

# Comportement des sols argileux lors du séchage sous chargement mécanique

## Coupled drying and mechanical loading effects on clay soil response

Junior EPOH\*, Lamis MAKKI, Sahar HEMMATI, Myriam DUC, Philippe REIFFSTECK

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

*\*junior-dimitri.epoh-kollo@univ-eiffel.fr*

**RESUME :** Le changement climatique accentue la fréquence et l'intensité des sécheresses, renforçant les désordres sur les bâtiments, lesquels sont liés au retrait-gonflement des argiles. Or le phénomène de retrait reste peu étudié pour décrire le comportement des sols argileux intacts sous les fondations d'un bâtiment. Les travaux présentés, réalisés dans le cadre du projet ADEME REMED RGA visent le développement d'un essai de retrait sous chargement mécanique, conçu pour reproduire de manière plus représentative les conditions rencontrées in situ. Contrairement à l'essai de retrait classique, limité à l'évaluation des variations massiques et volumiques lors du séchage, cette approche prend en compte l'influence directe de la descente de charges du bâtiment sur la réponse au retrait du sol. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes intactes de l'argile verte de Romainville, l'une des principales formations géologiques du bassin Parisien. Les premiers résultats mettent en évidence l'influence marquée du chargement mécanique, à la fois sur le chemin de séchage et sur l'amplitude du retrait observé. Plus précisément, la présence d'une contrainte conduit à un retrait total plus important par rapport à l'essai de retrait classique non chargé. Ces observations suggèrent que le poids appliqué par le bâtiment modifie significativement la réponse hydromécanique du sol lors des périodes de dessiccation. Cet essai doit permettre à terme une meilleure compréhension des interactions hydromécaniques entre séchage et contraintes appliquées et constitue une étape clé vers une représentation plus réaliste du comportement des sols argileux intacts situés sous les fondations.

**ABSTRACT:** Climate change is increasing the frequency and intensity of droughts, thereby exacerbating the damage to buildings caused by clay shrinkage and swelling. However, there is a paucity of research on shrinkage to describe the behavior of intact clay soils under building foundations. The work presented here was carried out as part of the ADEME REMED RGA project, with the aim of developing a shrinkage test under mechanical loading. This test has been designed to reproduce the conditions encountered in situ in a more representative manner. In contradistinction to the conventional shrinkage test, which is confined to the evaluation of mass and volume variations during the drying process, this methodology incorporates the building load application on the soil's shrinkage response. The tests were carried out on intact samples of Romainville green clay, which is one of the main geological formations in the Paris basin. The initial results indicate the significant impact of mechanical loading on both the drying path and the amplitude of the observed shrinkage. To elaborate further, an increase in the applied stress results in a greater total shrinkage, in comparison to the conventional unloaded shrinkage test. These observations suggest that the weight of the building significantly alters the hydromechanical response of the soil during periods of desiccation. This test should ultimately provide a better understanding of the hydromechanical interactions between drying and applied stresses and is a key step towards a more realistic representation of the behavior of intact clay soils located under foundations.

**Mots-clés :** Retrait-gonflement des argiles (RGA), Changement climatique, Sécheresse, Essai de retrait sous chargement mécanique, Prévention/Remédiation.

## 1 INTRODUCTION

Le changement climatique est marqué par la multiplication des épisodes de sécheresse. Dans ce contexte qui est désormais le nôtre, la question du retrait-gonflement des argiles (RGA) atteint une ampleur nouvelle, avec à son actif des coûts considérables à l'échelle mondiale. On note en moyenne annuellement pas moins de 15 milliards de dollars aux États-Unis, 400 million de livres au

Royaume-Uni, 150 million de dollars australiens en Australie, et 100 million de rands en Afrique du Sud, pour ne citer ceux-là (Jones, Banks et Jefferson, 2020; Fondjo, Theron et Ray, 2021; Almuaythir *et al.*, 2025; British Geological Survey, 2025).

En France, l'épisode survenu en 2022 (sécheresse longue et intense) a remis en lumière l'ampleur du problème, avec un record historique de 3,5 milliards d'euros de dommages indemnisés par le régime

CATNAT (Figure 2) (MRN, 2024). A l'heure actuelle, le RGA affecte en aléa moyen ou fort environ 12,1 millions de maisons individuelles sur les 19,8 millions que compte le parc résidentiel français, soit 61,5 % des maisons individuelles (Ministère de la Transition écologique, 2025).

