

LES MAISONS ET LES ROUTES EXPOSÉES AU RGA À L'ÉPREUVE DE L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE OF HOUSES AND ROADS UNDER SHRINKAGE-SWELLING PHENOMENON EFFECTS

Lamine IGHIL AMEUR¹

¹ Cerema, Blois, France

RÉSUMÉ – L'objectif de ces travaux est à la fois de sensibiliser sur les conséquences du RGA (Retrait-Gonflement des sols Argileux) sur le bâti et les effets du changement climatique. Après quelques rappels sur le phénomène, ses impacts sur les structures et les sinistrés sont détaillés. Ensuite, des solutions issues des travaux de recherche en cours pour la résilience climatique et la réduction des vulnérabilités des ouvrages sont évoquées.

ABSTRACT – The aim of these research works is both to raise awareness of the consequences of shrinkage-swelling phenomenon on buildings and roads under climate change conditions. After some reminders on the phenomenon, its impacts on structures and victims are detailed. Then, a summary is proposed on new solutions currently developed for the climate resilience and the reduction of the vulnerability of structures.

1. Introduction

Sous les effets du changement climatique, les événements météorologiques deviennent de plus en plus fréquents et intenses en termes de sinistralité et de coût des dommages associés. D'autre part, les phénomènes et les mécanismes régissant les risques naturels sont au même titre affectés par l'accentuation de ces pressions hydriques rendant leur compréhension et leur suivi davantage complexes. Les structures légères à l'instar des maisons et des routes, construites sur des sols argileux sensibles aux phénomènes de retrait et de gonflement, subissent davantage de dégradations imputables à la sécheresse.

En France, le dernier recensement établi par le ministère en charge de l'écologie fin juin 2021 fait état de plus de 10,4 millions de maisons individuelles potentiellement très exposées au RGA, dont près de la moitié bâtie après 1976 ([SDES, 2021](#)). De plus, le nouveau zonage national montre que l'exposition forte ou moyenne au RGA concerne désormais 48 % des sols métropolitains. Ainsi, trois-quarts des communes ont plus de 50% des maisons exposées selon les derniers chiffres de la Mission Risques Naturels ([MRN, 2022](#)). Sur la base des chiffres publiés en 2021 par la Caisse Centrale de Réassurance ([CCR, 2021](#)), le coût moyen estimé des dommages assurés représente pour la sécheresse au moins 50% du coût moyen global, comparée aux autres catastrophes naturelles, sur chaque année depuis 2018 et atteint près de 77% en 2020.

Les routes sont également durement impactées par la sécheresse à travers des dommages caractérisés le plus souvent par des fissures longitudinales proches des bords et des déformations très significatives constituant un danger pour la sécurité des usagers. L'impact du changement climatique sur les routes va peser de plus en plus en termes de dommages et de coûts liés à l'entretien du réseau exposé. La Cour des comptes a publié début 2022 son rapport sur "L'entretien des routes nationales et départementales" en citant les travaux du Cerema en partenariat avec les gestionnaires locaux en faveur de la résilience des infrastructures à l'épreuve du changement climatique.

Le présent article propose un état des lieux sur les travaux de recherche en cours pour l'adaptation des structures exposées au RGA face au changement climatique. D'abord, à travers une compréhension du phénomène RGA et son évolution dans ces conditions météorologiques critiques. Ensuite, ses conséquences sur le bâti et l'impact psychologique sur les sinistrés sont exposés. Enfin, une synthèse est proposée sur les projets menés actuellement par le Cerema, Institut Carnot Clim'adapt, pour concevoir et développer les nouvelles solutions de remédiation RGA avec les acteurs socio-économiques impliqués. Il s'agit par exemple de la solution MACH « MAison Confortée par Humidification », pour le confortement des maisons exposées à la sécheresse et ORSS « Observatoire des Routes Sinistrées par la sécheresse » avec le concours des départements de la région Centre-Val de Loire pour la stabilisation des routes affectées par le RGA.

