

Journée Scientifique et Technique du CFMS

Jeudi 9 décembre 2021

Résilience et adaptation face au changement climatique pour les maisons et les routes exposées au phénomène RGA

Lamine IGHIL AMEUR

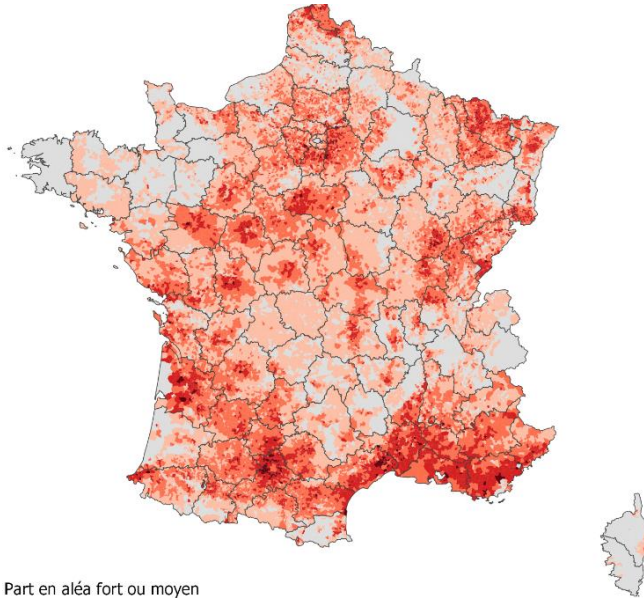


1. Sécheresse & RGA, quoi de neuf ?
2. Phénomène RGA : définitions et caractérisation en laboratoire
3. Impacts du RGA sur les ouvrages et effets de l'environnement proche
4. Nouvelles solutions de remédiation pour les routes : Projet ORSS
5. Solutions de remédiation pour les maisons
6. Conclusions et perspectives

1. Sécheresse & RGA, quoi de neuf ?

1. Sécheresse & RGA, quoi de neuf ?

- Tour d'horizon de la récente actualité sur le RGA en France (juin – octobre 2021)



Part en aléa fort ou moyen
Part des maisons construites après 1976 exposées (en %)

- 75 - 100
- 50 - 75
- 25 - 50
- 1 - 25
- Pas de maison exposée

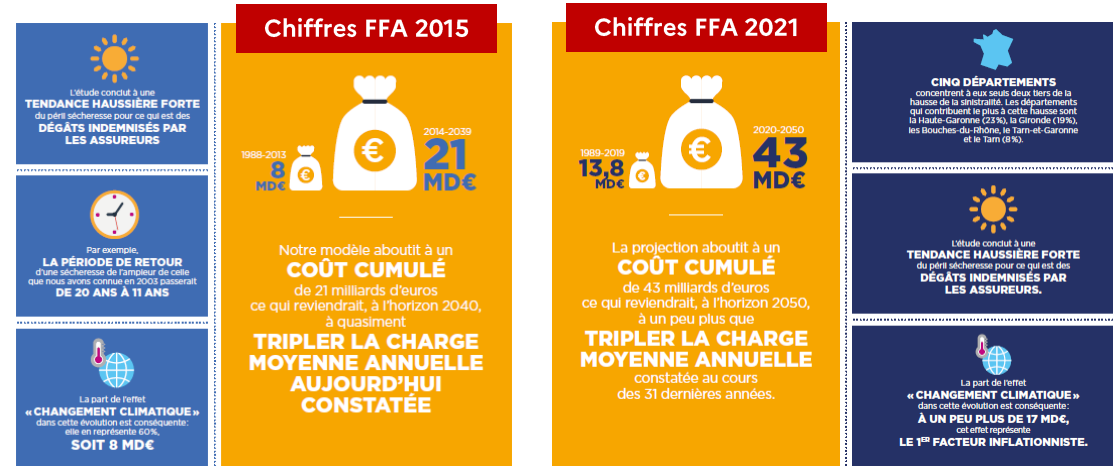
Sources : BRGM, 2019 ; Fidéli, 2017. Traitements : SDES, 2021

Nouveau zonage d'exposition au RGA

Publié par le Ministère de la Transition écologique le 23 juin 2021, l'exposition forte ou moyenne au RGA concerne désormais **48 %** des sols métropolitains.

Plus de **10,4 millions** de maisons individuelles potentiellement très exposées dont près de la moitié bâties après 1976. Leur répartition selon les périodes de construction, illustrée par la cartographie ci-dessus, révèle des disparités territoriales.

Pour en savoir plus : [cliquer ici](#)



Crédits photos : © FFA 2021



RÉFÉRENTIELS DE RÉSILIENCE DU BÂTI AUX ALÉAS NATURELS

ANNEXES RÉPERTOIRE DE LA MISSION RISQUES NATURELS ÉDITION JUILLET 2021



Répertoire des référentiels de résilience du bâti aux aléas naturels

La MRN a publié le 1^{er} juillet 2021 un **répertoire de référentiels de résilience du bâti aux aléas naturels** qui passe en revue différents documents ayant valeur de référence en matière de résilience,

Pour télécharger le répertoire et en savoir plus : [cliquer ici](#)

Construire en terrain argileux, la plaquette com' de la DHUP

Le 14 juin 2021, la DHUP a publié une **plaquette de communication** à destination du public sur la nouvelle réglementation (art. 68 de la loi ELAN et ses 3 arrêtés d'application) et les bonnes pratiques pour construire en terrain argileux sensible au phénomène RGA.

Pour télécharger la plaquette et en savoir plus sur le sujet : [cliquer ici](#)

Impact du changement climatique

La FFA a publié le 28/10/2021 une nouvelle version de son rapport 2015 sur l'impact du changement climatique sur l'assurance.

Pour la **sécheresse**, on passe de 8 MDE initialement imputables au changement climatique entre 2014-2039 à **17,2 MDE** entre 2020-2050.

Pour en savoir plus : [cliquer ici](#)



Juin 2021

1. Sécheresse & RGA, quoi de neuf ?

- Ressources en ligne sur le RGA dans lesquelles le Cerema est impliqué



Informations & valorisations

Vous êtes concernés par l'adaptation des ouvrages (routes et maisons individuelles) affectés par le risque sécheresse et le phénomène de RGA au changement climatique ou vous souhaitez simplement être informés des avancées et des travaux de recherche et d'innovation en cours en la matière ?

Cet article recense pour vous l'essentiel des ressources disponibles en ligne dans lesquelles le [Cerema](#), Institut Carnot [Clim'adapt](#), est impliqué en partenariat avec les acteurs socio-économiques mobilisés.

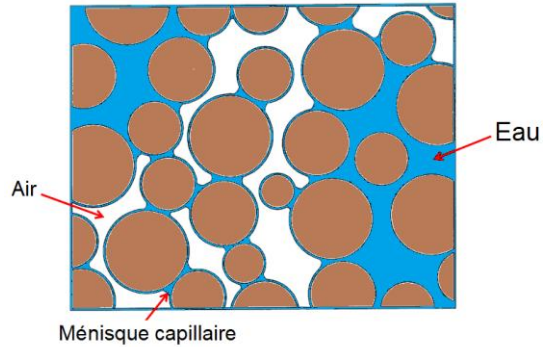
Pour accéder à l'article disponible en ligne ☞ [cliquer ici](#)

2. Phénomène RGA : définitions et caractérisation en laboratoire

2. Phénomène RGA : définitions et caractérisation en laboratoire

- Quelques notions de la mécanique des sols et Courbe de rétention d'eau (Soil Water Characteristic Curve)

➤ Modèle élémentaire d'un sol

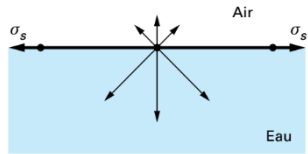


Volumes		Poids	
Va	Air	Wa=0	Vides
Vw	Eau	Ww	
Vs	Grains solides	Ws	

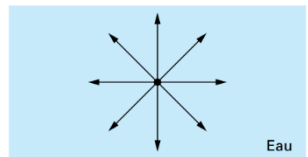
➤ Teneur en eau

$$\omega = \frac{M\omega}{Ms}$$

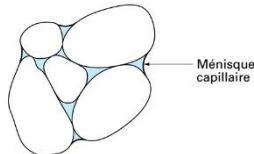
➤ Capillarité et calcul de la succion



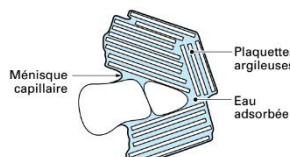
(a) à l'interface eau-air



(b) au sein d'une masse d'eau

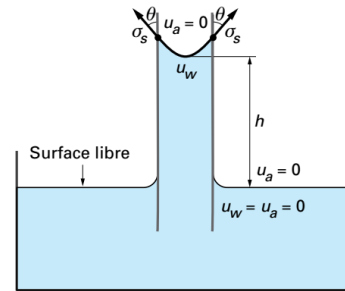


(a) sol granulaire



(b) sol fin

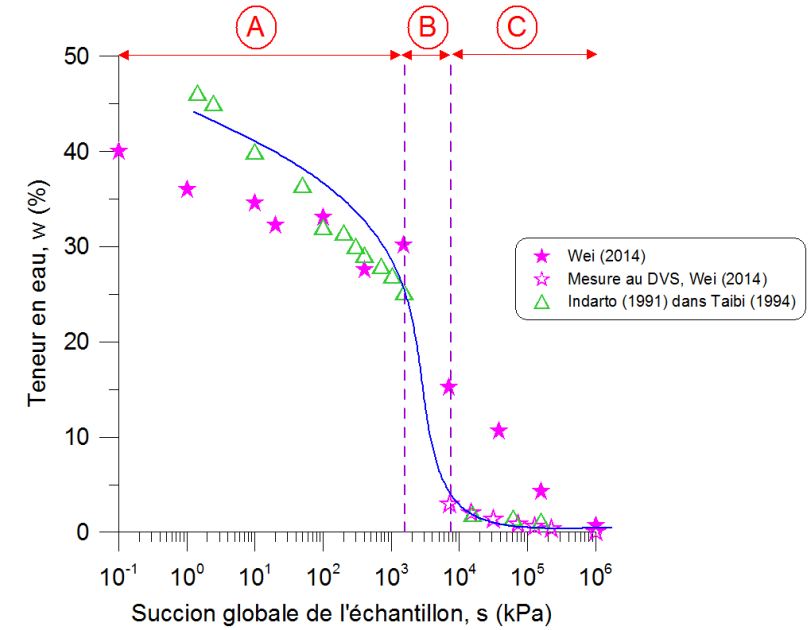
Delage et Cui (2000)



➤ Succion

$$u_a - u_w = \frac{2\sigma_s \cos\theta}{r}$$

➤ Relation entre la teneur en eau « w » et la succion du sol « s » : SWCC

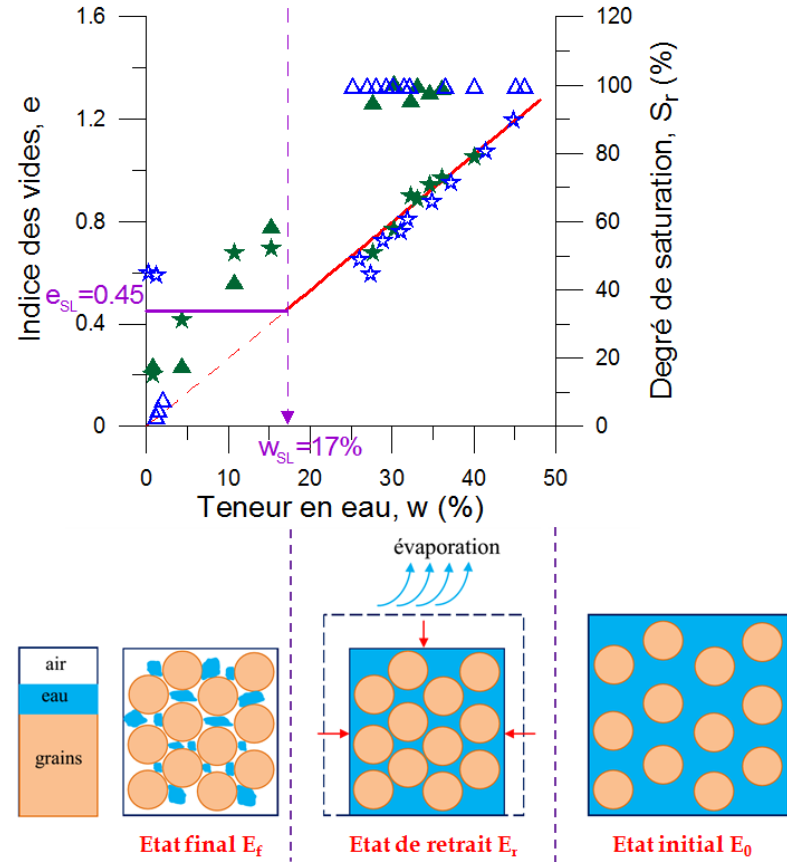


Ighil Ameur (2016)