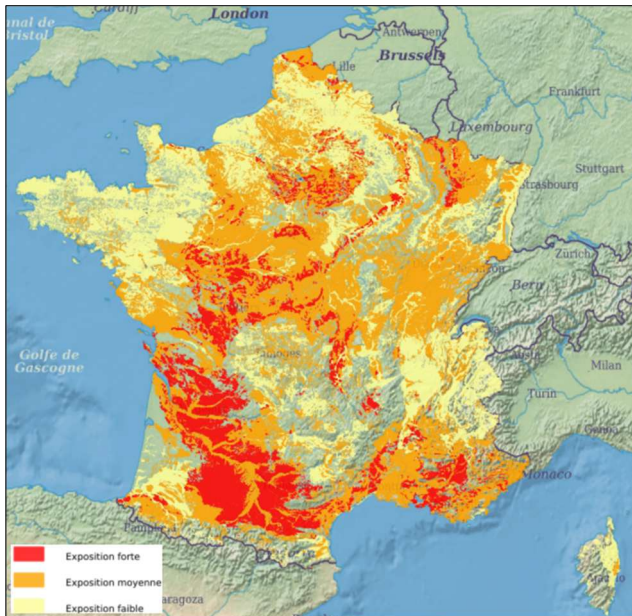


Figure 1: carte d'exposition au RGA en France (BRGM, 2025): les couleurs jaune, orange et rouge correspondent respectivement aux niveaux d'exposition faible, moyen et fort

Le phénomène représente désormais la seconde cause d'indemnisation des catastrophes naturelles après les inondations, avec plus de 25 Milliards d'euros au compteur depuis 1989, et un coût annuel moyen s'élevant désormais à 697 millions d'euros (BRGM, 2018; ONRN, 2018).

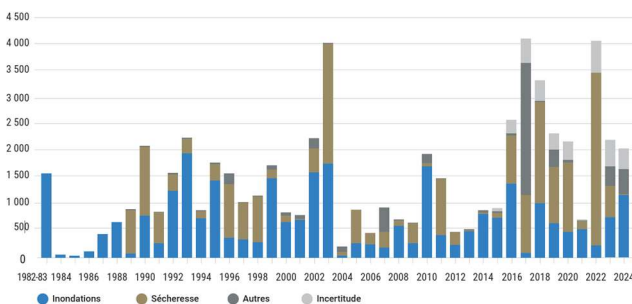


Figure 2: la sinistralité catastrophes naturelles en France de 1982-2024 (CCR, 2025)

Ces montants s'expliquent par la nature même des sols argileux. En effet, la prise en compte de leur répartition nationale, associée aux données de sinistralité à l'échelle communale, permet d'élaborer la carte d'exposition présentée en Figure 1, laquelle rend compte d'une forte exposition de l'ensemble du

territoire aux phénomènes liés au RGA. Les argiles ont la particularité de modifier leur volume en fonction de leur teneur en eau : elles se rétractent lorsqu'elles sèchent et gonflent lorsqu'elles se réhumidifient. Ce comportement entraîne des variations saisonnières de volume sous les fondations, variations qui affectent à la fois la géométrie du sol et ses propriétés mécaniques. Avec le changement climatique, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses devrait augmenter dans les années à venir (Chen *et al.*, 2023) augmentant ipso facto la vulnérabilité des constructions.

En France, l'intérêt pour les phénomènes de retrait et de gonflement des argiles s'est développé à la fin des années 1970, notamment à travers les travaux menés au CEBTP. Parmi les contributions fondatrices, Philipponnat (1991) a proposé une méthode d'estimation des mouvements verticaux d'un sol consécutifs de la transition entre deux profils hydriques, notés Ph1 et Ph2. A la suite d'ARGIC 1 (2011), les travaux du projet ARGIC 2 (2015) ont notamment montré via un démonstrateur en vraie grandeur posé sur des vérins simulant un tassement du sol, que le strict respect des normes de construction françaises permet de limiter efficacement la vulnérabilité des bâtiments neufs. Plus récemment, Kazmierczak *et al.* (2016) ont développé un dispositif basé sur un microscope électronique à balayage environnemental (MEBE), permettant de déterminer en une journée la courbe de retrait sur de micro éprouvettes d'argile.

Les essais de retrait (quelle que soit leur échelle) restent donc indispensables pour comprendre le comportement des sols sensibles lorsqu'ils subissent des variations de teneur en eau. L'essai de retrait classique (XP P94-060-2), qu'il soit réalisé en mode libre ou de manière automatisée, consiste à suivre l'évolution du volume et de la masse d'un échantillon au cours de son séchage. Il permet ainsi d'établir la relation entre l'indice des vides et la teneur en eau. L'introduction d'une version automatisée de cet essai a d'ailleurs amélioré la précision du tracé de la courbe de retrait et permis de déterminer la cinétique de séchage (Makki *et al.*, 2008).

