

Journée Scientifique et Technique

RGA: COMPRENDRE, ANTICIPER, PRÉVENIR

Solutions en développement face à l'évolution du RGA sous l'effet du changement climatique







Lamine IGHIL AMEUR

Plan de présentation

- 1. Présentation du groupe de recherche sur le RGA au Cerema
- 2. Évolution du RGA sous l'effet du changement climatique
- 3. Impacts de la sécheresse sur les maisons et les routes
- 4. Solutions d'adaptation au changement climatique
- 5. Projets de recherche SEHSAR et SAFE RGA (2024 2029)



1. Présentation du groupe de recherche sur le RGA au Cerema

> Projet scientifique du groupe et intégration dans l'équipe de recherche GéoCoD

Évolution du comportement hydromécanique des sols argileux non saturés appliquée au phénomène de RGA* sous l'effet du changement climatique

*RGA: Retrait-Gonflement des sols Argileux

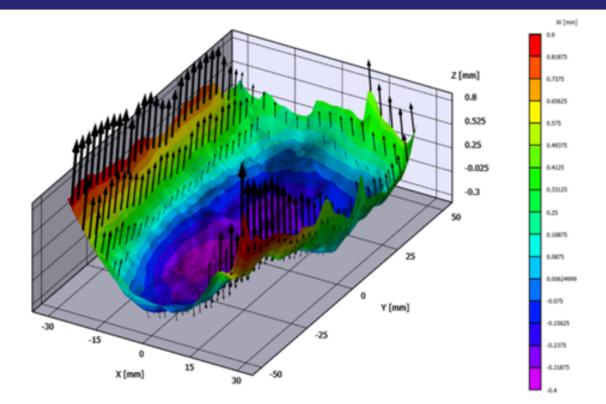
Volet 1 : couplage hydromécanique des sols argileux non saturés et interactions sol-végétationatmosphère (SVA) multi-échelles



Principaux verrous scientifiques:

- Représentativité des échantillons de sol naturel prélevés in situ et reproduction des conditions hydriques à l'échelle labo et intermédiaire;
- Prise en compte de l'anisotropie minéralogique, de la variation de volume, des déformations du sol argileux et l'hétérogénéité de sa réponse aux sollicitations hydriques;
- Rôle de l'action racinaire de la végétation à la fois dans la dessiccation du sol et l'aggravation des dommages.

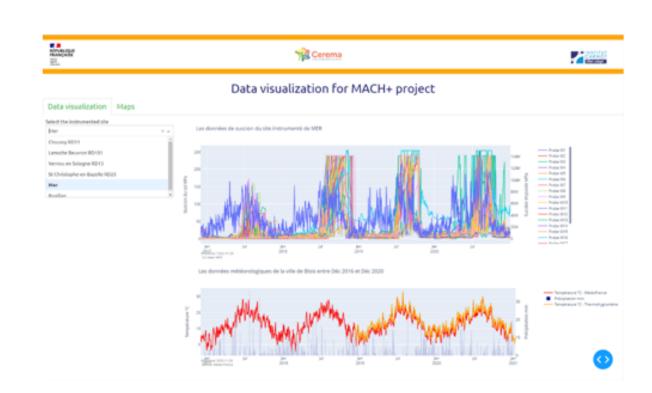
Volet 2 : fissuration de dessiccation des sols argileux – caractérisation expérimentale des mécanismes d'amorçage et de propagation



Principaux verrous scientifiques:

- Caractérisation expérimentale de la fissuration de dessiccation et son couplage avec son état in situ dans les sols argileux non saturés, en considérant leur anisotropie minéralogique et l'influence des conditions hydriques locales;
- Corréler l'endommagement et la fissuration du sol argileux avec les dommages structurels de l'ouvrage.

Volet 3 : utilisation de l'IA sur les données collectées in situ pour prévenir le risque sécheresse des sols argileux



Principaux verrous scientifiques :

- Qualité des données ;
- Élaboration des algorithmes capables de prédire à court et à moyen termes l'ampleur de la dessiccation dans les sols argileux et prévenir la fissuration.



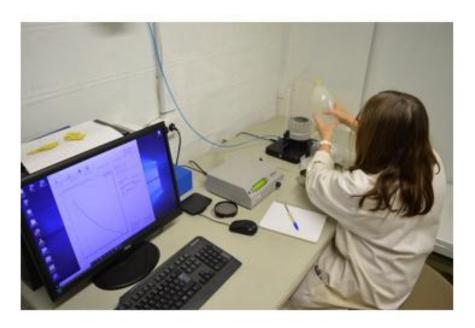
1. Présentation du groupe de recherche sur le RGA au Cerema

> Equipements scientifiques de laboratoire et stations d'instrumentation in situ

Équipements scientifiques de laboratoire



DVS (Dynamic Vapor Sorption)



Kit LABROS (WP4C, KSAT et HYPROP)



Simul'Climat Lab (prototype)



Enceinte climatique instrumentable (68 I)

Stations d'instrumentation in situ



Station RGA-Prevent à Vendôme (41)



Station SNCF Réseau à Donnazac (81)



Station ORSS à Saint-Loup-des-Vignes (45)



Station MACH Series près de Poitiers (86)

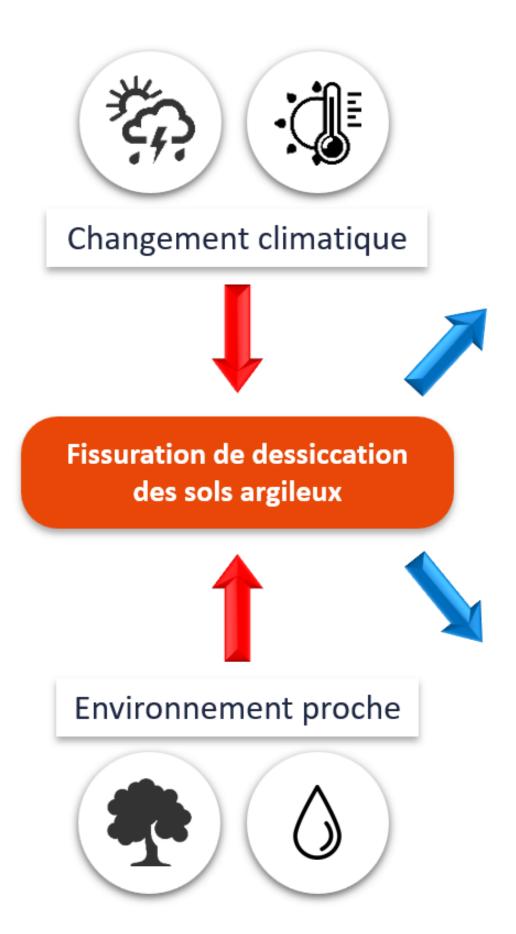


2. Évolution du RGA sous l'effet du changement climatique

> Faits marquants post-2015 et impacts sur les sols et les ouvrages

Faits marquants post-2015:

- L'expansion de la sécheresse impacte d'autres ouvrages et infrastructures
- Extension géographique de l'exposition RGA
- 1 maison sur 2 est potentiellement très exposée au RGA
- La sécheresse devient la catastrophe naturelle la plus coûteuse de ces 10 dernières années
- La sécheresse s'étend progressivement sur toute la France
- La dessiccation des sols se propage en profondeur (> 3 m)
- Une sécheresse 2022 exceptionnelle







Les pistes cyclables



Les ouvrages en terre



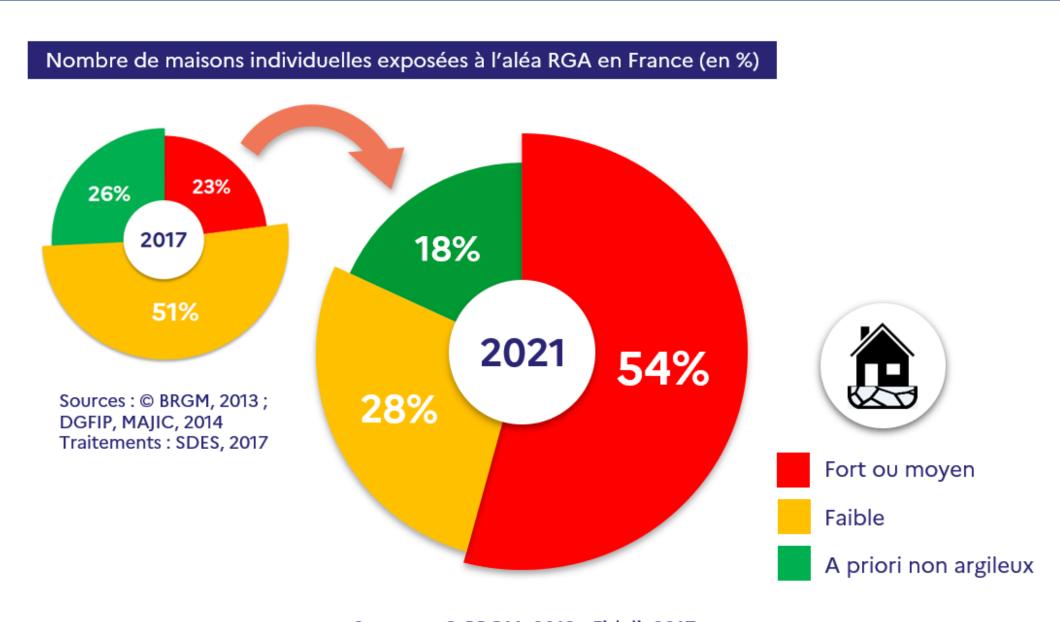






2. Évolution du RGA sous l'effet du changement climatique

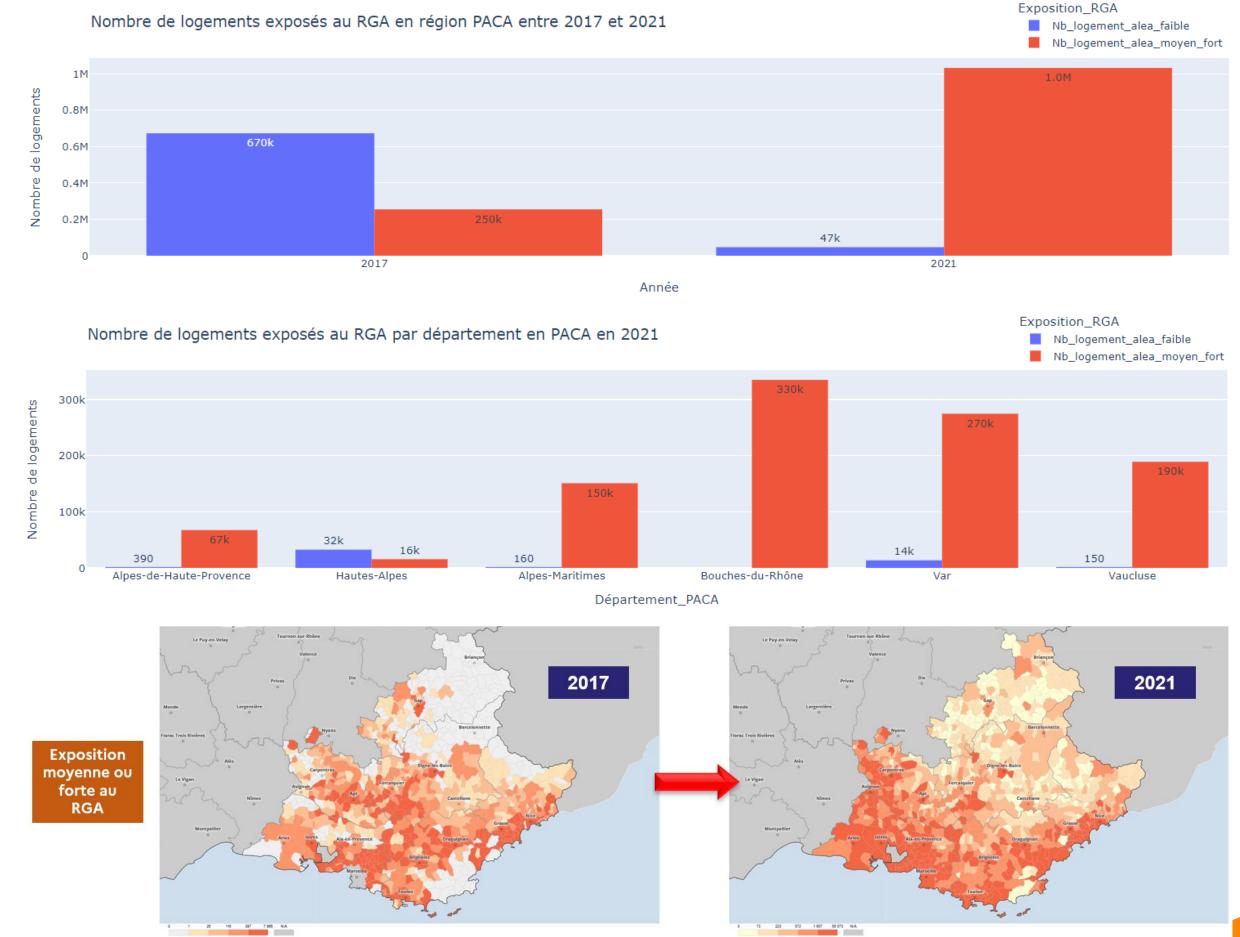
> Extension de l'exposition du bâti au phénomène de RGA en France (focus sur la région PACA)