2. Phénomène RGA : définitions et caractérisation en laboratoire

- Phénomènes de retrait et de gonflement des sols argileux : définitions

➤ Phénomène de retrait : courbe expérimentale



Ighil Ameur (2016)

➤ Phénomène de gonflement des sols argileux

➤ Kaolinite

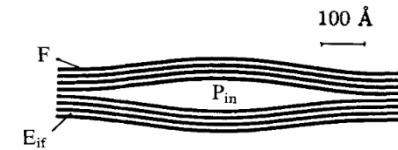
1. Feuille



2. Particule

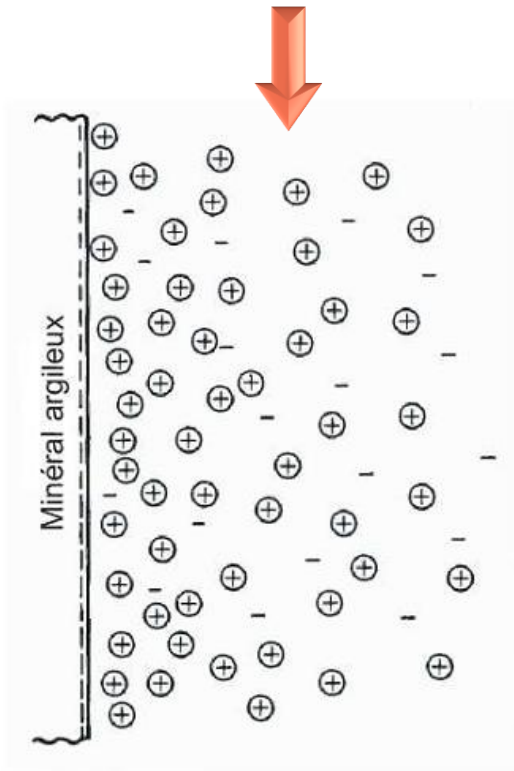


➤ Smectite



Détail d'une particule constituée par $M = 8$ feuillets
F: feuillet élémentaire
 E_{if} : espace interfoliaire
 P_{in} : micropore lenticulaire interne à la particule

Phénomène physico-chimique entre particules d'argile et l'eau



2. Phénomène RGA : définitions et caractérisation en laboratoire

- Essais de laboratoire pour la caractérisation du RGA et l'adaptation au changement climatique

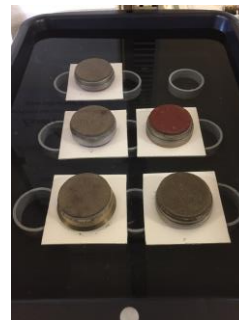


Essais hydriques pour l'adaptation au changement climatique

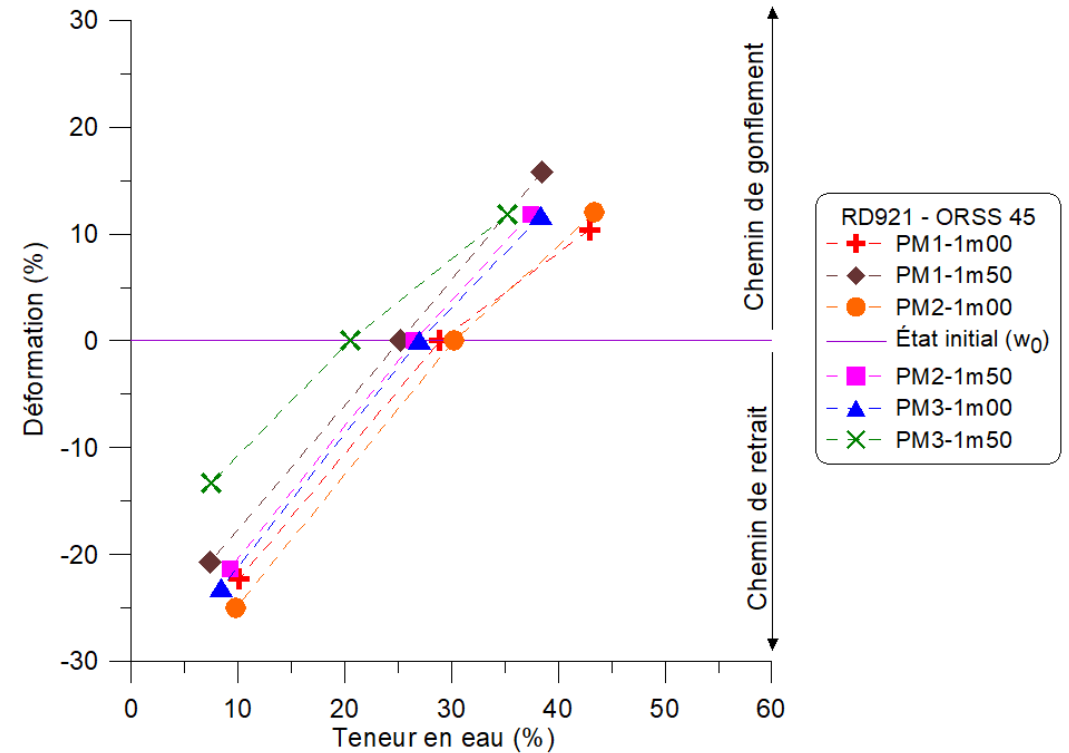
- Caractérisation des isothermes de sorption-désorption des matériaux / DVS - Dynamic Vapor Sorption (analyseur de sorption de vapeur)
- Essai de retrait-gonflement simplifiés / Table RGS
- Mesure automatisée pour la détermination de la conductivité hydraulique saturée des échantillons de sol / LABROS - KSAT
- Mesure de la conductivité hydraulique non saturée des sols / LABROS - HYPROP2
- Mesure du potentiel en eau des sols / LABROS - WP4C

DVS Pour en savoir plus : [cliquer ici](#)

Retrait-gonflement simplifiés



➤ Potentiel de retrait-gonflement (ME 81*)



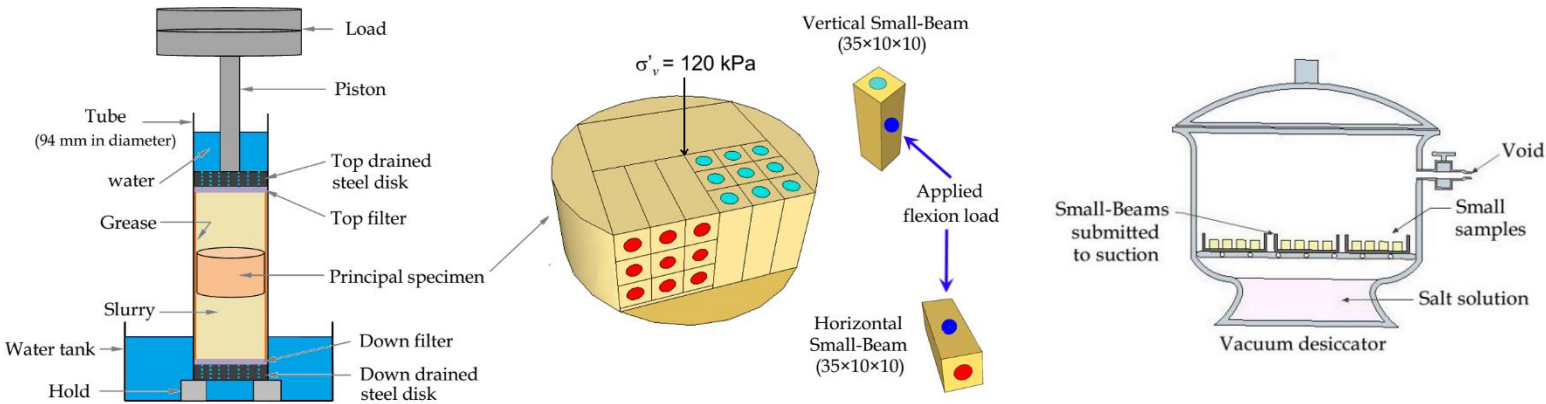
Les résultats montrent une amplitude moyenne de **déformation de gonflement à 12%** et une amplitude moyenne de **déformation de retrait à 21%**

*Méthode d'essai ME 81 : Détermination rapide de l'amplitude totale des déformations de retrait et gonflement des sols sur un prélèvement non remanié

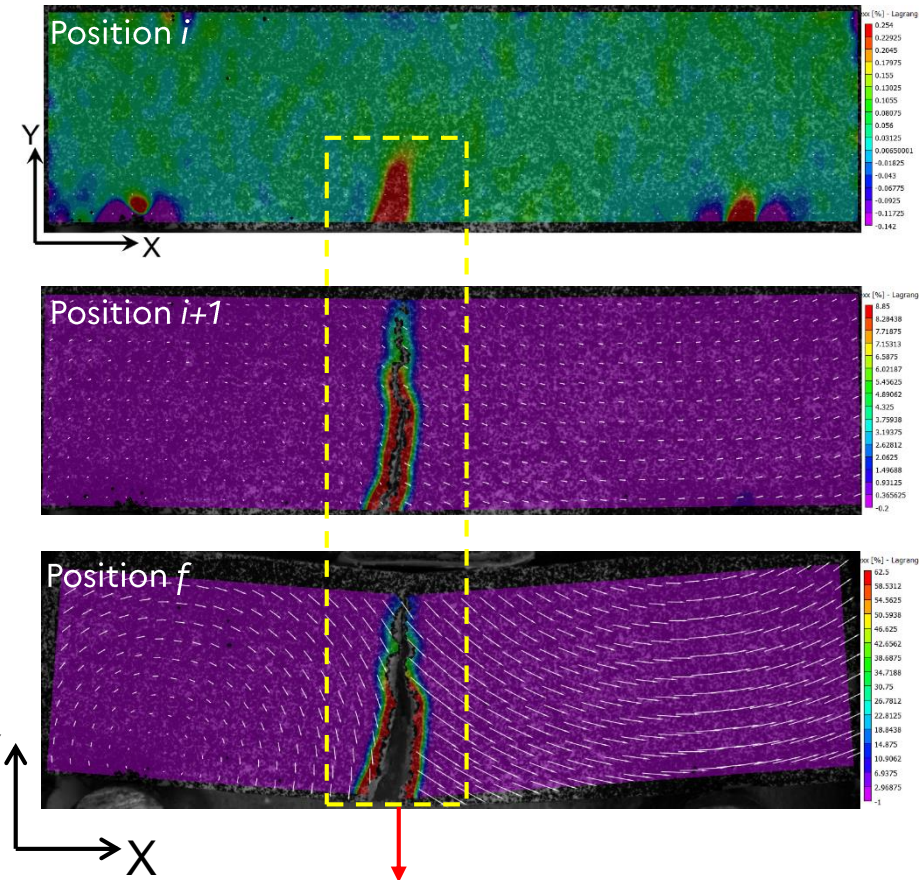
2. Phénomène RGA : définitions et caractérisation en laboratoire

- Analyse des mécanismes d'initiation et de propagation de la fissuration par traction indirecte (Ighil Ameur and Hattab, 2021)