2. Phénomène de RGA et impacts du changement climatique

2.1. Processus de retrait et de gonflement dans les sols argileux

Les processus naturels de retrait et de gonflement sont une succession de variations de teneur en eau d'un sol argileux sous l'effet de sollicitations hydriques et cycliques influencées par les conditions météorologiques de sécheresse et de précipitations. Par ailleurs, le phénomène de RGA dépend de la nature minéralogique du sol argileux et l'environnement proche dans lequel il se produit. Pour comprendre comment se traduisent les processus de retrait et de gonflement d'un sol argileux, la figure 1 montre l'évolution de l'état d'un élément de sol idéalisé soumis à un cycle complet de séchage-humidification.

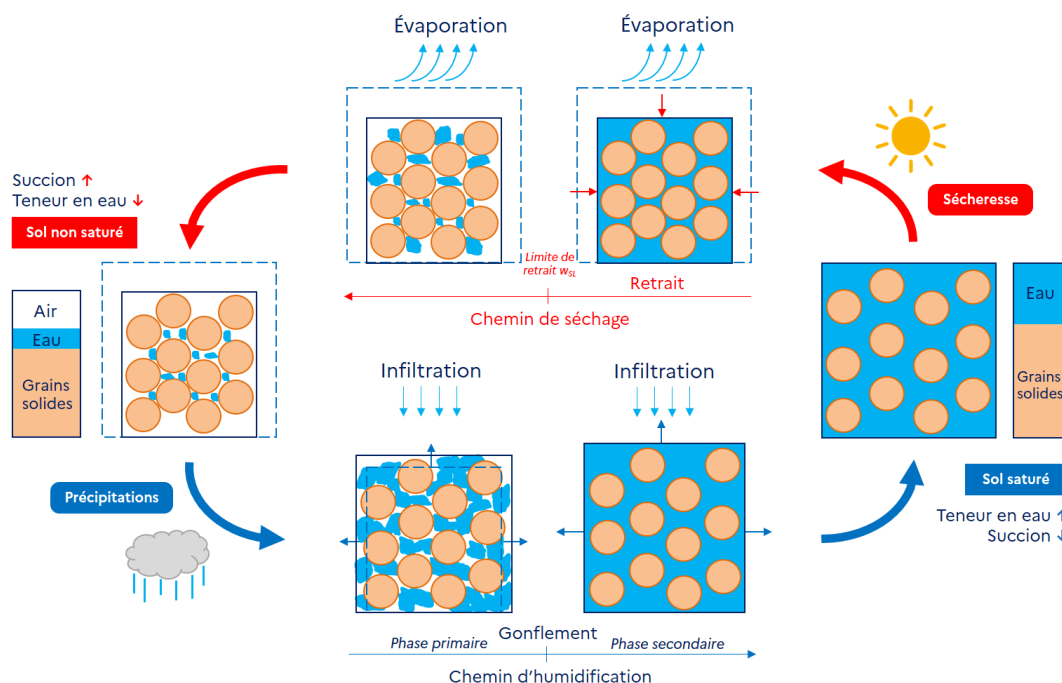


Figure 1. États d'un élément de sol *idéalisé* soumis à un cycle complet de séchage-humidification.

Sur la figure 1, un élément de sol saturé idéalisé soumis à un chemin de séchage (sécheresse) enregistre à la fois une déformation volumique (flèches rouges) dans le sens du retrait et une perte de masse liée l'évaporation de l'eau présente dans le sol. Cette première phase dite de « retrait » est caractérisée par le rapprochement des grains solides et se poursuit jusqu'à la limite de retrait notée w_{SL} , à partir de laquelle le séchage se poursuit via l'évaporation. Sur ce chemin de séchage, la teneur en eau du sol diminue et inversement, sa succion augmente et le sol devient non saturé à l'état final. A noter que les cinétiques du retrait et du séchage dépendent, entre autres, des conditions hydriques

du milieu. En effet, [Ighil Ameer et Hattab \(2019\)](#) ont observé des vitesses de retrait plus rapides à forte succion imposée à un échantillon de kaolinite initialement saturé. La succion du sol, pouvant être influencée par les conditions météorologiques et celles de l'environnement proche, est susceptible d'affecter la cinétique du retrait sous l'effet de la sécheresse.