Sources : © BRGM, 2019 ; Fideli, 2017 Traitements: SDES, 2021

Par ailleurs, dans l'avis enregistré par le Sénat le 12 octobre 2021, sur la proposition de loi visant à réformer le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles (http://www.senat.fr/rap/a21-045/a21-0450.html), de nouveaux chiffres de la CCR ont été cités sur l'exposition RGA en France, à savoir désormais 18,9 millions de maisons concernées :

- 12,8 millions (contre 10,4 en 2021 et 4,3 en 2017) de maisons sont fortement ou moyennement exposées
- 6,1 millions de maisons sont faiblement exposées

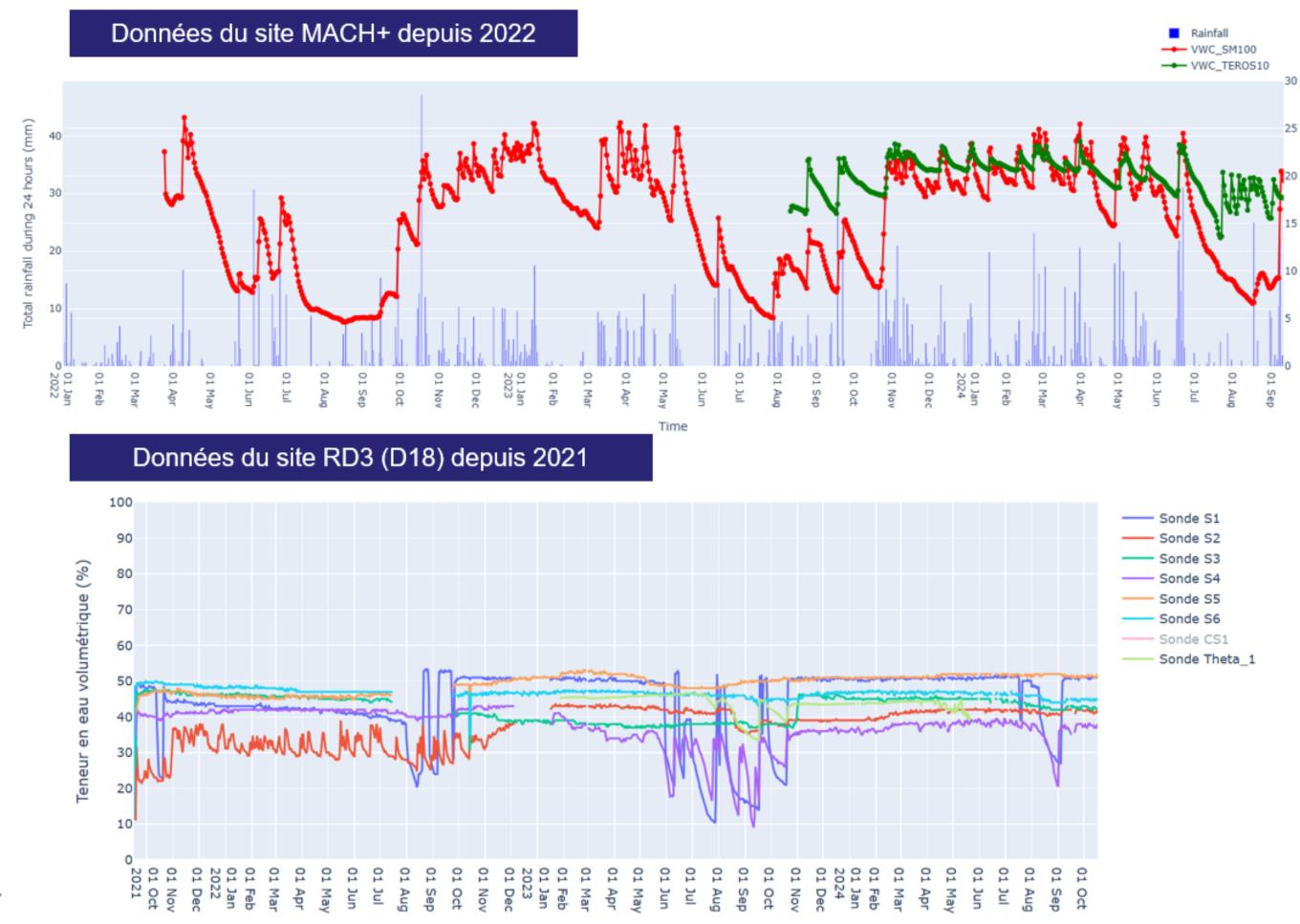




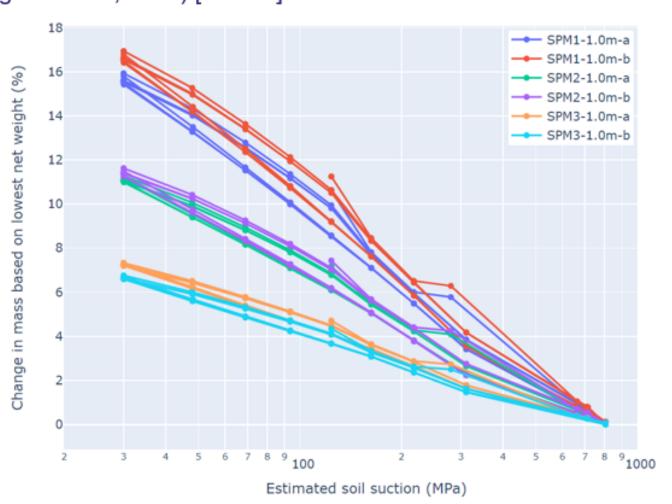


2. Évolution du RGA sous l'effet du changement climatique

> Combiner les données sur le terrain et en laboratoire pour comprendre cette évolution



Change in mass as a function of soil suction during the DVS test (Ighil Ameur, 2023) [ACTI 2]



Fredlund and Rahardjo (1993):

$$s = -\frac{\rho_w RT}{M_w} \ln \left(\frac{HR\%}{100} \right)$$

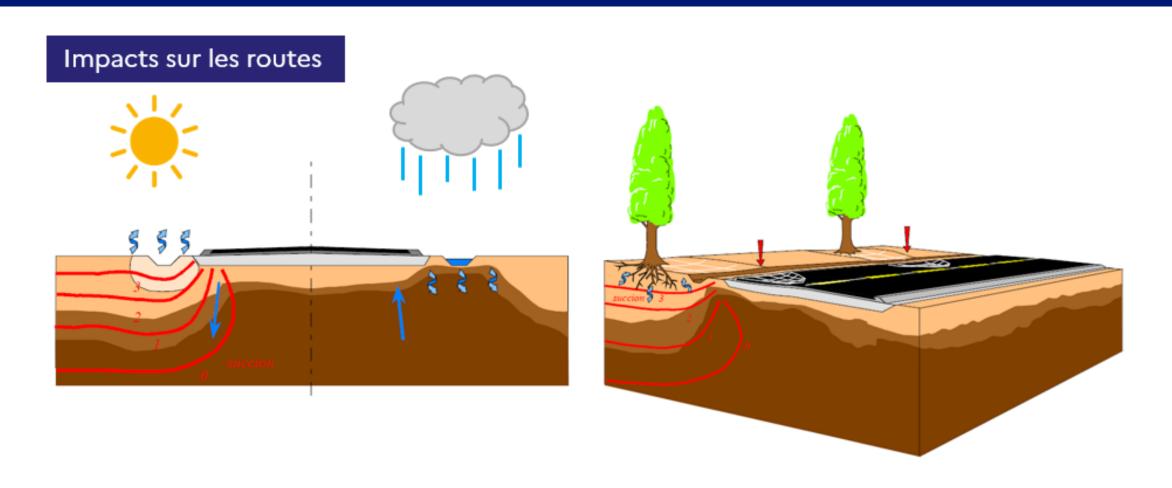
Principal objectif:

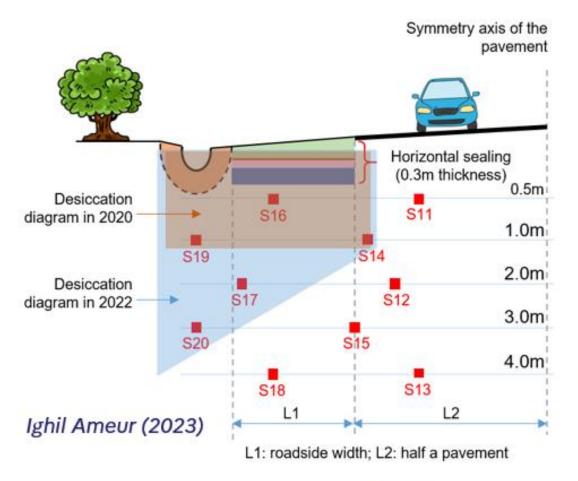
 Analyser l'effet du changement climatique sur l'évolution du phénomène de RGA à travers le comportement hydromécanique du sol argileux à l'échelle labo et in situ.



Date

> Impacts du RGA sur les structures (routes et maisons) et effets de l'environnement proche

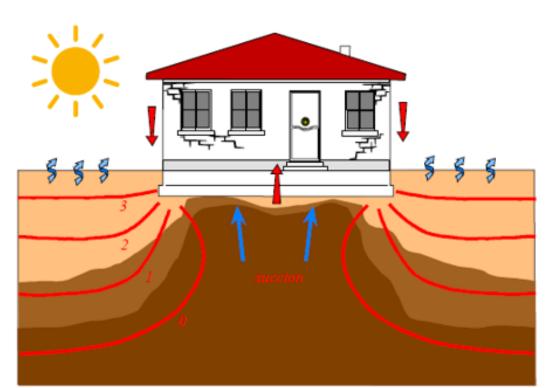


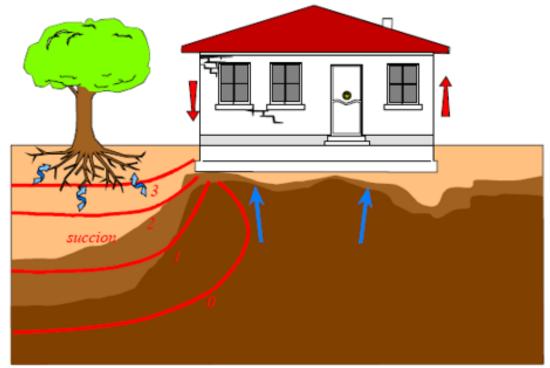


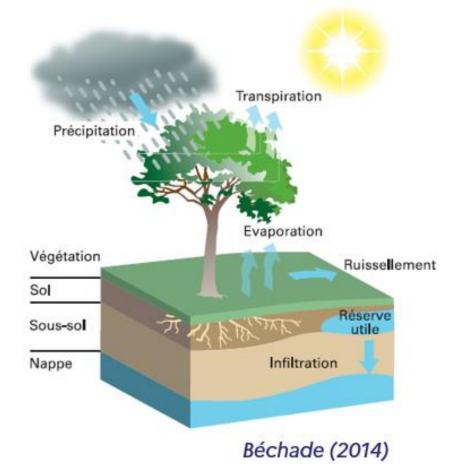


Impacts sur les maisons

Reiffsteck (1999)



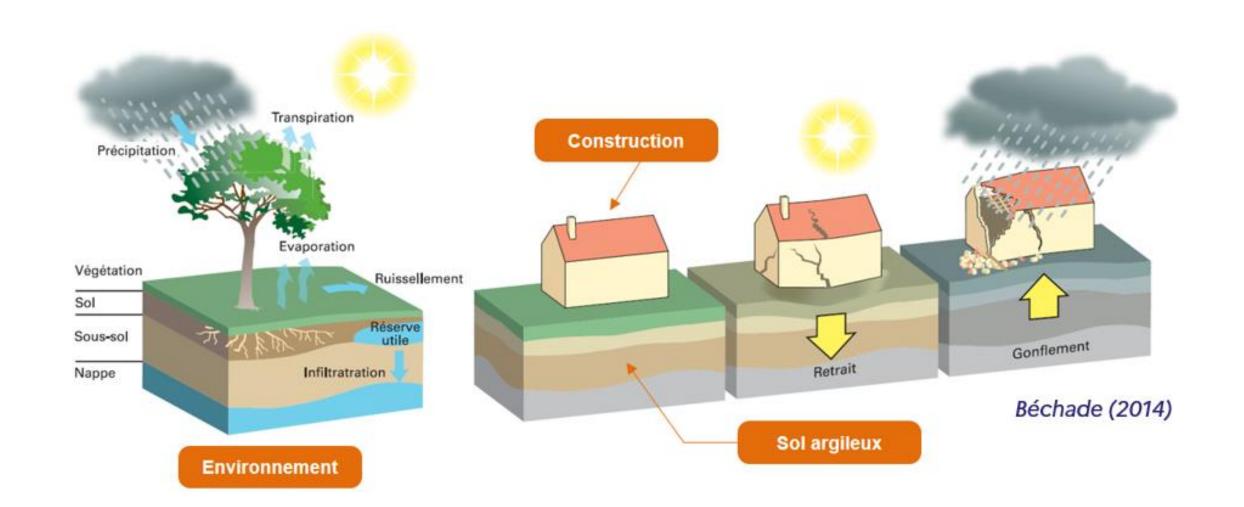


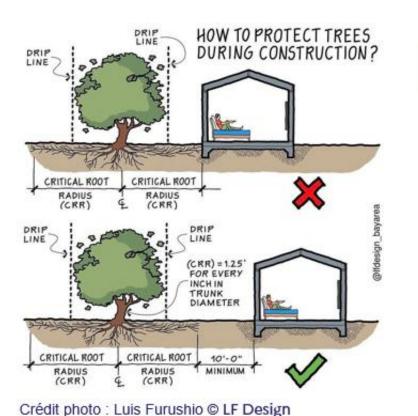






Importance de l'environnement proche pour identifier les effets de la sécheresse sur les maisons