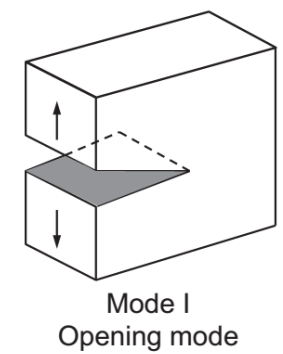
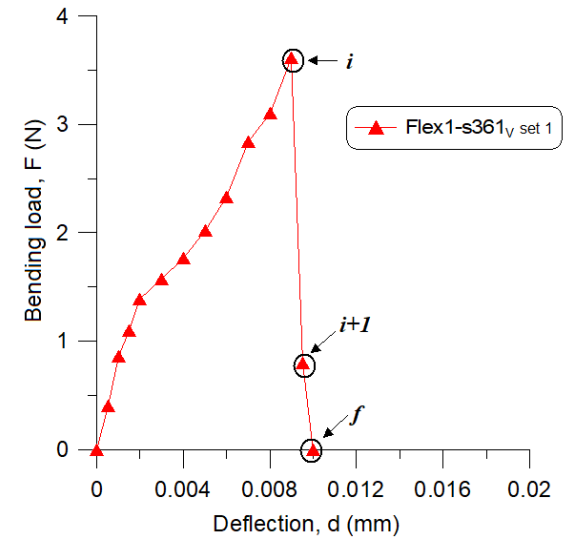
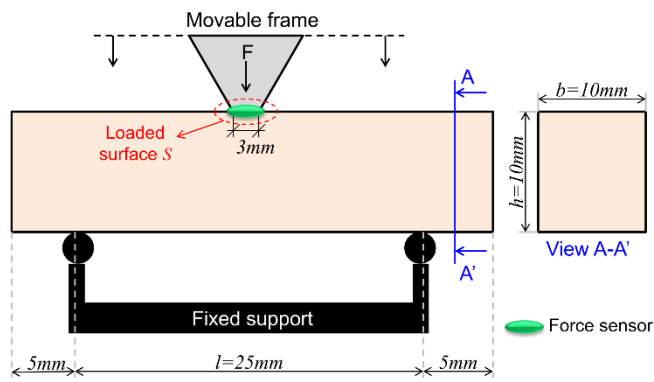
➤ Préparation et conditionnement des poutrelles d'argile



➤ Cartographies VIC2D des déformations longitudinales ϵ_{xx} (test Flex1-s361V set 1)

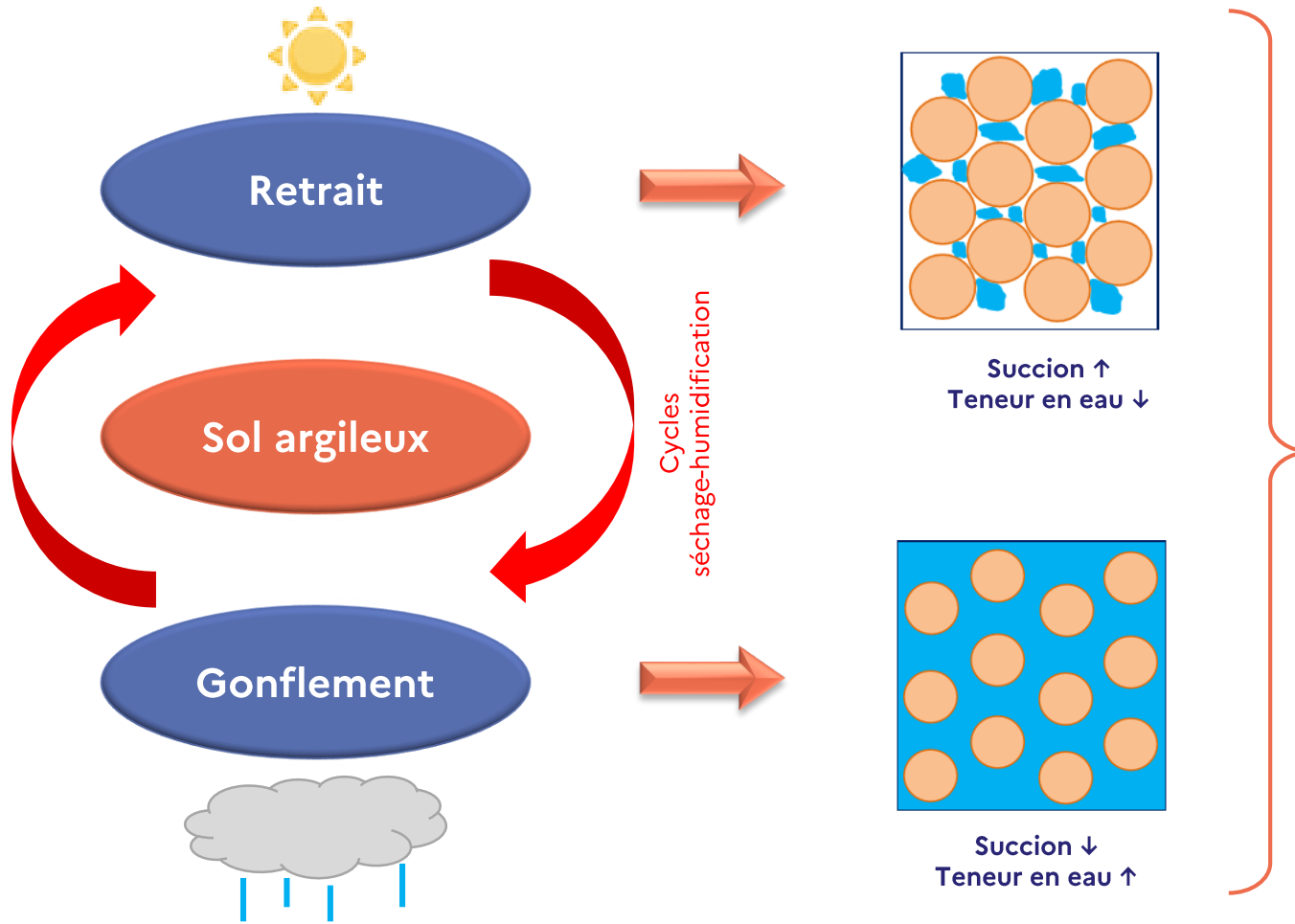


➤ Schéma de principe de la flexion 3 points



2. Phénomène RGA : définitions et caractérisation en laboratoire

- Principe du phénomène du retrait-gonflement des sols argileux (RGA)



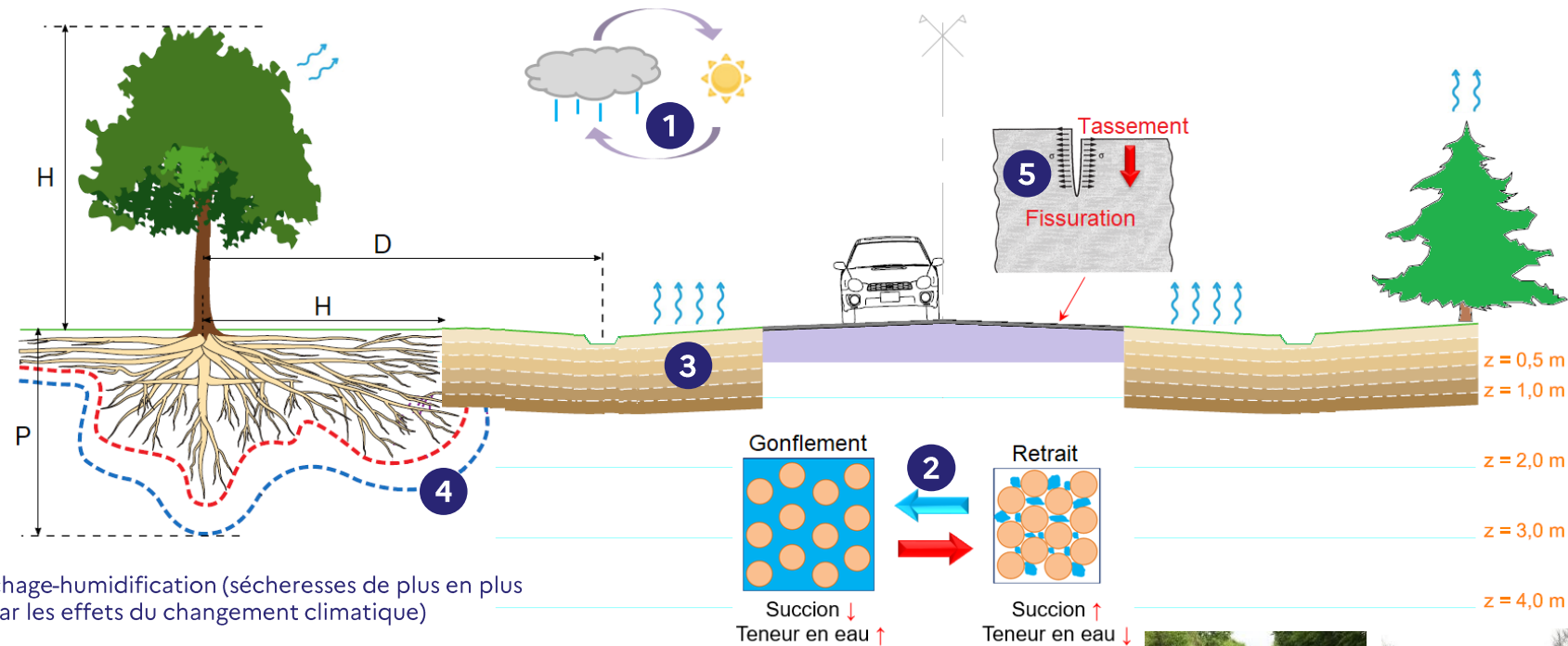
Comment limiter les vulnérabilités des ouvrages affectés par les sécheresses et le RGA ?



3. Impacts du RGA sur les ouvrages et effets de l'environnement proche

3. Impacts du RGA sur les ouvrages et effets de l'environnement proche

- Impacts et conséquences des sécheresses sur les routes



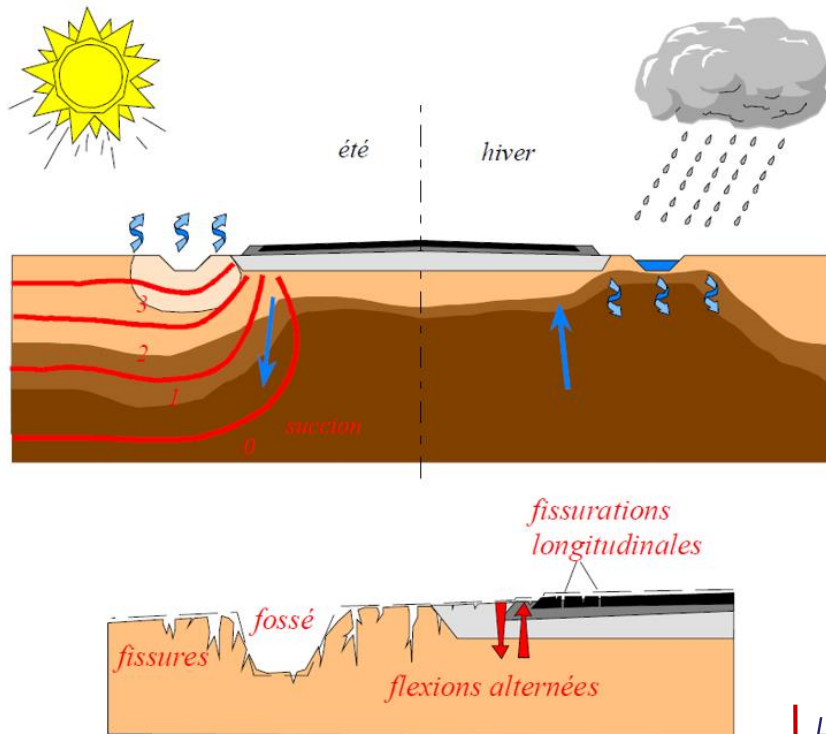
- 1 Cycles de séchage-humidification (sécheresses de plus en plus accentuées par les effets du changement climatique)
- 2 Phénomène du retrait-gonflement des sols argileux (RGA)
- 3 Limites de séchage successives durant un épisode de sécheresse au niveau du sol sous accotements (Béchade, 2014)
- 4 Augmentation de la succion générée dans la zone d'influence des racines de la végétation (Béchade, 2014)
- 5 Fissuration longitudinale et tassement différentiel proches des bords de chaussée



