




DEMANDE DE BREVET   
N. EP23171424

# **SARGAR<sup>®</sup>**

## **SYSTÈME D'ATTENUATION RETRAIT ET GONFLEMENT DES ARGILES**

 **GEOSEC**  
GROUND ENGINEERING

# Le saviez-vous ?

Les fissures qui parsèment les murs des habitations ne sont pas toujours dues à un manque d'entretien ou à des défauts de construction.

Un autre phénomène, appelé " retrait-gonflement des sols argileux (RGA) " peut lui aussi toucher fortement aussi bien des structures légères comme les maisons individuelles, que des bâtiments industriels ou les réseaux routiers.

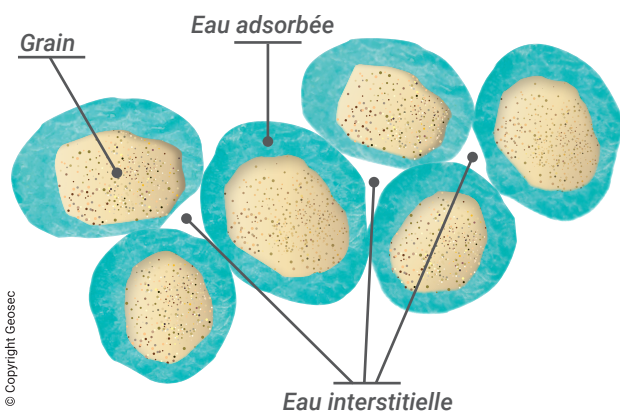
Dans les prochaines décennies, il est attendu qu'un nombre croissant de bâtiments soient impactés par des dégradations attribuables au RGA.

En cause: des variations de la teneur en eau des sols qui se gonflent en période humide et se rétractent lors d'épisodes de sécheresse, à l'image d'une éponge.

Tous les sols présentent la particularité de contenir de l'eau en quantité plus ou moins importante :

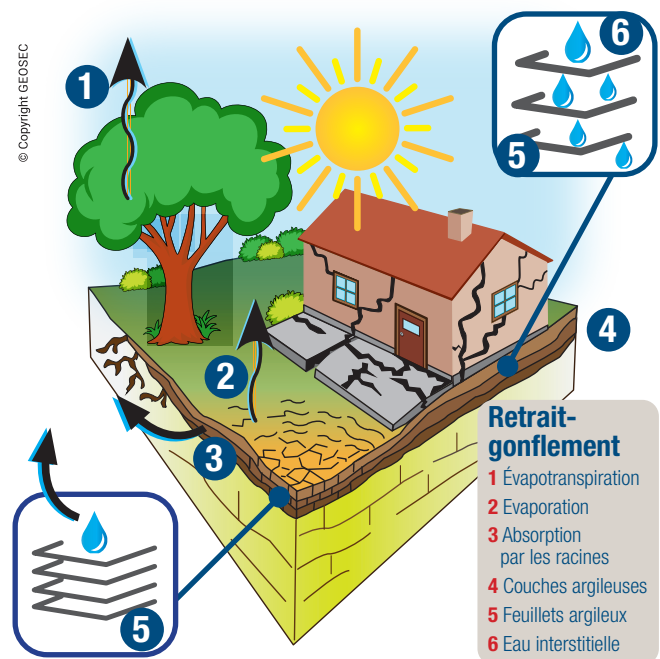
- De l'eau de constitution, faisant partie intégrante de l'organisation moléculaire des grains formant le sol ;
  - De l'eau liée (ou adsorbée), résultant de l'attraction entre les grains et l'eau (pression de succion). On peut se représenter cette couche adsorbée comme un film visqueux entourant le grain;
  - Une eau interstitielle, remplissant les vides entre les grains du sol (lorsque ceux-ci sont entièrement remplis, le sol est dit saturé).
- La part respective entre ces différents " types " d'eau, très variable, dépend de la nature du sol et de son état hydrique.

En fonction de cette répartition, les sols auront une réponse différente vis-à-vis des variations de teneur en eau. Plus la quantité d'eau adsorbée contenue dans un sol est grande, plus celui-ci est susceptible de se rétracter.



## Pourquoi spécifiquement les sols argileux ?

Certains minéraux argileux présents dans les sols superficiels peuvent modifier leur volume en fonction de leur teneur en eau. Ils se contractent pendant les périodes de sécheresse (phénomène de retrait) et augmentent leur volume lorsqu'ils sont à nouveau hydratés (phénomène de gonflement). En particulier, la variation de la teneur en eau dans les sols superficiels (seules les premiers mètres (1 à 2 m) sont concernés par ces variations) peut être due à des conditions météorologiques inhabituelles (sécheresse ou fortes pluies), à des fluctuations du niveau des nappes phréatiques ou à des modifications hydrologiques résultant de l'intervention humaine. Les arbres situés à proximité des bâtiments peuvent également aggraver le phénomène de retrait volumétrique des argiles en puisant de l'eau par succion à partir de leur système racinaire.



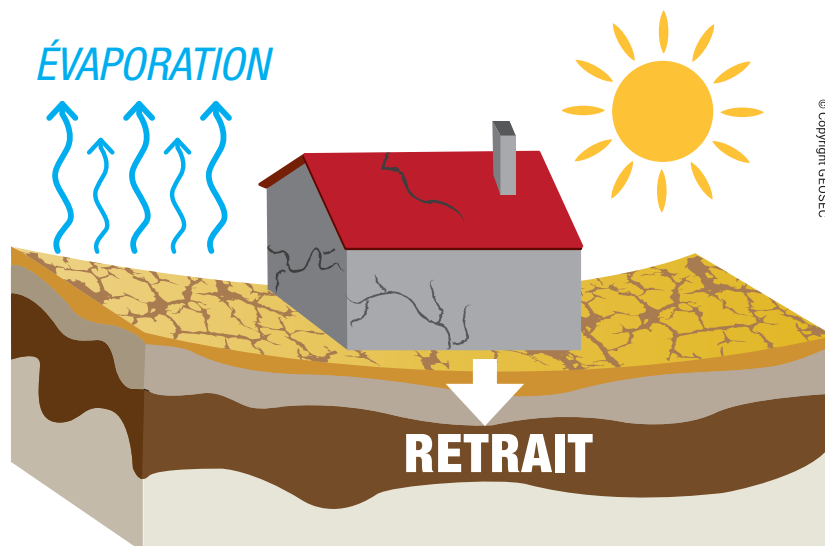
Si ce processus (cyclique et saisonnier) entraîne des dégâts sur la structure des bâtiments (principalement des fissures dans les murs et des affaissements de dallages), il ne représente pas un risque direct et significatif pour la population. Cependant, ces mouvements lents du sol argileux peuvent atteindre une ampleur telle qu'ils endommagent les bâtiments situés sur ces sols, compromettant ainsi leur stabilité à long terme.

# Comment fonctionne-t-il le phénomène du retrait-gonflement des argiles ?

1

## LE PHÉNOMÈNE DE RETRAIT

En période sèche, les sols argileux se rétractent suite à l'évaporation. Les sols argileux se comportent comme une éponge.



Les principaux facteurs influençant ces phénomènes dépendent de la nature et des caractéristiques du sol, de la profondeur et de la position des volumes expansifs, des caractéristiques climatiques, du niveau et du régime des eaux souterraines, ainsi que des sources locales d'humidification et de séchage des sols (Popescu, 1979). Ces argiles, également appelées argiles actives, sont sensibles aux variations saisonnières de tem-

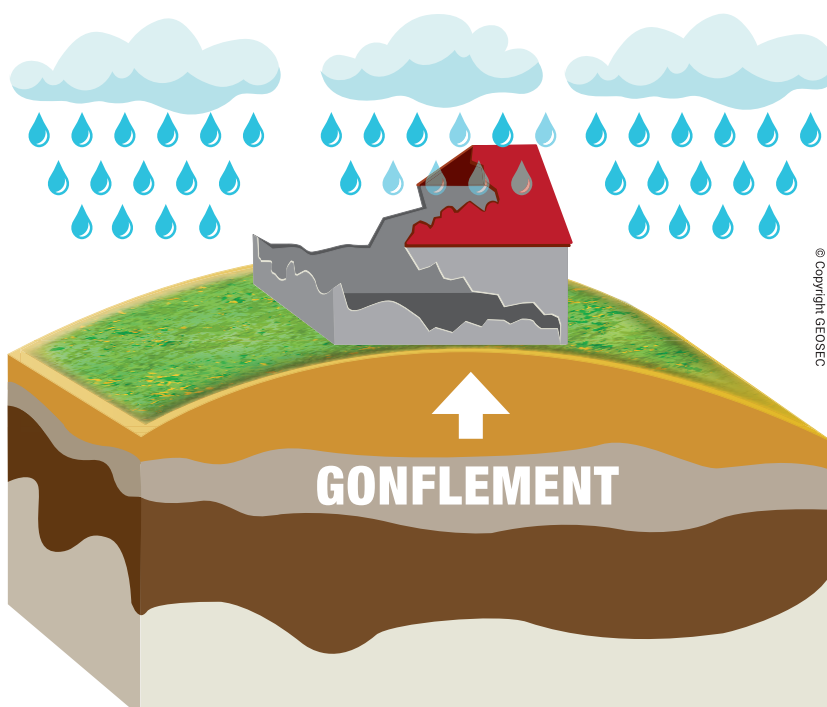
pérature en surface et aux précipitations plus ou moins fréquentes et intenses. Leur comportement en fonction des changements de température, en présence d'eau, modifie les caractéristiques chimiques et physiques du sol. En particulier, les sols argileux cohésifs réduisent leur volume initial en l'absence de précipitations, surtout avec des températures élevées au sol, tandis qu'ils augmentent leur volume initial en présence de préci-

2

## LE PHÉNOMÈNE DE GONFLEMENT

En période pluvieuse, lorsque l'apport en eau est important, les sols gonflent.

Ces fortes variations créent des mouvements de terrain qui fragilisent les fondations, pouvant provoquer des effondrements.



pitations fréquentes. Ces phénomènes, appelés respectivement retrait et gonflement, une fois déclenchés, peuvent avoir des effets cycliques dévastateurs au contact des structures de fondation, transmettant ainsi des contraintes anormales aux structures rigides en élévation, pouvant conduire à la rupture des matériaux. Les études ont montré que le gonflement de ces argiles actives est principalement vertical plutôt qu'horizontal et latéral. De plus, le gonflement diminue avec la profondeur dans le sol, à tel point que ces effets peuvent devenir négligeables (Popescu, 1978).

En général, l'argile a la capacité, plus ou moins prononcée, d'absorber l'eau en raison de l'attraction entre l'eau elle-même et certains minéraux présents dans l'argile, ce qui entraîne une variation de sa composition et de ses caractéristiques chimiques-physiques. L'eau dans le sol peut se lier aux particules d'argile à la fois à l'extérieur et entre les couches minérales qui la composent. Les minéraux les plus courants qui constituent les argiles sont la kaolinite, la chlorite, l'illite et la montmorillonite, appartenant au groupe le plus commun des smectites. En particulier, la structure cristalline de ces minéraux argileux est définie comme extensible, notamment chez les montmorillonites où le gonflement est maximal dans la direction normale au plan de la particule. De plus, les minéraux argileux ont une charge superficielle négative et l'eau, qui est un dipôle, est adsorbée par cette surface chargée. La présence de cations neutralise la charge superficielle et entraîne la floculation de

l'argile. Les différents minéraux argileux ont des charges superficielles négatives d'intensités relativement différentes, ce qui se traduit par une capacité d'adsorption d'eau et d'expansion de leur volume variable. Pour définir cette capacité, un indice d'activité a été introduit (Skempton, 1953), défini comme suit :

$$A = I_p / CF$$

L'indice de plasticité ( $I_p$ ) d'un sol argileux est directement proportionnel à la teneur en pourcentage de minéraux argileux. Étant donné que **CF** représente la teneur en pourcentage de minéraux argileux, l' $I_p$  peut donc être exprimé comme suit :

$$I_p = A * CF$$

Le pourcentage et la composition des minéraux argileux sont donc les principaux facteurs qui contrôlent la plasticité d'un sol cohésif.