La figure 1 montre que sur un chemin d'humidification par infiltration d'eau, le sol subit le phénomène de gonflement en deux phases ([Reiffsteck, 1999](#)) : (i) la phase primaire, avec la migration ou la diffusion de l'eau dans le sol à partir de ses extrémités. Elle est plus ou moins longue suivant la nature du sol, son état de saturation (selon le mode d'imbibition) ainsi que l'état des contraintes. Elle peut durer de quelques heures à plus d'un mois. (ii) la phase secondaire, liée à l'hydratation progressive des minéraux argileux, qui correspond à un processus de cinétique lente. Sur ce chemin d'humidification, la teneur en eau du sol augmente et inversement, sa succion diminue et tend vers zéro lorsque le sol devient saturé à l'état final à la fin du cycle complet de séchage-humidification.

2.2. Évolution du phénomène RGA sous l'effet du changement climatique

La question de l'impact du changement climatique sur la sinistralité sécheresse et le phénomène de RGA a été anticipée il y a quelques années à travers des études prospectives et des modélisations sous différents angles (climatique, assurantiel et phénoménologique). [Plat et al. \(2009\)](#) ont étudié ce sujet en soulevant les quelques questions suivantes : (i) le phénomène de RGA va-t-il s'intensifier ? Affectera-t-il les constructions jusque-là épargnées ? Engendrera-t-il des désordres plus conséquents sur les maisons sinistrées ? (ii) Y aura-t-il une modification de l'extension géographique affectée par le RGA ? (iii) Quel sera l'impact de l'augmentation de la fréquence des sécheresses sur les désordres occasionnés ?

Le phénomène de RGA s'intensifie naturellement et durablement avec l'accentuation des cycles de séchage-humidification qui, en se produisant d'une manière encore plus aléatoire, fragilisent davantage les propriétés hydromécaniques des sols argileux. De plus, les sécheresses plus longues et intenses engendreront une dessiccation plus profonde, estimée aujourd'hui aux deux premiers mètres proches de la surface exposée à l'évapotranspiration. En fonction de la qualité de construction des ouvrages exposés et la configuration de leur environnement proche, cela peut en effet affecter des constructions épargnées dans le passé et induire des désordres conséquents (Fig. 2).



Figure 2. Exemples de dommages imputables à la sécheresse et au phénomène de RGA : (a) fissuration de la structure d'une maison, (b) fissuration d'une route départementale.

L'augmentation de la fréquence des sécheresses extrêmes constatée ces six dernières années aura pour conséquences ; l'augmentation de la vulnérabilité du bâti et un effet cumulatif des désordres. Ainsi, ces désordres cumulés nécessiteront alors des travaux lourds et coûteux. Pour les dégâts sécheresse indemnisés par les assureurs, la nouvelle projection de France Assureurs aboutit au triplement de la charge moyenne annuelle (13,8 M€ entre 1989 et 2019) à hauteur de 43 M€ et estime à 17,2 M€ la part de l'effet du changement climatique à horizon 2050 ([FA, 2021](#)).

3. Conséquences du RGA sur le bâti et les sinistrés

Les conséquences de la sécheresse et du phénomène de RGA ne se limitent pas aux seuls dommages matériels du bâti et aux coûts assurantiels (maisons) et d'entretien (routes), à la tendance croissante. L'impact sociologique et psychologique subi par les sinistrés au quotidien (cas de l'habitat) est tout aussi important à prendre en compte ; (i) l'aspect cumulatif et la cinétique lente du RGA, (ii) la récurrence et l'intensité des événements météorologiques dans le contexte du changement climatique et (iii) la lenteur des procédures d'indemnisation, sont autant de facteurs de préoccupation pour les sinistrés.