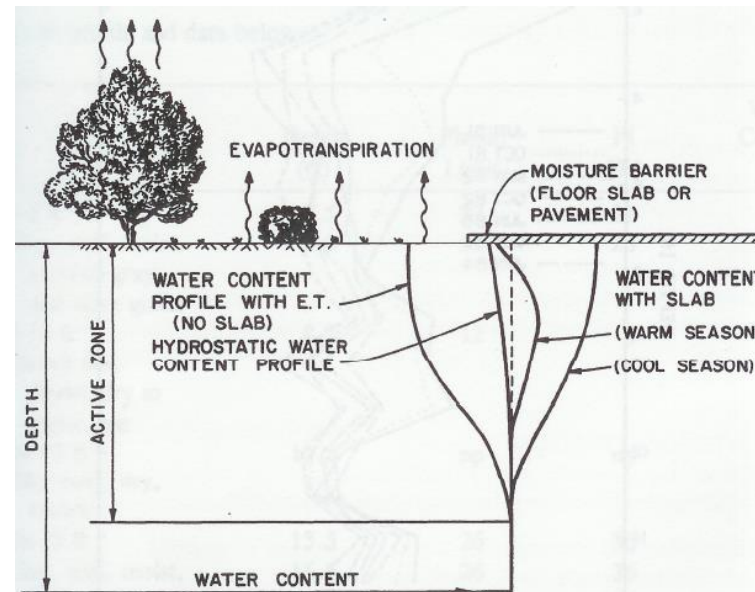
3. Impacts du RGA sur les ouvrages et effets de l'environnement proche

- Exemples de pathologies en lien avec l'environnement proche (Reiffsteck, 1999)

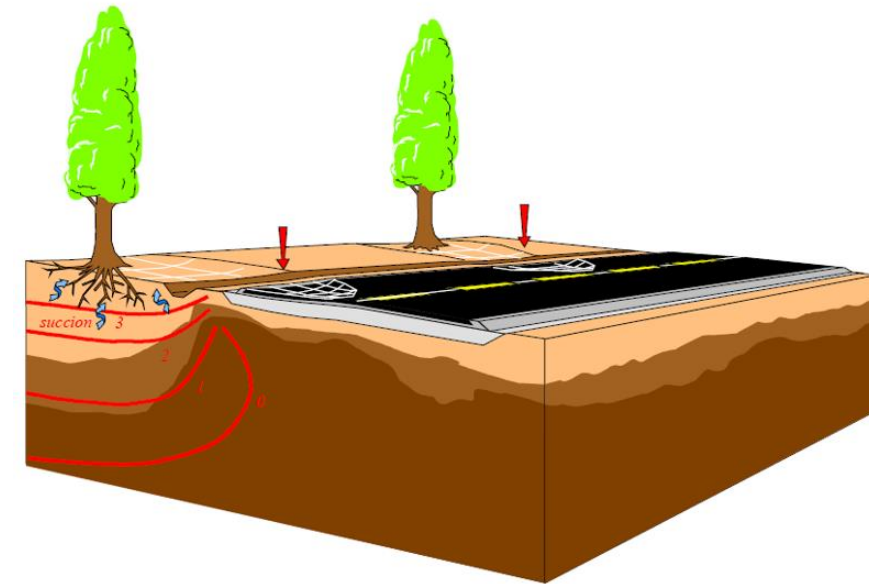
➤ Influence saisonnière



➤ Principe de la « zone active » par Nelson and Miller (1992)



➤ Influence de la végétation

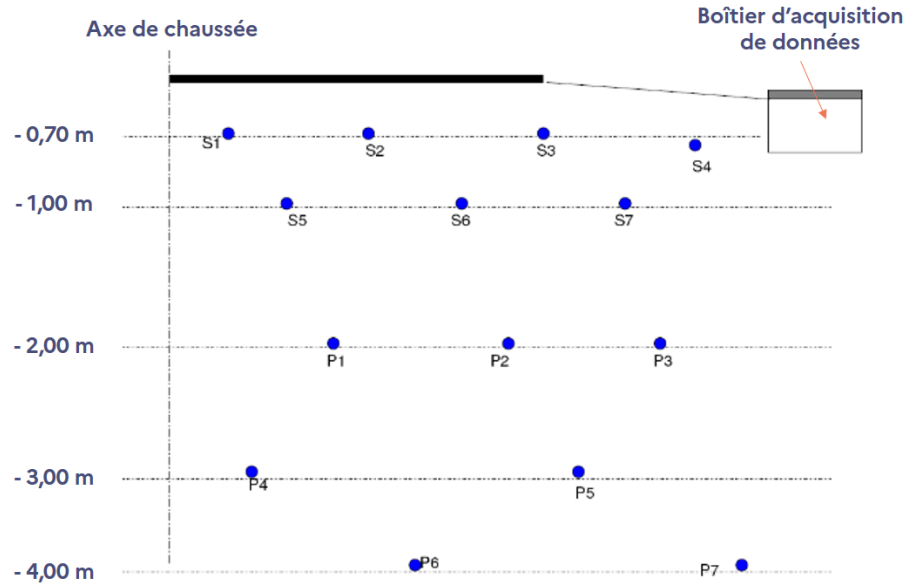


Les sols argileux très plastiques sont affectés par les **variations de la teneur en eau** au niveau des **couches supérieures** fortement exposées aux conditions climatiques et aux facteurs de l'environnement proche : il s'agit de la « **zone active** » ou « **zone de fluctuations saisonnières** »

3. Impacts du RGA sur les ouvrages et effets de l'environnement proche

- Retour d'expérience suite à une instrumentation in situ dans le Loir-et-Cher (LRPC, 2009)

- Schéma d'implantation des sondes tensiométriques sur un demi-profil de chaussée

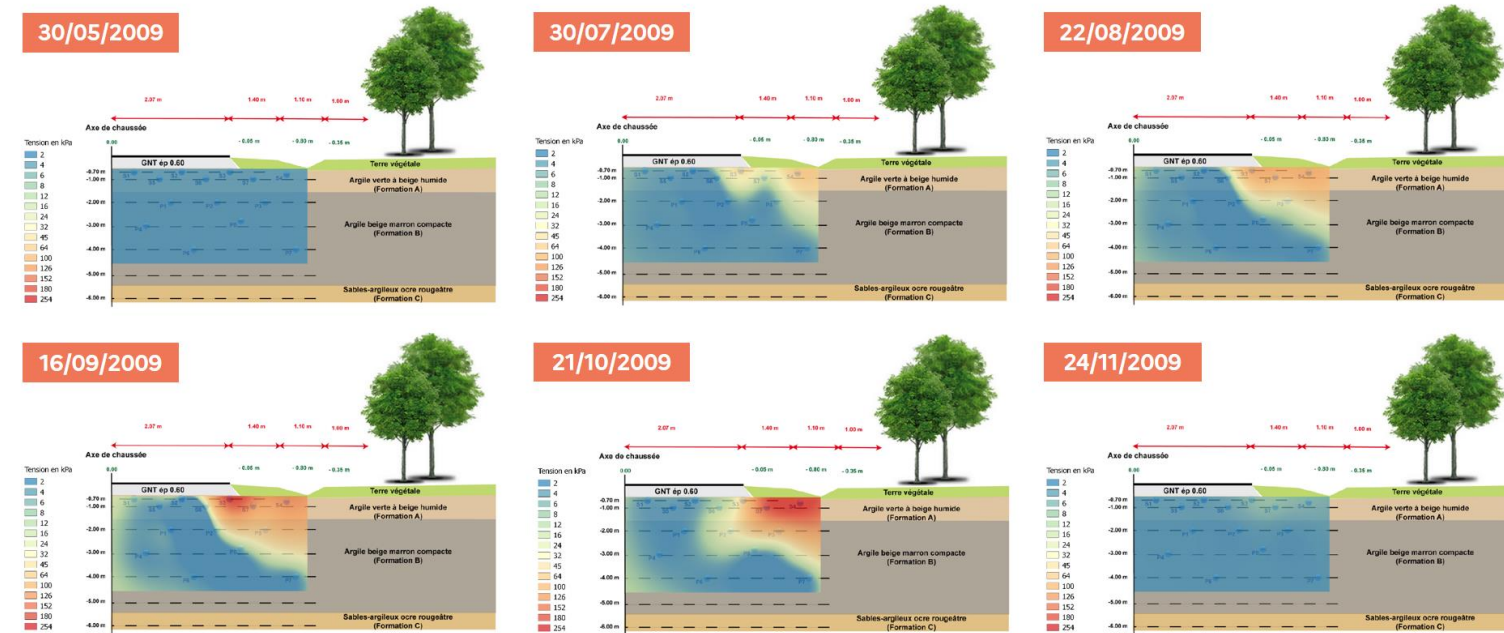


Sondes Watermark®



Monitor®

- 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

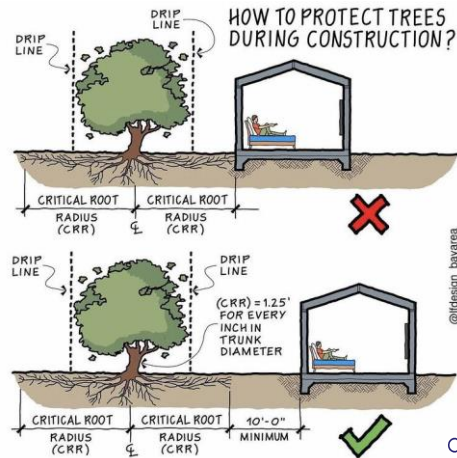
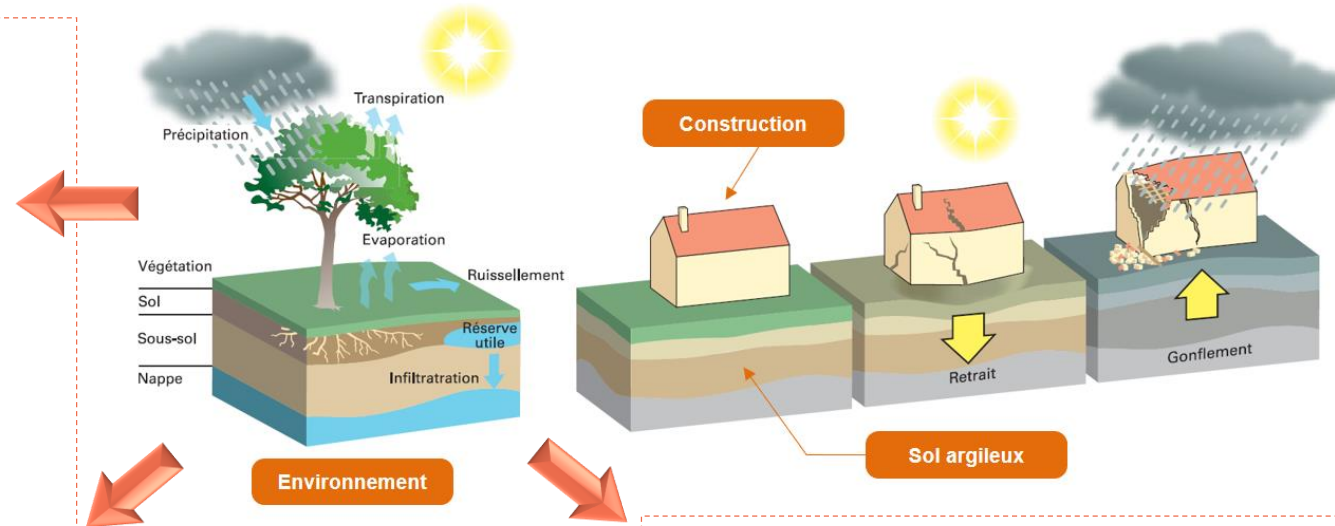
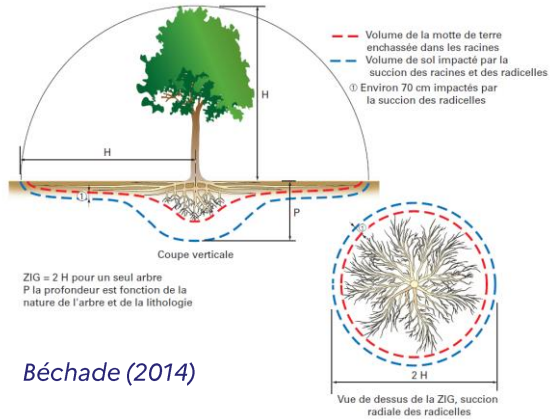