Les minéraux argileux non expansifs tels que la kaolinite et l'illite ont des valeurs plus faibles de l' $I_p$ , tandis que ceux qui sont gonflants avec une capacité élevée d'adsorption d'eau, comme les montmorillonites, ont des valeurs élevées de l' $I_p$ . De plus, les montmorillonites ont une large gamme de variation de **A** (indice d'Activité) qui dépend de la disponibilité de cations pour neutraliser le déficit de charge important caractéristique de la montmorillonite.

Le calcium ( $Ca^{++}$ ) et le sodium ( $Na^+$ ) sont les cations libres les plus courants dans l'eau interstitielle. L'eau interstitielle riche en calcium,



en raison de la valence plus élevée de l'ion  $\text{Ca}^{++}$ , a une plus grande capacité de neutralisation que celle riche en  $\text{Na}^+$ , où la neutralisation de la charge superficielle négative des minéraux argileux réduit la quantité d'eau adsorbée nécessaire pour compléter la neutralisation de la charge négative superficielle. Il en résulte que les montmorillonites riches en calcium ont généralement un  $I_p$  plus faible que celles riches en sodium et, par conséquent, avec un pourcentage égal de minéraux argileux, elles formeront des sols avec un indice d'activité (**A**) plus faible. En revanche, les montmorillonites pauvres en calcium auront un indice d'activité plus élevé, ce qui nécessitera une attention particulière pour une intervention ciblée visant à atténuer les effets de gonflement de leur volume. En effet, l'énergie avec laquelle l'eau est retenue par un minéral argileux influence sa capacité à changer de volume.

En particulier, la classification des sols argileux en fonction de l'indice d'activité est la suivante (Skempton, 1953)

inactives	$A < 0,75$
normalement actives	$0,75 < A < 1,25$
très actives	$A > 1,25$

Il y a ensuite deux modes d'expansion dans les sols argileux (Grim 1952) : l'expansion intercrystalline et l'expansion intracrystalline.

L'expansion intercrystalline se produit par l'adsorption de l'eau à la surface externe des cristaux.

L'expansion intracrystalline est caractéristique des minéraux argileux de la famille des smectites, en particulier la montmorillonite.

Les couches constituant les cristaux de montmorillonite sont faiblement liées, de sorte que l'eau pénètre non seulement entre les cristaux, mais aussi entre les couches qui les constituent. En général, la kaolinite a la plus faible capacité d'expansion et presque toute l'expansion est de type intercrystallin.

L'illite peut se dilater jusqu'à 15 %, mais les illites mélangées à de la montmorillonite peuvent se dilater jusqu'à 60 %, voire 100 %.

Comme expliqué précédemment, l'expansion des montmorillonites calciques est beaucoup plus faible que celle des montmorillonites sodiques: elle varie de 50 % à 100 %. Une première évaluation de l'expansibilité d'un sol peut être faite en fonction du retrait (Williams & Donaldson, 1960).

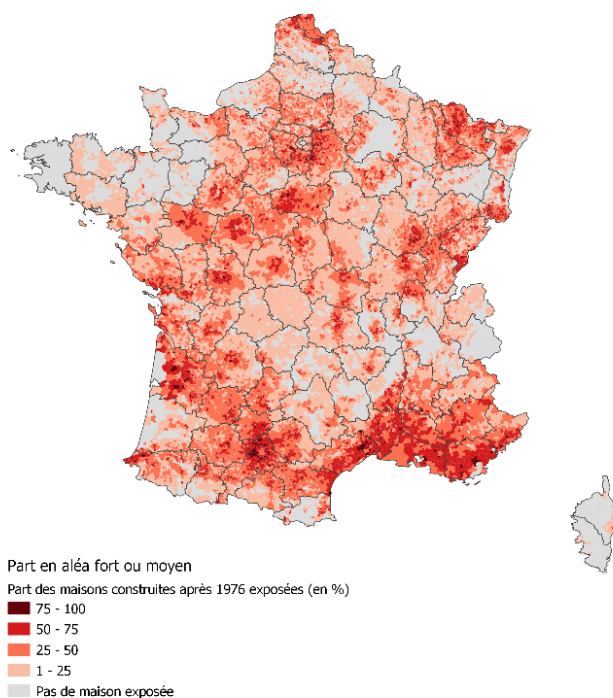
Il est donc tout à fait évident qu'en présence d'un sol argileux de fondation, il est essentiel de connaître sa nature et ses caractéristiques, sa prédisposition "active" à déclencher des effets cycliques de contraction et d'expansion de son volume initial. Du point de vue de l'ingénierie, il est également nécessaire de prendre en compte l'influence de la charge appliquée ou applicable sur les sols argileux de fondation sur l'évolution dans le temps et la valeur finale de l'expansion attendue. Il est également nécessaire de prendre en compte l'influence de l'intercalation de couches de matériau inerte entre la fondation et le sol expansif, ainsi que les conditions d'annulation de l'expansion avec la profondeur en raison de l'action combinée de la charge lithostatique, de la surcharge et de la résistance au cisaillement du sol. Enfin, il convient de considérer l'effet différent des cycles d'imbibition - dessiccation sur l'expansion et la contraction des sols argileux dans le but ultime de construire des bâtiments avec des précautions adéquates de stabilité et de sécurité.



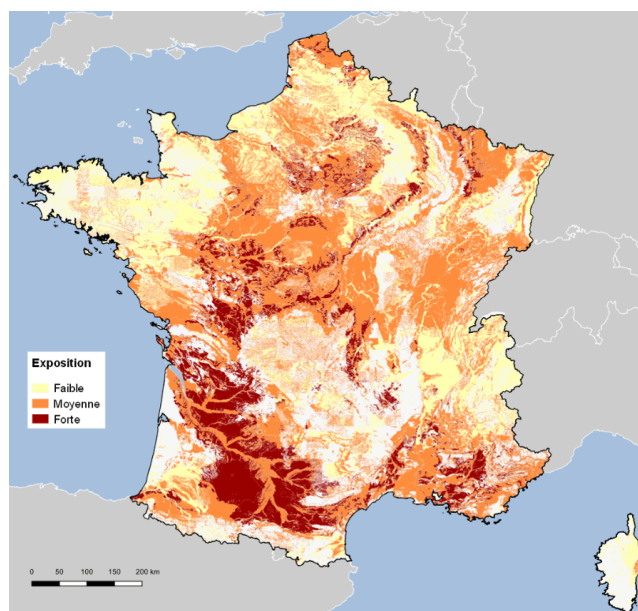
## IMPACTS ET EXPOSITION AU RGA EN FRANCE

Les mouvements du sol induits par le retrait-gonflement des argiles et amplifiés par les épisodes de sécheresse constituent un risque majeur en raison des dégâts matériels qu'ils provoquent. Ce phénomène représente 20 % des arrêtés de catastrophe naturelle et 36 % des coûts d'indemnisation. L'exposition forte ou moyenne au retrait-gonflement des argiles concerne 48 % des sols métropolitains. De nouvelles dispositions réglementaires de prévention du risque de sécheresse géotechnique s'appliquent dans ces zones (article 68 de la loi Elan). 10,4 millions de maisons individuelles y sont présentes, dont près de la moitié bâties après 1976. Leur répartition selon les périodes de construction révèle des disparités territoriales. Le SDES a mis à jour l'indicateur d'exposition des maisons individuelles au retrait-gonflement des argiles par commune, qu'il avait produit en 2017, pour tenir compte du nouveau zonage de l'aléa prévu dans le cadre de la loi Elan.

*Part des maisons individuelles construites après 1976 exposées au retrait-gonflement des argiles*



*Note : Exposition du territoire au RGA*



*Note : 48 % du territoire est en zone d'exposition moyenne ou forte BRGM®*

## IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE SYSTÈME ASSURANTIEL À L'HORIZON 2050

*(Source : France Assureurs, 2021)*

Les assureurs sont en effet bien placés pour mesurer concrètement le processus de réchauffement de la planète. Indemnisant les dommages consécutifs aux aléas naturels, ils disposent de précieux indicateurs quantitatifs de mesure du phénomène en temps réel.

Les assureurs sont également dépositaires de retours d'expériences, acquis sur le terrain, à l'écoute des populations sinistrées.

Acteurs de la protection et de la prévention, ils sont aussi les témoins des défaillances de l'aménagement des territoires qui démultiplient les conséquences humaines et économiques des catastrophes naturelles.

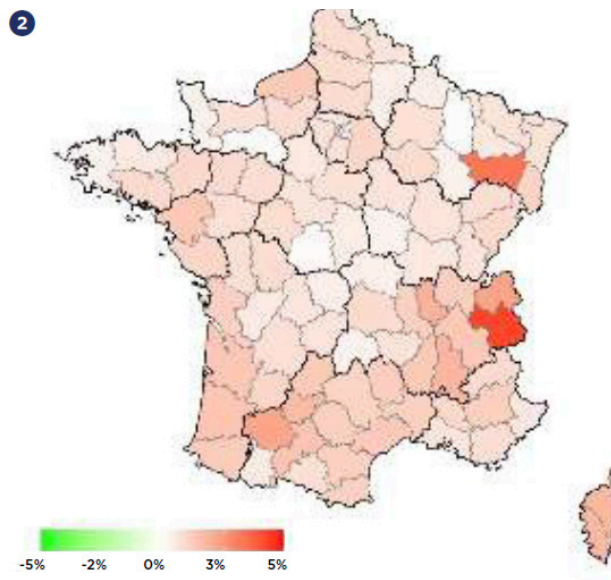
Aujourd'hui, les objectifs collectivement fixés sont loin d'être atteints: le 1er volet du 6e rapport du GIEC, publié en août 2021, nous alerte sur une accélération du processus de réchauffement.

En témoigne la publication de cette seconde étude

de France Assureurs, " Impact du changement climatique sur l'assurance à l'horizon 2050 ". Quelles que soient les orientations retenues et les engagements pris lors de ce nouveau rendez-vous au niveau international, l'ensemble des acteurs doit se préparer et s'adapter aux conséquences du réchauffement climatique. C'est dans cette logique que le monde de l'assurance se projette dans les défis à venir.

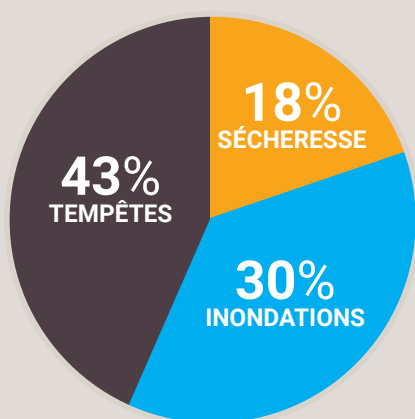
## RETOUR SUR LE PASSÉ

L'historique des indemnités versées par les assureurs à la suite d'aléas naturels peut se résumer par le graphique suivant qui signale, hors tempête extrême de Lothar et Martin, une inflation de la sinistralité assurantielle depuis 1989.