3.1. Impacts du RGA sur les structures légères

L'analyse des effets de la sécheresse et du RGA sur les structures légères requière la prise en compte de l'ensemble des éléments impliqués : la structure de l'ouvrage (maison ou route), le sol de fondation, la météorologie locale et surtout l'environnement proche (végétation, gestion des eaux, évapotranspiration, etc). La figure 3 propose une synthèse de ces facteurs prépondérants et des dommages induits pour les routes et les maisons.

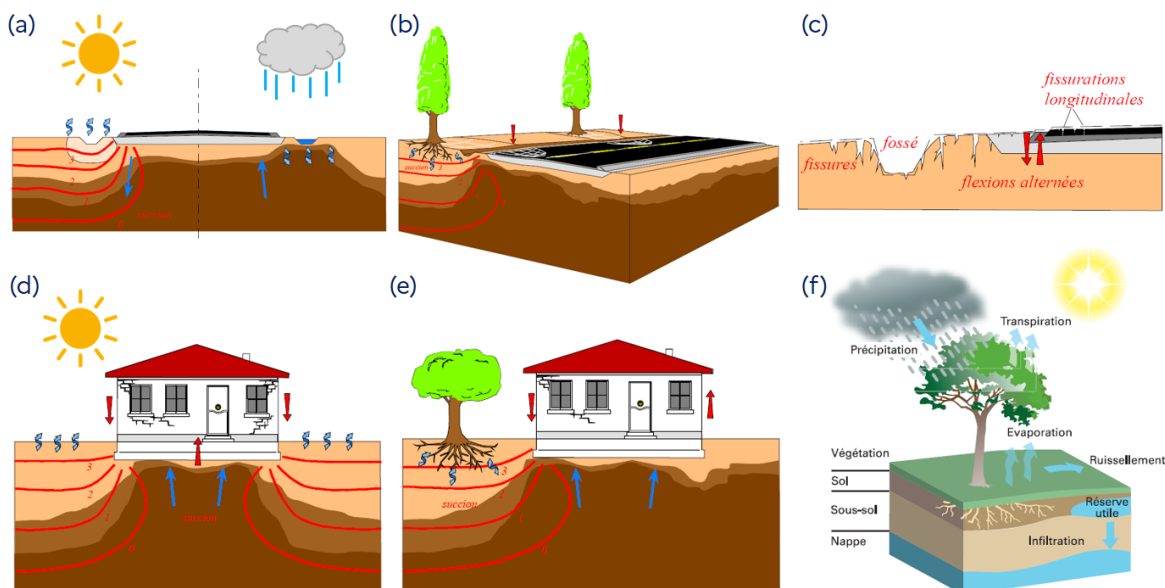


Figure 3. Conséquences du RGA et impacts de l'environnement proche : (a), (b) et (c) sur une route, (d) et (e) sur une maison (Reiffsteck, 1999) et (f) cycle de l'eau (Béchade, 2014).

Les départements, gestionnaires en charge de l'entretien des routes départementales, sont de plus en plus confrontés aux fissurations et dégradations liées à la sécheresse. En effet, les sols argileux très plastiques, sur lesquels sont construites ces routes, sont sensibles aux variations de teneur en eau au niveau des couches supérieures, fortement exposées aux conditions météorologiques et aux facteurs de l'environnement proche. Lors des périodes de sécheresse, cela entraîne sur les routes des désordres souvent matérialisés par des fissures longitudinales et des tassements différentiels proches des bords (Fig. 3c). Reiffsteck (1999) présente sur la figure 3 les pathologies les plus évidentes en lien avec l'environnement proche de la route : (i) sous les effets des cycles sécheresse/humidification (Fig. 3a), le sol de fondation est soumis à des mouvements alternés verticaux irréversibles. Ceci est caractérisé par un phénomène de retrait latéral en été et un phénomène de gonflement en hiver avec comme conséquences des contraintes de traction sur la structure de chaussée entraînant des fissures longitudinales, (ii) en présence de la végétation qui borde la chaussée (Fig. 3b), une influence racinaire par la succion favorise l'amplification du RGA et fragilise davantage cette zone active au

niveau des accotements, déjà fortement exposée et sollicitée par les conditions météorologiques.