De nombreuses études ont été menées afin notamment d'identifier les profils et les phases typiques des courbes de retrait, ceci étant, des méthodes de caractérisation plus fines du retrait sont nécessaires pour approcher le phénomène de manière plus réaliste et en tenir compte dans les calculs de dimensionnement des fondations ou pour estimer les effets escomptés. Dans les conditions réelles des ouvrages géotechniques, les sols ne sont pas uniquement soumis à des variations hydriques : ils doivent également supporter des charges mécaniques

provenant des structures. Or, le comportement des sols sous l'effet combiné du séchage et du chargement reste encore très peu étudié, alors même que ce couplage contrôle directement la réponse des sols d'assise des fondations.

À la suite des premiers travaux menés sur ce sujet par Makki *et al.* (2008), cet article propose d'examiner les effets du couplage entre variations hydriques et chargement mécanique, à travers l'étude comparative de deux matériaux.

Après avoir présenté les matériaux testés et leurs propriétés, le dispositif comprenant un œdomètre et des bagues spécialement conçues pour répondre aux besoins de cette étude sera présenté, avant pour finir, de décrire et comparer l'évolution avec et sans contrainte mécanique, du volume et de l'indice des vides des éprouvettes à partir des premiers essais obtenus.



Figure 3. Sites de prélèvement des échantillons testés avec à gauche celui de l'argile verte de Romainville (coordonnées 48.83878° N, 2.59369° E) et à droite celui de la marne bleue d'Argenteuil (coordonnées 48.93167° N, 2.63919° E) (source : ©2025 Google)

## 2 MATERIEL ET METHODES

### 2.1 Matériaux

Cette étude est menée avec deux matériaux prélevés dans le département de Seine-et-Marne :

- de l'argile verte de Romainville (AVR), collectée sur le campus Cité Descartes de l'Université Gustave Eiffel à Champs-sur-Marne,
- de la marne bleue d'Argenteuil (MBA), extraite en front de taille dans une carrière de gypse exploitée par la société Placo à Villeparisis (Le Pin).

La Figure 3 montre la localisation des sites de prélèvement des matériaux testés.

### 2.2 Propriétés des matériaux

Les sols testés sont tous deux classés F4 selon la norme française NF P11-300, ce qui correspond dans les deux cas à la catégorie des argiles et argiles marneuses très plastiques.

Tableau 1. Propriétés des sols testés

Paramètre	Norme	AVR	MBA	Unité
Fraction de fines	NF EN ISO 17892-4	96	98	%
$C_{63\mu m}$				
Fraction d'argile	NF EN ISO 17892-4	67	38	%
$C_{2\mu m}$				
Indice de Plasticité ( $I_p$ )	NF EN ISO 17892-12	56	46	-
Valeur au Bleu ( $V_{BS}$ )	NF EN 17542-3	13.5	5.5	g/100g
Masse volumique ( $\rho$ )	NF EN ISO 17892-2	1895	2070	kg/m <sup>3</sup>
Teneur en eau (w)	NF EN ISO 17892-1	27%	30	%
Teneur en carbonates ( $C_{CaCO_3}$ )	(NF P94-048)	3.13	34.4	%

Résumée dans le Tableau 1, la caractérisation géotechnique des sols testés a révélé un indice de plasticité ( $I_p$ ) et une valeur au bleu de méthylène ( $V_{BS}$ ) élevés, atteignant respectivement d'une part 56 et 13,5 g/100 g pour l'argile verte de Romainville (AVR) et d'autre part 46 et 5,5 g/100 g pour la marne bleue d'Argenteuil (MBA). Ces valeurs indiquent ainsi un fort potentiel de changement volumique sous l'effet des variations hydriques.

### 2.3 Démarche expérimentale

#### 2.3.1 Matériel et appareillage

Pour appliquer les chargements mécaniques, des œdomètres automatiques ont été utilisés. Ces appareils permettent d'imposer une charge constante sur l'éprouvette tout en mesurant avec précision ses déformations à l'aide de capteurs de déplacement.

L'ensemble du dispositif est connecté à un ordinateur, ce qui permet un enregistrement continu et automatique des données pendant toute la durée de l'essai.

Pour répondre aux besoins spécifiques de cette étude, de nouvelles bagues ont été spécialement conçues afin de remplacer les bagues œdométriques classiques (Figure 4). Leur particularité réside dans la présence d'ouvertures latérales qui permettent non seulement de maintenir l'échantillon confiné lors de l'application du palier de chargement comme dans un œdomètre traditionnel, mais aussi d'autoriser son séchage pendant l'essai. Pour des raisons mécaniques, nous avons visé une surface totale d'ouverture de 20% en première approche. En début d'essai, la zone de séchage correspond donc aux ouvertures latérales de la bague (lesquelles représentent environ 20% de la surface latérale totale), cependant peu de temps après le début de l'essai, l'échantillon se décolle latéralement de la bague et le séchage se poursuit ainsi sur toute la surface latérale. La bague n'affecte donc que légèrement le séchage et ceci en début d'essai. Enfin, un chapeau permet de transmettre la contrainte axiale (verticale) sur la face supérieure de l'éprouvette ; il est doté d'une pierre poreuse sur la surface de contact avec l'éprouvette (face supérieure), ce qui permet le séchage.