Influence de la végétation

La présence de la végétation n'est pas problématique lorsqu'elle est plantée à bonne distance afin d'éviter l'aggravation de la succion du sol par les racines



Crédit photo : Luis Furushio © LF Design

Influence de la gestion des eaux

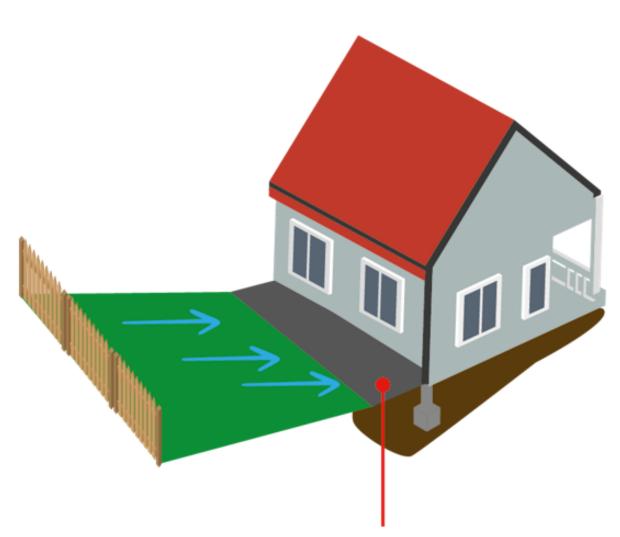
La gestion des eaux autour de la construction doit être aux normes et fiable pour éviter l'infiltration indésirable pouvant provoquer l'affaissement des fondations





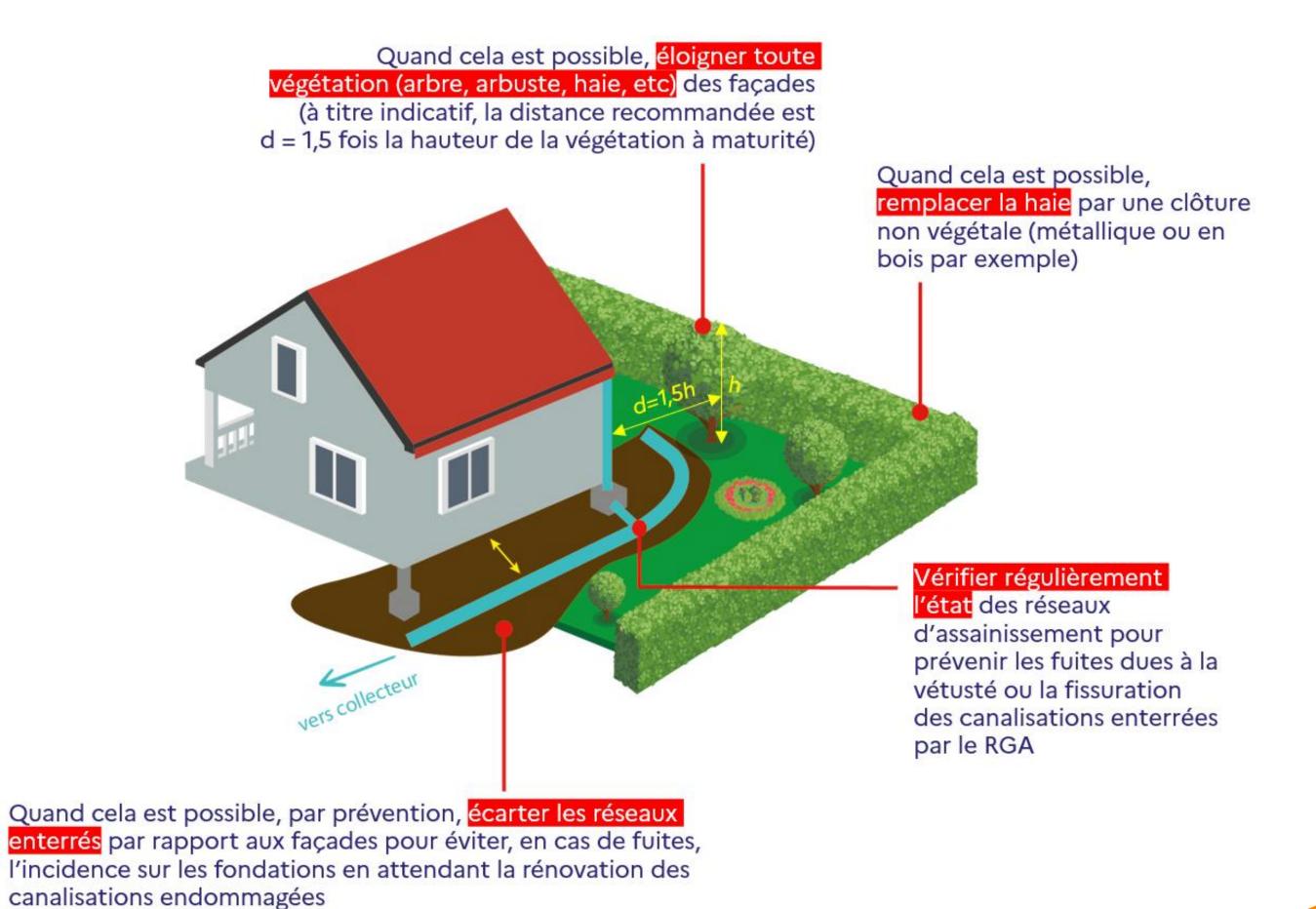


> Comment réduire la vulnérabilité de sa maison exposée au RGA face à la sécheresse ?



Face à un terrain en pente et un pourtour nu exposé, appliquer les recommandations nécessaires pour l'étanchéification horizontale périphérique et de drainage des eaux adéquat

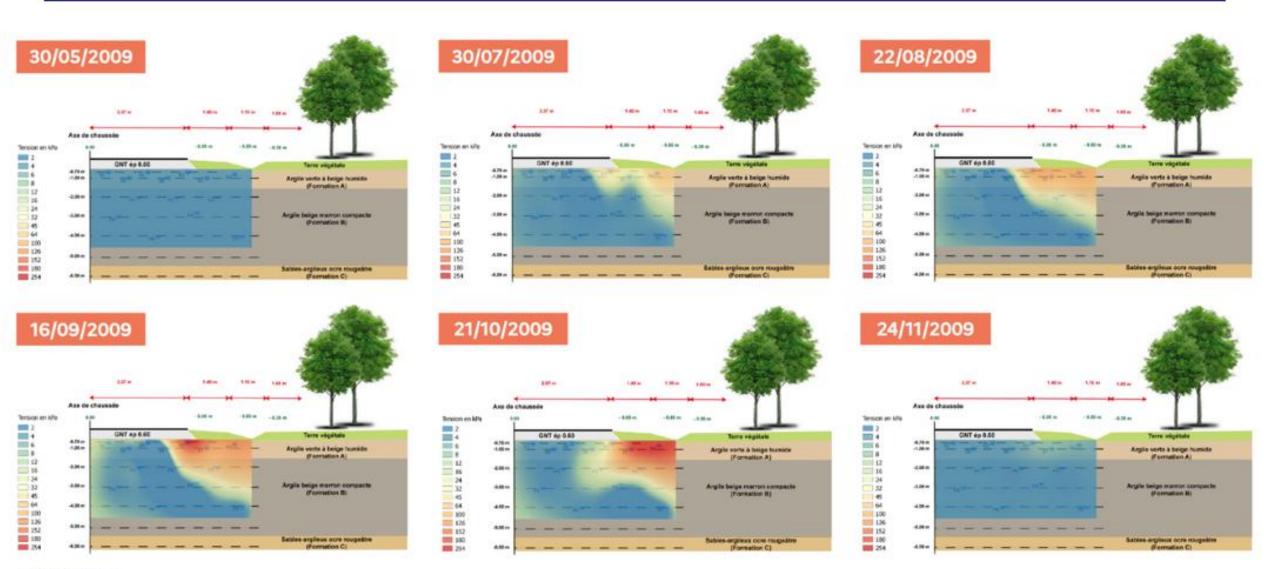
Crédit : L. Ighil Ameur © Cerema 2023



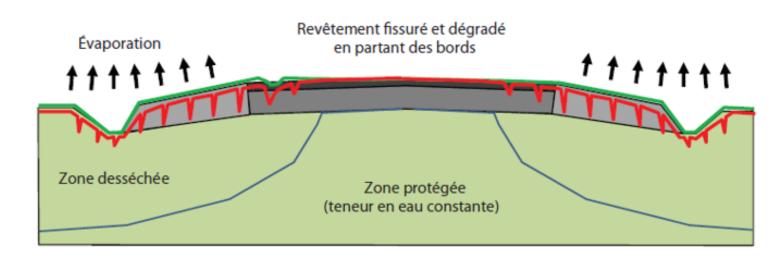


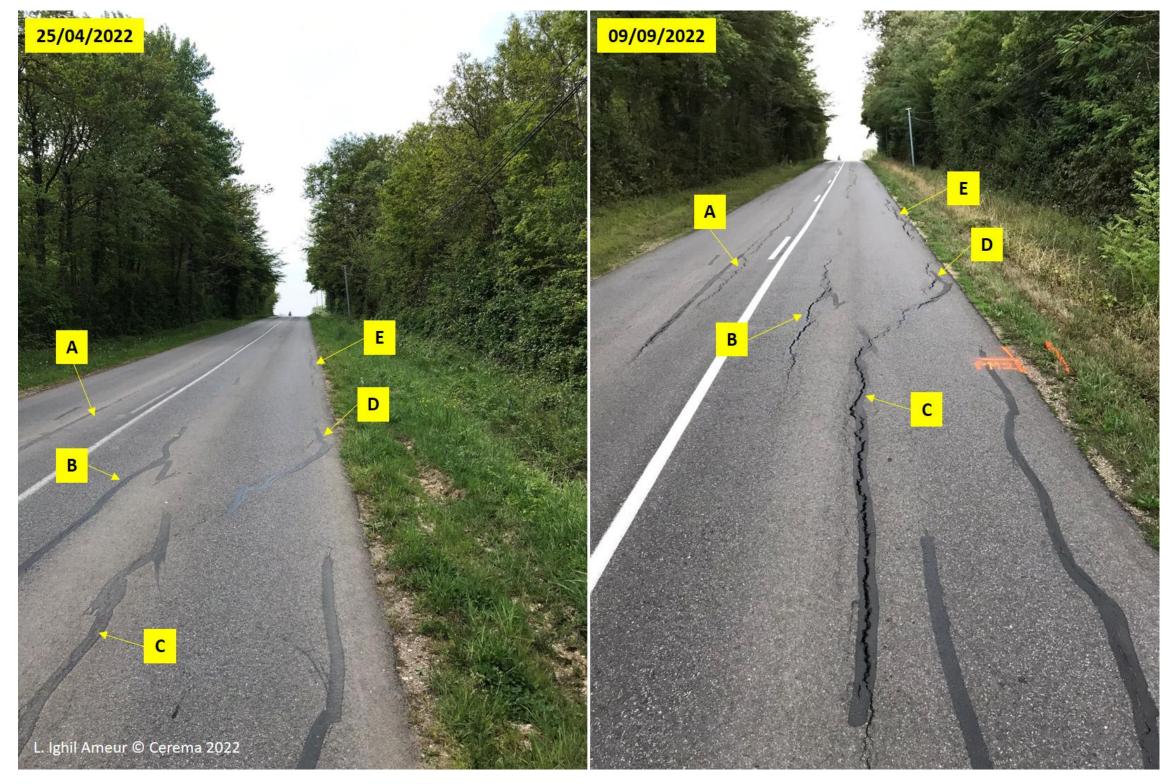
> Comment les routes exposées au RGA se fissurent par la sécheresse ?