Les maisons individuelles construites le plus souvent sur des fondations superficielles sont les plus vulnérables au phénomène de RGA et les déformations volumiques induites du sol de fondation. D'abord, les saisonnalités (Fig. 3d) avec une survenance devenue très variable provoquent la dessiccation et le retrait des couches superficielles du sol (jusqu'à 2 m de profondeur) pendant la période de sécheresse, puis une saturation marquée par le gonflement des sols argileux pendant la période de précipitations. De plus, la présence de végétation à proximité des fondations (Fig. 3e) accentue la succion du sol par l'action racinaire (jusqu'à 5 m de profondeur). Par ailleurs, une mauvaise gestion des eaux autour de la maison (Fig. 3f) peut être préjudiciable, où une infiltration indésirable au droit des fondations peut provoquer la plastification du sol et leur enfoncement. Ainsi, ces variations de teneur en eau dans le sol peuvent altérer ses propriétés hydromécaniques et entraîner la fissuration voire la rupture de la structure qu'il supporte.

3.2. Impacts sociologique et psychologique du RGA sur les sinistrés

Si le phénomène de RGA est étudié et documenté en France depuis plusieurs années, il y a encore une méconnaissance des sinistrés et des acteurs locaux sur l'impact de la sécheresse et du RGA sur le bâti et les dispositions constructives pour s'en prémunir. Les sinistrés se sentent ainsi bien souvent démunis face aux coûts des travaux et à l'impact psychologique que peut induire la dégradation de leurs habitations. De plus, sans accompagnement, les sinistrés méconnaissent les procédures d'indemnisation en cas de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle (cat-nat) et les aides exceptionnelles auxquelles ils pourraient être éligibles en l'absence de reconnaissance cat-nat. Prenons l'exemple de la commune de Cour-Cheverny dans le Loir-et-Cher qui n'a toujours pas été reconnue cat-nat sécheresse et ce depuis 2015. Paradoxalement, la commune recense plus de 96% de maisons fortement ou moyennement exposées au RGA. Avec des fissures béantes qui s'aggravent de sécheresse en sécheresse, le maire et ses administrés sinistrés sont dans l'incompréhension quant à la non reconnaissance cat-nat de leur commune.

Les sinistrés, parfois regroupés en collectifs ou faisant appel à des associations, expriment leur inquiétude face à chacune des situations qu'ils vivent désormais au quotidien avec parfois des situations critiques, comme perdre son travail de garde d'enfants en raison des fissures importantes et visibles dans son lieu de travail (sa maison) ou encore aller au travail en craignant que la structure fissurée du garage automobile s'effondre sur les employés. Il est donc important de considérer les impacts sociologique et psychologique dans la réponse globale et la gestion de ce phénomène par les pouvoirs publics et les acteurs socio-économiques concernés.

4. État des lieux des solutions d'adaptation au changement climatique

4.1. Actions de prévention, information et sensibilisation

Les professionnels de la construction ne sont pas toujours suffisamment informés et formés sur le phénomène de RGA, sa bonne caractérisation et les bonnes pratiques constructives pour la prévention des dommages sécheresse. Pour toute nouvelle construction de maison, la Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages a publié fin 2021 une plaquette de communication à destination du public sur la nouvelle réglementation (art. 68 de la loi ELAN) et les bonnes pratiques pour construire en terrain argileux sensible au RGA ([DHUP, 2021](#)). De même, le Cerema vient de publier la première fiche de sensibilisation qui donne aux gestionnaires une information technique

sur les conséquences du changement climatique sur les infrastructures routières (Cerema, 2022).

