

EVALUATION DE L'EFFICACITE DE TECHNIQUES DE TRAITEMENT DU RETRAIT GONFLEMENT PAR MODELISATION NUMERIQUE

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF SHRINK-SWELL TREATMENT TECHNIQUES USING NUMERICAL MODELING

Martin CAHN¹, Nguyen Nath HOANG¹, Sebastien BURLON¹, Alain Franck Béchade

¹ Terrasol, Paris, France

³ AFB Expertise, Bordeaux, France

RÉSUMÉ – De manière à identifier des techniques de prévention et de traitement du risque de Retrait Gonflement des Argiles sur les maisons individuelles, une importante étude numérique a été menée permettant d'apprécier l'efficacité de différentes solutions couramment mise en œuvre à l'aide d'une procédure de modélisation innovante.

ABSTRACT – In order to identify techniques for preventing and treating the risk of Clay Shrinkage and Swelling in individual houses, a significant numerical study was carried out to assess the effectiveness of various solutions currently in use, thanks to an innovative modelling procedure.

1. Introduction

Le Retrait-Gonflement des Argiles (RGA) est l'origine, chaque année, de nombreux désordres, en particulier sur les maisons individuelles. En France, environ 48% du territoire est en zone d'exposition moyenne ou forte à ce risque selon la cartographie 2020, établie par le BRGM, soit environ 10 millions de maisons.

Dans le cadre du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, la prise en charge de ces désordres, en augmentation du fait du développement des zones et périodes de sécheresse en lien avec le dérèglement climatique, représente un coût total proche du milliard d'euros par an (et une estimation de 3,5 milliards pour la seule sécheresse de 2022).

Dans ce contexte, et en vue d'identifier des techniques de prévention et de traitement de ce risque, une importante étude numérique a été menée pour le compte de la Caisse Centrale de Réassurance, permettant d'apprécier l'efficacité de différentes solutions (terrasses périmétriques et géomembranes, reprises en sous œuvre par micropieux, écrans anti-racine) ou à l'inverse les effets de certains désordres (défaut de drainage, regards fuyards). La présente communication illustre certains résultats obtenus sur l'efficacité relative de la mise en œuvre de terrasses périmétriques et d'une reprise en sous œuvre par micropieux.

2. Modélisation du retrait-gonflement des argiles

1.1. Démarche méthodologique

Le phénomène de retrait et gonflement des sols argileux est un mécanisme complexe, trouvant son origine à l'échelle moléculaire dans l'interaction entre les particules argileuses et l'eau. Il se manifeste à l'échelle macroscopique par une augmentation ou une réduction du volume du sol concerné (BRGM 2006). L'amplitude du phénomène dépend de la présence et la nature de particules argileuses dans le terrain, mais elle est également dictée par des aspects thermiques, hydrauliques et mécaniques. Ces derniers peuvent par ailleurs varier au cours du temps, dans des proportions qui sont parfois difficilement quantifiables et qui affectent aussi le comportement du sol sur plusieurs années (par exemple avec la succession d'années plutôt pluvieuses puis d'années plutôt sèches).

Le retrait se manifeste très souvent par des fissures de traction dans le terrain, augmentant la surface d'échange avec l'air ambiant ce qui amplifie le phénomène. Du fait de la pluralité des mécanismes en jeux, la simulation numérique du phénomène de RGA s'avère donc complexe.

La réponse d'une structure à une déformation imposée est également un problème de modélisation numérique en soi. Le comportement d'une maison individuelle dépend de ses matériaux constitutifs, de sa géométrie, du système de fondation, de la prise en compte de défaut et dommages préexistants, etc.

L'objectif des modélisations présentées dans cette communication est de pouvoir juger de l'efficacité relative de certaines techniques de gestion du phénomène de RGA.