Cartographies de la succion du sol mesurée in situ sous une demi chaussée et son accotement entre le 30/05 et le 24/11/2009



Mécanismes de dégradation d'une chaussée exposée à la sécheresse (Magnan, 2013)



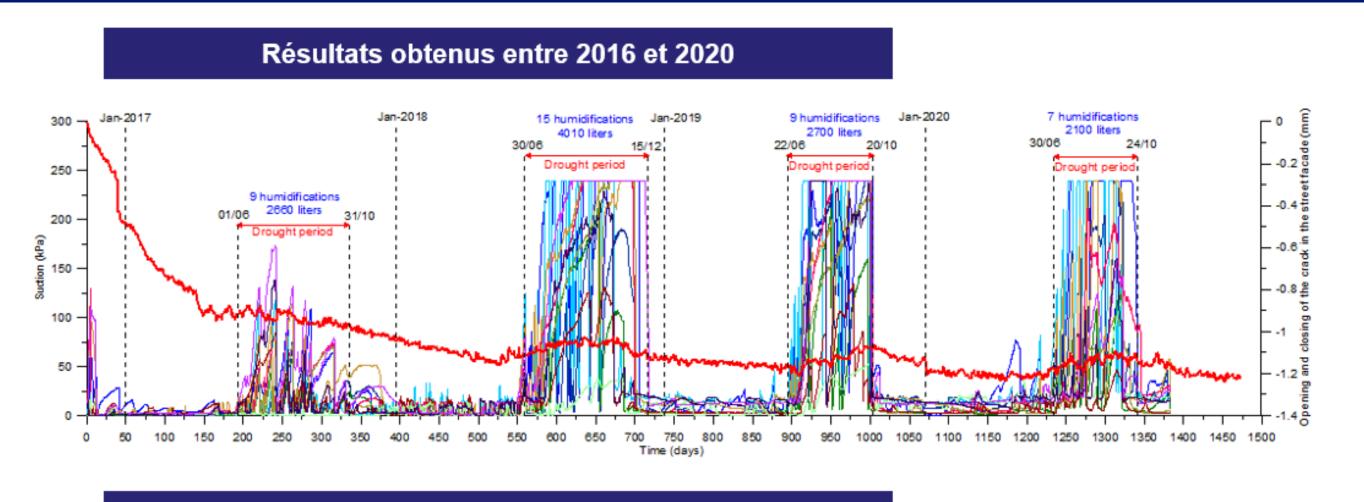




© Cerema

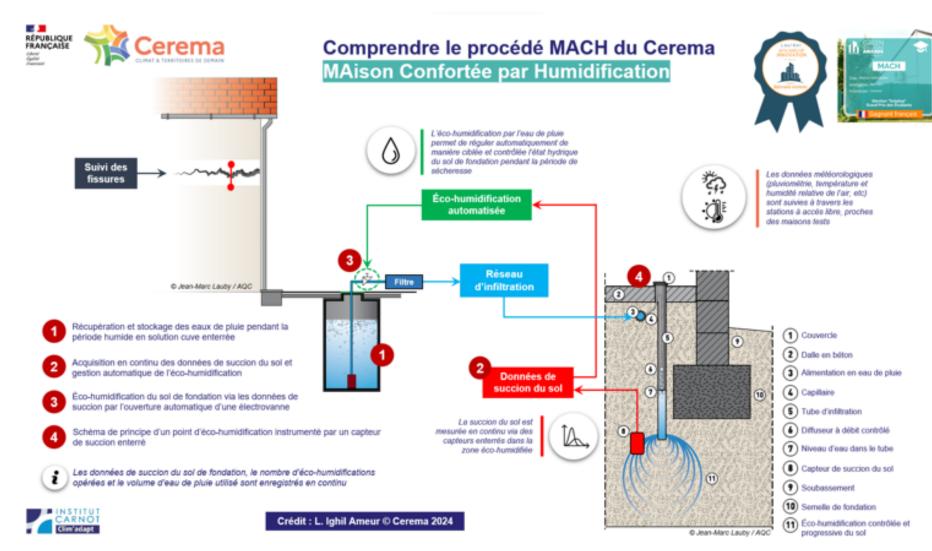


> Retour sur les expérimentations du procédé MACH (MAison Confortée par Humidification) du Cerema



Résultats obtenus entre 2021 et 2024





Quelques principaux résultats :

- La réhydratation ciblée et contrôlée du sol de fondation permet de réduire son niveau de dessiccation et la déformation de retrait associée;
- Equilibrer l'état hydrique du sol durant les périodes de sécheresse a permet à la fois de stabiliser les dommages existants et prévenir l'apparition de nouvelle fissures dans la structure;
- Le positionnement des capteurs de teneur en eau proche de la surface permet de prévenir la propagation de la dessiccation en profondeur.



> Elargissement des expérimentations du procédé MACH en partenariat avec Covéa











*Fait partie du projet « Initiative Sécheresse » de MRN, CCR et France Assureurs

Objectifs:

- Vérifier la reproductibilité du procédé MACH quelque soit la configuration du site (bâtiment, environnement proche, nature du sol, etc)
- Collecter les données sols et météo et interaction avec le bâti pour alimenter la base de donnée permettant de développer la solution MACH+









Première maison MACH Series équipée en 2024 près de Poitiers (86)



CARNOT

Clim'adapt

L'Observatoire des Routes Sinistrées par la Sécheresse (ORSS)

L'ORSS du Cerema, c'est à ce jour :









16 solutions dont



~ 2,6 km de routes

1 857 921 €

530 564 € en études 1 220 086 € en travaux 107 271 € en instrumentation

9 sites / 16 planches d'essais

la portion de RD identifiée

1 solution = 1 configuration 1 planche d'essai = 1 section dans de test (planche d'essai)

8 procédés confortées

Date de signature des conventions Cerema & départements CVdL*

Calendrier prévisionnel de l'Observatoire

1 site = 1 RD





Phase II Opérations de suivi annuel

Phase III Suivi et valorisations

* Départements de la région Centre-Val de Loire partenaires du projet ORSS : Cher (18), Indre (36), Indre-et-Loire (37), Loir-et-Cher (41) et Loiret (45)



> Illustration des procédés innovants expérimentés à ce jour dans le cadre de l'Observatoire

Solutions catégorie 1



- Stabilisation mécanique de la couche porteuse par deux lits de géogrille triaxiale TriAx®
- Stabilisation mécanique de la structure de chaussée par pose de blocs de Compostyrène®

Solutions catégorie 2



- Étanchéification verticale par encapsulage avec une géomembrane
- Étanchéification horizontale des accotements (par géomembrane ou par enduit de surface)
- Stabilisation du sol sous chaussée par injection de résine expansive URETEK®

Solution catégorie 3



- Stabilisation physico-chimique du sol sous chaussée par injection du RemediaClay®
- Stabilisation physico-chimique du sol sous chaussée par Bio-cimentation MeduSoil® BS1





> Confortement par encapsulage : influence des facteurs de l'environnement proche (végétation)

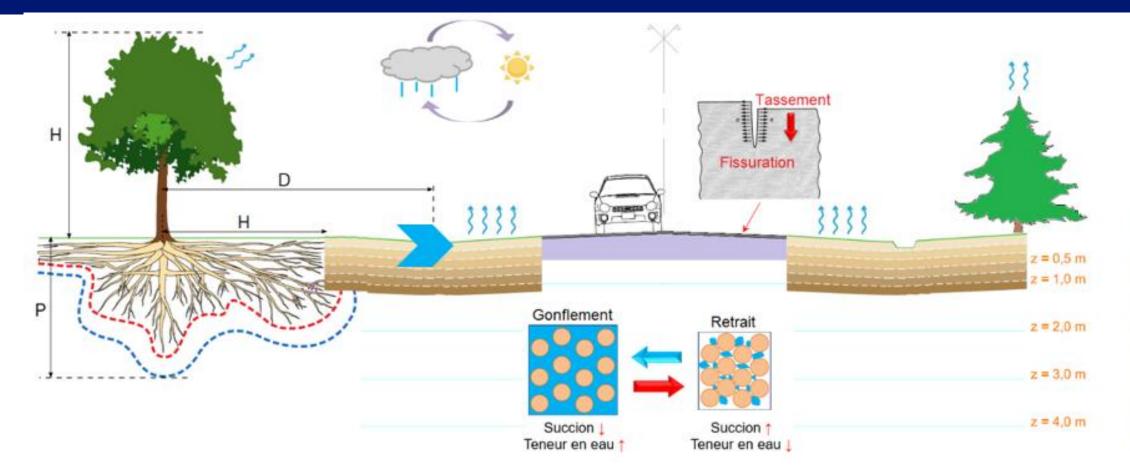
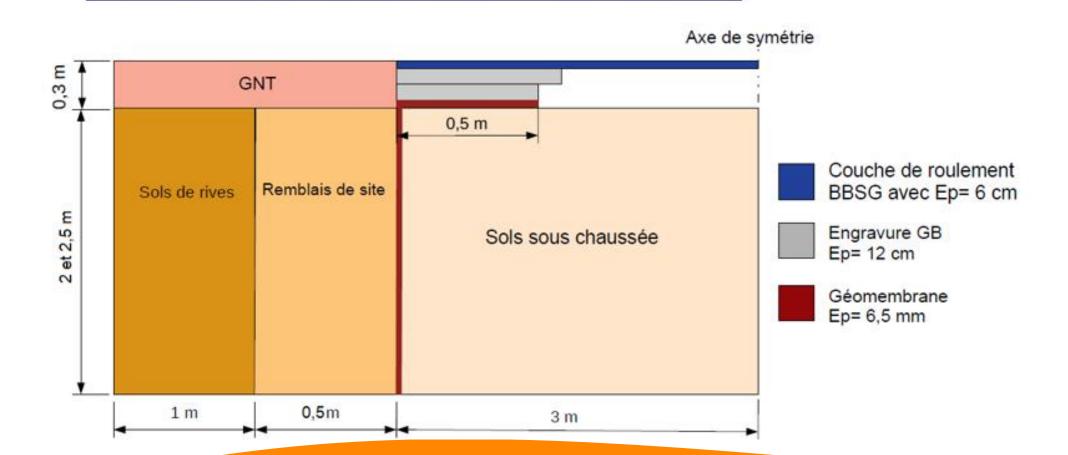


Planche 3 : confortement par encapsulage



Travaux de mise en œuvre (entre juin et septembre 2018)



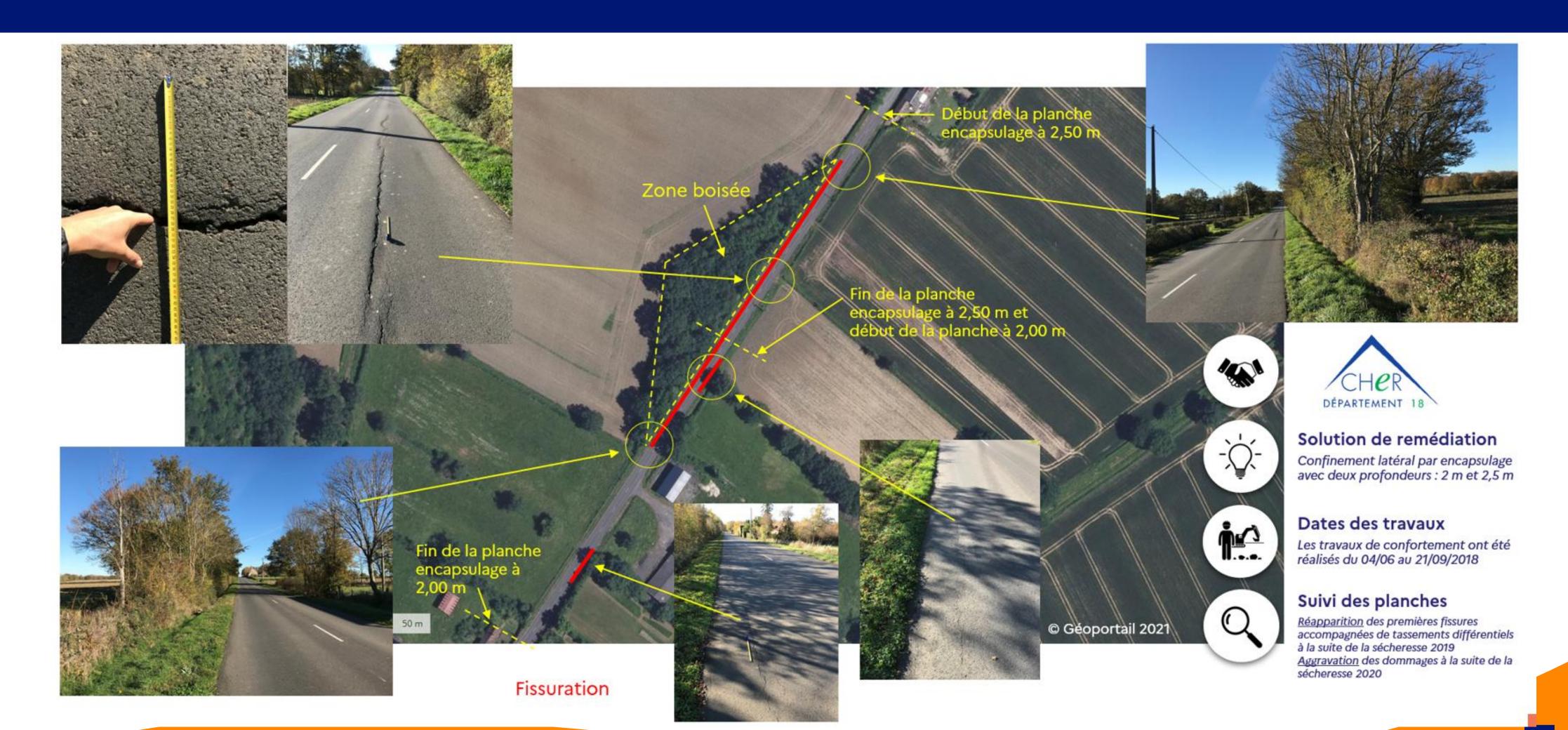








> Confortement par encapsulage: influence des facteurs de l'environnement proche (végétation)