© Cerema

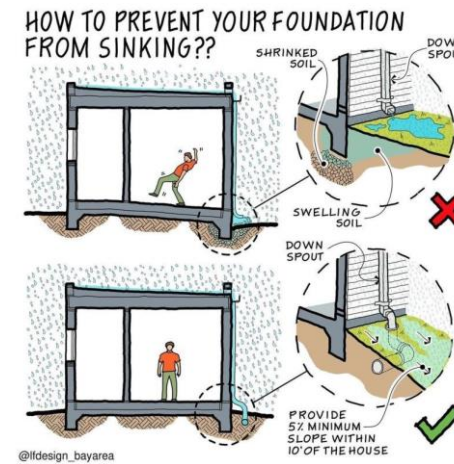
3. Impacts du RGA sur les ouvrages et effets de l'environnement proche

- Importance de l'environnement proche pour identifier les effets des sécheresses 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



➤ 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

3. Impacts du RGA sur les ouvrages et effets de l'environnement proche

- Origines des désordres et exemples de conséquences sur l'habitation

➤ Mauvaise gestion des eaux de pluie



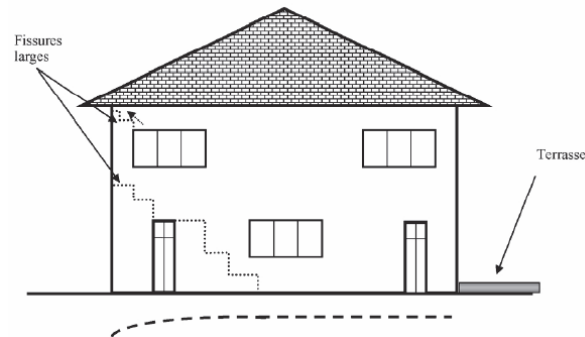
➤ Présence de la végétation



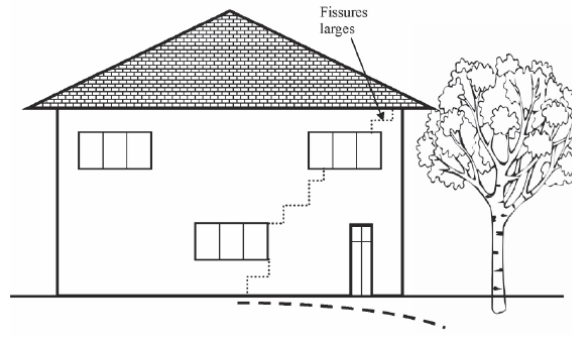
➤ Défauts de construction



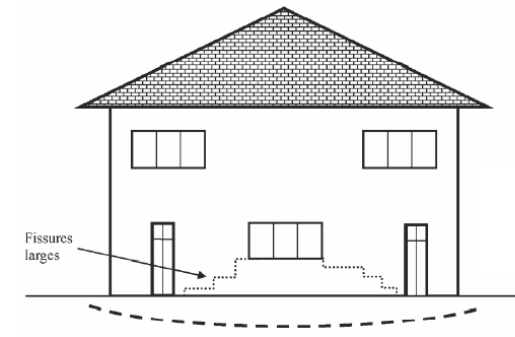
➤ Mécanismes d'apparition des fissures



Mode de déformation provoqué par un retrait périphérique du sol sous la maison



Mode de déformation provoqué par un retrait localisé du sol induit par la présence d'un arbre



Mode de déformation provoqué par le tassement d'un mur de façade

3. Impacts du RGA sur les ouvrages et effets de l'environnement proche

- Exemple : impact de l'environnement proche d'une maison sinistrée dans la commune de Dhuizon (Stage L. Ouerdi, 2021)



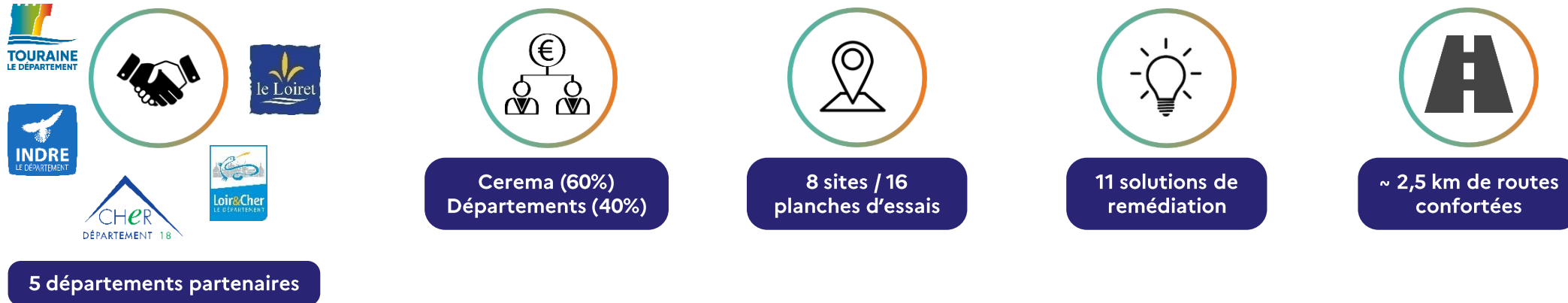
4. Nouvelles solutions de remédiation pour les routes : Projet ORSS

4. Nouvelles solutions de remédiation pour les routes : Projet ORSS

- Cartographie du projet ORSS : quelques chiffres à ce jour et phases de l'Observatoire

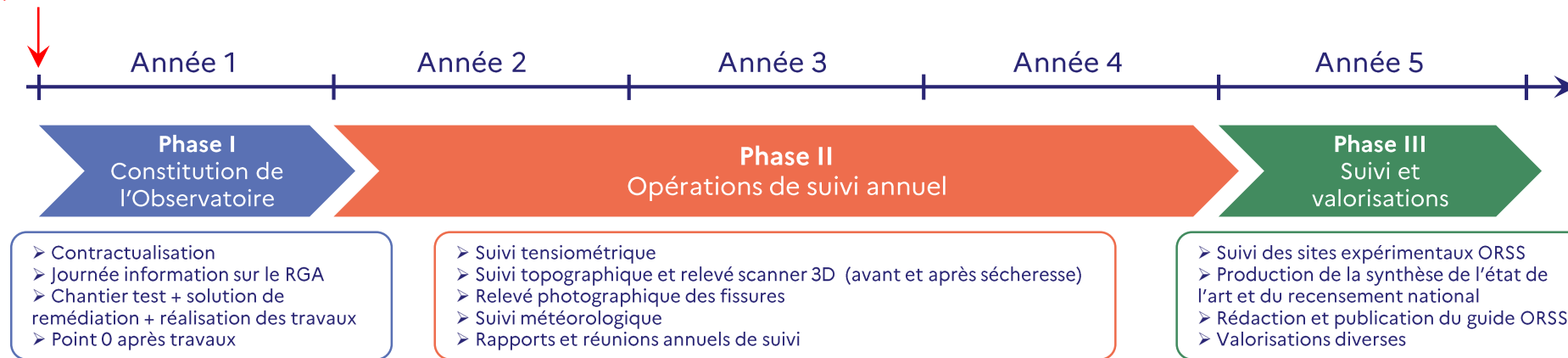
➤ L'Observatoire des Routes Sinistrées par la Sécheresse (ORSS) du Cerema, c'est à ce jour :

▶ Pour en savoir plus : [cliquer ici](#)



Date de signature des conventions
Cerema & départements CVdL*

Calendrier prévisionnel de l'Observatoire



* 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)

4. Nouvelles solutions de remédiation pour les routes : Projet ORSS

- Classification des solutions de remédiation en fonction de la partie confortée des éléments qui composent la route et instrumentation tensiométrique

➤ Pour accéder à la cartographie en ligne du projet ORSS : [cliquer ici](#)

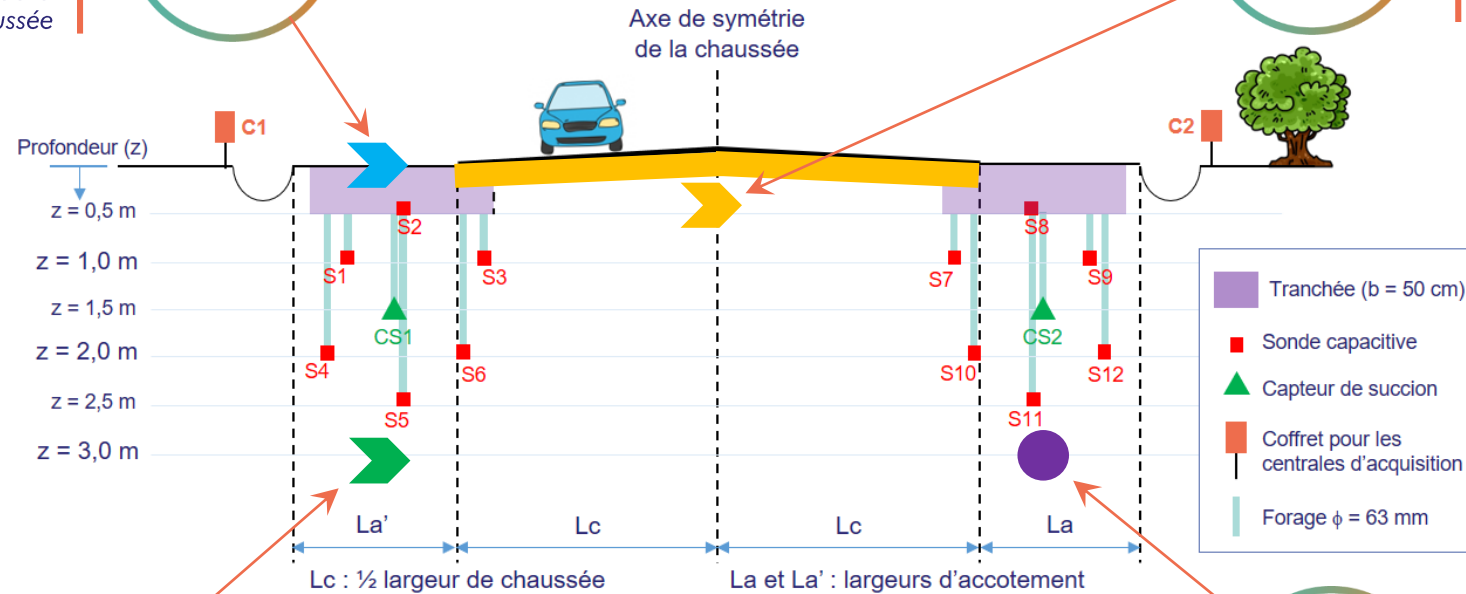
Agir sur l'environnement proche (cat. 2)

Cette catégorie de solutions permet de limiter les effets des facteurs aggravants tels que l'évapotranspiration au niveau des accotements et l'influence racinaire de la végétation à proximité de la chaussée



Agir sur la structure de chaussée (cat. 1)

Il s'agit essentiellement de renforcer la structure de corps de chaussée avec par exemple les techniques de géogrilles pour ralentir la propagation des fissures



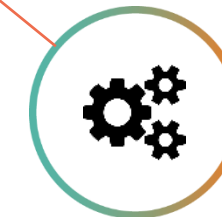
Agir sur le sol argileux (cat. 3)

Il s'agit de traiter le sol en place jusqu'à une profondeur de 4 m pour réduire sa sensibilité au phénomène de RGA et conserver un état hydrique équilibré sous chaussée



Instrumentation tensiométrique

Afin d'évaluer l'apport de chaque solution de remédiation, une instrumentation tensiométrique est mise en place via l'implantation de sondes de succion de 0,5 à 4,0 m de profondeur permettant un suivi en continu et à distance



4. Nouvelles solutions de remédiation pour les routes : Projet ORSS

- Illustrations des procédés innovants expérimentés à ce jour dans le cadre de l'Observatoire

Solutions catégorie 1



- Réhabilitation de l'enrobé avec le principe du Recyclovia® (seul et renforcé par une géogridle)
- Stabilisation mécanique de la couche porteuse par deux lits de géogridle triaxiale TriAx®
- Consolidation de la structure de chaussée par pose de bloc de Compostyrène®