Figure 4. Eprouvette en place dans les bagues spéciales avec ouvertures latérales conçues pour l'essai de retrait sous chargement : a- en début d'essai, b- en fin d'essai

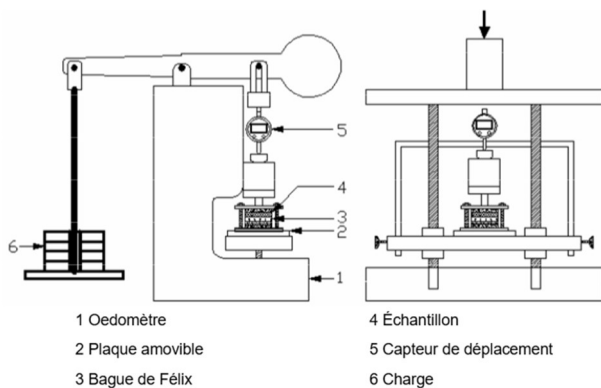


Figure 5. Appareillage pour l'essai de retrait sous charge (MAKKI et al. 2008)

Grâce au dispositif de la Figure 5, il est possible d'étudier simultanément le comportement mécanique du sol sous charge constante et l'évolution de son volume pendant le séchage, offrant de ce fait une approche complète pour analyser le retrait des sols argileux dans des conditions plus réalistes et plus représentatives des phénomènes rencontrés sous les fondations.

### 2.3.2 Préparation des échantillons

Les prélèvements à la pelleuse ont été réalisés sous forme de blocs de sol intacts d'environ 30 cm de côté. Dès leur extraction, ces blocs ont été protégés de manière hermétique au moyen de sacs étanches et conservés dans une chambre froide. Cette précaution permet de conserver leur teneur en eau naturelle et d'éviter tout dessèchement ou modification de leurs propriétés.

Les essais ont ensuite été effectués sur des échantillons cylindriques de 30 mm de hauteur et 50 mm de diamètre, découpés directement dans ces blocs à l'aide d'une trousse coupante adaptée. La mise en forme des échantillons a été réalisée avec le plus grand soin afin de préserver au mieux l'état naturel du sol et de limiter tout remaniement lié à la préparation.

### 2.3.3 Mode opératoire

Dans le cadre de ces travaux, deux niveaux de contrainte mécanique ont été considérés pour chaque sol afin d'analyser l'influence de la présence d'un chargement sur le comportement au retrait. Ces niveaux de contrainte ont été choisis de manière à représenter les descentes de charges typiques des maisons pavillonnaires ; ils sont les suivants :

- Argile verte de Romainville : contrainte de 0 kPa (sans chargement mécanique) et de 50 kPa
- Marne bleue d'Argenteuil : contrainte de 0 kPa et de 55 kPa.

Pour les essais réalisés sous chargement mécanique, deux éprouvettes de masses initiales quasi identiques sont testées simultanément. La première éprouvette a été soumise à l'essai de manière continue, sans aucune interruption, afin de garantir une mesure stable et représentative de l'évolution des déformations. La seconde éprouvette, en revanche, a été retirée brièvement à intervalles réguliers pour permettre la mesure directe de sa masse au cours du séchage. Cette approche permet de suivre précisément l'évolution de la teneur en eau tout en limitant les perturbations du dispositif de mesure des déformations. Au début de l'essai, le séchage du sol s'effectue principalement à travers les ouvertures latérales. Progressivement, le retrait du sol provoque son décollement des parois de

la bague, ce qui permet alors un contact direct avec l'air sur l'ensemble de sa surface latérale.

Les essais sans chargement mécanique ont été réalisés selon la procédure d'un essai de retrait libre en version automatisée développée au LCPC par Makki (2009). Cette méthode, équivalente à l'essai normalisé de retrait libre, permet une acquisition automatique, continue et précise de la déformation et de la masse de l'échantillon testé.

À l'issue de chaque essai, lorsque la masse des éprouvettes se stabilise, indiquant l'atteinte d'un état proche de l'équilibre hydrique, les éprouvettes sont placées à l'étuve afin d'assurer un séchage complet. Les paramètres finaux des échantillons, notamment le diamètre, la hauteur et la masse sèche, sont alors mesurés. La déformation latérale a été mesurée au moyen d'un pied à coulisse et la variation de hauteur, directement par l'œdomètre ; la variation de volume est ensuite déduite par calcul.