Il convient également de coordonner les services en charge des risques naturels dans les collectivités et les services de l'Etat à l'échelle locale pour la gestion et la diffusion de l'information et du conseil sur la sécheresse et le phénomène de RGA afin de mieux renseigner et orienter les acteurs qui en sont demandeurs. Par ailleurs, il est recommandé de sensibiliser les propriétaires de maisons vulnérables (en zones d'exposition RGA forte ou moyenne) pour prendre les dispositions nécessaires afin de limiter l'impact des facteurs de l'environnement proche de la maison pour réduire sa vulnérabilité face au RGA.

4.2. Exemple de travaux pour la résilience des maisons : solution MACH

Dans la perspective de développer de nouvelles solutions de remédiation, alternatives aux techniques de réparation classiques, le Cerema a expérimenté à l'échelle d'une maison test sinistrée, entre fin 2016 et fin 2020, une solution innovante nommée MACH « MAison Confortée par Humidification » (Cerema, 2019). Le principe de MACH (Fig. 4) vise à maintenir un état hydrique équilibré au niveau du sol de fondation pendant les périodes de sécheresse. Cela consiste à réhydrater le sol durant la sécheresse par l'eau de pluie, préalablement récupérée et stockée pendant la période humide. Il s'agit d'une solution résiliente et d'adaptation au changement climatique permettant de stabiliser les dommages existants (de faible ampleur) et empêcher la survenance de nouvelles fissures.

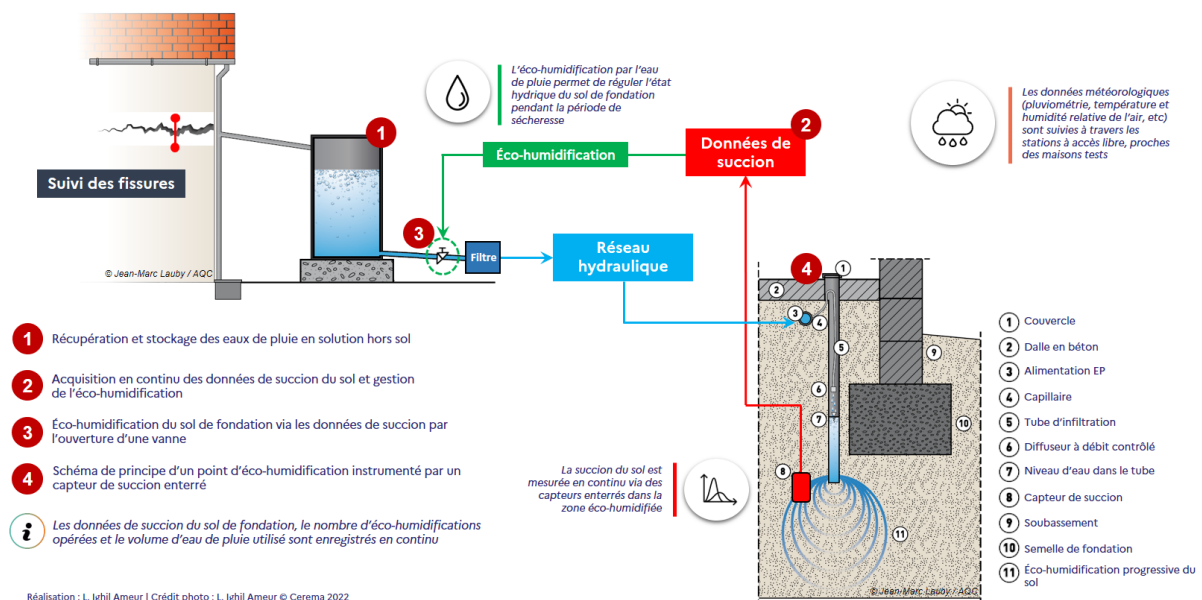


Figure 4. Schéma de principe de la solution MACH du Cerema.