Pour ce faire, des simplifications importantes mais nécessaires à la résolution numérique globale du problème de retrait-gonflement sont introduites dans les modélisations aux éléments finis proposées :

- les mécanismes de retrait et gonflement sont traduits à l'échelle macroscopique par le biais de déformations volumiques imposées. Ces déformations volumiques sont associées aux variations de teneurs en eau via des essais de laboratoire simples de retrait-gonflement ;
- les lois de comportement retenues pour les structures et le sol sont simplifiées : élasticité parfaite ou élasto-plasticité parfaite avec un critère de rupture de Mohr Coulomb.

Ces simplifications sont compensées par un couplage direct entre modélisation du retrait-gonflement et réponse de la structure, la possibilité de modéliser les phénomènes en trois dimensions sur des géométries de maisons individuelles réalistes et l'étalonnage des variations de teneur en eau sur des mesures in-situ.

Cette démarche s'inscrit dans la lignée du projet ARGIC 2 pour lequel un module de calcul avait été développé dans le logiciel CESAR-LCPC pour simuler le phénomène de retrait de manière analogue (ARGIC 2013). Le présent travail le complète en introduisant la modélisation des structures et en ajustant les fonctions du champ de déformation aux différentes situations étudiées. Cette technique de modélisation est par ailleurs analogue à celle pouvant être mise en œuvre pour dimensionner l'effet du gonflement des argiles sur des infrastructures souterraines (Cahn et al. 2022).

1.2. Modélisation du phénomène de retrait

Le phénomène de retrait est traduit via une fonction sécheresse $S(x,y,z)$ dépendant de l'espace et bâtie pour différentes formes de maison, pour un arbre ou pour une fuite. Elle permet de relier la variation de teneur en eau en tout point de l'espace à la variation de teneur en eau Δw_{max} tel que :

$$\Delta w(x, y, z) = -\Delta w_{max} \times S(x, y, z) \quad (1)$$

La fonction sécheresse S dépend de quatre paramètres de forme :

- α et β traduisant l'amortissement de la variation de teneur en eau dans le plan.
- γ et la puissance n traduisant l'amortissement de la variation de teneur en eau avec la profondeur.

La variation de teneur en eau s'exprime alors :

$$\Delta w(x, y, z) = -\Delta w_{max} \times e^{\gamma(z-z_0)^n} \left(1 - \frac{1}{(1+e^{\alpha(x-x_0)})(1+e^{\beta(y-y_0)})} \right) \quad (2)$$

La figure 1 illustre le champ de variation de teneur en eau en surface pour une maison rectangulaire et en profondeur à différentes distances de la structure. La forme de la

variation de teneur en eau avec la profondeur a pu être calée sur des mesures expérimentales tirées d'ARGIC réalisées à Mormoiron. En dehors de l'emprise de la maison ($x, y \rightarrow \infty$) le choix d'une puissance n égale à 3 permet la meilleure reproduction des résultats expérimentaux.