L'ensemble des mesures, combinées aux données acquises tout au long des essais, a permis de tracer les courbes de retrait, établissant la relation entre la teneur en eau et l'indice des vides (ou, de manière équivalente, la variation volumique). Les mesures de déformation sont réalisées par les capteurs et les dispositifs de mesure avec une précision allant du dixième au centième de millimètre ; les paramètres combinés ont été fournis avec une résolution du millimètre ; bien sûr, la variabilité propre au matériau peut entraîner des variations supérieures.

### 2.3.4 Durée des essais

Afin de garantir une cohérence méthodologique la durée des essais a été fixée à 10 jours pour l'ensemble des configurations étudiées avec une température maintenue à 20 °C. Cette durée correspond à un état pour lequel l'évolution de la masse des éprouvettes devient très faible, voire négligeable, indiquant que les

échanges hydriques avec l'environnement sont largement stabilisés.

Pour les essais de retrait libre, les mesures sont réalisées toutes les 5 minutes grâce à l'appareil automatisé.

Pour les essais de retrait sous charge, les mesures sont réalisées toutes les 24h.

## 3 RESULTATS

### 3.1 Essais de retrait libre

Les courbes de retrait libre sans chargement mécanique de la Figure 6, montrent une nette différence de comportement entre l'argile verte et la marne bleue.

Selon la norme française encadrant l'essai de retrait, la limite de retrait effective  $W_{Re}$  correspond à la teneur en eau située à l'intersection des pentes des deux segments caractéristiques de la courbe. Elle est facilement identifiable et vaut 13% pour l'argile verte, dont la courbe présente deux phases bien distinctes. En revanche, pour la marne bleue, la courbe présente trois segments, ce qui rend l'identification de cette limite moins aisée et illustre ainsi un comportement plus complexe. Sa limite de retrait physique est autour de 11%.

On observe également que la marne bleue présente un retrait (égal à 11%) globalement plus faible que celui de l'argile verte (21%), bien que son état initial soit moins dense (soit un indice des vides de 0,83 comparé à 0,75) avec une teneur en eau plus élevée (soit 30% comparée à 27%). Une explication possible réside dans la présence de carbonates (calcite et dolomite) dans la marne : ces minéraux jouent un rôle d'inhibiteur du retrait en limitant la contraction de la matrice argileuse (squelette rigide) au cours du séchage.

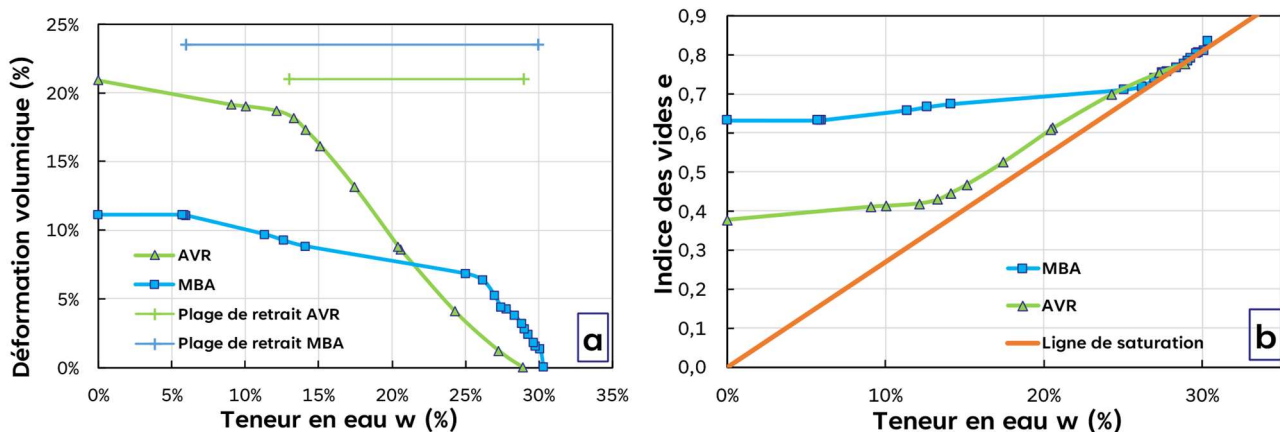


Figure 6 . Courbes de retrait libre des deux matériaux : a- les variations volumiques en fonction de la teneur en eau, b- l'indice des vides en fonction de la teneur en eau

## 3.2 Essais de retrait sous charge

### 3.2.1 Marne bleue d'Argenteuil

Les résultats obtenus sur les échantillons de marne bleue lors de l'essai de retrait sous chargement sur la Figure 7 montrent que son comportement au retrait est peu sensible à la charge mécanique appliquée. En effet, la limite de retrait demeure quasiment inchangée et proche de 6%, que l'échantillon soit soumis ou non à un chargement. La forme générale de la courbe de retrait, caractérisée par la présence de trois zones distinctes, se maintient sous chargement.