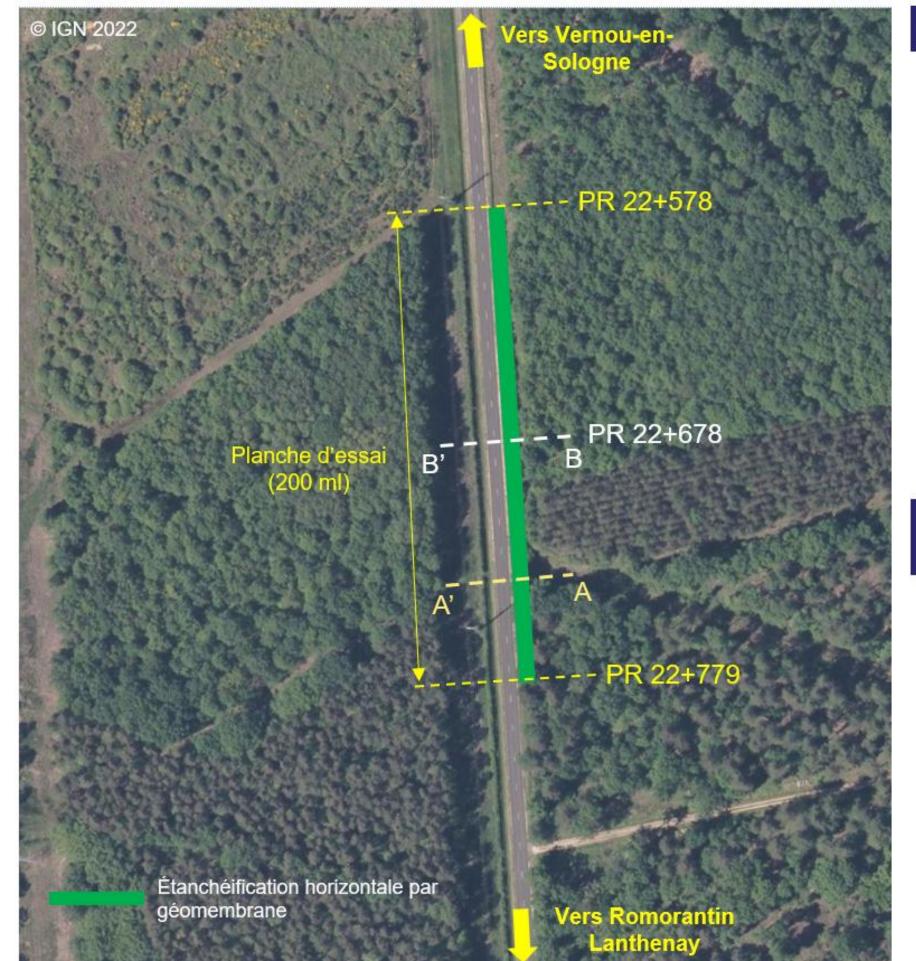


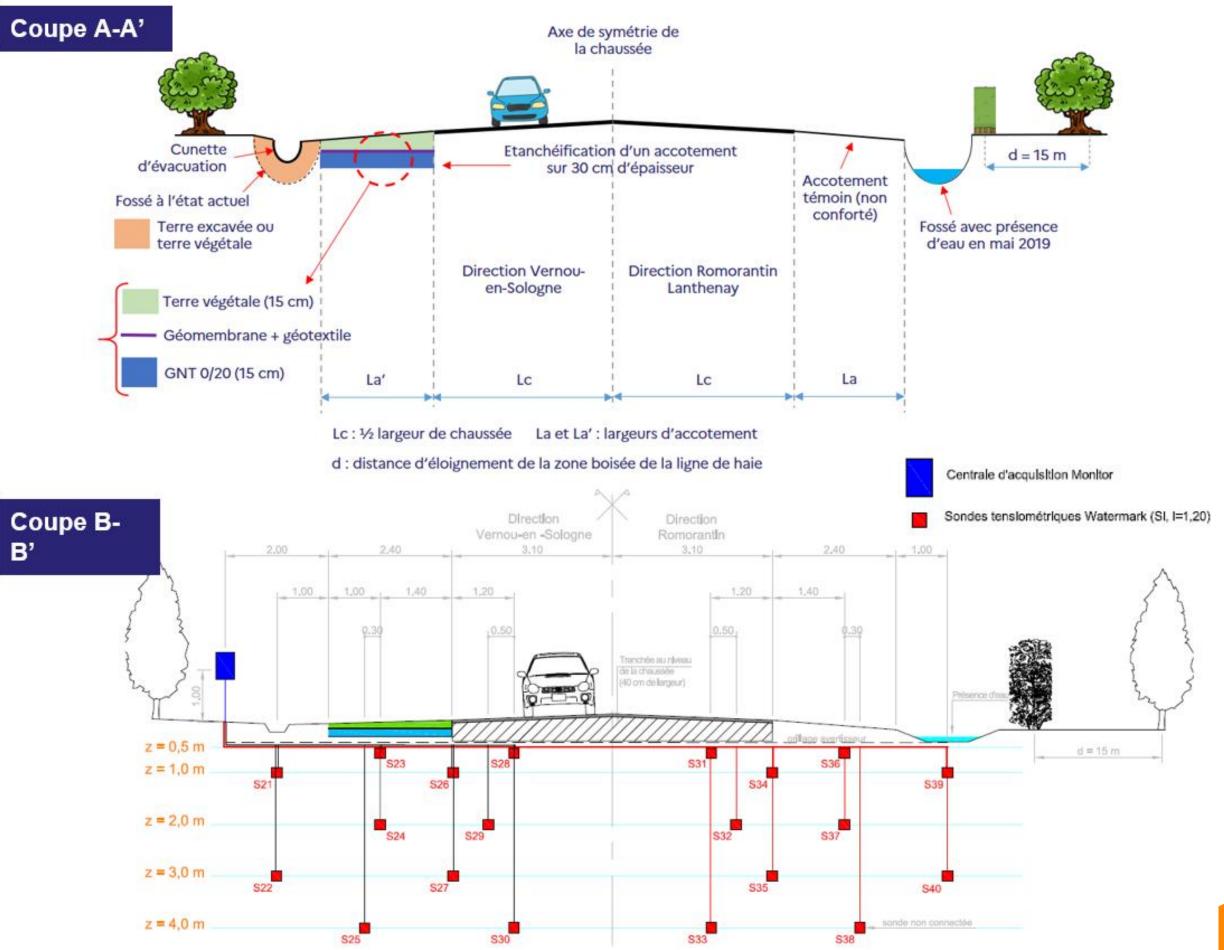
INSTITUT CARNOT

Clim'adapt



> Etanchéification horizontale des accotements par géomembrane









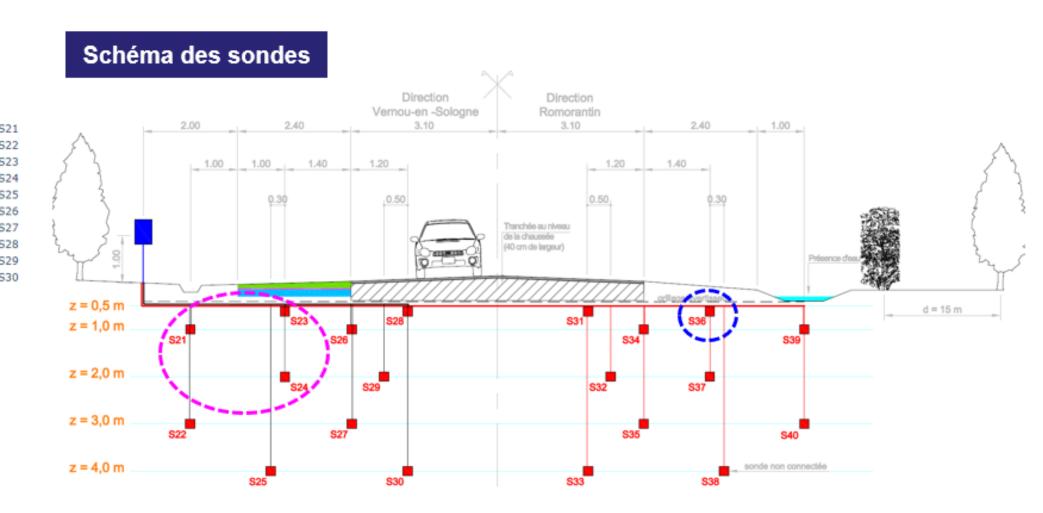


> Etanchéification horizontale des accotements par géomembrane

Bilan 2022

Suivi RD13 (sens vers Vernou-en-Sologne)

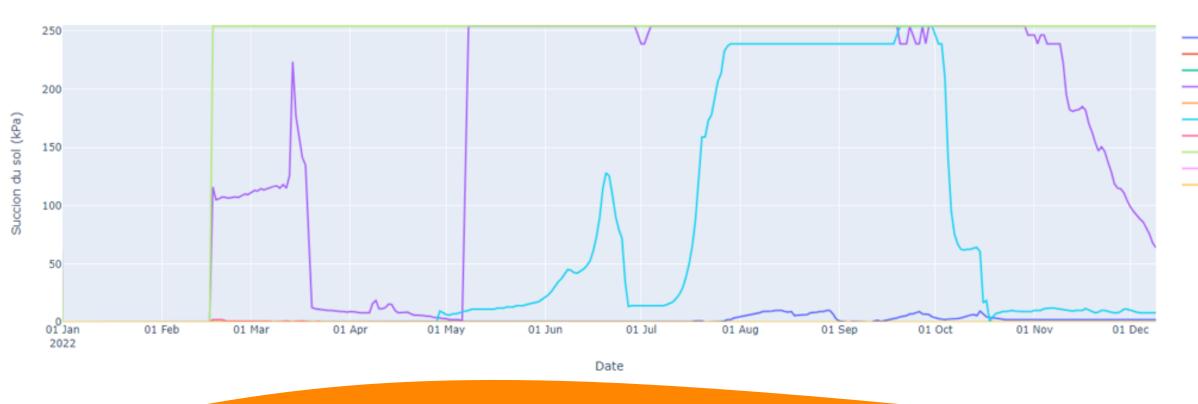


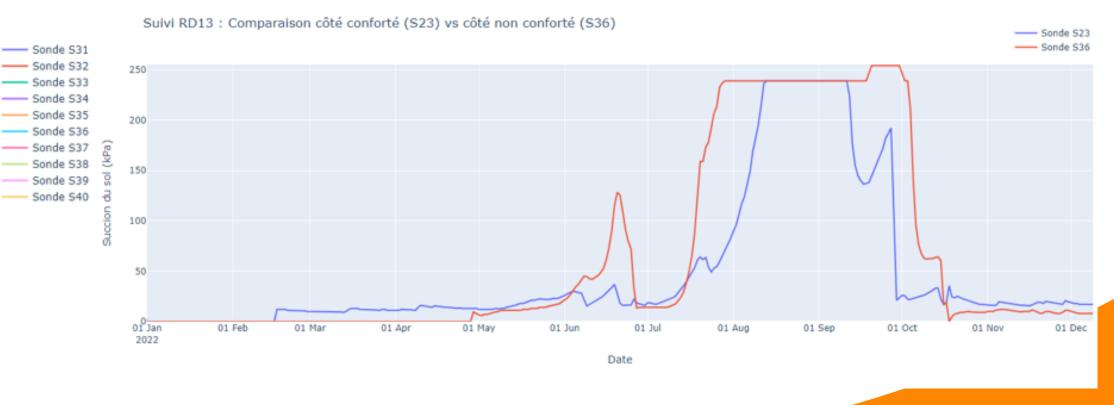


Suivi RD13 (sens vers Romorantin)