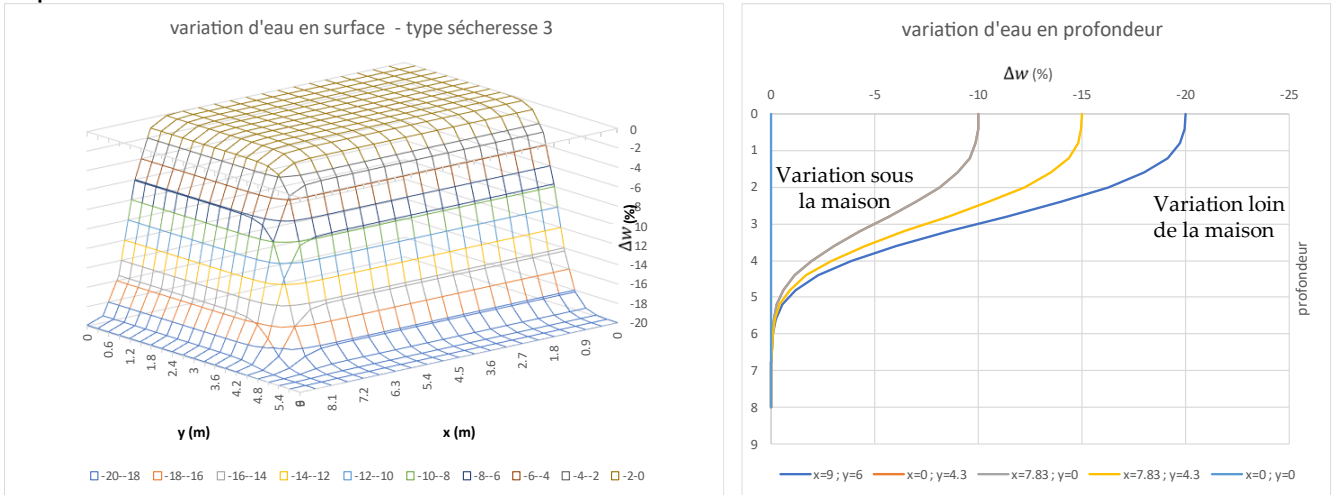


Figure 1. Exemple de champs de variation de teneur en eau en surface et profondur

Trois types de sécheresses sont définies :

- la sécheresse 1 dite « normale », pour laquelle la variation maximale de teneur en eau en surface est de 10% et l'approfondissement est tel que la moitié de la variation d'eau a lieu dans le premier mètre ;
- la sécheresse 2 dite « moyenne », pour laquelle pour laquelle la variation maximale de teneur en eau en surface est de 15% et la moitié de la variation d'eau a lieu dans les deux premiers mètres ;
- la sécheresse 3 dite « exceptionnelle », pour laquelle la variation maximale de teneur en eau en surface est de 20% et la moitié de la variation d'eau a lieu dans les trois premiers mètres.

Les paramètres d'amortissement autour de la maison α et β sont définis tel que le front moyen de dessiccation soit situé à l'axe de la zone couverte avec un rayon d'amortissement de 1,0 m de part et d'autre de celle-ci. Autrement dit :

- 1 m à l'extérieur de la zone couverte, la variation maximale de teneur en eau est retrouvée et le terrain subit la dessiccation maximale ;
- 1 m à l'intérieur de la zone couverte, le terrain ne subit plus les effets saisonniers et aucune variation de teneur en eau n'est simulée sous la maison.

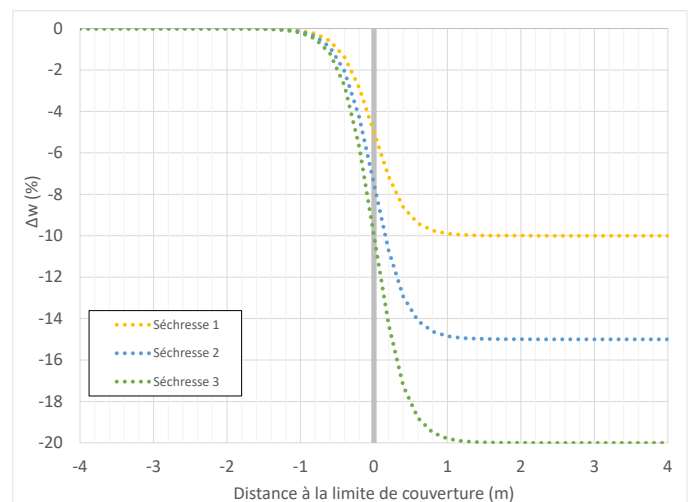


Figure 2. Amortissement autour de la zone de couverture

Les limites x_0 et y_0 de la fonction sécheresse $S(x,y,z)$ sont ajustées suivant le type de configuration et de dispositions constructives étudiées : dans le cas de référence et dans le cas d'une reprise en sous œuvre par micropieux, la limite de la zone de couverture correspond à la limite extérieure des façades. Dans les cas des imperméabilisations périmétriques, ces limites sont éloignées de 50 cm, 1,0 m ou 1,5 m suivant la largeur retenue.