La persistance de cette structuration en trois domaines suggère que les mécanismes de retrait propres à la marne bleue ne sont pas fondamentalement modifiés par l'application de la charge.

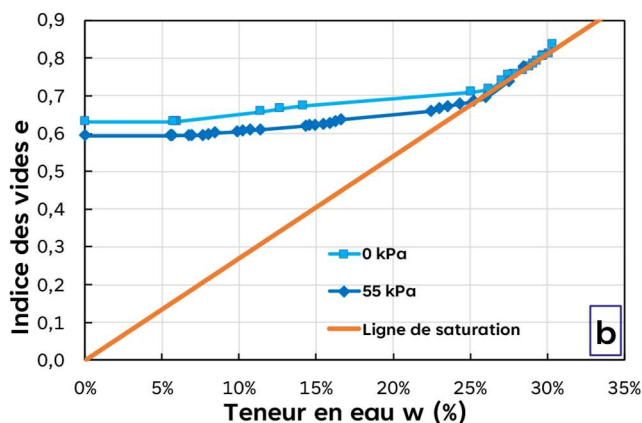
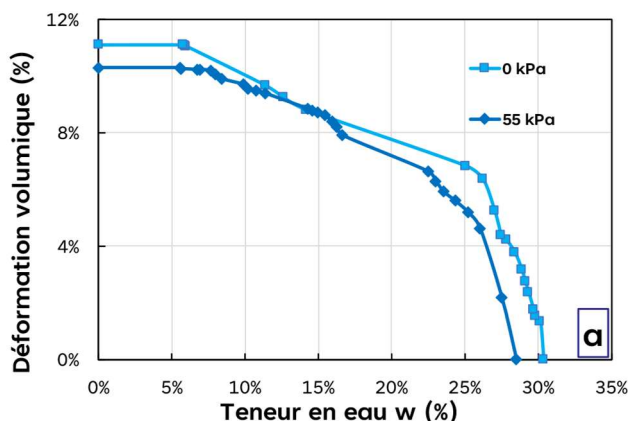


Figure 7. Courbes de retrait sous charge de la marne bleue d'Argenteuil : a- les variations volumiques en fonction de la teneur en eau, b- l'indice des vides en fonction de la teneur en eau

### 3.2.2 Argile verte de Romainville

La comparaison des essais avec et sans chargement sur l'AVR (Figure 8) met en évidence l'influence de la présence d'une contrainte mécanique sur le comportement de retrait du sol.

Pour les fortes teneurs en eau (début du séchage), les courbes suivent un chemin de séchage similaire, traduisant un comportement comparable tant que le sol reste suffisamment humide. À partir d'un certain niveau de dessiccation, les trajectoires divergent et empruntent des chemins distincts selon que l'éprouvette est chargée ou non. On note une augmentation notable de la plage de retrait, la limite de retrait passant d'environ 13 % pour l'essai sans charge à 7 % pour l'essai avec charge.

Ce comportement peut s'expliquer par l'effet du chargement sur la structure du sol et l'évolution de sa porosité au cours du séchage. La contrainte mécanique tend à maintenir les contacts intergranulaires en

Les différences observées peuvent s'expliquer de deux manières :

- un effet mécanique initial, correspondant au tassement induit lors de la mise en place du chargement, qui modifie légèrement l'état structural du matériau sans altérer sa réponse au séchage.
- un effet de la teneur en eau initiale sensiblement différente entre les deux éprouvettes.

Ces observations indiquent ainsi que pour la marne bleue, le séchage constitue le mécanisme prédominant du retrait, tandis que l'influence de la présence d'un chargement mécanique reste secondaire. Le comportement volumique du matériau est donc principalement gouverné par l'évolution de sa teneur en eau, plutôt que par la charge appliquée.

favorisant les réarrangements structuraux, ce qui prolonge la capacité du sol à se contracter volumétriquement jusqu'à de faibles teneurs en eau.

Par ailleurs, la présence d'un chargement conduit à une déformation volumique globale plus importante que celle observée en conditions libres. On passe de 21% de potentiel de retrait à 28%. Ce comportement peut s'interpréter par l'effet combiné du chargement mécanique et des forces capillaires générées lors de la dessiccation. Ainsi, au lieu de stabiliser progressivement son volume, le sol reste soumis à un état de contrainte qui favorise la poursuite des réarrangements internes et la fermeture des pores, même à des teneurs en eau faibles. Dans cette configuration, la courbe de retrait reste plus longtemps parallèle à la ligne de saturation dans le sens du retrait avant de s'en écarter.