Solutions catégorie 2



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

Solution catégorie 3

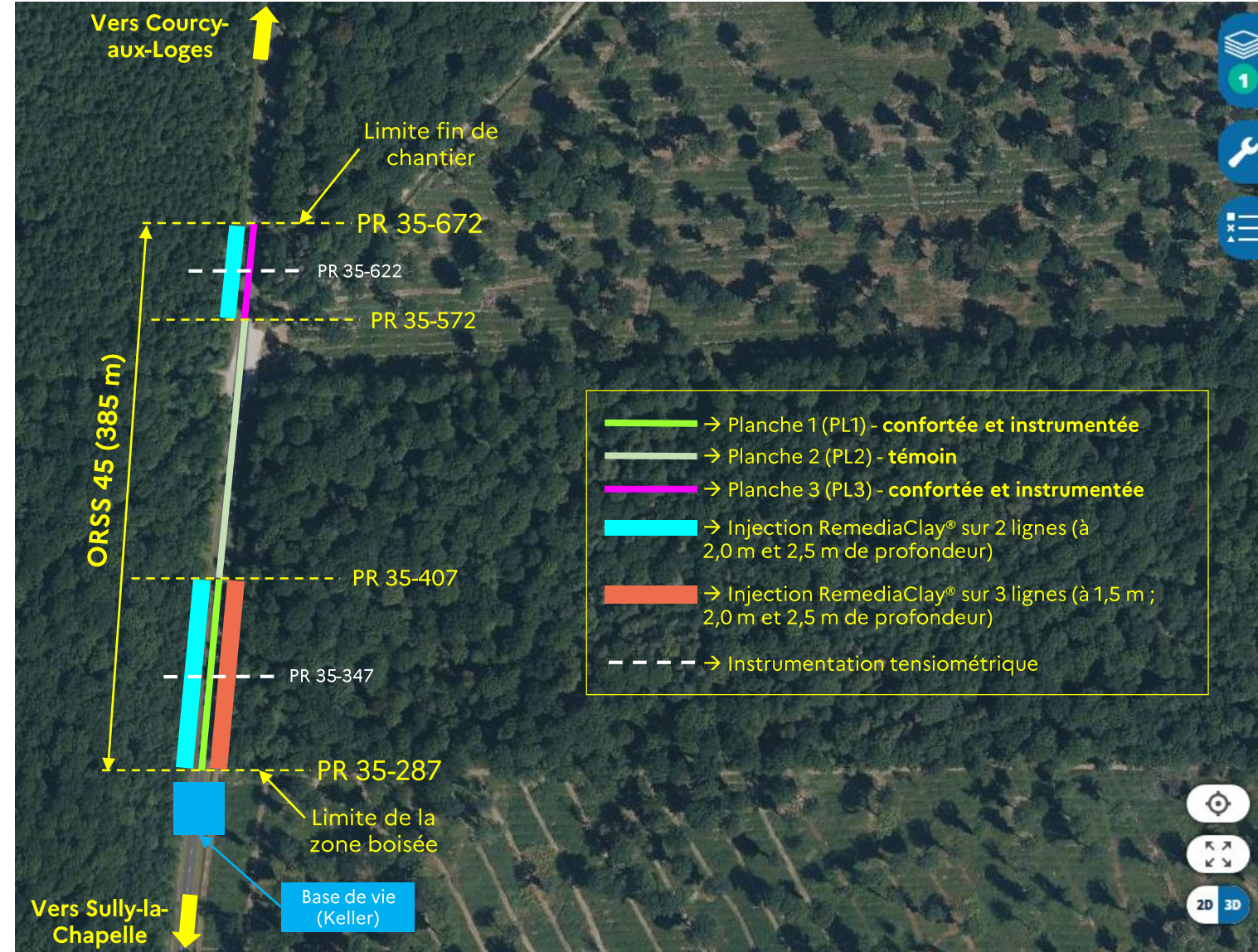
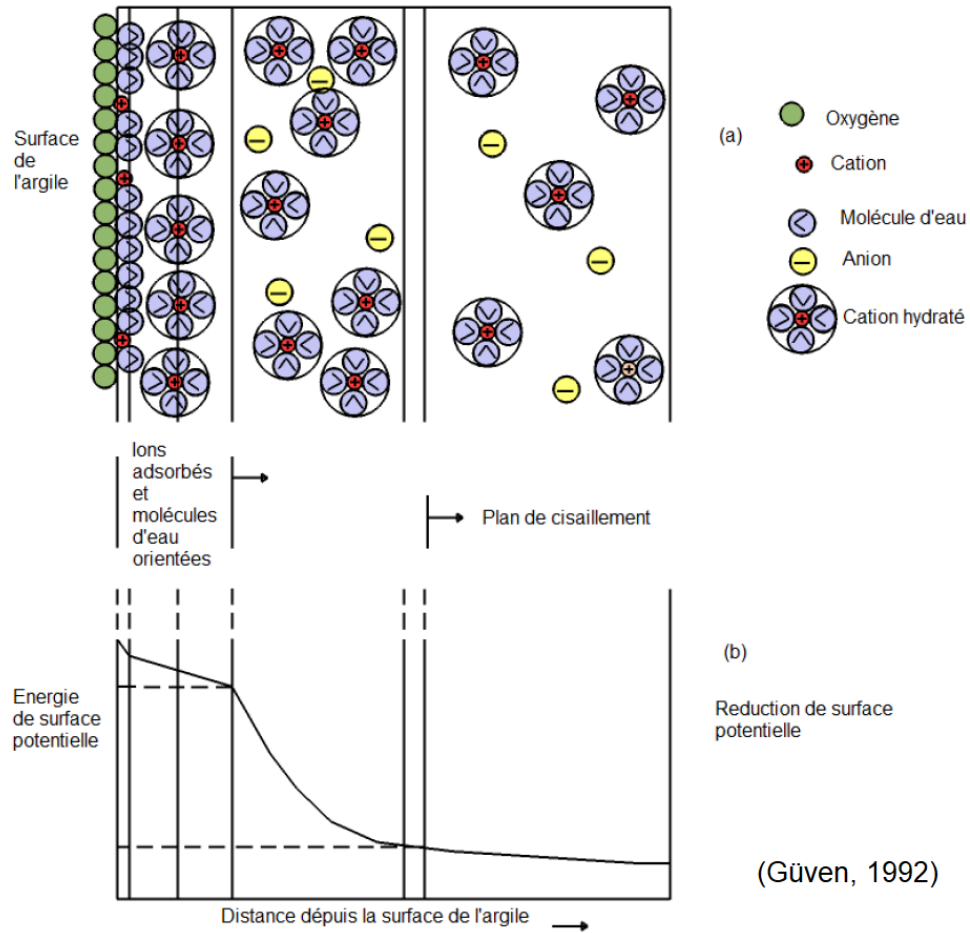


- Stabilisation chimique du sol sous chaussée par injection du RemediaClay®

4. Nouvelles solutions de remédiation pour les routes : Projet ORSS

- Expérimentation de la stabilisation chimique par injection du RemediaClay®, une première en France et en Europe

Principe de la stabilisation chimique des sols argileux



4. Nouvelles solutions de remédiation pour les routes : Projet ORSS

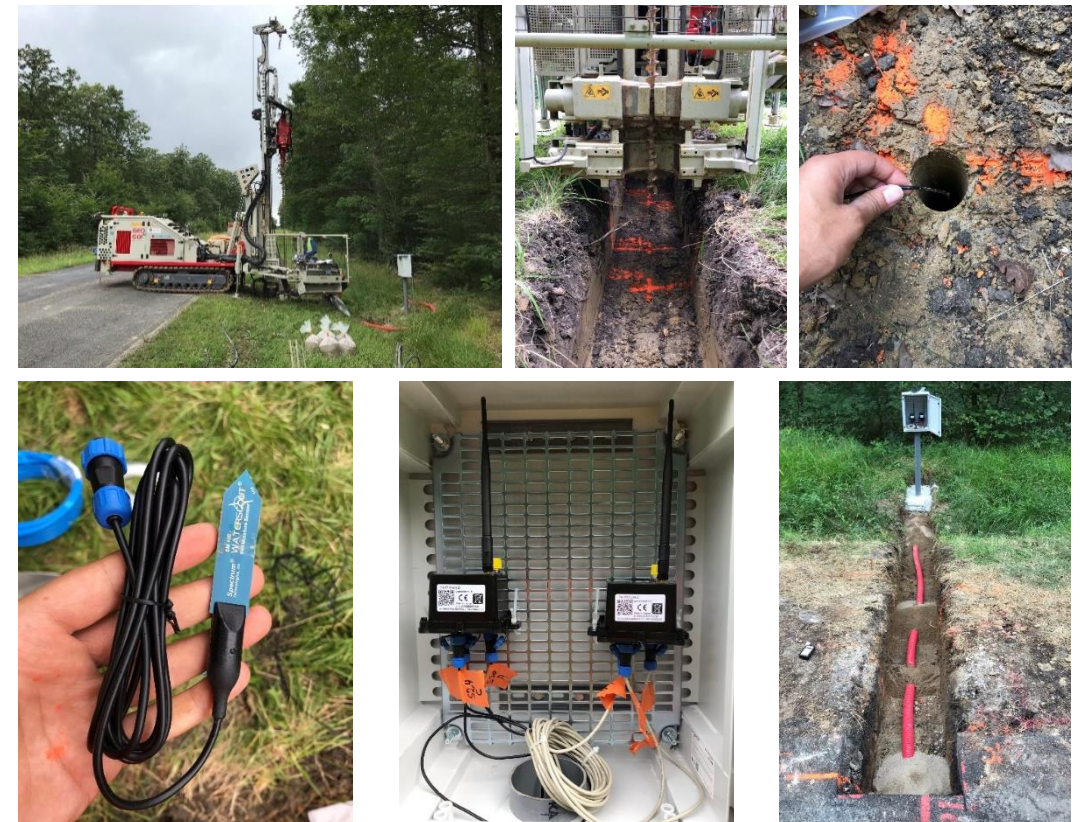
- Expérimentation de la stabilisation chimique par injection du RemediaClay®, une première en France et en Europe

Pour en savoir plus : [cliquer ici](#)

Les travaux d'injection du RemediaClay® en images



Forages et implantation des sondes SM100



5. Solutions de remédiation pour les maisons

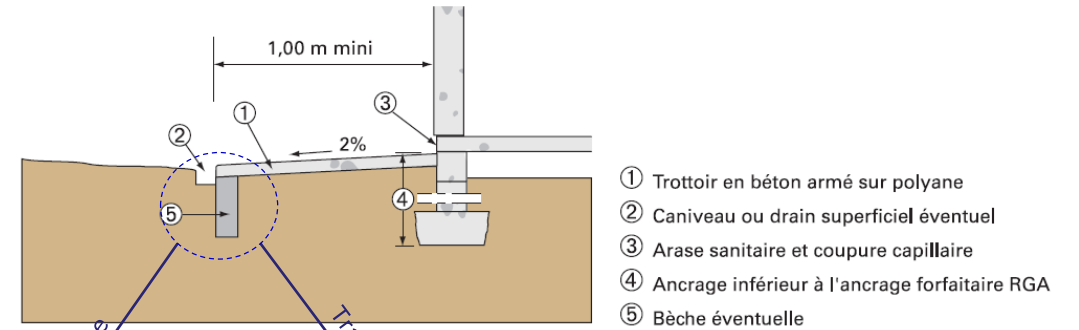
5. Solutions de remédiation pour les maisons