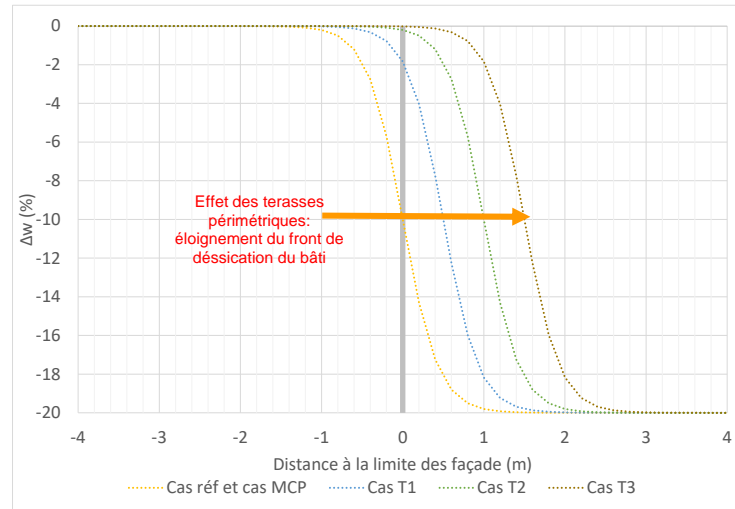


Figure 3. Ajustement des limites de la fonction $S(x,y,z)$ suivant le type de disposition constructive

La variation hydrique est ensuite reliée à la variation volumique grâce à l'exploitation d'essais de retrait. Ces essais permettent de relier la variation d'indice des vides d'un sol à la variation de teneur en eau. Ils montrent que les terrains suivent la droite de saturation avant d'atteindre la limite de désaturation w_{crit} et que la majorité de la variation d'indice des vides a lieu avant d'atteindre la désaturation.

L'équation de la droite de saturation relie la variation d'indice des vides Δe à la variation de teneur en eau Δw en fonction du poids volumique des grains solides γ_s et du poids volumique de l'eau γ_w tel que :

$$\Delta e = \Delta w \times \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (3)$$

Sur la droite de saturation, la variation de volume $\Delta \varepsilon$ peut alors être reliée à la variation d'indice des vides tel que :

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta w}{1+e_0} \times \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (3)$$

Dans la présente étude, on supposera que quelle que soit l'hypothèse de variation de teneur en eau imposée par la sécheresse, le sol reste saturé si bien que le comportement du terrain suit la droite de saturation. Cette hypothèse est maximaliste, puisqu'elle a tendance à amplifier les variations volumiques imposées mais reste néanmoins pertinente compte tenu des hypothèses faites par ailleurs sur les variations de teneur en eau.

Ainsi avec un indice des vides initial e_0 de 0,8 et un rapport $\gamma_s/\gamma_w = 2,7$, les variations volumiques maximales autour de la maison varient entre 15 et 30 %

La déformation volumique est finalement imposée dans le modèle aux éléments finis du modèle PLAXIS 3D « par blocs » autour de la maison en fonction de leur position.

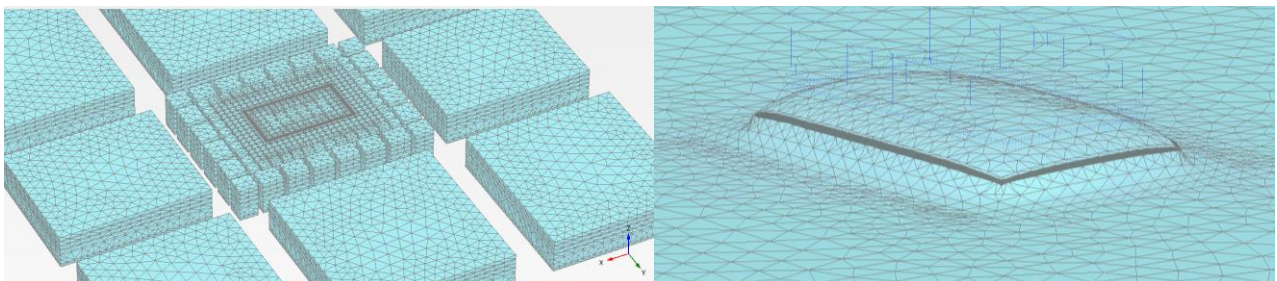


Figure 4. Découpage « en blocs » autour d'une maison rectangulaire et maillage déformé du sol