Ces résultats confirment que le chargement mécanique joue un rôle déterminant dans le processus de retrait, en modifiant à la fois l'amplitude des déformations et le domaine hydrique dans lequel elles se développent.

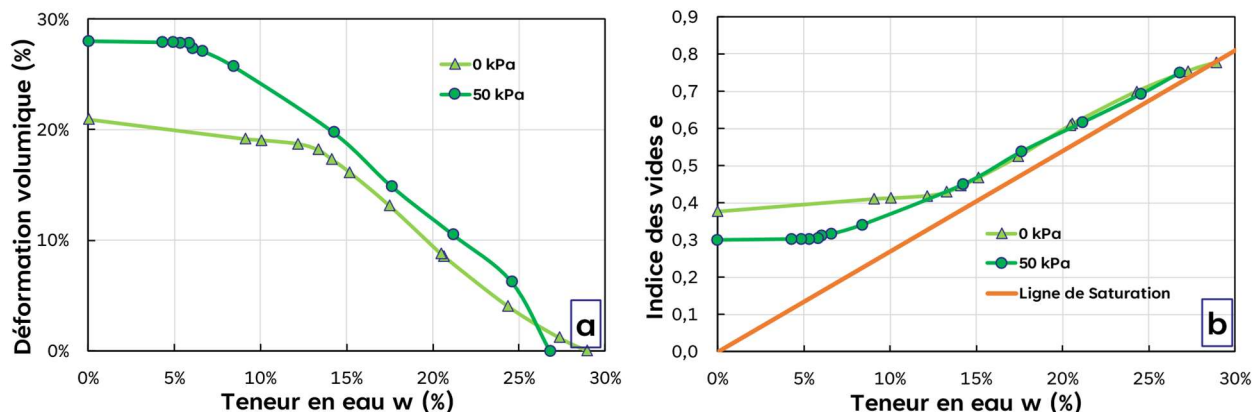


Figure 8. Courbes de retrait sous charge de l'argile verte de Romainville : a- les variations volumiques en fonction de la teneur en eau, b- l'indice des vides en fonction de la teneur en eau

encadrant la gestion des sols sensibles au retrait-gonflement.

#### 4 CONCLUSIONS

Ce travail a montré que les charges mécaniques peuvent avoir un effet non négligeable sur les phénomènes de retrait. C'est donc le cas des sols d'assise des fondations. Plus précisément, sous chargement, on observe une augmentation à la fois de l'amplitude des déformations volumiques et de la limite de retrait, ce qui conduit à une augmentation de la plage de séchage au cours de laquelle le sol continue à se contracter. Ces résultats démontrent l'importance de prendre en compte le chargement mécanique dans l'étude des phénomènes de retrait. Par ailleurs, l'étude met en évidence le rôle de la nature du matériau. Ainsi, la teneur relativement élevée en carbonates de calcium des marnes peut avoir un effet inhibiteur, voire réducteur, sur le retrait, illustrant que les propriétés minéralogiques et chimiques des sols modulent fortement leur comportement volumique.

La suite de cette étude consistera à réaliser des cycles complets d'humidification et de séchage sous chargement mécanique, dans le but de simuler des conditions plus représentatives du terrain et d'analyser de manière plus approfondie les effets combinés du chargement, des variations hydriques et de la nature du sol sur le retrait.

Dans une région à climat tempéré comme la France et dans le contexte de changement climatique qui est le nôtre, les phénomènes de retrait constituent l'essentiel des problématiques liées au retrait-gonflement des argiles (RGA). Cette étude souligne ainsi la nécessité de développer des outils expérimentaux et analytiques mieux adaptés pour étudier le comportement des sols argileux sous les fondations face aux effets de la sécheresse. Elle suggère également que ces travaux pourraient contribuer à une évolution des cadres normatifs

#### REMERCIEMENTS

La présente étude est menée au sein du projet « REMED RGA », lequel est financé par l'état dans le cadre du programme « France 2030 » opéré par l'ADEME. Ce projet vise le développement de solutions de prévention et de remédiation face au RGA applicables sur bâtis existants. Les auteurs expriment leur gratitude envers l'ADEME pour son appui à ces recherches novatrices.