Taux de croissance annuel moyen en 2050 du nombre de logements en zone à risque sécheresse (en%)

La répartition du cumul des indemnités versées par les assureurs au cours des 31 dernières années (1989-2019) par type de risque est la suivante :



Le détail de ces chiffres, en montant et nombre de sinistres par catégorie d'assurés (particuliers et professionnels) est le suivant<sup>2</sup> :

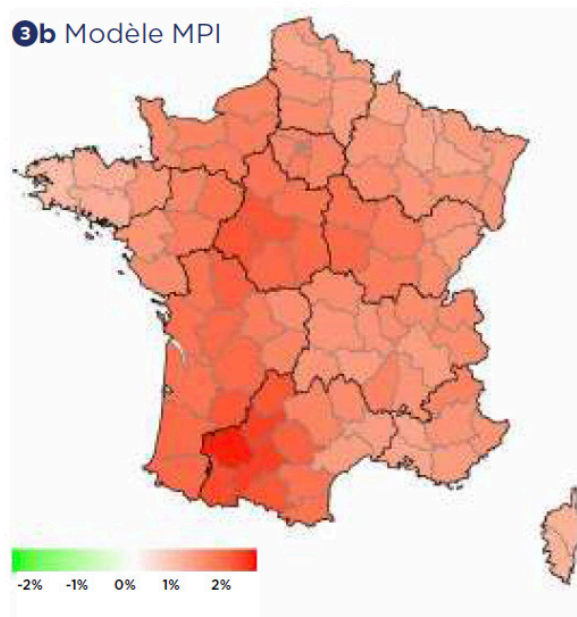
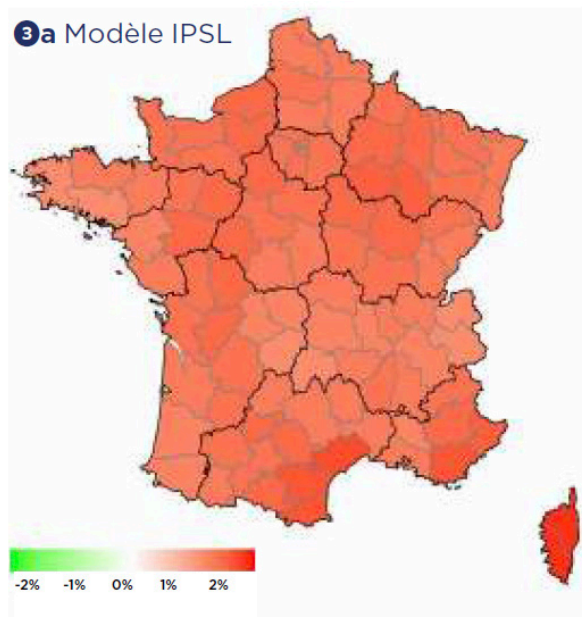
De 1989 à 2019	Nombre de sinistres indemnisés	Chiffres (Md€ constants 2020)
 <b>INONDATIONS</b>	<b>1 961 000</b>	<b>28,8</b>
Particuliers	1 480 000	15,1
Professionnels	481 000	13,6
 <b>TEMPÊTES</b>	<b>10 105 000</b>	<b>31,6</b>
Particuliers	8 251 000	17,9
Professionnels	1 854 000	13,7
 <b>SÉCHERESSE</b>	<b>843 000</b>	<b>13,8</b>
<b>Ensemble des risques</b>	<b>12 909 000</b>	<b>74,1</b>

<sup>2</sup> En raison des arrondis, la somme des sous-postes n'est pas toujours égale au total.

## VARIATION ANNUELLE DE LA FRÉQUENCE DES SÉCHERESSES (EN %)

Les deux indicateurs climatiques retenus pour projeter le risque sécheresse au cours

des 31 prochaines années sont les niveaux de précipitations (moyenne journalière) et les températures maximales qui ont été étudiées dans le cadre des deux modèles IPSL et MPI.

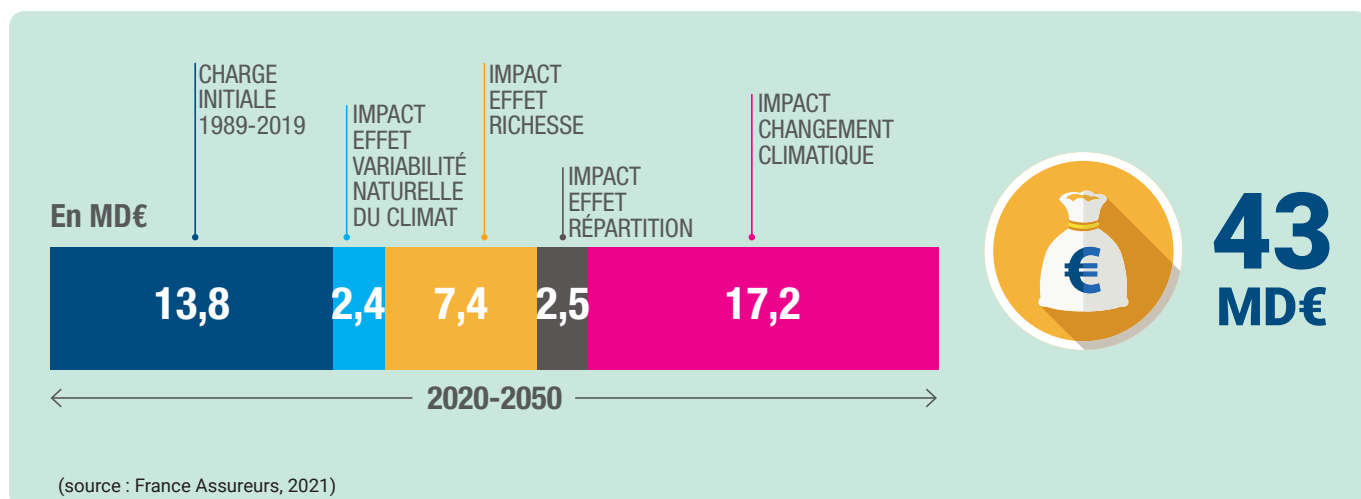


Indicateurs retenus : précipitations inférieures à la médiane et températures supérieures au 3e quartile.

## CONCLUSION

A l'horizon 2050, l'estimation du total des indemnisations s'élèverait à **43 milliards d'euros**, soit un peu plus que **trois fois le coût moyen annuel** constaté au cours des **31 dernières années**.

**CINQ DÉPARTEMENTS** : concentrent à eux seuls deux tiers de la hausse de la sinistralité. Les départements qui contribuent le plus à cette hausse sont la Haute-Garonne (23 %), la Gironde (19 %), les Bouches-du-Rhône, le Tarn-et-Garonne et le Tarn (8 %)





# QUELLES CONSÉQUENCES POUR LE BATIMENT ?

Exemples de désordres  
plus importants.

## QUELLES CONSEQUENCES EN CAS DE RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES ?

Fissuration des structures, désencastrement de la charpente, rupture des canalisations, déformations, décolllement des enduis, affaissement des terrasses, les retombées du retrait-gonflement sont nombreuses et surtout dangereuses.

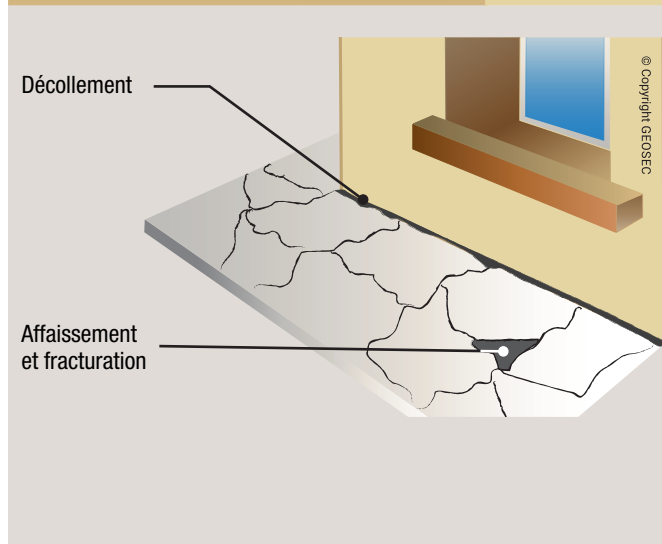
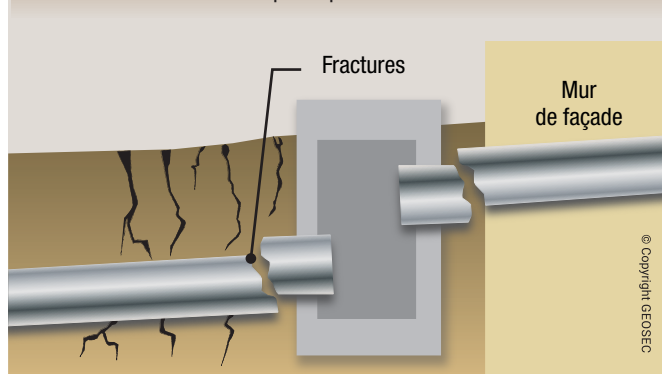
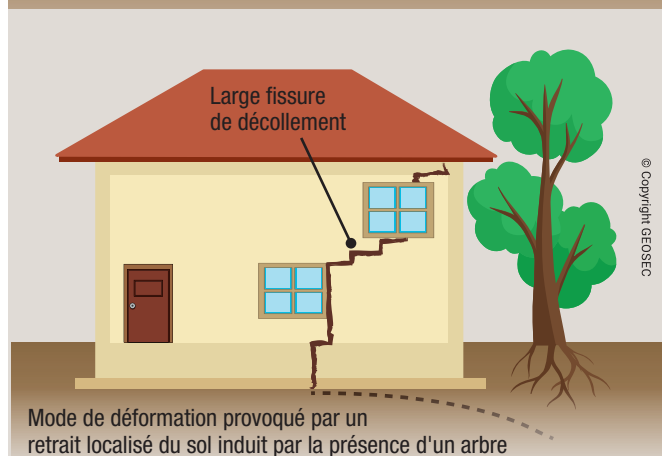
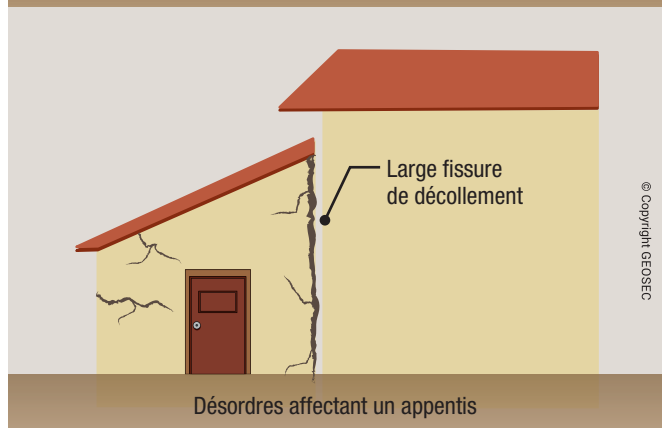
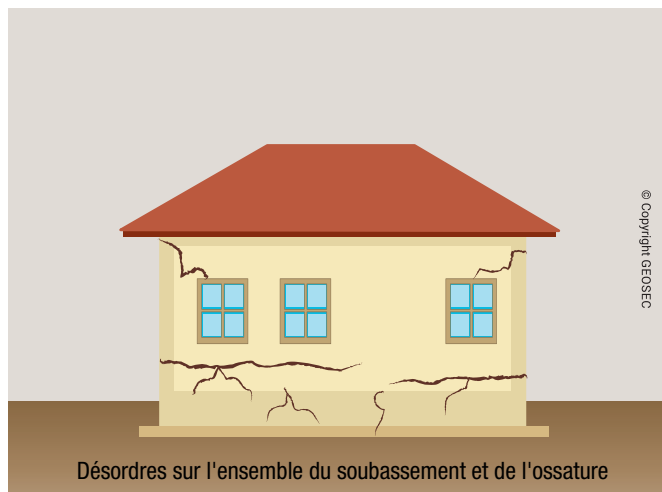
Bien que le phénomène soit connu dans la littérature scientifique depuis plusieurs décennies, la compréhension et la gestion des dégâts attribués au retrait-gonflement sont encore insuffisantes et mal maîtrisées par les municipalités et les habitants.

La première conséquence invisible de ce phénomène est la déformation du sol d'assise d'un bâtiment ou d'une maison qui va générer des désordres importants fragilisant l'ouvrage de manière durable.

Des fissures apparaissent sur les façades, souvent au niveau des points de faiblesse, tels que les ouvertures (huisseries), ayant une trajectoire oblique ou horizontale, entre deux rangées de parpaings ou de briques; des décolllements entre parties jointives des ouvrages comme les garages ou les terrasses ou une fissuration des dallages ; la rupture des canalisations créant une fuite au niveau des réseaux d'arrivée d'eau ou d'évacuation, aggravant de ce fait le phénomène.

Le plus souvent, les maisons individuelles touchées par le phénomène de sécheresse présentent un système de fondation trop faible et/ou avec un ancrage trop superficiel qui n'est pas adapté aux sols argileux.

C'est pourquoi il est fortement recommandé de réaliser, avant un projet de construction, une étude géotechnique.





## ÉTUDE DE SOL

Si vous constatez des fissures sur votre maison, ne tardez pas à contacter votre assureur qui demandera une étude de sol (**mission de diagnostic géotechnique G5**) pour confirmer ou infirmer le lien entre les désordres et le retrait-gonflement des argiles.