Le comportement des terrains est modélisé par une loi de comportement élastique pour deux configurations géotechniques:

- la configuration géotechnique 1 où l'on modélise une couche d'argile de 6 m d'épaisseur doté d'un module d'élasticité de 20 MPa au-dessus d'un substratum raide doté d'un module d'élasticité de 50 MPa.
- la configuration géotechnique 2 où une épaisseur importante d'argile est considérée avec un module d'élasticité en surface de 8 MPa et une augmentation de ce dernier avec la profondeur de 1 MPa/m.

1.3 Modélisation des structures

Trois typologies de maison sont simulées en se basant sur des plans de structures existantes: deux maisons de plain-pied et une maison partiellement en R+1 pour une emprise au sol variant entre 135m² et 235m².

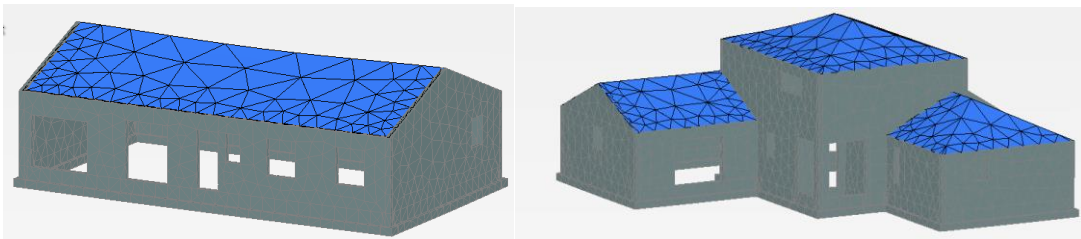


Figure 5. Maillage éléments finis des maisons étudiées

Les murs et les voiles porteurs sont simulés avec une loi de comportement élastique et avec un module de 10 GPa, valeur caractéristique des murs en maçonnerie ou du béton à long terme. La rigidité du toit et des dallages n'a pas été prise en compte car négligeable devant celle des murs porteurs. Dans un des cas et dans le cadre d'une analyse de sensibilité, la structure de la maison a été simulée à l'aide d'une loi élastoplastique.

Les fondations superficielles filantes ont systématiquement été modélisées sous les murs et voiles porteurs avec des dimensions classiques : profondeur d'encastrement de 80 cm, largeur de 50 cm et épaisseur de semelle de 30 cm.