- Agir sur l'environnement proche de l'habitation : gestions des eaux

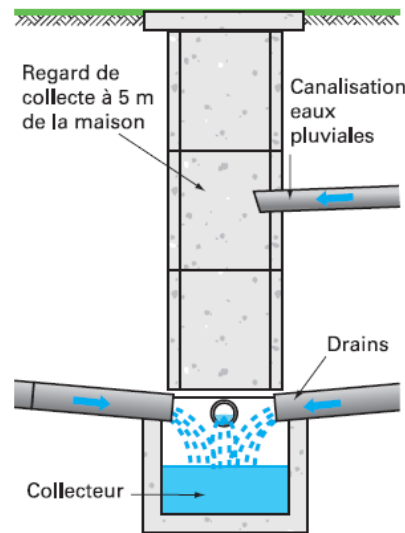
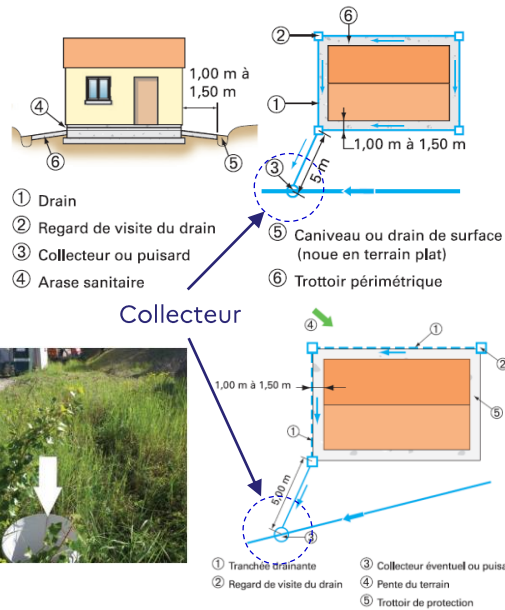
➤ Trottoir et drainage périphériques



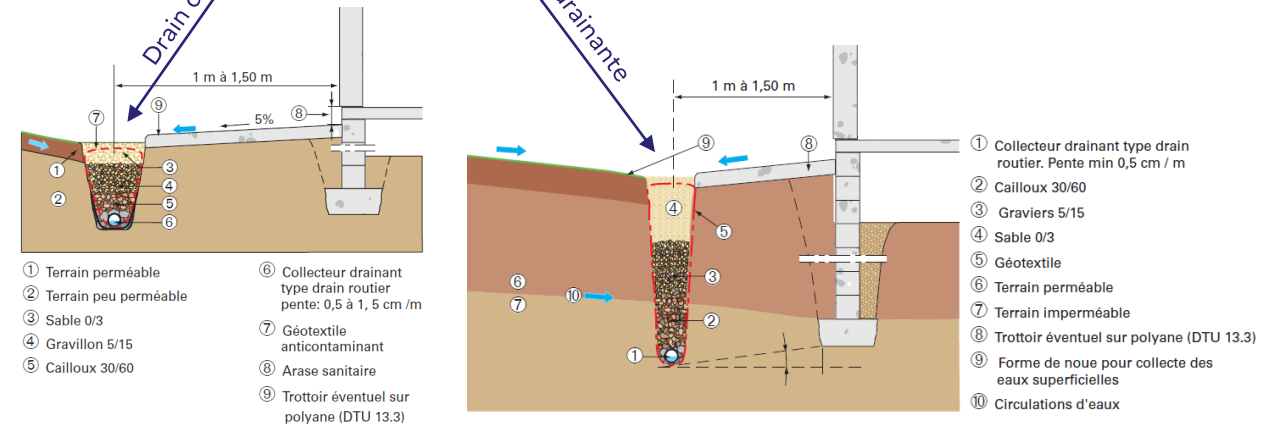
➤ Trottoir périphérique en béton avec caniveau



➤ Collecteur commun des eaux de drainage



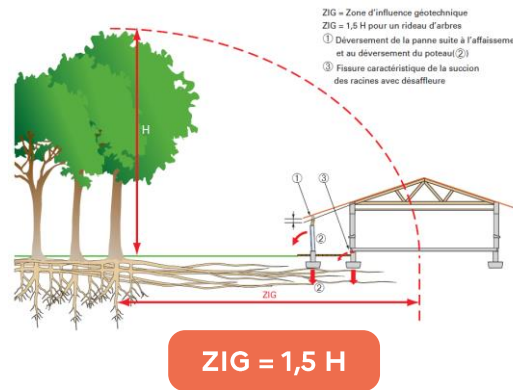
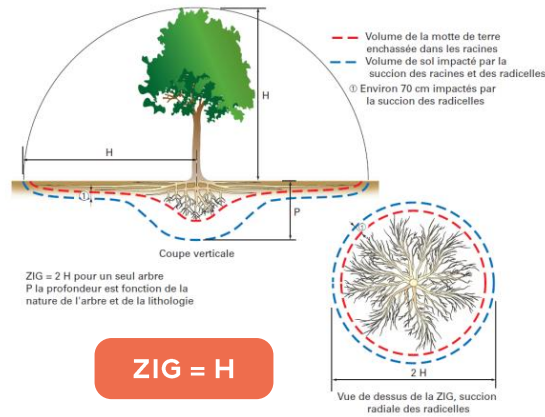
Béchade (2014)



5. Solutions de remédiation pour les maisons

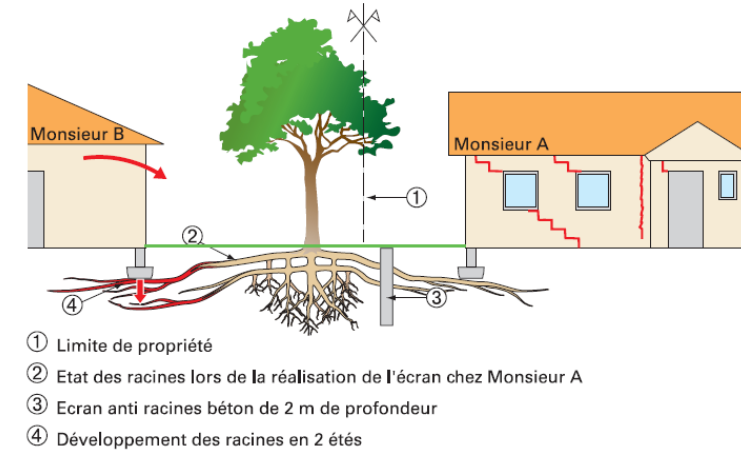
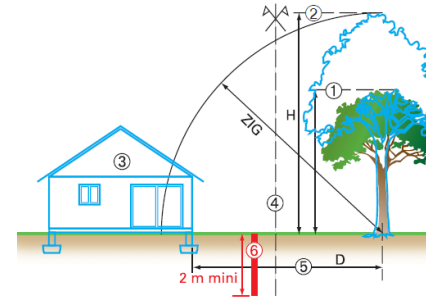
- Agir sur l'environnement proche de l'habitation : végétation

➤ Zone d'influence géotechnique (ZIG) des arbres



Béchade (2014)

➤ Techniques d'implantation des écrans anti-racines



Voile polyester. La coupure capillaire est protégée par deux films plastiques alvéolés



Écran en béton classique (tranchée de 30 cm coulée en béton pleine fouille)



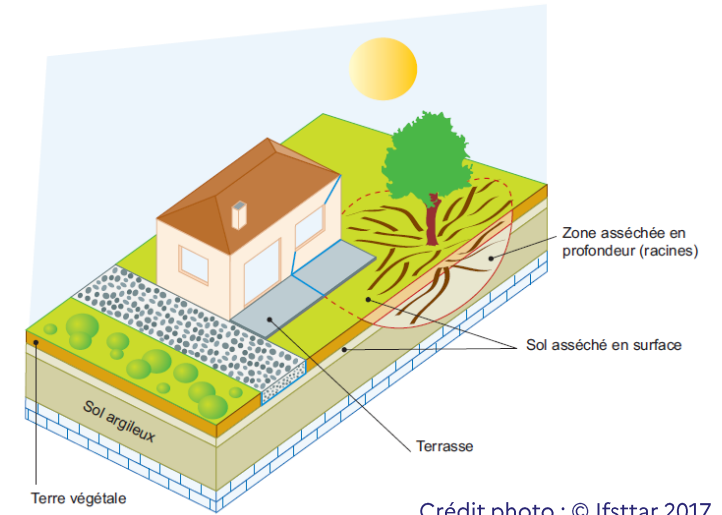
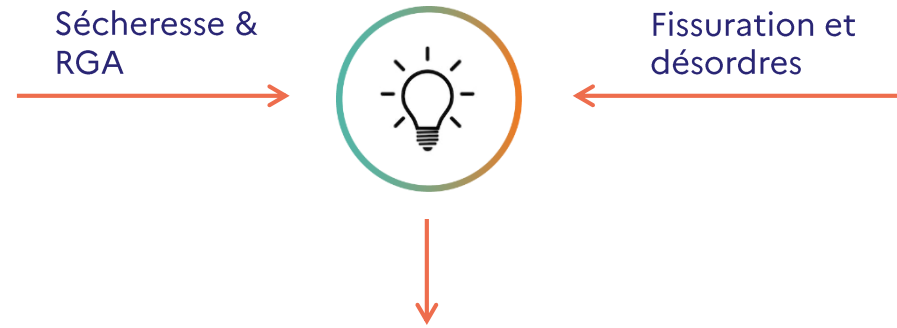
Écran métallique placé à une distance minimale de 4 m de l'arbre