Les résultats observés durant les 4 années de sécheresses intenses de 2017 à 2020 sont satisfaisants tant en termes de stabilisation d'ouverture des fissures existantes que d'absence d'apparition de nouvelles fissures sur les façades confortées (Ighil Ameur, 2021). Cette solution est à la fois écologique, efficace, peu coûteuse, et donc accessible à tous les sinistrés. À titre indicatif, le procédé expérimental MACH a été mis en place pour un coût total de 15 k€ HT, soit un coût nettement inférieur à celui d'un confortement en sous-œuvre traditionnel. Cette technologie, actuellement testée en stabilisation post-sinistre, pourrait également être mise en œuvre en phase de prévention pour éviter la survenance de dommages des bâtiments exposés.

4.3.3. Exemple de recherche pour la résilience des routes : projet ORSS

Les techniques classiques de réparation de chaussée n'étant pas adaptées au phénomène de RGA, les conséquences pour les gestionnaires sont ainsi importantes en termes de coûts d'entretien annuel. D'autre part, il y a un fort enjeu de sécurité des usagers. Le Cerema, en partenariat avec les départements de la région Centre-Val de Loire, développe de nouvelles solutions de remédiation pour limiter les vulnérabilités des routes affectées par le RGA dans le contexte du changement climatique. Ce multi-partenariat inédit est nommé ORSS « Observatoire des Routes Sinistrées par la Sécheresse » (Cerema, 2020). ORSS à ce jour est un partenariat régional co-financé entre le Cerema et cinq départements (Cher, Indre, Indre-et-Loire, Loir-et-Cher et Loiret), 8 sites expérimentaux et 16 planches d'essais, 11 solutions de remédiation testées et au total 2,5 km de routes confortées.



Figure 5. Illustration des solutions de remédiation testées à ce jour dans le cadre du projet ORSS.

En fonction de la partie confortée des éléments qui composent la route, les solutions de remédiation expérimentées peuvent être classées en trois catégories (Fig. 5) :

- **Catégorie 1** : consiste à agir sur la structure de chaussée afin de la renforcer pour reprendre la remontée de fissures (Cerema, 2021a) ;
- **Catégorie 2** : consiste à agir sur l'environnement proche de la route pour limiter les effets des facteurs amplificateurs de la dessiccation tels que l'évapotranspiration au niveau des accotements et l'influence racinaire de la végétation (Cerema, 2021b) ;
- **Catégorie 3** : consiste à agir sur le sol argileux via un traitement en profondeur, pouvant atteindre 4,00 m, pour réduire par des relations physico-chimiques sa sensibilité au RGA et conserver un état hydrique équilibré (Cerema, 2021c).

De plus, une instrumentation avec des capteurs de succion accompagne la mise en place de ces solutions pour analyser et évaluer leur efficacité et leur durabilité.

5. Conclusions et perspectives

Les sécheresses intenses et successives subies ces six dernières années ont fortement contribué à la dégradation des structures en surface (routes et maisons). Ces ouvrages, construits sur des sols sensibles au RGA, sont affectés par des fissurations de dessiccation accentuées par les facteurs de l'environnement proche. Dans le contexte du changement climatique, les solutions de confortement classiques ne sont pas adaptées pour faire face à la récurrence et l'intensité des événements météorologiques à venir.

Les travaux de recherche menés pour la réduction des vulnérabilités des ouvrages exposés au RGA ne peuvent se faire sans l'implication de tous les acteurs concernés, en incluant les sinistrés (maisons) et les gestionnaires (routes). Les efforts doivent être fournis à tous les niveaux en diffusant largement l'information sur le RGA et en sensibilisant ses conséquences, en mettant en œuvre les recommandations et les dispositions constructives en vigueur et enfin en poursuivant la conception et le développement des nouvelles solutions d'adaptation au changement climatique.