### NOTE :

Une **étude de sol G5**, dite de diagnostic géotechnique, permet d'identifier les causes d'un sinistre sur un ouvrage et de suggérer des solutions réparatoires et de réduction des risques majeurs auxquels l'ouvrage est exposé. Définie dans la **norme NF P 94-500** de novembre 2013, l'étude G5 consiste à :



Identifier les risques majeurs liés au terrain (exposition aux inondations, au retrait-gonflement des argiles, aux séismes, aux glissements de terrain ou présence de cavités souterraines, au risque radon, etc.) et à la présence d'eau.



Identifier les causes du sinistre observé à partir des sondages et d'essais réalisés sur site et des analyses en laboratoire.



Proposer des solutions réparatoires (par exemple une reprise en sous-œuvre) et des recommandations pour réduire le risque identifié.

# COMMENT RÉDUIRE LES RISQUES ?

Mesures d'atténuation durables  
et solutions traditionnelles.

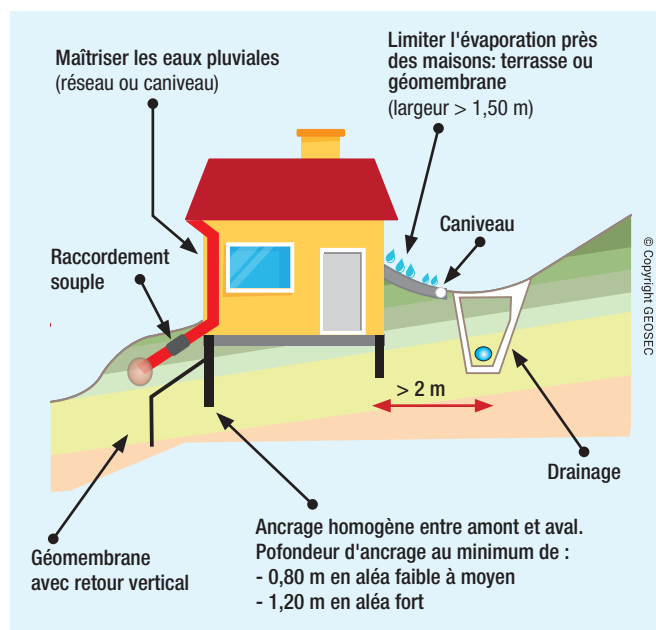
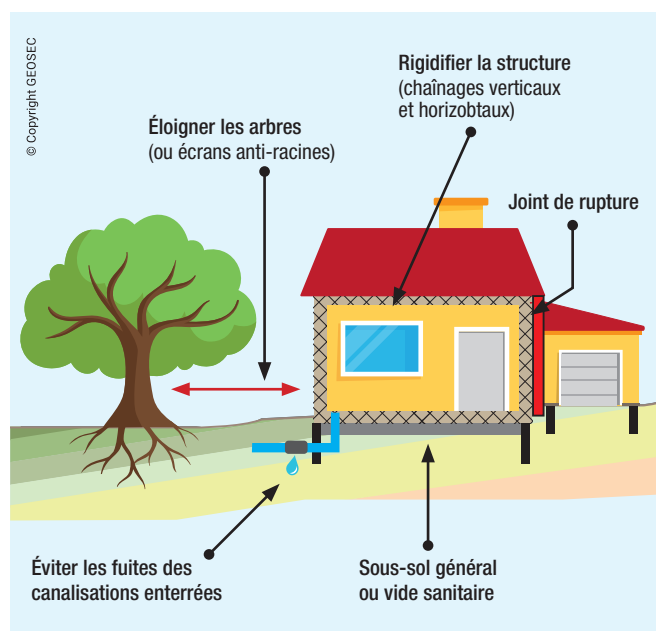


## MESURES D'ATTÉNUATION DURABLES

Source: Sols argileux et catastrophes naturelles - février 2022 Cour des comptes - [www.ccomptes.fr](http://www.ccomptes.fr) - @Courdescomptes

- Gestion de l'écoulement des eaux, qu'elles soient superficielles ou souterraines, d'origine pluviale ou sanitaire à travers la réalisation d'un dispositif de drainage adapté ;
- Gestion des eaux pendant le chantier de construction ;
- Rejet des eaux pluviales et des eaux usées dans les réseaux collectifs ;
- Protection et étanchéification des canalisations enterrées ;
- Mise en place de dispositions particulières pour les constructions sur sol argileux ou marneux afin de maintenir une teneur en eau à peu près constante sur le terrain ;
- Imperméabilisation de la surface du sol: entourer la maison d'un système étanche pour protéger sa périphérie immédiate de l'évaporation et éloigner les eaux de ruissellement (trottoir périphérique, géo-membrane enterrée ;
- Gestion des arbres : les tenir éloignés de la maison d'au moins 1,5 fois leur taille à maturité. Les arbres prélèvent en effet des quantités d'eau importantes dans les sols, qu'ils contribuent à assécher en provoquant leur retrait (en cas de sécheresse, les racines vont chercher les zones humides situées sous les fondations de la maison) ;
- Adaptation structurelle spécifique : Les fondations doivent être adaptées à la capacité de gonflement et retrait du sol et avoir une profondeur à minima de 1,20 mètre en zone à forte exposition et de 0,80 mètre en zone moyenne exposition. La superstructure doit elle aussi être renforcée par des chaînages horizontaux.

Depuis 2019, la loi ELAN impose la réalisation d'études de sol, préalablement à la construction de tout bâti, dans les zones exposées au RGA, afin de réduire ces risques.



## JOINT DE RUPTURE

Les éléments de construction accolés, fondés de manière différente ou exerçant des charges variables (par exemple garages, vérandas, dépendances, etc), doivent être désolidarisés et munis de joints de rupture sur toute leur hauteur pour permettre des mouvements différentiels.

## ÉQUILIBRE HYDRIQUE

Sous la construction, le sol est à l'équilibre hydrique alors que tout autour il est soumis à l'évaporation saisonnière, ce qui tend à induire des différences de teneur en eau au droit des fondations.

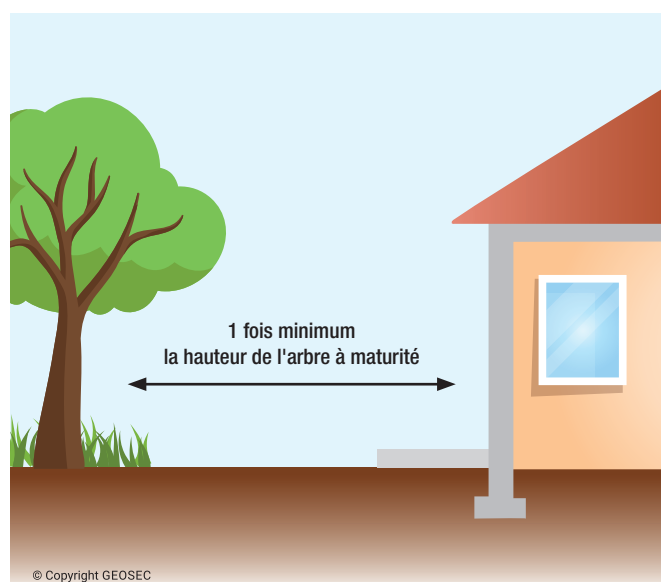
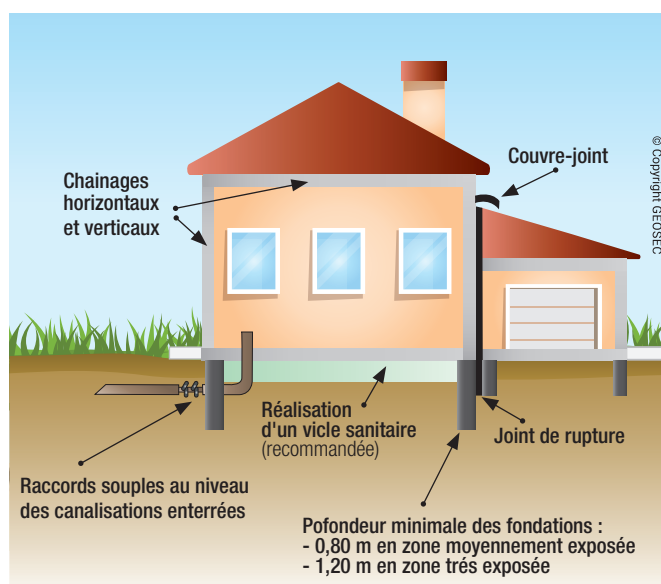
Pour éviter cela, il convient d'entourer la construction d'un dispositif, le plus large possible, sous forme de trottoir périphérique ou de géomembrane enterrée, qui protège sa périphérie immédiate de l'évaporation. Il s'agit de réaliser une ceinture étanche autour du bâtiment, en entourant le bâti d'un système étanche le plus large possible (minimum 1,50 m), protégeant ainsi sa périphérie immédiate de l'évaporation et éloignant du pied des façades les eaux de ruissellement.

Éloignement de la végétation du bâti : la technique consiste à abattre les arbres isolés situés à une distance inférieure à une fois leur hauteur à maturité par rapport à l'emprise de la construction (une fois et demi dans le cas de rideaux d'arbres ou d'arbustes).

Un élagage régulier et sévère, permettant de minimiser la capacité d'évaporation des arbres et donc de réduire significativement leurs prélèvements en eau dans le sol, peut constituer une alternative à l'abattage.

Attention, l'abattage des arbres est néanmoins également susceptible de générer un gonflement du fait d'une augmentation de la teneur en eau des sols qui va en résulter ; il est donc préférable de privilégier un élagage régulier de la végétation concernée.

La « construction-sinistrée type » est ainsi une habitation individuelle de plain-pied (l'existence d'un sous-sol impliquant des fondations assez largement enterrées, à une profondeur où les terrains sont moins sujets à la dessiccation), reposant sur des fondations inadaptées et avec présence d'arbres à proximité.



## MICROPIEUX GROUNDFIX® ACTIFS FONCÉS PAR PRESSION



**GROUNDFIX®** de **GEOSEC®** est proposé comme une technologie de pieux actifs c'est-à-dire qui n'est pas destinée à empêcher les mouvements horizontaux. Très peu invasif, c'est-à-dire sans aucune extraction de sol, le micropieu est créé par des éléments en acier modulaires spéciaux correctement assemblés et fixés au sol par des vérins hydrauliques. Le tout est associé à la structure de fondation grâce à des platines en acier industriel, fixées par ancrage à scellement chimique.

### AVIS TECHNIQUE ICMQ

Certificat d'inspection n. 093/21/ISP  
conformément aux :

#### NF EN 12699

- Exécution des travaux géotechniques spéciaux
- Pieux avec refoulement du sol

#### EN 1997

- Calcul géotechnique
- Partie 1 : règles générales

(Reconnu par EN 119-1 : 2004/AC : 2009)

#### EN 1993-5

- Calcul des structures en acier
- Partie 5: pieux et palplanches

## ROBOPILE® : TECHNOLOGIE À HAUTE AUTOMATISATION POUR LA POSE DE MICROPIEUX



**ROBOPILE®** est la dernière frontière technologique dans l'installation de micropieux en acier pour les fondations profondes des bâtiments et des chaussées.

L'application industrielle est destinée aussi bien aux travaux neufs et de grande envergure qu'aux bâtiments et infrastructures déjà existants.

**ROBOPILE®** est une technologie brevetée et à haute automatisation industrielle pour le secteur de référence.

La seule du genre jamais réalisée auparavant et conçue pour :

- Améliorer l'efficacité de l'application et de la pose en consolidation avec des micropieux en acier (plus de 80 pieux / jour pour un diamètre minimum de 76 mm - plus de 60 pieux / jour pour un diamètre maximal de 152 mm) ;
- Améliorer les conditions de sécurité du chantier en réduisant significativement les activités de manutention manuelle à bord des machines.



# LA SOLUTION SARGAR®

Injections de résines  
expansives

+

Injections de  
solutions salines

+

Tomographie  
de résistivité électrique

AVIS TECHNIQUE ICMQ  
(CERTIFICAT N. 177/24/ISP)



La solution **SARGAR®** (Demande de brevet n. EP23171424) conçue et développée dans le centre de recherche du groupe **GEOSEC®** a été ensuite élaborée sur des sites tests choisis en collaboration avec le BRGM

(Bureau de Recherches Géologiques et Minières) dans le cadre du Projet **ViSéGéo**, pour réduire le risque de retrait-gonflement des sols argileux avec un IP élevé.