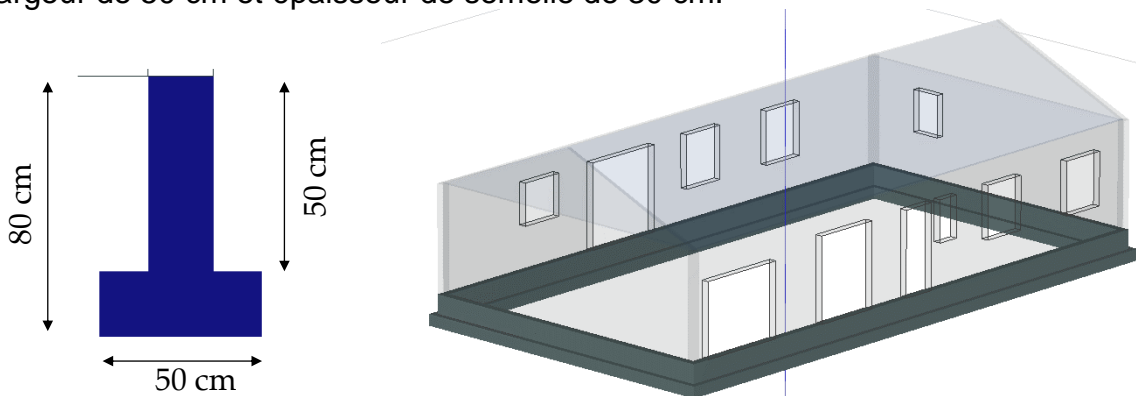


Figure 6. Modélisations des fondations

Pour simuler le cas de la reprise en sous œuvre par micropieux, un massif de liaison de 30 cm d'épaisseur a été considéré sous la semelle existante associée à des micropieux de 7 m de longueur. Ces micropieux présentent un diamètre de forage de 140 mm, des tubes de 70 mm de diamètres et 2,9 mm d'épaisseurs, espacés tous les 2,5 m pour un frottement axial unitaire q_s pris égale à 120 KPa. Il est à noter que la jonction entre les massifs de liaison et la fondation existante et entre les micropieux et le massif de liaison est parfaite, correspondant au cas d'une reprise en sous œuvre « idéale ».

3. Exploitation des résultats et discussion

3.1 Méthode d'analyse des résultats

La réponse de la maison à la simulation du retrait est étudiée selon une analyse globale, complétée, lorsque la géométrie de la maison le permet, par une analyse locale. Les grandeurs analysées pour chaque type d'analyse sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 1. Grandeurs analysées

Analyse globale	Analyse locale
<ul style="list-style-type: none"> - le tassement moyen par façade: S_{moyen} - le déplacement normal moyen par façade: U_{moyen} - le tassement différentiel: S_{diff} défini comme la différence de tassement entre les deux coins des murs de soubassement, divisé par la longueur de la façade - le nombre de points de rupture dans le cas de la modélisation de la structure avec une loi de comportement élastoplastique; 	<ul style="list-style-type: none"> - l'allongement du chainage des façades ; - l'allongement des murs de soubassements ; - l'allongement des diagonales; - la distorsion au sommet ; - la distorsion au centre; - la distorsion diagonale.

Pour l'ensemble des grandeurs analysé, les résultats sont normalisés par rapport au cas de référence considéré être, pour chaque sécheresse, le cas de la maison sans imperméabilisation périmétrique ni reprise en sous œuvre par micropieux. Les résultats sont présentés sous forme d'histogrammes permettant une comparaison directe entre le cas de référence et le type de disposition constructive étudié.

3.2 Exemple d'analyse de résultat

Un exemple d'analyse des résultats est illustré avec le cas du tassement moyen de la maison 1 à l'aide de la Figure suivante où les quatre façades de la maison sont étudiées séparément avec de gauche à droite, la façade nord, la façade sud, la façade ouest puis la façade est.