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR(1996) « NF P94-048 | Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en carbonate - Méthode du calcimètre », AFNOR Editions, France.
- AFNOR (1997) « 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. » AFNOR Editions, France
- AFNOR (2014a) « NF EN ISO 17892-1 | Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 1 : détermination de la teneur en eau ». AFNOR Editions, France.
- AFNOR (2014b) « NF EN ISO 17892-2 | Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 2 : détermination de la masse volumique d'un sol fin », AFNOR Editions, France.
- AFNOR (2018a) « NF EN ISO 17892-4: Reconnaissance et essais géotechniques – Essais de laboratoire sur les sols – Partie 4 : Détermination de la distribution granulométrique des particules », AFNOR Editions, France.

- AFNOR (2018b) «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 », AFNOR Editions, France.
- AFNOR (2022) « NF EN 17542-3 | Terrassements - Essais géotechniques en laboratoire - Partie 3 : Valeur de bleu de méthylène VBS d'un sol ou d'une roche », AFNOR Editions, France.
- AFNOR (2025) « Terrassements - Classification complémentaire des matériaux de terrassement », AFNOR Editions, France.
- Almuaythir, S., Zaini, M. S. I., Hasan, M., Hoque M. I. (2025) Stabilization of expansive clay soil using shells based agricultural waste ash , *Scientific Reports*, 15(1), pp. 10186. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94980-5>, consulté le : 05/11/2025.
- BRGM (2018). *Rapports sur le retrait-gonflement des argiles en France*, Bureau des Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France.
- BRGM (2025) *Visualiseur InfoTerre*. Disponible à l'adresse: <https://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do>, consulté le: 02/12/2025.
- British Geological Survey (2025) Swelling and shrinking soils , *British Geological Survey*. Disponible à l'adresse: <https://www.bgs.ac.uk/geology-projects/shallow-geohazards/clay-shrink-swell/>, consulté le: 05/11/2025.
- CCR (2025) Les catastrophes naturelles en France - Bilan 1982-2024. Caisse Centrale de Réassurance, Paris, France.
- Chen, D., et al. (2023) Framing, Context, and Methods (Chapter 1), *In: IPCC 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 6th ed., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, pp. 147-286. Disponible à l'adresse: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Fondjo, A.A., Theron, E. et Ray, R.P. (2021) Stabilization of Expansive Soils Using Mechanical and Chemical Methods: A Comprehensive Review, *Civil Engineering and Architecture*, 9(5), pp. 1295-1308. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090503>.
- Jones, L., Banks, V. et Jefferson, I. (2020) Chapter 8 Swelling and shrinking soils, *In : Geological Hazards in the UK: Their Occurrence, Monitoring and Mitigation – Engineering Group Working Party Report*, D.P. Giles et J.S. Griffiths, Geological Society of London, UK. <https://doi.org/10.1144/EGSP29.8>
- Kazmierczak, J.-B. et al. (2016) Un nouveau dispositif pour la caractérisation du retrait et du gonflement des sols argileux, *Revue Française de Géotechnique*, 147(1), pp. 13, <https://doi.org/10.1051/geotech/2016005>, consulté le : 06/01/2026.
- Magnan, J.-P. (2015) *Projet ARGIC2 - Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions - Rapport de synthèse générale*, IFSTTAR, Champs-sur-Marne, France.
- Makki, L. et al. (2008). Essai de retrait pour une meilleure classification de la sensibilité des sols à la sécheresse, dans: *SEC 2008*, Paris, France, pp 257-264. Disponible sur: <https://hal.science/hal-00388343>
- Makki, L. (2009). *Comportement de retrait-gonflement des sols en période de sécheresse*. These de doctorat. Université Pierre et Marie Curie. Disponible à l'adresse: <https://theses.fr/2009PA066657>, consulté le: 07/01/2026.
- Ministère de la Transition écologique (2025) Consultation du 20/11/2025 au 22/12/2025 – Projet d'arrêté modifiant la carte d'exposition au retrait-gonflement des argiles, Disponible à l'adresse: <https://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/consultation-du-20-11-2025-au-22-12-2025-arrete-a3275.html>, consulté le: 06/01/2026.
- MRN (2024) Nouvelle édition du Répertoire des Référentiels de Résilience du bâti aux aléas naturels, Mission des Risques Naturels, Paris, France.
- ONRN (2018) La vulnérabilité des communes à l'aléa retrait-gonflement des argiles : méthode de calcul et classification typologique. Disponible à l'adresse: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/media/613>, consulté le: 20/10/2025.
- Philipponnat, G. (1991) Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie, *Revue Française de Géotechnique*, pp. 5-22. <https://doi.org/10.1051/geotech/1991057005>
- Vincent, M., Roger C., Jean-Marie F., Yu-Jun C., Catherine J., et al. (2011) *Projet ARGIC: Analyse du retrait-gonflement et de ses incidences sur les constructions - rapport final*, GEOSCIENCES, Fontainebleau, France.