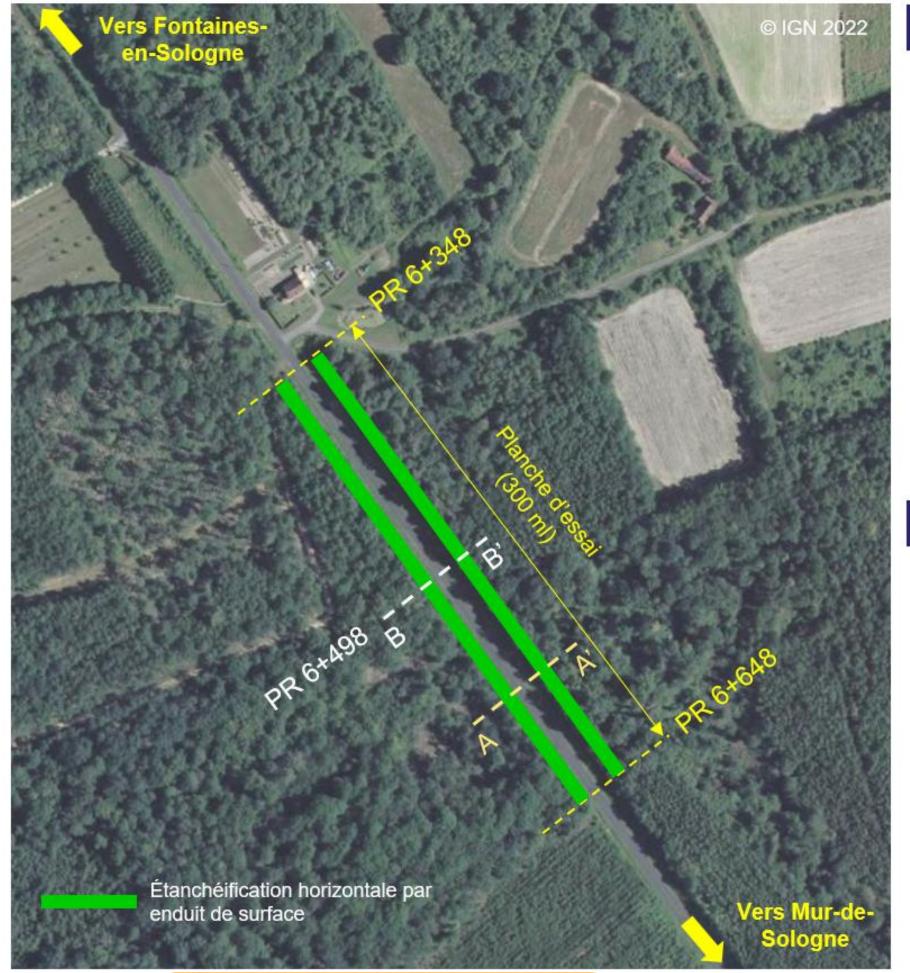


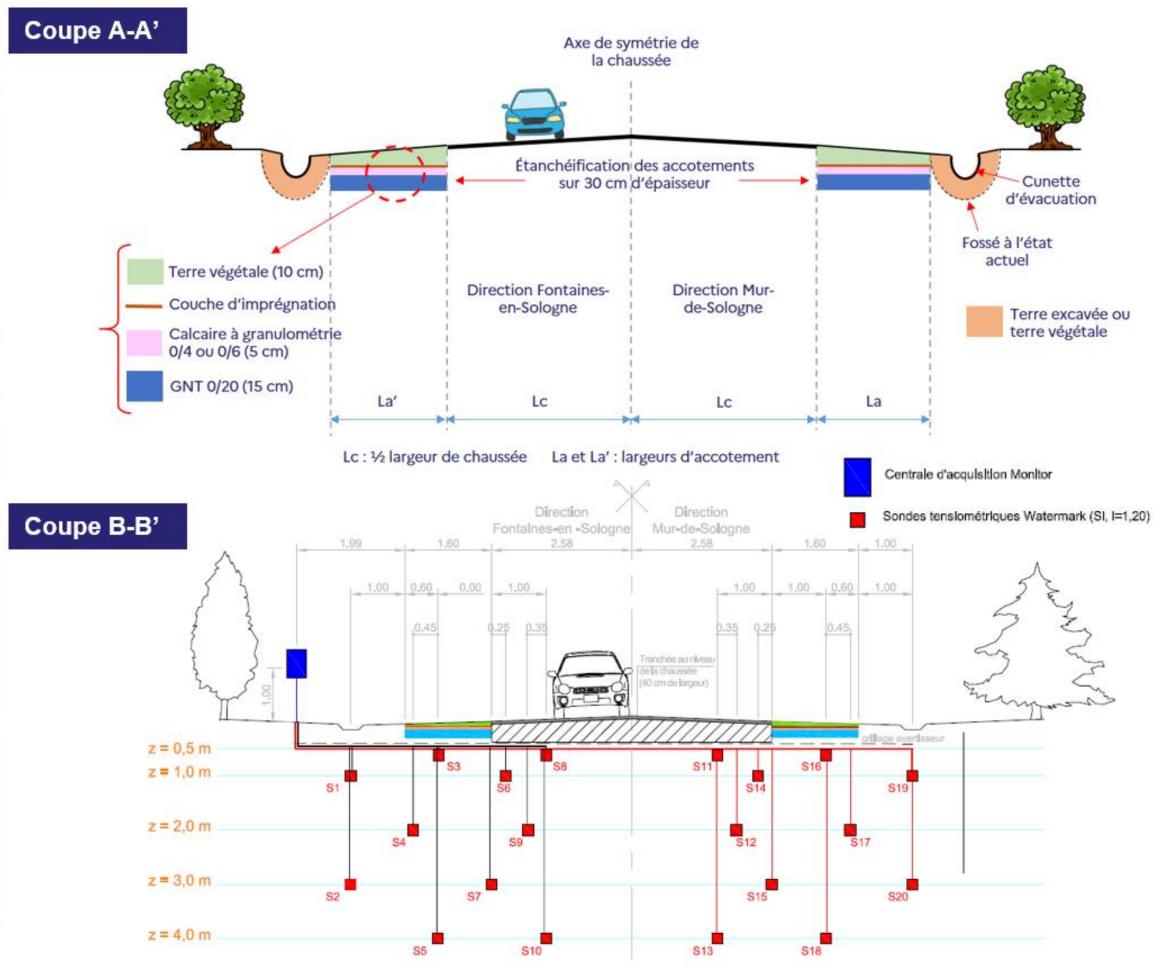






> Etanchéification horizontale des accotements par enduit de surface











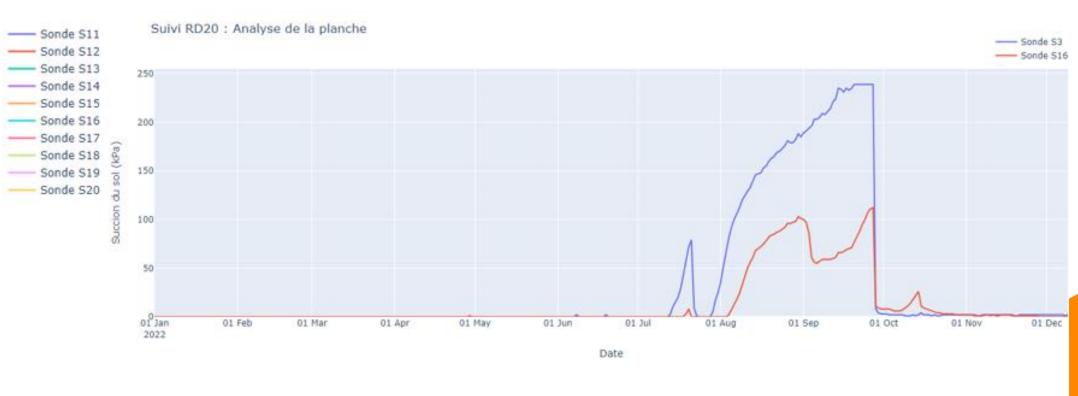
> Etanchéification horizontale des accotements par enduit de surface





Suivi RD20 (sens vers Mur-de-Sologne)

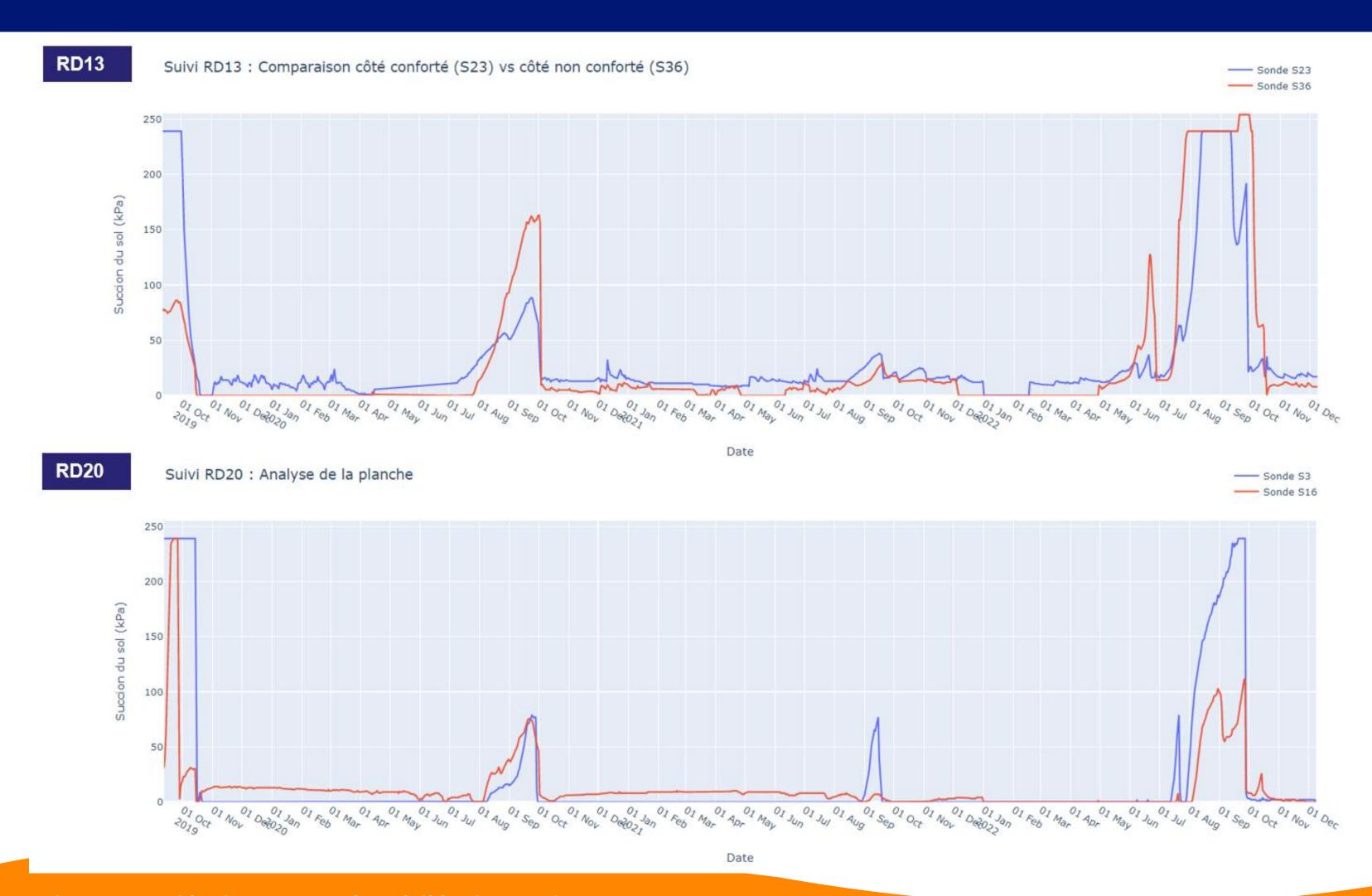








> Analyse de l'effet de l'étanchéification horizontale après les sécheresses 2020, 2021 et 2022







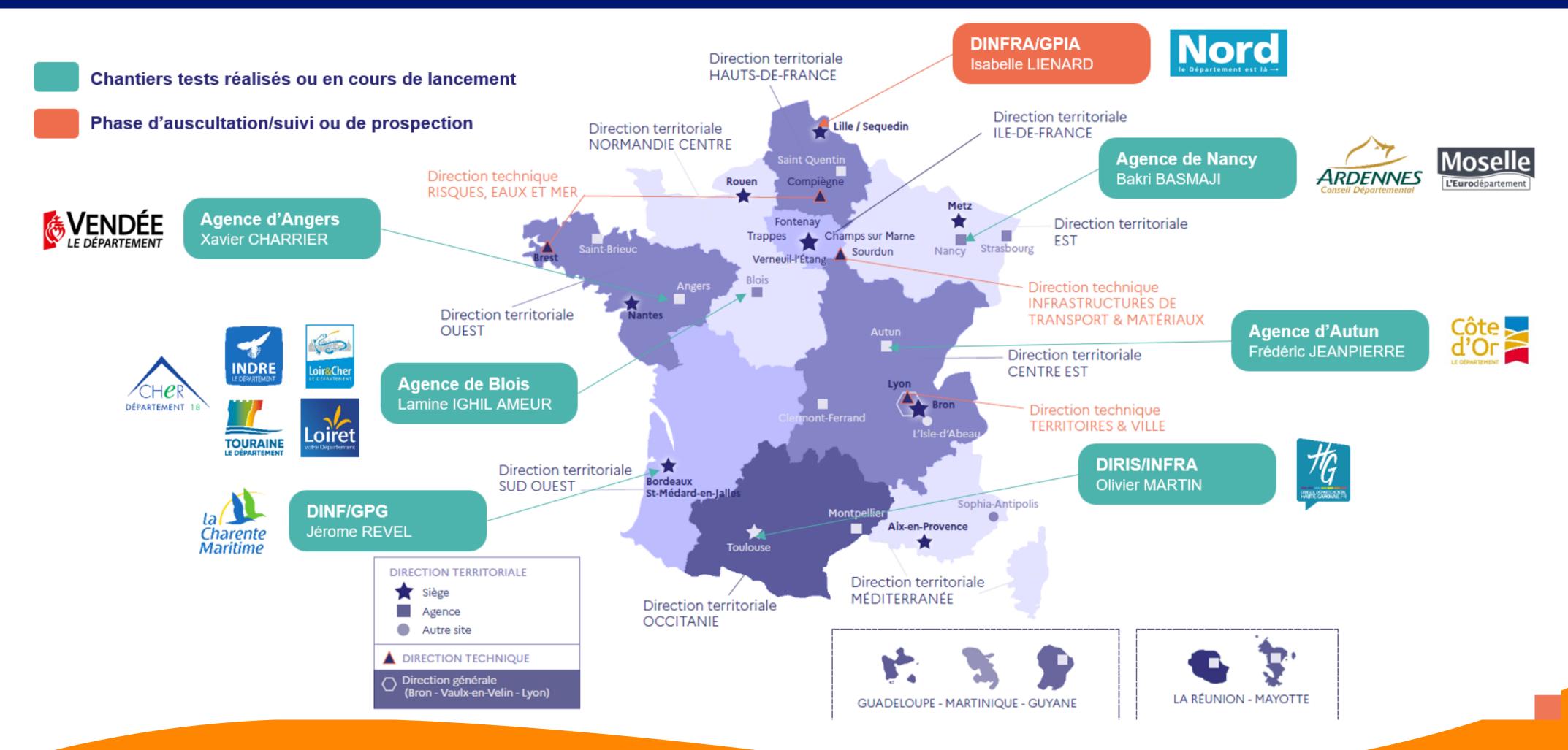
Loir&Cher

Cerema

INSTITUT CARNOT

Clim'adapt

> Elargissement de l'observatoire à l'échelle nationale et élaboration d'un guide Cerema x IDRRIM



- > Confortement d'une voie ferrée par injection de RemediaClay de Keller
 - Localisation du site: ligne Brive-Toulouse par Capdenac (L718 ZER: Zone à évolution Rapide) > Km 327+350 à 328+000 > Commune de Donnazac (81)
 - Problèmes rencontrés : apparition récurrente de défauts de géométrie de voie > nombreux dépassements de seuil enregistrés lors de la <u>sécheresse 2022</u> provoquant des opérations de maintenance en urgence
 - Actions à court et moyen termes : limitation temporaire de vitesse 60 km/h > modernisation de la ligne financée par la Région Occitanie
 - Projet RemediaClay: profiter des travaux programmés (circulation coupée) pour réaliser une expérimentation du RemediaClay sur une section de 80 m du Km 327+760 à 327+840
 - Période des travaux : de mai à juin 2024