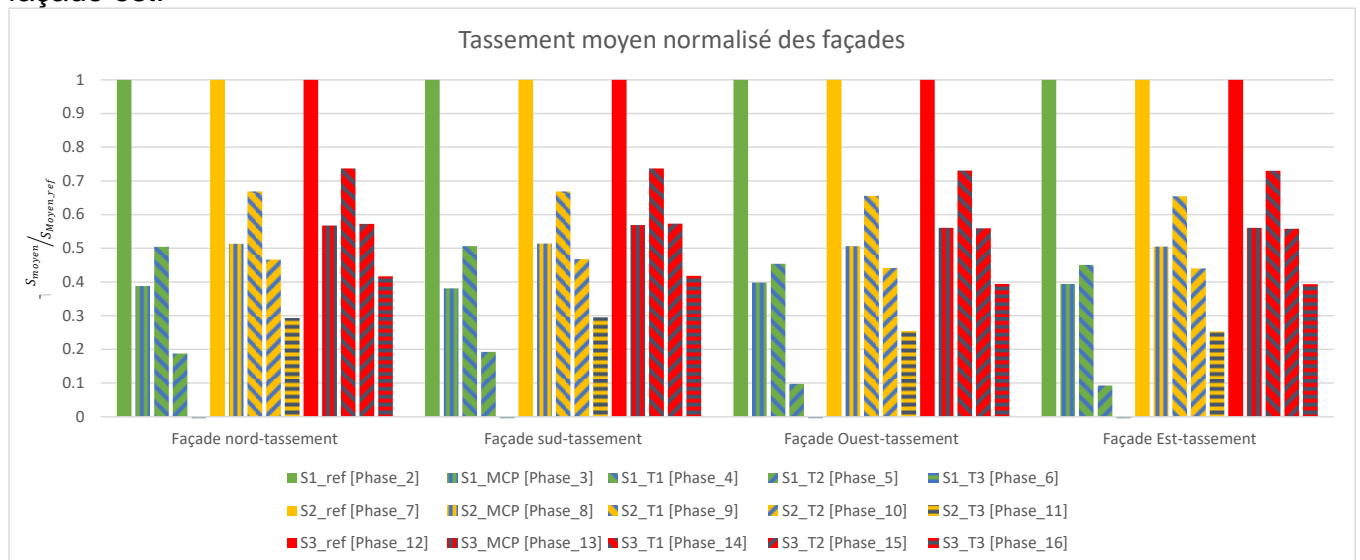


Figure 7. Exemple d'exploitation des résultats tassement moyen maison 1

La sécheresse 1 correspond à l'ensemble des histogrammes verts, la sécheresse 2 à l'ensemble des histogrammes jaunes et la sécheresse 3 à l'ensemble des histogrammes rouges. Pour chaque type de sécheresse et chaque façade, les résultats sont toujours présentés dans le même ordre avec de gauche à droite :

- le cas de référence de la maison sans terrasse ni micropieux pour lequel la valeur normalisée vaut toujours 1.
- la reprise en sous œuvre par micropieux ;
- les terrasses périmétriques de 50 cm, celle de 1m et enfin celle de 1,5 m.

La réduction de tassement apportée par les micropieux ou les différentes largeurs de terrasse par rapport au cas de référence est illustrée par une diminution de la taille des histogrammes de gauche à droite. L'efficacité relative entre la reprise en sous œuvre par micropieux et les différentes largeurs de terrasses est évaluée en comparant la taille du deuxième histogramme avec les trois derniers. Dans le cas de la sécheresse 1, la terrasse d'1,5 m permet de réduire de près de 100 % le tassement par rapport au cas de référence.

L'analyse de la Figure 7 permet de conclure, pour le tassement vertical moyen, sur :

- une moins bonne efficacité de la terrasse de 50 cm par rapport à la reprise en sous œuvre par micropieux ;
- une efficacité équivalente, voire meilleure de la terrasse d'1 m par rapport à la reprise en sous œuvre par micropieux ;
- une meilleure efficacité de la terrasse d'1,5 m par rapport à la reprise en sous œuvre par micropieux.

Cette démarche est conduite sur l'ensemble des grandeurs du Tableau 1 puis traduite sous forme de tableaux de synthèse. Sur l'ensemble des configurations étudiées, il apparaît qu'une imperméabilisation de 50 cm est moins efficace que les micropieux, une terrasse de 1 m est globalement de la même efficacité, et la terrasse de 1,5 m permet d'atteindre globalement une meilleure efficacité que la reprise en sous œuvre.

3.3 Effet parasite de report de charge des micropieux

Dans le cadre d'une étude de sensibilité, l'une des maisons a été modélisée avec une loi de comportement élastoplastique parfaitement plastique avec critère de Mohr Coulomb. La résistance en compression équivalente pour les murs est de 30 MPa et la résistance à la traction de 3 MPa.