**SARGAR®** est une méthode innovante de consolidation et de stabilisation des sols argileux actifs (gonflants), qui permet de réduire significativement le phénomène RGA (retrait-gonflement des sols argileux).

La méthode repose sur des injections d'un mélange de résines expansives spéciales et de solutions salines, selon un procédé spécifique préalablement testé en laboratoire et sur site.

La combinaison des effets de deux différents types d'injection permet d'obtenir une réduction considérable des variations volumétriques des argiles gonflantes et par conséquent une meilleure stabilisation des sols argileux actifs.

Avec la méthode **SARGAR®** on atteint deux objectifs simultanément. D'une part, les injections de solutions salines rendent les particules d'argile moins sensibles à l'eau et d'autre part, les injections ciblées de résines expansives permettent un meilleur compactage final du sol.

Le système **SARGAR®** a d'abord été testé en laboratoire dans la cuve expérimentale du centre de recherche **GEOSEC®** en Italie (photo 1) et en France puis, dans le cadre du projet **ViSéGéo**, dans de nombreux sites expérimentaux en France caractérisés par des sols argileux ayant des indices de plasticité considérables.

En particulier, 8 sites pilotes ont été étudiés et mis à disposition du BRGM, 4 sur la commune de LABEGE (31) et 4 sur la commune de CORNEBARRIEU (31).

**Afin d'avoir des résultats les plus impartiaux possibles, nous avons décidé de faire appel à des bureaux d'études géotechniques différents pour chaque étape du projet (Alios - Fondasol - Ginger Ceftp).**

Les premières données sur les parcelles étudiées ont été acquises en novembre 2021.



*Photo 1 : Centre de recherche GEOSEC® Italie, laboratoire expérimental à l'échelle 1:1*

## Site d'étude à Labège

Sondage	Profondeur (m/TN)	Nature	Wnat %	Wl %	Wp %	Ip	Ic
T1	-0.1 à -1.0	Limons marron	12.9	44.9	18.4	26.5	1.2
	-1.0 et -2.0	Limons argileux marron	11.5	54.6	25.3	29.3	1.5
	-2.0 à -3.0	Limons argileux beiges/gris	18.1	50.5	23.7	26.8	1.2

Sondage	Profondeur (m)	Nature	W <sub>nat</sub> %	W <sub>re</sub> %	R <sub>i</sub>
T1	-1.0 à -2.0	Limons argileux marron	11.5	7.1	0.60

Sondage	Profondeur (m/TN)	Nature	Wnat %	Passant à 2 µm %	VBS	Activité de bleu
T1	-0.1 à -1.0	Limons marron	12.9	25.1	2.61	10.41
	-1.0 et -2.0	Limons argileux marron	11.5	28.2	2.45	8.70
	-2.0 à -3.0	Limons argileux beiges/gris	18.1	17.1	2.94	17.19

Les tests en laboratoire effectués par Fondasol montrent un sol similaire avec deux essais de dessiccation indiquant des valeurs de limites de retrait  $W_{re}$  de 7.9 % et 9.6 %, soit proche des 7.1% retrouvés par Alios (02/2021).

## Site d'étude à Cornebarrieu

Sondage	Profondeur (m/TN)	Nature	Wnat %	Wl %	Wp %	Ip	Ic
T1	-0.1 à -1.0	Limons marron	12.2	30.2	15.8	14.4	1.3
	-1.0 et -2.0	Argiles limoneuses marron	14.8	44.6	17.4	27.2	1.1
	-2.0 à -3.0	Argiles limoneuses marron	17.6	43.4	19.0	24.4	1.1

Sondage	Profondeur (m)	Nature	W <sub>nat</sub> %	W <sub>re</sub> %	R <sub>i</sub>
T1	-2.0 à -3.0	Argiles limoneuses marron	17.6	10.1	0.30

Sondage	Profondeur (m/TN)	Nature	Wnat %	Passant à 2 µm %	VBS	Activité de bleu
T1	-0.1 à -1.0	Limons marron	12.2	15.1	1.56	10.32
	-1.0 et -2.0	Argiles limoneuses marron	14.8	29.4	2.97	10.09
	-2.0 à -3.0	Argiles limoneuses marron	17.6	26.9	3.38	12.57

Les tests en laboratoire effectués par Fondasol montrent un sol similaire avec deux essais de dessiccation indiquant des valeurs de limites de retrait  $W_{re}$  de 11.4 % et 16.4 %, soit proche des 10.1 % retrouvés par Alios.

## Les tests réalisés par le pôle R&D de GEOSEC

Depuis environ deux ans, **GEOSEC R&D** a activé son pôle R&D dans le domaine des traitements de consolidation et de stabilisation des sols sensibles au phénomène de RGA.

- Exécution d'essais en laboratoire sur plusieurs mixtures ;
- Réalisation d'essais à échelle 1/1 sur des sols argileux.

Les expériences menées par le service R&D de **GEOSEC®**, d'abord en laboratoire puis *in situ*, ont permis d'évaluer et de définir différentes configurations de traitement avec différentes substances et produits (photos 2,3), à base de polyuréthane, d'eau et de sels minéraux dans le but de consolider, stabiliser et d'atténuer la sensibilité des sols argileux les plus actifs.



Photos 2, 3 : Traitements des sols argileux par des différentes mixtures synthétiques et naturelles.

## Traitement et analyse des données :

- Analyses et évaluations des résultats et choix de 8 configurations d'essais adaptées aux sols des sites de Cornebarrieu et Labège
- Définition de différents protocoles (Analyse des sols, Mixtures, Procédure d'injection, ... etc) pour les 8 mini-sites de Cornebarrieu et Labège.

**GEOSEC®** a réalisé, sur chaque site expérimental, 4 mini tests-site et a procédé à des injections pour traiter et pour stabiliser le sol en utilisant un mélange de produits de différentes formulations chimiques (A, B, C, D, etc.)

Dans cette phase, l'approche suivie a été celle d'injecter différentes solutions en faisant varier les paramètres suivants :

- Le type du produit (différents sels et/ou différentes résines expansives),
- La profondeur d'injection,
- Le schéma de mise en œuvre,
- La quantité du produit injecté et l'ordre chronologique des injections.

Chaque mini-site est unique de par ses spécificités.

Sur les sites de Cornebarrieu et Labège, les caractéristiques des sols ont été déterminées (ERT 3D, tests mécaniques, tarières, tests en laboratoire...) avant la phase d'injection afin de suivre l'évolution du traitement en temps réel et comparer les résultats après traitement.

Les premiers résultats obtenus ont été très significatifs par rapport aux paramètres caractérisant l'activité des argiles.



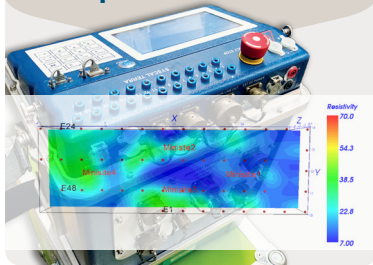
**Photo 4 :** Installation sur le site de Labège



Photo 5 : Installation sur le site de Cornebarrieu

## ESSAIS RÉALISÉS POUR LA MÉTHODE SARGAR®

Tomographie  
de résistivité électrique :  
Avant - Pendant -  
Après traitement



Essais mécaniques :  
pénétromètres  
dynamiques et statiques



Essais de laboratoire

Valeurs au bleu

Limites d'Atterberg

Oedomètre

Perméabilité à l'oedomètre

Cisaillement rectiligne  
à la boîte

Triaxial Cu+U

Triaxial Cu+Ut

Différents types  
de sites-test :

Minisite

1

SEL ÉLECTRO-STIMULÉ

Minisite

2

RÉSINE + SEL

Minisite

3

SEL

Minisite

4

RÉSINE

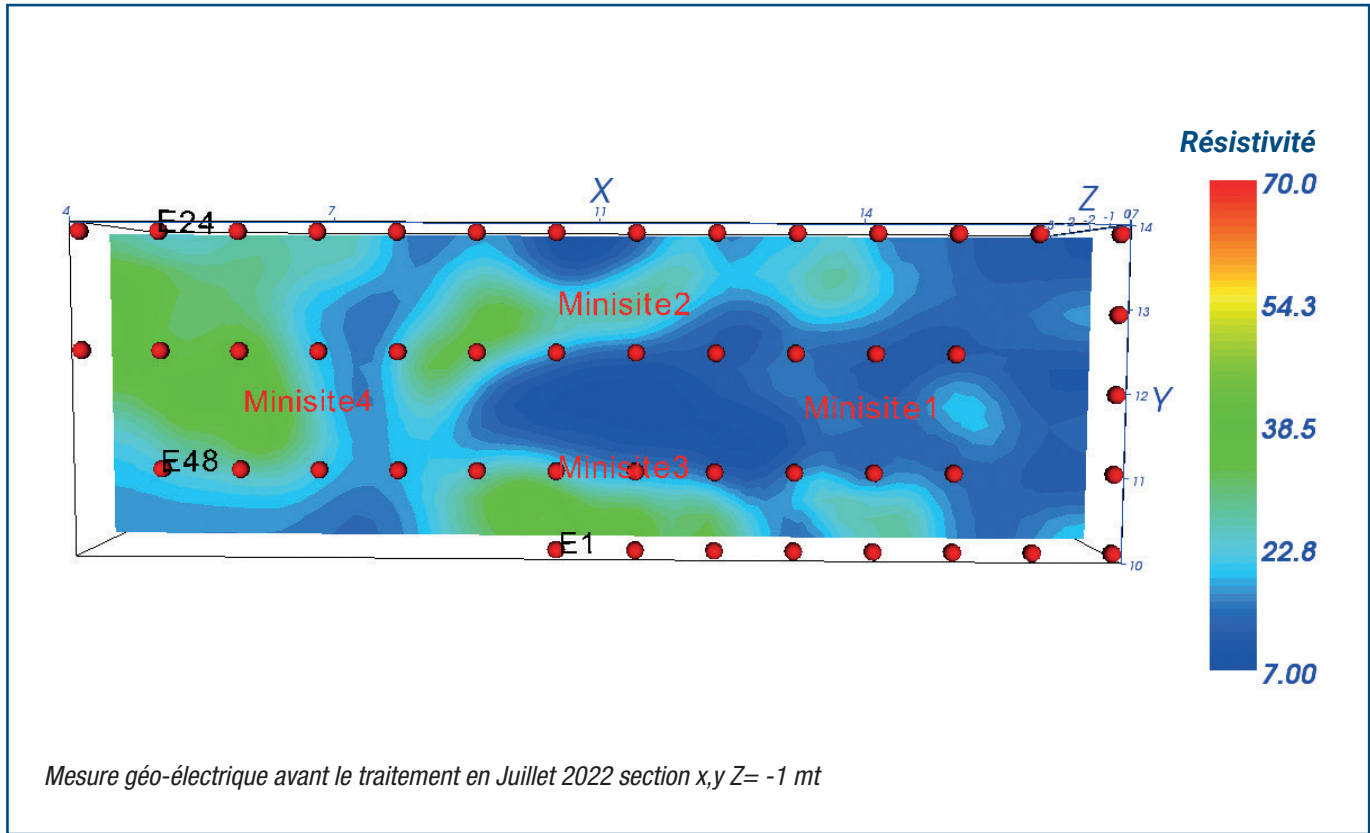
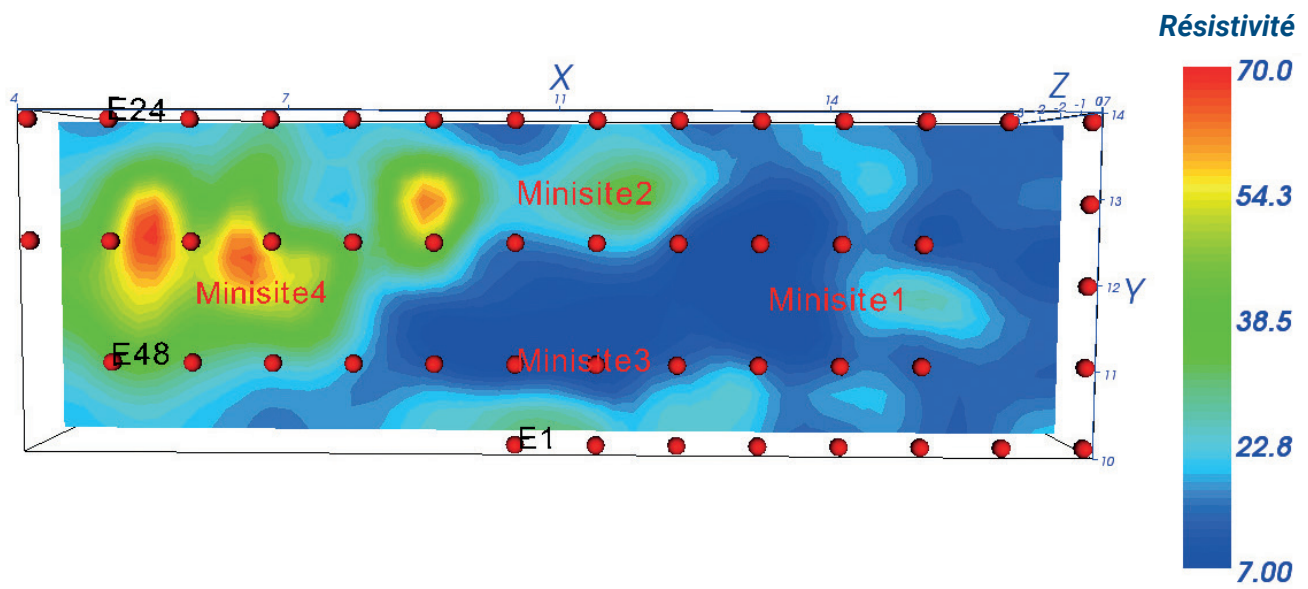
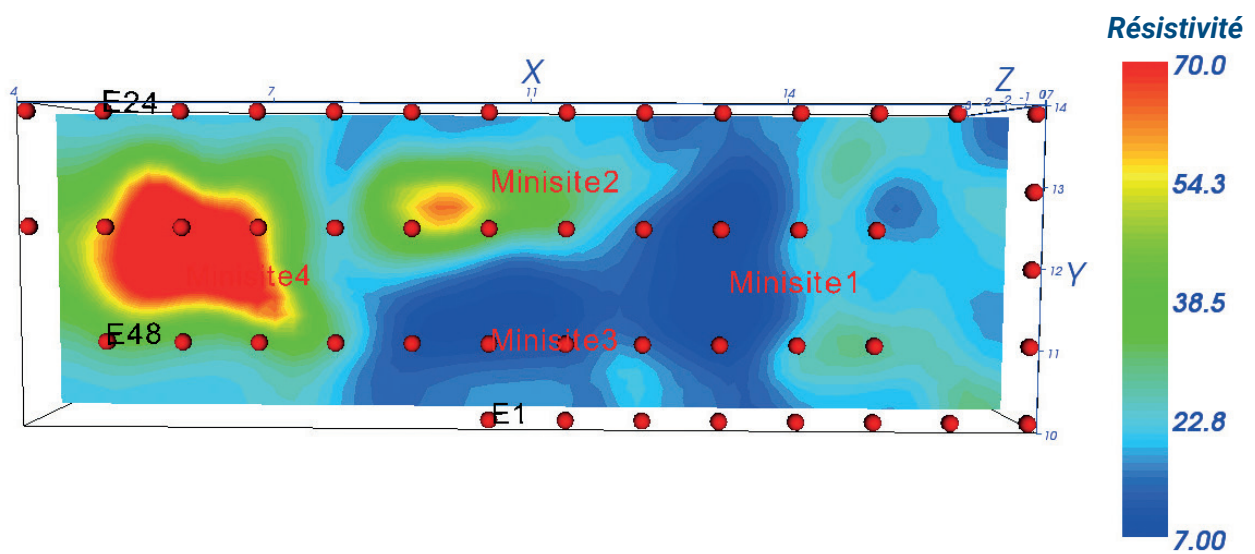


