmin/user\\_upload/editions/lcpc/Actes/Actes LCPC ACTSEC15.pdf](https://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/lcpc/Actes/Actes LCPC ACTSEC15.pdf)
- Ferber, V., Auriol, J.C., Magnan, J.P., Cui, Y.-J., 2009. Effet des variations d'état hydrique dans les sols fins compactés : Quelles conséquences pour la conception des talus et des bases de remblai ? Bull. Lab. Ponts Chaussées pp 63-88.
- IDRRIM Institut Des Routes, des R. et des I. pour la M., 2024. Guide des terrassements des remblais et des couches de forme : Fascicule n°1 - Principes généraux / Fascicule n° 2 - Annexes techniques - Édition 2024. Réf. Réf. 216 p.
- INA, 2022. « 1976 : la France paralysée par la sécheresse » | <https://www.ina.fr/ina-eclairage-actu/1976-la-france-paralysee-par-la-secheresse>
- Mathon, D., Dore, L., Ameer, L.I., 2018. Réparer une maison en arrosant ses fondations – le projet MACH. <https://www.ifsttar.fr/collections/ActesInteractifs/AII3/pdfs/163686.pdf>
- Microtest SA, 2010. SCM3000 Software [WWW Document]. Microtest SA. URL <https://www.microtest-sa.es/en/products/testing-software/scm3000-software/>
- MRN, 2024. Nouvelle édition du Répertoire des Référentiels de Résilience du bâti aux aléas naturels. Mission des Risques Naturels.
- NF EN 17542-3 Terrassements - Essais géotechniques en laboratoire - Partie 3 : Valeur de bleu de méthylène VBS d'un sol ou d'une roche, 2022.

NF EN ISO 17892-1 Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 1 : détermination de la teneur en eau, 2014.

NF EN ISO 17892-4 Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 4 : Détermination de la distribution granulométrique des particules, 2018.

NF EN ISO 17892-12 Reconnaissance et essais géotechniques — Essais de laboratoire sur les sols — Partie 12 : Détermination des limites de liquidité et de plasticité, 2018.

NF P94-093 Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié, 2014.

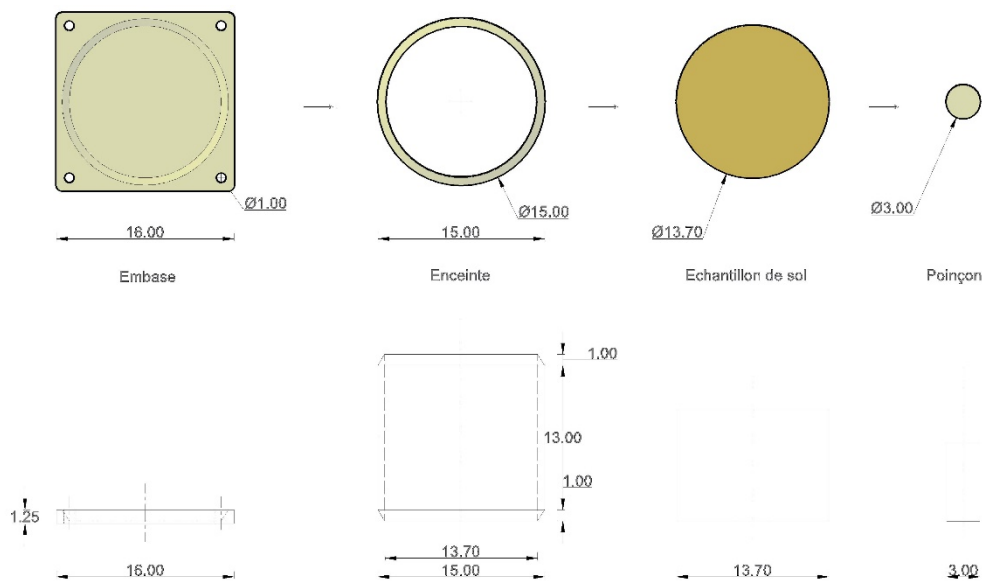
NF P94-261 Justification des ouvrages géotechniques — Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 — Fondations superficielles, 2013.

SIBELCO, 2024. Silica Sand NE 34.

XP P94-060-2 Sols : reconnaissance et essais - Essai de dessiccation - Partie 2 : détermination effective de la limite de retrait sur un prélèvement non remanié., 1997.

XP P94-091 Sols : reconnaissance et essais - Essai de gonflement à l'oedomètre - Détermination des déformations par chargement de plusieurs éprouvettes., 1995.

## ANNEXE: Dimensions du modèle



Annexe 1. Dimensions du dispositif en cm