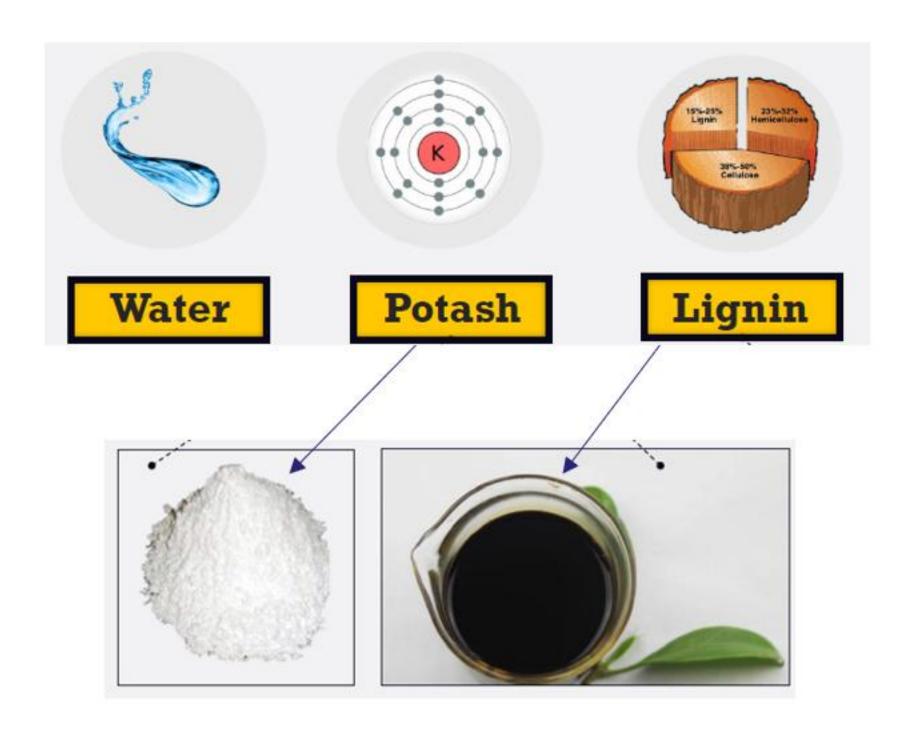




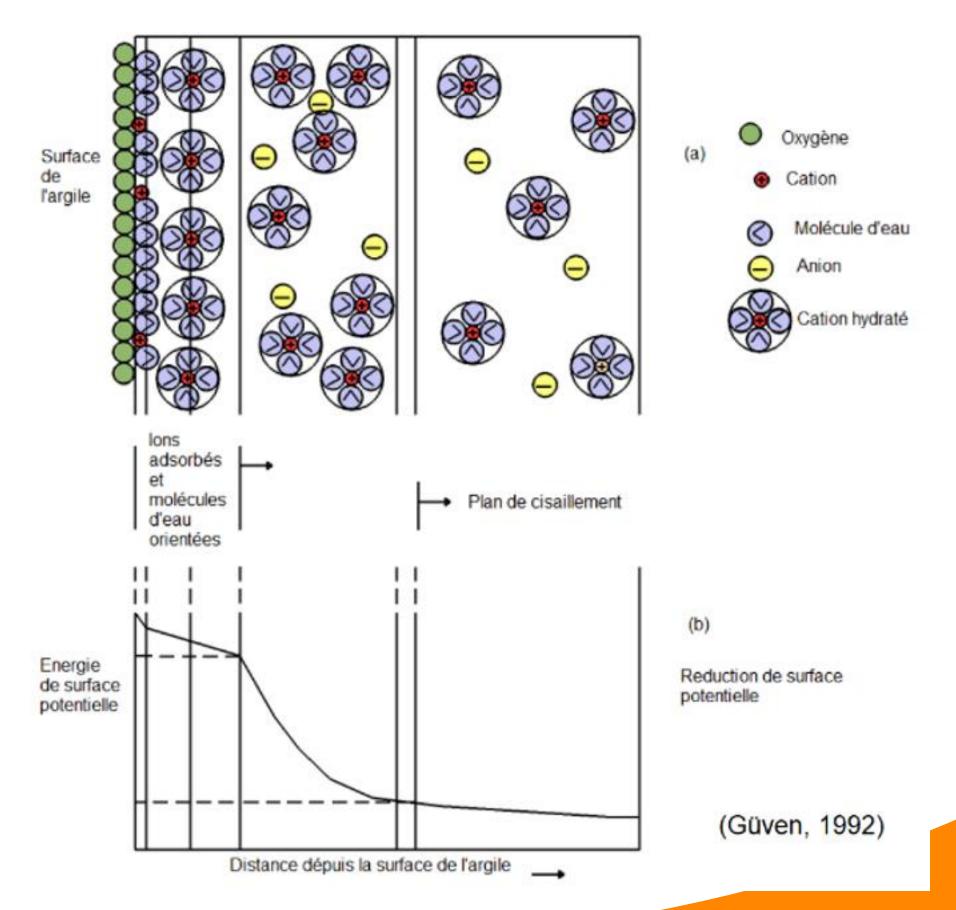


> Confortement d'une voie ferrée par injection de RemediaClay de Keller

Composition du RemediaClay® (Doumet, 2017)



Principe de la stabilisation chimique des sols argileux







> Confortement d'une voie ferrée par injection de RemediaClay de Keller

Protocole d'injections:

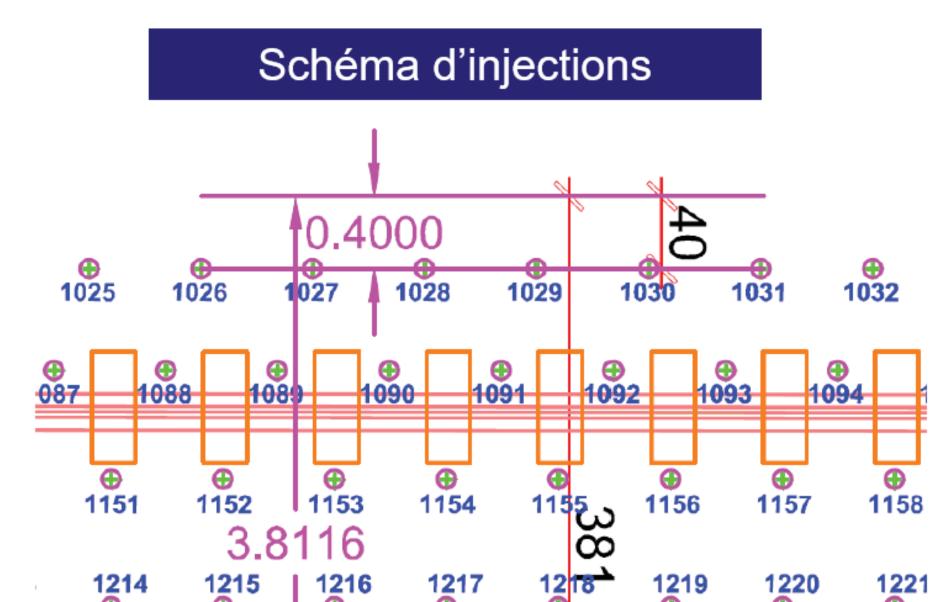
- Planche d'essai RemediaClay de longueur 80 m (km 327+760 à km 327+840)
- 6 lignes de d'injections (profil en long)
- Maillage triangulaire 70 cm x 70 cm (maillage qui sera adapté lors de l'établissement du plan EXE)
- Profondeur d'injection : 2,50 m

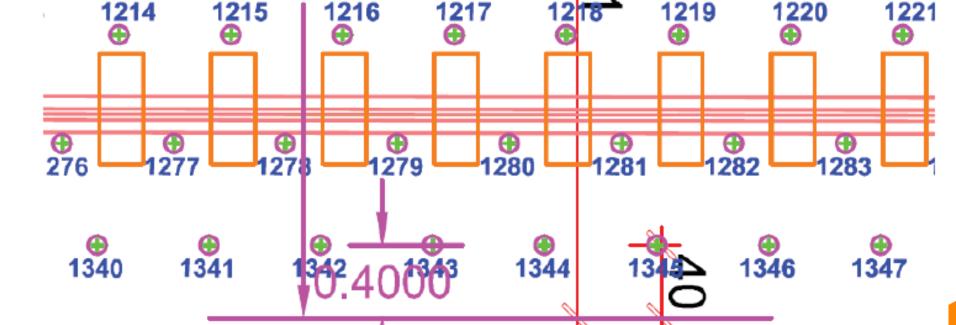
Protocole de contrôle sur site :

- Contrôle du dosage de produit par densité, contrôle effectué 2 fois par jour en centrale
- Contrôle de la vitesse de remonté et du débit/pression d'injection par enregistrement de paramètre pour chaque double point.











> Confortement d'une voie ferrée par injection de RemediaClay de Keller







> Appel à projets RGA France 2030 piloté par l'ADEME

Montage de deux programmes de recherche AAP France 2030 piloté par ADEME (février 2023 – juin 2024)

SEHSAR : Surveillance Etendue du niveau d'Humidité des Sols argileux pour l'Adaptation et la Résilience du bâti face au changement climatique

Objectif: porté par le Cerema en partenariat avec le BRGM (2024 – 2029), l'objectif est de développer un outil de veille et d'anticipation du niveau de la sécheresse des sols argileux en France







SAFE RGA : Solutions innovantes d'Adaptation du bâti exposé à la sécheresse Face à l'Expansion du phénomène de RGA

Objectif : porté par le Cerema dans le cadre d'un consortium composé avec l'AQC, CEAD, Fondasol et Université d'Orléans (2024 – 2029), l'objectif est de développer de nouvelles solutions innovantes pour l'adaptation et la prévention RGA















Lauréat



Financé par



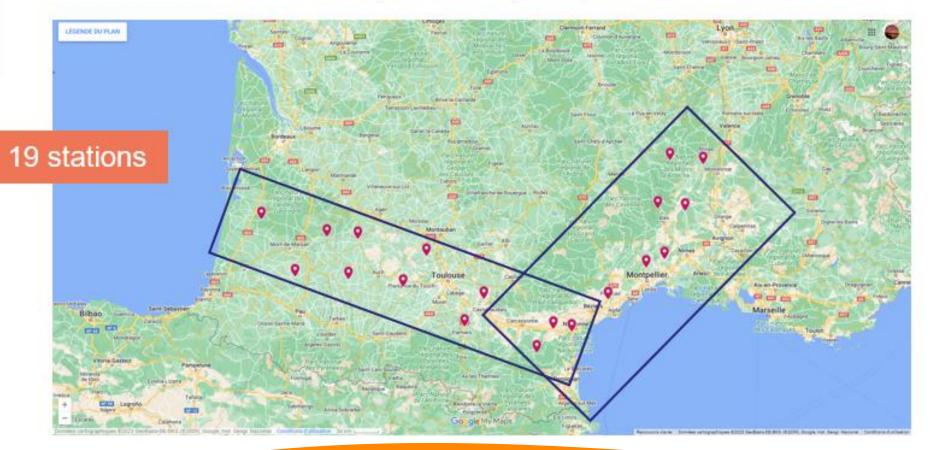






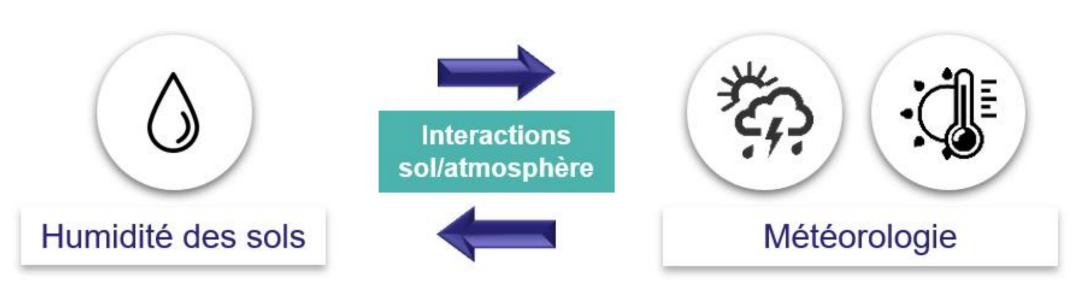
Projet SEHSAR (Cerema x BRGM)

Etat actuel de la mesure de l'humidité des sols en France 4°E ATLANTIQUE 45°N 45°N SWATME) **SMOSMANIA** 44°N 44°N 43°N MEDITERRANEE 42°N 5°E 4°E (Calvet et al., 2010)



Objectifs

- **Étendre la mesure in situ** de l'évolution de l'humidité des sols argileux dans le contexte du changement climatique
- SEHSAR -> Coupler données du sol et données météorologiques pour mieux adapter le bâti et prévenir la sécheresse des sols



Applications

- Météo France: mieux documenter l'indice d'humidité des sols utilisé comme critère pour la reconnaissance Cat-Nat
- Agriculteurs : mieux anticiper et gérer les besoins en eau des sols
- Services de secours : mieux anticiper les feux de forêt