Photo 6 : Installation sur le site de Cornebarrieu



Mesure géo-électrique après le traitement en Juillet 2022 section x,y Z= -1 mt



Mesure géo-électrique après le traitement en Mars 2023 section x,y Z= -1 mt

## RÉSULTATS GÉOTECHNIQUES POST-TRAITEMENT

L'activité de recherche menée par **GEOSEC®** a été principalement orientée vers l'étude du gonflement du sol saturé en eau. Cependant, le phénomène inverse, c'est-à-dire le retrait dû à la diminution du degré de saturation, doit être compris comme exactement symétrique par rapport aux déformations induites, donc de signe opposé.

En particulier, pour l'évaluation de l'effet du traitement de stabilisation, à la fois l'indice de plasticité et la valeur au bleu de méthylène ont été considérés.

Les résultats de post-traitement de l'un des sites de test, génériquement appelés C2, sont résumés dans le **Tableau 1**.

### L'indice de plasticité

L'indice de plasticité est une mesure du degré de plasticité du sol, indiquant les caractéristiques des liaisons entre les particules présentes dans les sols argileux.

Ce paramètre ne peut pas être négatif et, si la limite plastique est supérieure à la limite de liquidité, on l'assume comme étant égal à zéro.

Dans le cas de sols à grosse granulométrie, la limite de liquidité coïncide avec la limite de plasticité et l'indice de plasticité est nul. Dans ce cas, on dit que le sol n'est pas capable d'atteindre un état plastique.

Un sol est considéré comme non-plastique également lorsque la limite de plasticité ou la limite de liquidité ne peuvent pas être déterminées. Il est donc défini comme « NP ».

Les sols argileux avec des indices de plasticité élevés sont couramment désignés sous le nom d'argilles à haute plasticité ou « fat clays ».

En cas de valeurs basses, les argilles sont désignées comme étant faiblement plastiques ou « lean clays ».

Des données expérimentales montrent comment l'indice de plasticité est lié au potentiel de gonflement des argiles.

De plus, les argiles peuvent être classées en fonction de l'indice d'activité défini par Skempton, qui est déterminé par le rapport entre l'indice de plasticité et la fraction argileuse CF, qui est indiquée pour le mini-site C2 et son injection verticale dans le **Tableau 1**.

Injection site	Prof. [m]	Ip avant	Ip après	CF	A avant	A après
C2	0.9-1.8	27.2	12	29.4	0.93	0.41
	1.8-2.7	24.4	11	26.9	0.91	0.41

**Tableau 1.** Indice de plasticité  $I_p$ , fraction argileuse CF et Activité pour le site C2, avant et après l'injection.

**Note :** En référence générale (Skempton, 1953), les argiles sont considérées comme inactives avec  $A < 0,75$ , normalement actives si  $A$  se situe entre 1,25 et 0,75, et très actives si  $A > 1,25$ .

De l'observation des données dans les **Tableau 1**, il ressort que les injections entraînent une réduction de l'activité, rendant inactives (en vert) des argiles normalement actives (en jaune).

### Bleu de méthylène

Le test du bleu de méthylène a été développé en France pour déterminer l'adéquation d'un matériau granulaire pour la production de béton, en déterminant sa teneur en argile.

La poudre de bleu de méthylène agit comme un colorant cationique : lorsqu'elle entre en contact avec l'argile, les ions de chlore présents dans la solution de méthylène s'échangent avec les cations du minéral argileux, étant adsorbés à la surface des minéraux. La quantité de solution de méthylène adsorbée dépend de la teneur en argile et de la nature de ses minéraux, de la capacité d'échange cationique et de la surface spécifique.

Les résultats des tests au bleu de méthylène sont présentés dans le **Tableau 3**. La comparaison entre les valeurs de bleu de méthylène avant et après l'injection montre une nette réduction.

Injection site	Profondeur [m]	VBS avant	VBS après
C2	0.9 - 1.8	2.83	1.82
	1.8 - 2.7	3.38	2.53

**Tableau 3.** Bleu de méthylène VBS pour le site de Cornebarrieu.

# MODÈLE 3D AUX ÉLÉMENTS FINIS POUR L'ANALYSE DE LA RÉPONSE MÉCANIQUE DES SITES TRAITÉS PAR DES INJECTIONS SELON LA MÉTHODE INNOVANTE SARGAR®

**Procédure proposée pour simuler l'effet des injections afin de réduire le gonflement du sol.**

La première partie de cette section indique une approche pragmatique pour modéliser l'effet des argiles gonflantes traitées par des injections.

La procédure commence par la classification des sols fins telle que définie dans la Norme Française ci-dessous.

## Classification des sols fins selon la Norme Française NF P 11 300.

Selon la NF P 11 300, le terme "sols fins" s'applique aux sols qui présentent les propriétés physiques suivantes :

a)  $D_{max} \leq 50 \text{ mm}$  ;

b) La quantité de particules ayant un diamètre inférieur à  $80 \mu\text{m}$  est supérieure à 35%.

où  $D_{max}$  est le diamètre maximal des particules de sol. Ces sols sont classés en catégorie A par les normes françaises. La catégorie A est ensuite subdivisée en sous-catégories en fonction de l'indice de plasticité  $I_p$ . L'indice de plasticité est défini comme  $I_p = w_L - w_p$  étant le rapport entre la limite de liquidité  $w_L$  et la limite plastique  $w_p$  du sol. La classification est représentée de manière schématique dans la **Figure 3**.

Classe <b>A</b>		Classification des sols fins									
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique							
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état						
$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ et Tamisat à $80 \mu\text{m} > 35\%$	<b>A</b>	$VBS \leq 2,5^{(*)}$ ou $I_p \leq 12$	<b>A<sub>1</sub></b> Limons peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	$IPI^{(*)} \leq 3$ ou $w_n \geq 1,25 W_{OPN}$	A <sub>1</sub> th						
				$3 < IPI^{(*)} \leq 8$ ou $1,10 \leq w_n < 1,25 W_{OPN}$	A <sub>1</sub> h						
				$8 < IPI \leq 25$ ou $0,9 W_{OPN} \leq w_n < 1,1 W_{OPN}$	A <sub>1</sub> m						
				$0,7 W_{OPN} \leq w_n < 0,9 W_{OPN}$	A <sub>1</sub> s						
				$w_n < 0,7 W_{OPN}$	A <sub>1</sub> ts						
		$12 < I_p \leq 25^{(*)}$ ou $2,5 < VBS \leq 6$	<b>A<sub>2</sub></b> Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...			$IPI^{(*)} \leq 2$ ou $I_c^{(*)} \leq 0,9$ ou $w_n \geq 1,3 W_{OPN}$	A <sub>2</sub> th				
						$2 < IPI^{(*)} \leq 5$ ou $0,9 \leq I_c^{(*)} < 1,05$ ou $1,1 W_{OPN} \leq w_n < 1,3 W_{OPN}$	A <sub>2</sub> h				
						$5 < IPI \leq 15$ ou $1,05 < I_c \leq 1,2$ ou $0,9 W_{OPN} \leq w_n < 1,1 W_{OPN}$	A <sub>2</sub> m				
						$1,2 < I_c \leq 1,4$ ou $0,7 W_{OPN} \leq w_n < 0,9 W_{OPN}$	A <sub>2</sub> s				
						$I_c > 1,3$ ou $w_n < 0,7 W_{OPN}$	A <sub>2</sub> ts				
						$25 < I_p \leq 40^{(*)}$ ou $6 < VBS \leq 8$	<b>A<sub>3</sub></b> Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...			$IPI^{(*)} \leq 1$ ou $I_c^{(*)} \leq 0,8$ ou $w_n \geq 1,4 W_{OPN}$	A <sub>3</sub> th
										$1 < IPI^{(*)} \leq 3$ ou $0,8 \leq I_c^{(*)} < 1$ ou $1,2 W_{OPN} \leq w_n < 1,4 W_{OPN}$	A <sub>3</sub> h
										$3 < IPI \leq 10$ ou $1 < I_c \leq 1,15$ ou $0,9 W_{OPN} \leq w_n < 1,2 W_{OPN}$	A <sub>3</sub> m
		$1,15 < I_c \leq 1,3$ ou $0,7 W_{OPN} \leq w_n < 0,9 W_{OPN}$	A <sub>3</sub> s								
				$I_c > 1,3$ ou $w_n < 0,7 W_{OPN}$	A <sub>3</sub> ts						
		$I_p > 40^{(*)}$ ou $VBS > 8$	<b>A<sub>4</sub></b> Argiles et argiles marneuses, très plastiques...			Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique	A <sub>4</sub> th				
A <sub>4</sub> h											
A <sub>4</sub> m											
A <sub>4</sub> s											

Figure 3. Classification des sols fins selon les Normes françaises.