Il apparaît que la plasticité est plus importante pour la reprise en sous œuvre par micropieux que dans le cas des terrasses. Ce constat s'explique par le développement de sollicitations parasites en tête de micropieux et du fait de reports de contraintes importants vers ces derniers. La figure suivante présente les bandes de cisaillement et la réorientation des contraintes principales dans le cas de la reprise en sous-œuvre par micropieux illustrant le phénomène :

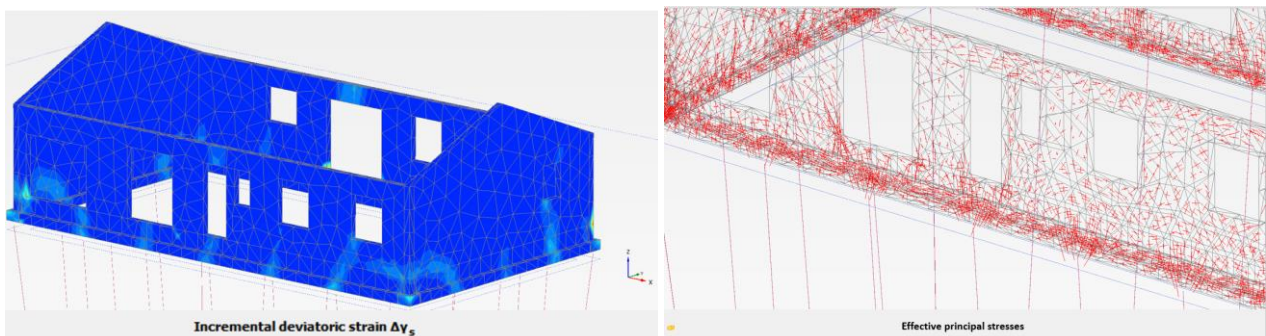


Figure 8 . Modélisation maison 1 élastoplastique-bandes de cisaillement et report de contraintes

Cette modélisation complémentaire permet d'affirmer que les micropieux ne fonctionnent correctement que si la maison est suffisamment résistante (autrement dit ferrillée) pour accepter les sollicitations parasites.

4. Conclusion

Les modélisations des phénomènes de Retrait et Gonflement des Argiles présentées dans cette communication ont été réalisées dans le code de calcul PLAXIS 3D à l'aide d'une procédure innovante. Ces modélisations, simplifiées à certains égards, présentent l'avantage de permettre un couplage direct entre le mouvement de sol et la réponse de la structure ainsi que la possibilité d'analyser un grand nombre de configurations.

L'analyse des résultats sous forme de grandeurs normalisées a permis de mettre en évidence que les imperméabilisations périmétriques de 1 m de largeur sont globalement aussi efficace que la réalisation de micropieux et qu'une imperméabilisation de 1,5 m de largeur est plus efficace que la reprise en sous œuvre.

Les modélisations ont également permis de souligner que, dans le cas des reprises en sous œuvre, les efforts parasites dans la structure et en tête de micropieux peuvent être importants : les confortements par micropieux ne peuvent être efficaces que si la structure de la maison est déjà suffisamment ferrillée.

Ces résultats permettent de conforter le retour d'expérience collecté sur plus de 170 sinistres entre 2008 et 2018 par (Béchade 2021) : bien trop souvent, les solutions de réparation ou de prévention mettent l'accent sur le traitement des conséquences en agissant sur la structure de la maison individuelle alors qu'il est beaucoup plus efficace et de traiter les causes du retrait-gonflement : les variations de teneur en eau dans les sols. En empêchant les arrivées d'eau accidentelles, en assurant un drainage adéquat, en empêchant la succion des végétaux et écartant le front de dessiccation de la structure à l'aide de terrasses périmétriques, il apparaît envisageable de traiter les risques associés au RGA de manière pérenne et économique.

5. Références

Béchade A.F., (2021). La pathologie des fondations superficielles - Diagnostic, réparations et prévention. Guide CSTB, 532 pages.

BRGM RP-54862-FR (2006). Étude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti

Cahn M., Nguyen N.H., Payant O., Burlon S. (2022) ; Algorithme pour la simulation des mécanismes de gonflement des argiles par éléments finis. JNGG, Lyon 2022 ;

Guide ARGIC 2 (2017). Retrait gonflement des argiles – Caractériser un site pour la construction, IFSTTAR, 46 pages.

Projet ARGIC 2 (2013). Annexe A1 Rapport Axe 1 (2014)