Financé par

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

ADEME

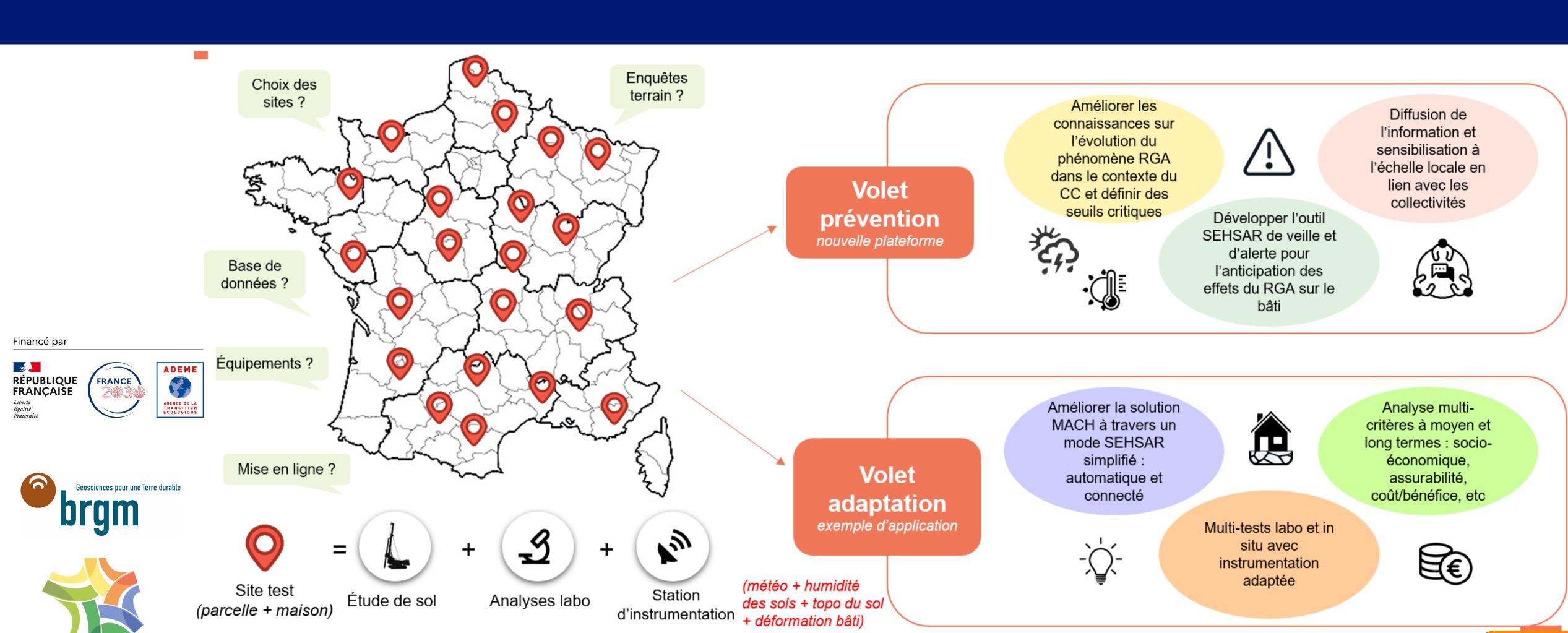
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

FRANCE

Géosciences pour une Terre durable



Projet SEHSAR (Cerema x BRGM)





Cerema

CARNOT

Clim'adapt

Projet SEHSAR (Cerema x BRGM)

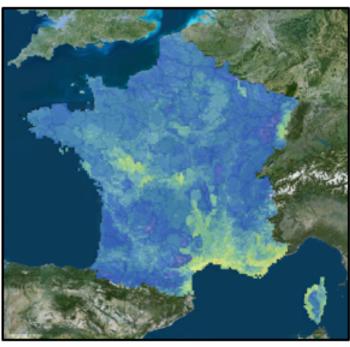
Principaux verrous scientifiques:

- Représentativité des données collectées in situ à l'échelle nationale, ce qui conditionne le choix des sites
- Corréler les paramètres météorologiques à la réponse du sol argileux à travers son comportement hydromécanique dans le contexte du changement climatique
- Prise en compte du changement d'échelle : du site expérimental et de la carte départementale vers un zonage local

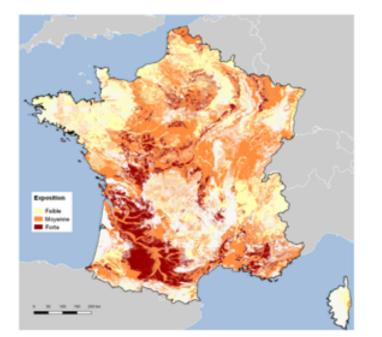












Susceptibilité







Thèse SEHSAR : développement d'un nouvel outil de veille et d'anticipation du niveau de la sécheresse des sols argileux

La proposition de thèse a pour objectif le développement de l'outil SEHSAR et ses applications de prévention et d'adaptation vis-à-vis du phénomène de RGA. Le ou la doctorant(e) conduira une analyse multi-échelles :

- En laboratoire, avec la caractérisation du comportement hydromécanique et de la fissuration de dessiccation des sols argileux prélevés in situ sur les 50 sites du réseau de stations SEHSAR;
- In situ, avec le monitoring des paramètres du sol (teneur en eau volumique, température, déformation, etc) et de l'atmosphère (température et humidité de l'air, pluviométrie, évapotranspiration, etc);
- Sur la base de ces données, le ou la doctorant(e) établira les corrélations nécessaires pour développer l'outil SEHSAR et pouvoir asservir le procédé MACH.

Encadrement:

- Pr. Mahdia Hattab (Université de Lorraine / LEM3)
- Dr. Lamine Ighil Ameur (Cerema / GéoCoD)



> Projet SAFE RGA (Cerema x AQC x CEAD x Fondasol x Université d'Orléans)









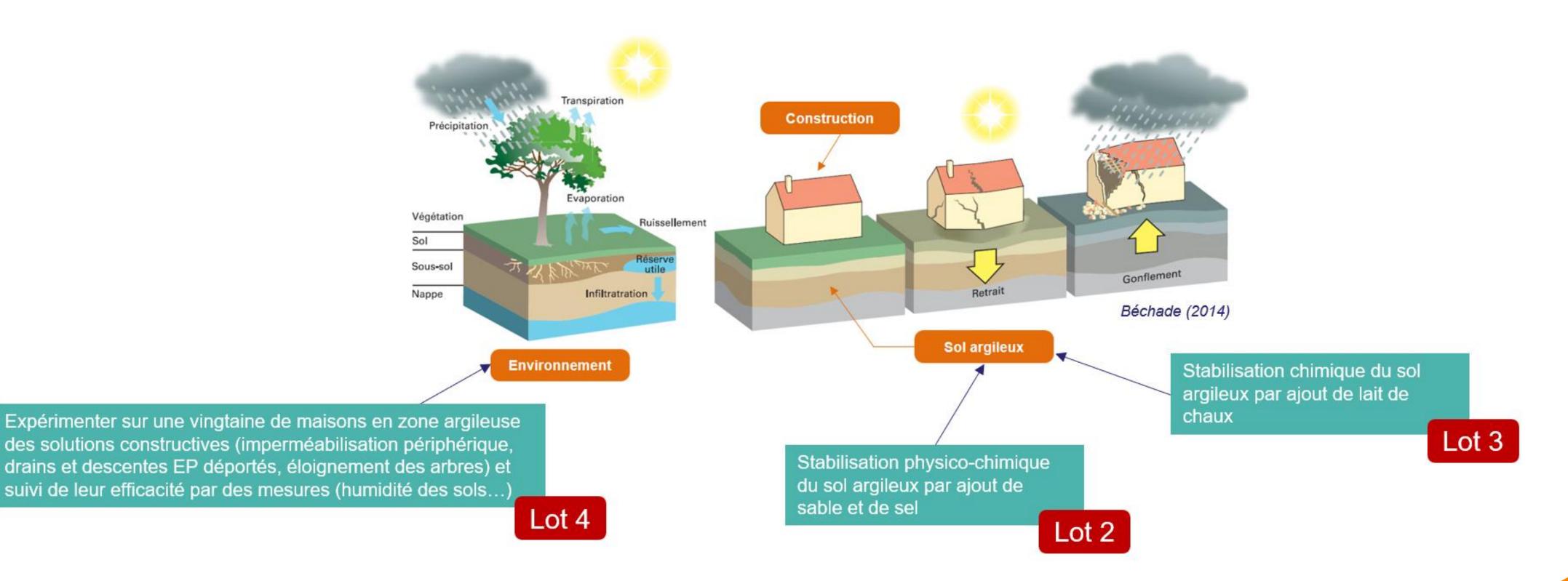














Projet SAFE RGA (Cerema x AQC x CEAD x Fondasol x Université d'Orléans)



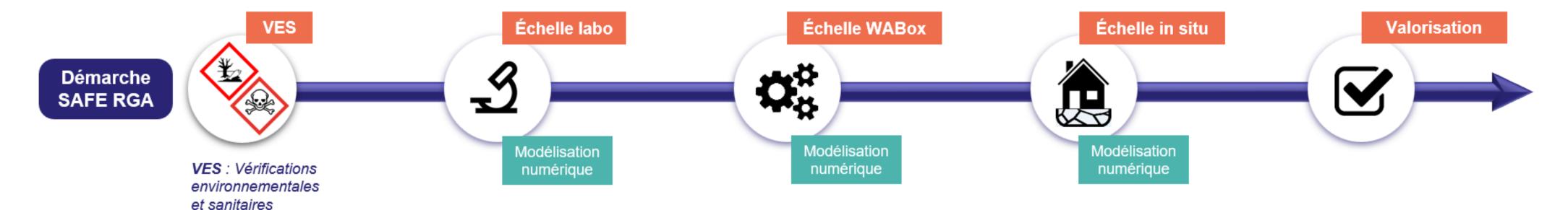










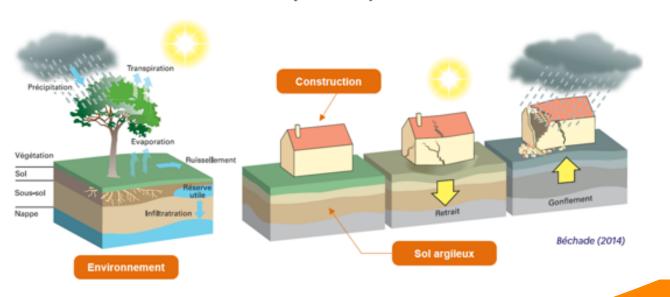


Verrous scientifiques:

- Représentativité des échantillons de sol naturel, prélevés in-situ, dans la réalisation des investigations en laboratoire;
- Prise en compte de l'anisotropie minéralogique, de variation de volume, des déformations et de comportement hydromécanique des sols argileux non saturés et l'hétérogénéité de leur réponse aux sollicitations hydriques aléatoires ;
- Conception et le développement des solutions innovantes à l'échelle 1 pour l'adaptation des maisons exposées au RGA à partir des avancées escomptées en termes de compréhension des mouvements de l'eau dans les sols argileux en périodes de sécheresse intenses et fréquentes ;
- · Applicabilité et la reproductibilité des solutions développées : méthodologie de mise en œuvre, impacts environnementaux et sanitaires, analyse coût-bénéfice, etc.

Objectifs:

- Prévenir le risque sécheresse des sols argileux pour les nouvelles constructions ;
- Adapter le bâti existant exposé au RGA;
- · Développer de nouvelles solutions écologiques, économiques et accessibles à tous, durables et faciles à mettre en œuvre avec une faible empreinte carbone ;
- · Tester et éprouver chaque solution selon un programme scientifique et technique multi-échelle avec modélisation numérique : reproductibilité et durabilité.



Projet SAFE RGA (Cerema x AQC x CEAD x Fondasol x Université d'Orléans)























Thèse 1 : évaluation expérimentale et numérique des solutions innovantes SAFE RGA: approche multiéchelles et multicritères

La proposition de thèse a pour objectif la conception, l'évaluation et l'analyse multicritères des solutions innovantes SAFE RGA, dont l'ajout de sable et de sel et l'ajout de lait de chaux. Le ou la doctorant(e) conduira une étude expérimentale et numérique multi-échelles :

- En laboratoire, avec la caractérisation du comportement hydromécanique du sol traité soumis à des cycles dérèglés de séchage/humidification,
- Dans la WABox à l'échelle d'un conteneur, avec des tests sur des échantillons à taille représentative,
- In situ, en appliquant les solutions sur des maisons sinistrées avec le monitoring sol-bâti-atmosphère.

Des simulations numériques seront réalisées à chacune de ces échelles afin d'optimiser et d'affiner les paramètres et les conditions de tests. Une attention particulière sera portée sur les techniques de mise en œuvre envisagées en termes de faisabilité, de coût, d'impacts sur l'environnement, etc.

Encadrement:

- Dr. Christophe Chevalier ou Dr. Myriam Duc (Université Gustave Eiffel / GERS)
- Dr. Lamine Ighil Ameur (Cerema / GéoCoD)
- Dr. Duc Phi Do (Université d'Orléans / LaMé)









Thèse 2 : contribution de la modélisation numérique à l'optimisation des solutions d'adaptation du bâti face à l'expansion du phénomène de retrait-gonflement des argiles

Le sujet de thèse s'inscrit dans le cadre du projet SAFE RGA. Dans ce contexte, les objectifs de ce sujet de thèse consistent à développer et appliquer les outils numériques pour accompagner et optimiser les solutions d'adaptation vis-à-vis du phénomène RGA selon le programme scientifique mené à trois échelles : l'échelle d'essai au laboratoire sur de petits échantillons, l'échelle intermédiaire d'une chambre environnementale instrumentée WABox et l'échelle du bâti.

Encadrement:

- Dr. Duc Phi DO (Université d'Orléans / LaMé)
- Pr. Dashnor HOXHA (Université d'Orléans / LaMé)
- Dr. Yudan JIN (Université d'Orléans / LaMé)
- Dr. Lamine Ighil Ameur (Cerema / GéoCoD)





Merci pour votre attention







Lamine IGHIL AMEUR lamine.ighil-ameur@cerema.fr