Catégorie	w <sub>L</sub> %		Indice des vides suggéré
A1	< 30		1
A2	30 <	< 45	1.1
A3	45 <	< 60	1.17
A4	60 <		1.27

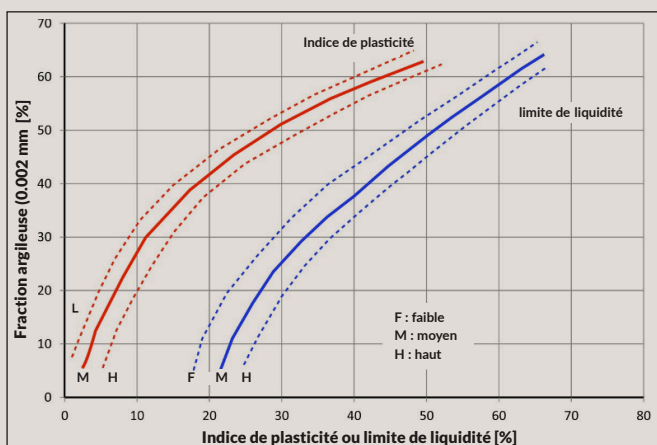
**Tableau 5.** Classification des Normes françaises modifiée en fonction de la limite de liquidité  $w_L$ .

Pour faciliter l'interprétation du tableau, les valeurs d' $I_p$  sont converties en valeurs correspondantes de limite de liquidité  $w_L$ .

Par la suite, nous nous référerons uniquement aux catégories principales A1, A2, A3 et A4, en ignorant les sous-catégories supplémentaires.

La classification française dans la Figure 3 peut être exprimée en termes de limite de liquidité, produisant ainsi le **Tableau 5**.

De plus, aux fins de la présente étude, une valeur moyenne de  $\rho_s = 2700 \text{ kg/m}^3$  est supposée pour la densité des grains de ces types de sols. Cela conduit à un poids spécifique relatif égal à  $G_s = 2.7$ .



**Figure 4.** Relation entre la limite de liquidité, l'indice de plasticité et la fraction argileuse.

La **Figure 4** montre la variation typique de la limite de liquidité  $w_L$  et de l'indice de plasticité  $I_p$  en fonction de la teneur en argile. On note que la différence entre  $I_p$  et  $w_L$  pour la même argile est d'environ 20% en moyenne. Par conséquent, à titre d'exemple, pour un sol avec  $I_p = 12$ , la limite de liquidité  $w_L$  sera d'environ 30%. En appliquant cette relation aux valeurs seuil de la Figure 1, on obtient la classification en termes de limite de liquidité  $w_L$  du **Tableau 5**. En ce qui concerne les valeurs de l'indice des vides du **Tableau 5**, elles ont été calculées en utilisant la formule fondamentale :

$$e = \frac{G_s \cdot \gamma_w - \gamma}{\gamma - S_r \cdot \gamma_w}$$

Où  $\gamma_w$  est le poids spécifique de l'eau. On suppose une valeur moyenne de  $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$

Le poids spécifique relatif  $G_s$  est considéré comme égal à 2.7. Le poids volumique  $\gamma$  est estimé en fonction de la fraction argileuse du sol. Les valeurs maximales et minimales pour  $\gamma$  sont indiquées dans le **Tableau 6**.

Pourcentage d'argile [%]	Poids volumique $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]
35 – 50	13.5 – 14.5
50 - 65	12.5 – 13.5

**Tableau 6.** Poids volumique  $\gamma$  en fonction de la fraction argileuse.

La **Figure 3** est utilisée pour déterminer la fraction argileuse correspondante en fonction de la limite de liquidité, et ensuite le **Tableau 2** est utilisé pour estimer le poids volumique  $\gamma$ . Pour un sol sec, on peut supposer un degré de saturation de l'ordre de 18 à 20%.

Granulométrie de la fraction de terre fine		Texture du sol (USDA)			Pourcentage d'argile	Limite de liquidité
limoneux ou silteux à grains grossiers	sableux	SL	S	5	15	
				8	17	
				10	19	
				12	21	
				15	24	
	limoneux ou silteux à grains fins	Sill	SL	18	26	
				20	28	
				25	33	
				27	34	
				30	37	
fine	SC	CL SiCL	35	42		
			40	46		
			45	51		
			50	55		
			55	60		
	très fine	SiC	C	60	64	
				65	69	
				70	73	
				75	78	
				80	82	
			85	87		
			90	91		

Figure 5. Pourcentage d'argile en fonction de la limite liquide.

Degré d'expansion	Chen (1983)	Seed et al. (1962)	Daksanamurthy et Raman (1973)	USBR (Holtz et Gibbs, 1956)
très élevé	LL > 60	PI > 35	LL > 70	CC > 28
élevé	40 < LL ≤ 60	20 < PI ≤ 35	50 < LL ≤ 70	20 < CC ≤ 31
moyen	30 ≤ LL ≤ 40	10 ≤ PI ≤ 20	35 < LL ≤ 50	13 ≤ CC ≤ 23
faible	LL < 30	< 10	20 ≤ LL ≤ 35	CC < 13

Tableau 7. Classification du degré de gonflement (potentiel de gonflement).

Catégorie	Potentiel de gonflement	Contrainte de gonflement libre $\epsilon_{so}$ %
A1	Faible	1.0
A2	Moyen	1.0 – 5.0
A3	Élevé	5.0 – 10.0
A4	Très élevé	> 10.0

Tableau 8. Catégorie du terrain et potentiel de gonflement correspondant.

La **Tableau 7** montre ce que la littérature technique propose comme corrélation entre les limites de consistance et le potentiel de gonflement du sol. Le symbole LL dans le **Tableau 7** correspond à  $w_L$ , et PI à  $I_p$ . Le symbole CC est l'abréviation de "Clay Content", c'est-à-dire la teneur en argile.

En comparant avec la classification française, on obtient le **Tableau 8**, qui montre la corrélation entre chaque catégorie de sol et son potentiel de gonflement. De plus, le **Tableau 8** montre le "free swelling" attendu, c'est-à-dire le gonflement libre. Le gonflement libre  $\epsilon_{so}$  est le rapport entre l'élévation

totale du sol dans des conditions de saturation complète et la hauteur initiale de l'échantillon avant le début du processus de saturation. Ce gonflement est appelé "libre" car il est observé en l'absence de charges externes appliquées.

## Gonflement libre attendu

Sur la base de la déformation de gonflement libre indiquée dans le **Tableau 8**, il est possible de calculer le gonflement libre attendu pour chaque site d'injection à une profondeur donnée **Tableau 9** :

Test Site injections	Profondeur [m]	$\epsilon_{so}$ % pre	$\epsilon_{so}$ % post	Variation %
C2	0.9-1.8	7.5	1.0	-86.7%
	1.8-2.7	5.0	1.0	-80.0%

Tableau 9. Gonflement libre pour le site test.

La comparaison des résultats obtenus montre un effet plus marqué pour les injections de résine avec des sels et une électrostimulation, la réduction maximale en pourcentage du gonflement libre a atteint 86,7%.

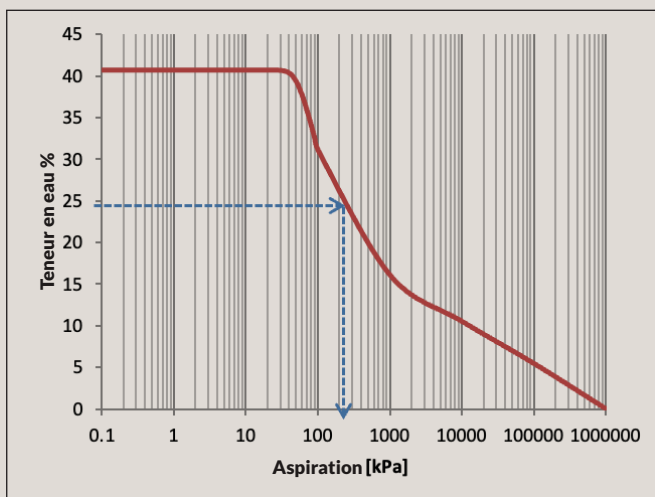
## Résultat sur le site C2 : Réduction maximale du gonflement a atteint 86,7%

Site d'injection	Profondeur [m]	Sr pre	Sr post
<b>C2</b>	0.9-1.8	0.33	0.93

### De la teneur en eau à la succion

Pour modéliser le comportement mécanique des sols partiellement saturés, il est nécessaire de relier les propriétés physiques à des grandeurs décrivant les propriétés mécaniques du matériau. Pour obtenir les propriétés nécessaires au calcul, il est nécessaire de corrélérer la teneur en eau  $w_L$ , l'indice de plasticité  $I_p$  et la teneur en eau à l'état naturel  $W_n$  à la pression d'eau interstitielle négative (suction). Pour obtenir cette valeur, on utilise la courbe caractéristique de rétention d'eau du sol (SWCC - Soil Water Characteristic Curve).

La construction de la SWCC nécessite un équipement spécial qui n'est pas disponible dans les laboratoires géotechniques standards. Cependant, pour les besoins de cette étude, il est possible de reconstruire la SWCC à partir de la courbe granulométrique en ajoutant les propriétés physiques du matériau. La méthode proposée a été mise en œuvre de manière appropriée dans une feuille de calcul, jointe au présent rapport, dans le but de faciliter la construction de la SWCC à partir des données d'entrée requises.



**Figure 6.**  
Courbes caractéristiques de la teneur en eau générées pour  $w_L = 60\%$ .

Les données d'entrée requises comprennent la limite de liquidité  $w_L$ , la densité des grains  $\rho_s$  et l'indice des vides  $e$ . À titre d'exemple, la **Figure 6** montre la SWCC générée pour un sol argileux avec une limite de liquidité  $w_L$  de 60%, une densité des grains  $\rho_s$  de 2700 kg/cm<sup>3</sup> et un indice des vides  $e$  de 1,1.

Cette SWCC est ensuite utilisée pour estimer la succion du sol étudié. Toujours à titre d'exemple, en utilisant la SWCC en combinaison avec un contenu d'eau naturel de  $W_n = 25\%$ , cela indique une succion de 220 kPa.

La SWCC générée a ensuite été utilisée pour calibrer les données du modèle hydraulique de Van Genuchten mis en place dans PLAXIS pour évaluer le degré de saturation initial, calculé à rebours à partir du gonflement libre attendu pour chaque catégorie de sol.

Le modèle de Van Genuchten mis en place dans le logiciel PLAXIS nécessite l'étalonnage de trois paramètres initiaux :  $g_a$ ,  $g_n$  et  $g_l$ . Le programme développé en interne fournit ces paramètres en résultat de l'étalonnage.