Le développement de la solution MACH se poursuit à travers deux déploiements en parallèle : (i) le projet « MACH Series » en partenariat avec les assureurs, qui vise à réaliser de nouvelles expérimentations sur des maisons avec des configurations différentes pour confirmer le caractère reproductible de la solution MACH et son adaptabilité aux différents sites, (ii) le projet « MACH+ » qui vise à intégrer l'intelligence artificielle pour l'humidification automatique du sol en fonction des seules données météorologiques locales.

En parallèle à la démarche ORSS, l'intérêt à l'échelle nationale est de recenser les sites sinistrés par la sécheresse et les solutions expérimentées par les gestionnaires pour alimenter une base de données. L'objectif de l'ORSS est de produire un « Guide des nouvelles solutions de remédiation pour conforter les routes sinistrées par la sécheresse ».

6. Références bibliographiques

- Béchade A.F. (2014). La pathologie des fondations superficielles. Guide Pathologies des bâtiments : CSTB Éditions, 360 pages, numéro ISBN 978-2-86891-597-9.
- Cerema (2022) [Les fiches "Résilience des infrastructures" : RGA](#). Fiche n°01 consacrée au phénomène de RGA et son impact sur les infrastructures routières.
- Cerema (2021a) [Route exposée au retrait-gonflement des sols : Evaluation d'une technique de confortement par pose de blocs de Compostyrène®](#).
- Cerema (2021b) [L'injection de résine expansive pour conforter les routes exposées aux sécheresses expérimentée par le Cerema et le département d'Indre-et-Loire](#).
- Cerema (2021c) [Le Cerema et le département du Loiret lancent une expérimentation avec le procédé RemediaClay® pour stabiliser les routes exposées à la sécheresse](#).
- Cerema (2020) [Adapter les routes aux impacts du changement climatique : l'Observatoire des Routes Sinistrées par la Sécheresse](#).
- Cerema (2019) [Stabilisation du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux sous les habitations : un système innovant par infiltration d'eau de pluie](#).
- CCR (2021). [Actualité des événements cat nat : Retour sur les événements 2019-2020](#). Article web de la Caisse Centrale de Réassurance.
- DHUP (2021). [Sols argileux, sécheresse et construction](#). Article web du ministère français en charge de l'écologie.
- FA (2021). [Impact du changement climatique sur l'assurance à l'horizon 2050](#). Rapport web de France Assureurs.
- Ighil Ameer L. (2021). [Experimental analysis of shrinkage-swelling phenomenon of clays - application to an individual house affected by drought under climate change effects](#). ASCE EMI-PMC International Conference (virtual event), New York, USA.
- Ighil Ameer L., Hattab M. (2019). Controlled desiccation behaviour of a clayey material based on digital image correlation DIC method. Proceedings of the XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – ECSMGE. 1-6 September, Reykjavik, Island.
- MRN (2022). [Référentiels de résilience du bâti aux aléas naturels](#). Ouvrage web de la Mission Risques Naturels.
- Plat E., Vincent M. et Lenôtre N. (BRGM), Peinturier C., Poupat B. et Dorelon P. (MEEDDAT/CGDD), Chassagneux P. (Météo France), Kazmierczak J.B. (INERIS),

- Salagnac J.L. (CSTB), Gerin S., Nussbaum R. et Chemitte J. (MRN) (2009). Estimation des coûts du changement climatique liés à l'aléa retrait-gonflement. Rapport final du GTRNACC. BRGM/RP-56771-FR, 62 p., 28 ill.
- Reiffsteck P. (1999). Les sols gonflants en Génie Civil : Synthèse bibliographique et cartographie. Pôle Géotechnique. Thème GEO 37, Rapport de recherche 1.37.01.9.
- SDES (2021). [Nouveau zonage d'exposition au retrait-gonflement des argiles : plus de 10,4 millions de maisons individuelles potentiellement très exposées.](#) Article web du ministère en charge de l'écologie en France.