### Valeurs initiales du modèle de Van Genuchten pour les sites de test

Les propriétés mécaniques de chaque site ont été déterminées avant les injections sur la base d'essais in situ et de laboratoire, et sont indiquées de manière schématique dans le tableau ci-dessous :

Test site	$c'$	$\phi'$	$\lambda^*$	$\kappa^*$	$e_0$
	[kPa]	[°]	[°]	[°]	[MPa]
<b>C2</b>	25.0	24.0	0.063	0.0126	0.6

**Tableau 10.**  
Cas considérés pour la modélisation numérique.

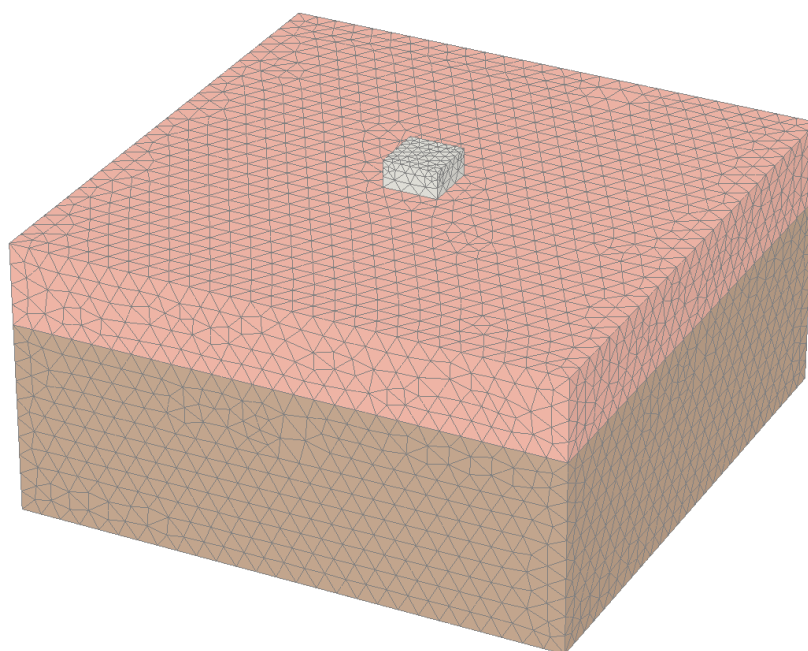
## Modèle de calcul pour les simulations aux Éléments Finis

Un modèle simple d'une fondation isolée de dimensions 2 m x 2 m (**Figure 7**) a été préparé dans le logiciel PLAXIS 3D CE 2021. Le socle est fondé sur une couche d'argile gonflante de 3 m de profondeur, tandis que le sol à une profondeur supérieure à 3 m est considéré comme inerte par rapport au gonflement/retrait, conformément à l'expérience acquise sur le phénomène.

Initialement, le degré de saturation décrit dans la section précédente a été défini pour la couche superficielle.

Dans la phase suivante, la saturation complète de la couche a été simulée en élevant la nappe phréatique jusqu'à atteindre le niveau du terrain. Les cas considérés sont résumés dans le **Tableau 10**. Les autres cas non considérés sont une répétition des cas qui font l'objet de la modélisation.

Pour simuler le poids d'un bâtiment, une pression de 800 kPa a été appliquée sur le dessus du socle avant que le processus de saturation du sol ne soit simulé.



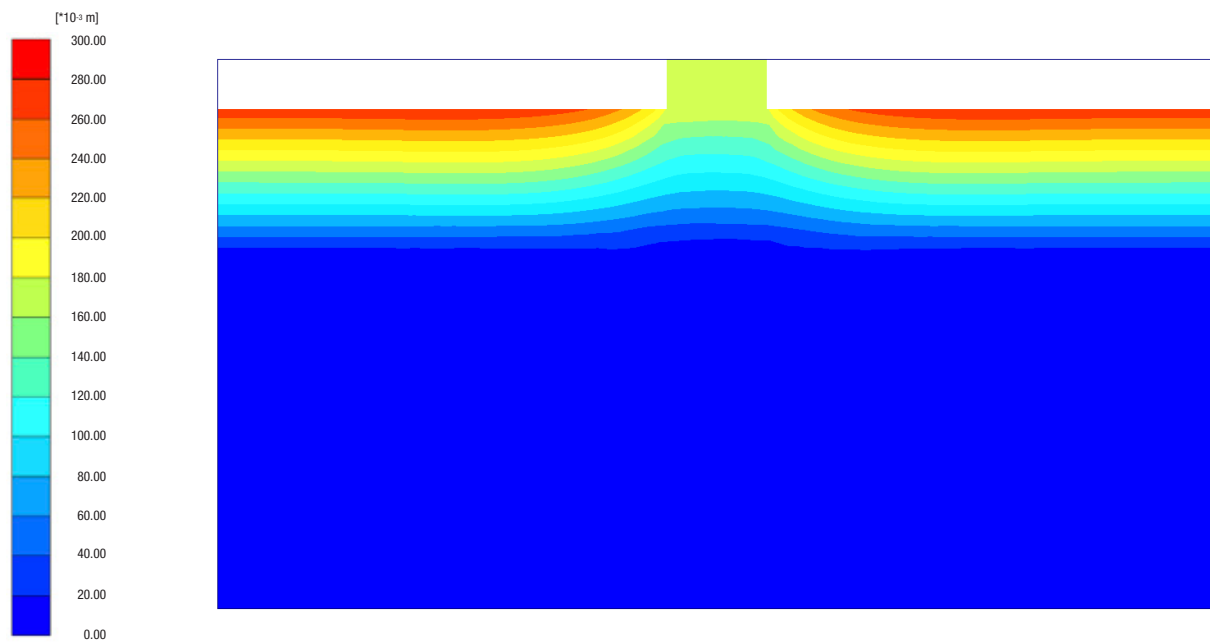
*Figure 7. Modèle 3D pour l'analyse de la réponse mécanique des sites traités par la méthode SARGAR®*

## Résultats

Les résultats sont présentés en termes de déplacement vertical (élévation) dû à la saturation de la couche superficielle d'argile gonflante (**Figures 8 et 9**). Les cas qui analysent le sol non traité, montrent un soulèvement maximal variant entre 0,14 et 0,28 m, alors que les simulations sur le sol traité avec les injections montrent un soulèvement maximal allant de 0,03 m à 0,06 m.

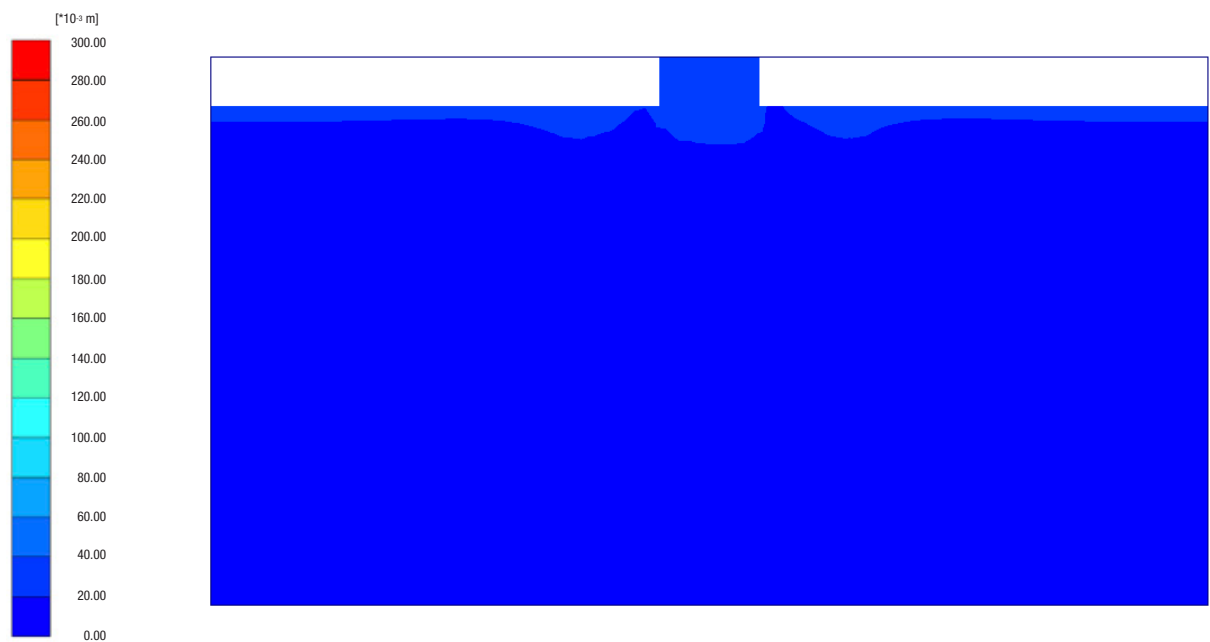
On peut donc en conclure que le gonflement libre attendu a été réduit, grâce aux injections, d'un facteur en moyenne supérieur à 4. La présence de la charge de la fondation entraîne évidemment une réduction de l'élévation, mais cela n'est pas pertinent pour les besoins de la présente étude car cette réduction dépend de l'importance de la charge appliquée.

## AVANT TRAITEMENT



**Figure 8.** Soulèvement après saturation. Soulèvement maximum de 0,28 m (champ libre).

## APRÈS TRAITEMENT



**Figure 9.** Soulèvement après saturation. Soulèvement maximal de 0,03 m (champ libre).

## CONCLUSIONS

L'effet des injections réalisées selon la méthode **SARGAR®** a été étudié à travers l'analyse de données obtenues à partir d'essais in situ et en laboratoire sur deux sites d'essais.

Cette étude a révélé l'effet des injections sur le potentiel de gonflement des argiles. Différents mélanges de résine et/ou de sels ont été injectés, avec ou sans électrostimulation.

Les données disponibles ont été analysées en termes de variation de l'indice de plasticité et de la valeur au bleu de méthylène suite aux injections.

L'analyse des données montre que, en général, l'indice de plasticité diminue considérablement dans les deux sites d'essais.

Ainsi, les argiles initialement très gonflantes deviennent faiblement actives, et les argiles initialement actives sont transformées par les injections en argiles inactives.

Ceci se repercute dans la classification des sols selon les Normes Françaises. En effet, s'agissant de deux sites analysés ils passent respectivement des catégories A3 à A2 et de A2 à A1 suite aux injections **SARGAR®**.

L'analyse des résultats en termes de classification des sols selon la Norme Française a mis en évidence une équivalence substantielle du mélange injecté, avec un effet plus favorable sur le site de Cornebarrieu (31) pour le mélange de résine et de sels avec électrostimulation, qu'à Labège (31), où des effets légèrement supérieurs ont été observés avec seulement l'injection de résine.

L'étude est complétée par une simulation numérique utilisant un logiciel 3D aux éléments finis.

Les résultats obtenus indiquent que le sol traité est soumis à un gonflement libre inférieur d'un rapport supérieur à 4 par rapport au gonflement libre du sol non traité.

**À partir des résultats obtenus par différentes approches, il a été constaté que les injections de mélanges de résine et sels minéraux conduisent à une réduction considérable du potentiel de gonflement et de retrait des argiles, voire leur annulation totale.**



# LA MAITRISE

DEMANDE DE BREVET  
N. EP23171424 



## DES SOLUTIONS BREVETÉES ET CERTIFIÉES

Avec **GEOSEC®** vous aurez la garantie des connaissances, de la technologie et de la compétence propres à l'inventeur de la méthode.

**GEOSEC®** fournit depuis plus de 20 ans la meilleure expertise du secteur, grâce à plus de 40.000 interventions de consolidation réalisées avec succès.

La méthode **SARGAR®** a obtenu l'**Avis Technique ICMQ** (certificat N. 177/24/ISP).



## TOMOGRAPHIE "ERT 4D LIVE"

Cette technologie, unique dans son domaine, garantit une fiabilité optimale et un maximum de précision de l'intervention.

Les méthodes **GEOSEC®**, permettent le monitoring des injections (avant, pendant, après) les travaux, et le suivi des changements dans le sol en dessous de l'ouvrage.



## INJECTIONS ECO-COMPATIBLE

**GEOSEC®** est attentive à la préservation de l'environnement. Le terrain n'est pas pollué par le traitement.

# GARANTIE DÉCENNALE



ALLIANZ France, partenaire de renommée mondiale, assure l'ensemble de ses travaux pour sa responsabilité civile ainsi que pour tous les travaux relevant de la garantie décennale conformément aux dispositions des art.1792 et suivants du code civil.

ALLIANZ France comme partenaire d'assurance représente pour **GEOSEC®** France une reconnaissance importante de la qualité et la spécificité technique de ses travaux ainsi que son engagement sur le marché de la consolidation de sol.



## POUR EN SAVOIR PLUS

CONTACTEZ-NOUS. UN EXPERT DE NOTRE RÉSEAU NATIONAL SE DÉPLACERA CHEZ VOUS, GRATUITEMENT ET SANS ENGAGEMENT

**GEOSEC FRANCE sas**  
Parc de l'Esplanade  
4, rue Enrico Fermi Bâtiment C3  
77400 Saint Thibault Des Vignes  
[www.geosec.fr](http://www.geosec.fr)



© Copyright GEOSEC 2024

**VISITE  
ET DEVIS  
GRATUITS**

APPEL GRATUIT DEPUIS UN POSTE FIXE  
**N° Vert 0 800 400 245**  
[www.geosec.fr](http://www.geosec.fr)

**GEOSEC**  
GROUND ENGINEERING