5. Solutions de remédiation pour les maisons

- Exemple de nouvelle solution de remédiation : solution MACH

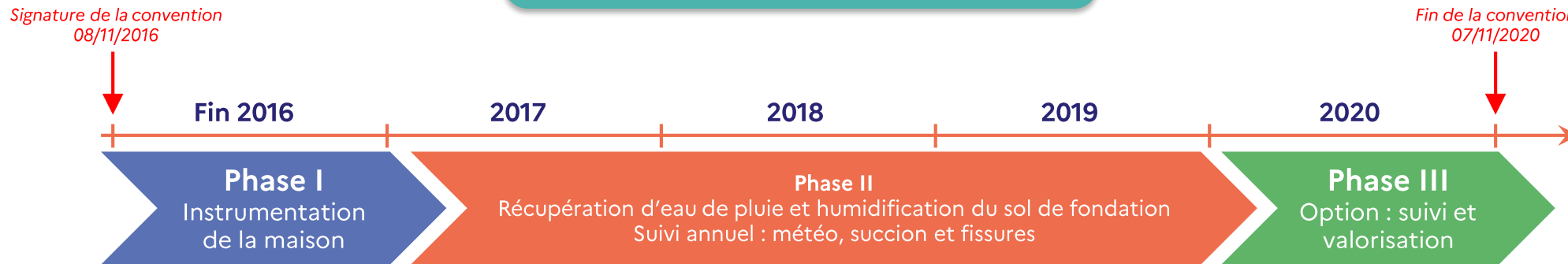


Crédit photo : © KONRAD K./SIPA



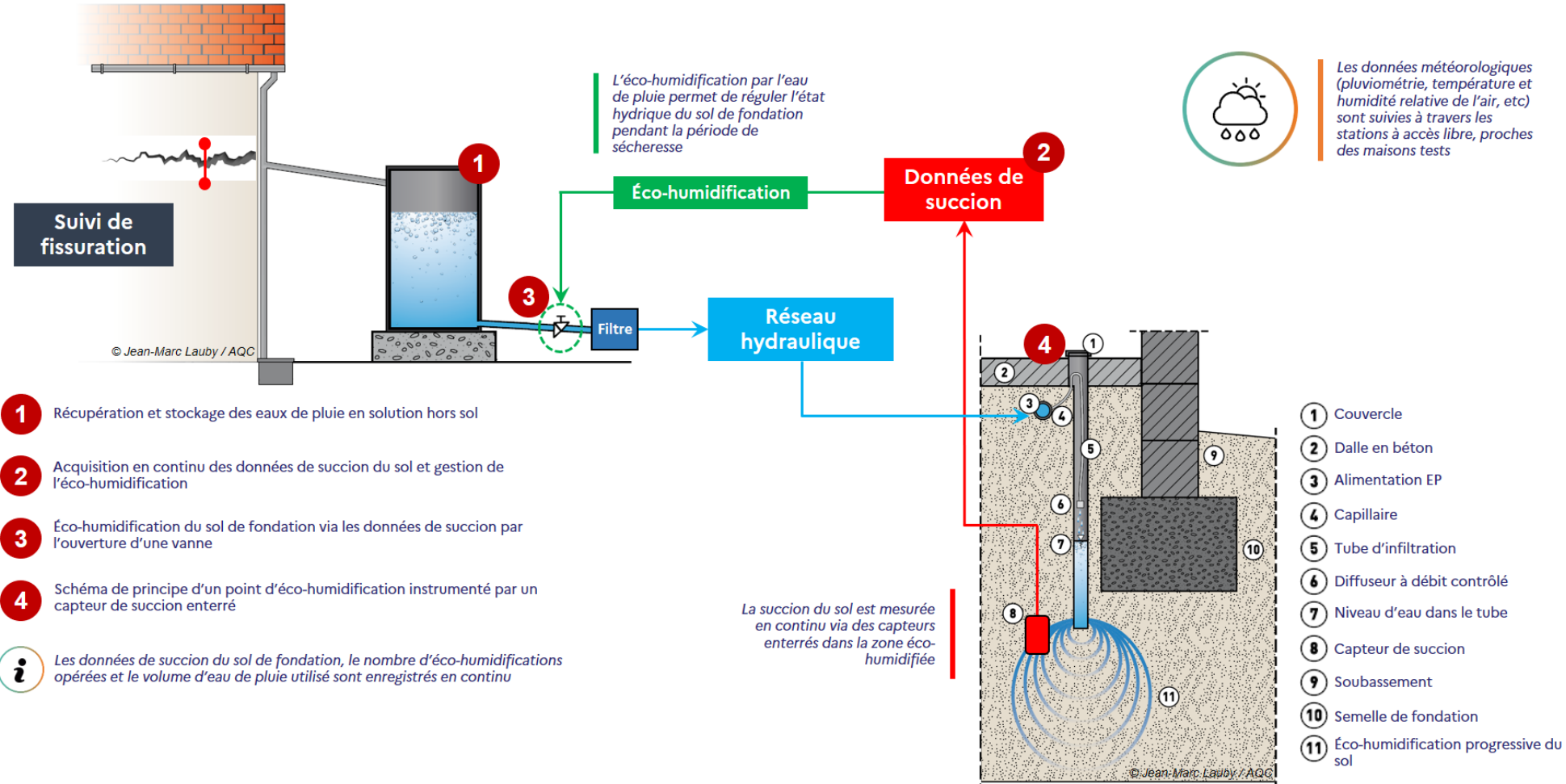
Crédit photo : © Ifsttar 2017

Solution MACH MAison Confortée par Humidification



5. Solutions de remédiation pour les maisons

- Exemple de nouvelle solution de remédiation : schéma de principe du procédé MACH



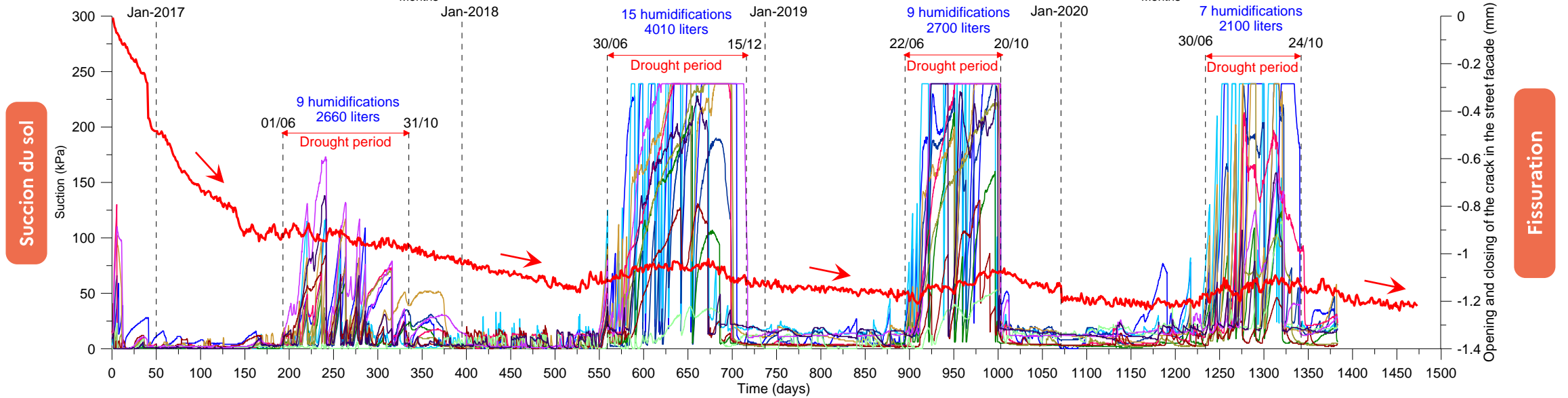
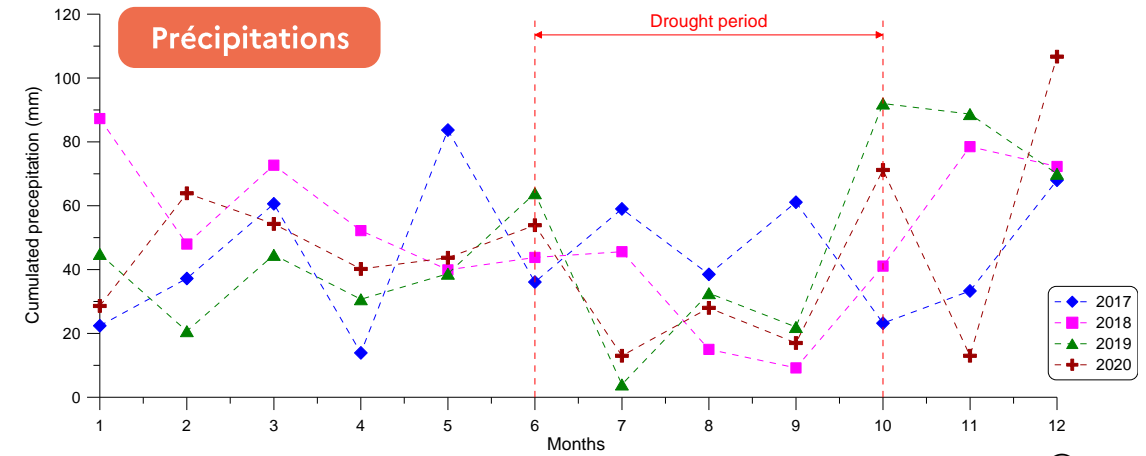
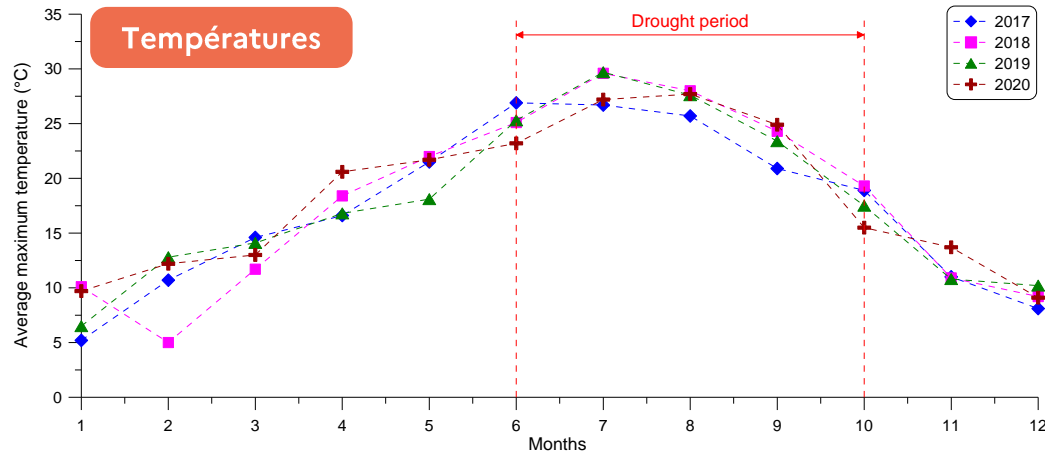
Pour en savoir plus : [cliquer ici](#)



Pour en savoir plus : [cliquer ici](#)

5. Solutions de remédiation pour les maisons

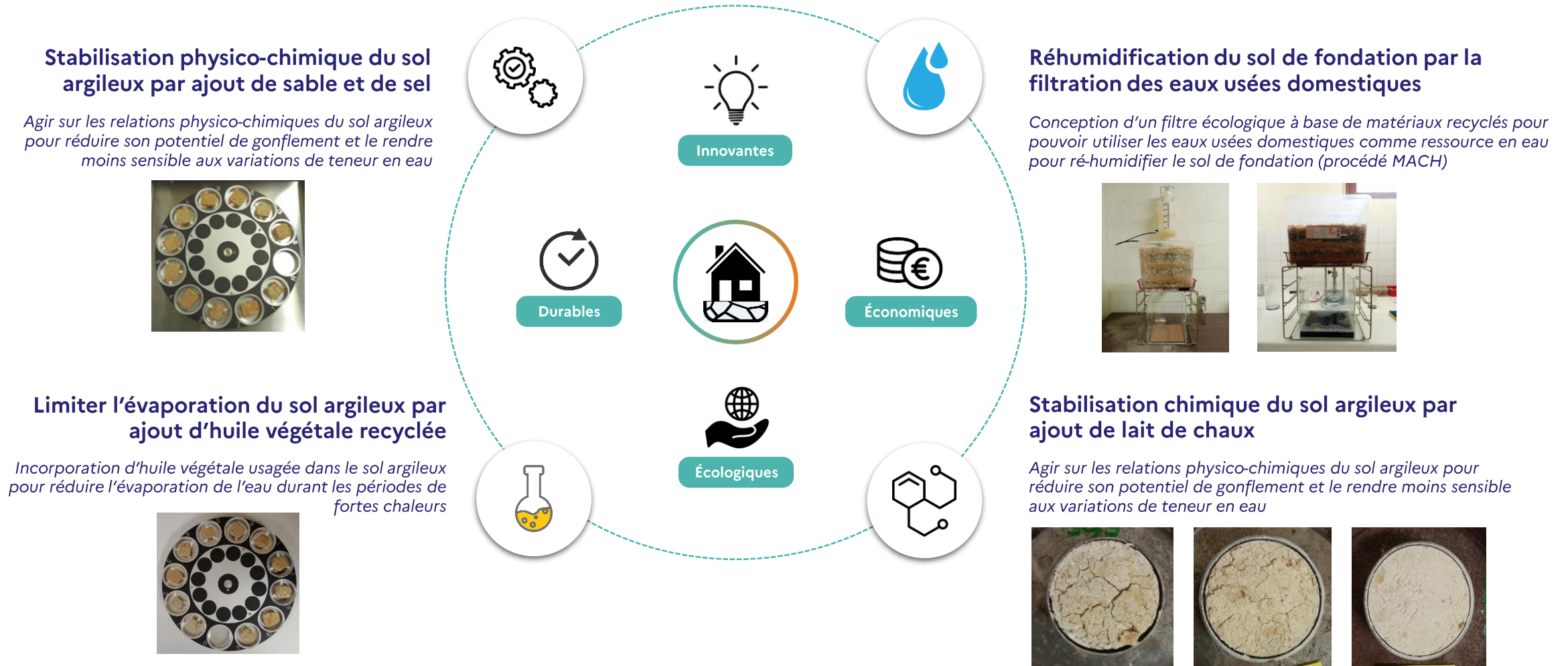
- Exemple de nouvelle solution de remédiation : synthèse des résultats obtenus grâce au procédé MACH (2017 – 2020)



5. Solutions de remédiation pour les maisons

▪ Projet SPISol-RGA : stage de fin d'études de Lamia OUERDI

➤ Exemples de conceptions de nouvelles solutions de remédiation à l'échelle labo (stage de Lamia OUERDI du 01/03 au 31/08/2021)



6. Conclusions et perspectives

- Les **sécheresses** extrêmes successives subies ces 6 dernières années en France ont considérablement contribué à la **dégradation** des ouvrages en surface (routes, maisons individuelles, etc)
- Ces ouvrages, construits sur des **soils sensibles au RGA**, sont affectés par des **fissures** 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 en termes de récurrence et d'intensité des événements climatiques extrêmes
- Le Cerema, en partenariat avec les acteurs socio-économiques, mène actuellement divers **projets de recherche** sur le phénomène RGA et son évolution sous l'effet du changement climatique pour la **résilience** et la **réduction des vulnérabilités** des ouvrages exposés
- La conception et le développement des **nouvelles solutions de remédiation** RGA pour les routes et les maisons nécessitent une phase d'expérimentation prévue jusqu'en 2025 et une étude du modèle économique dans la perspective in fine de les commercialiser



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Contact

Lamine **IGHIL AMEUR**



Docteur en mécanique des sols



Me contacter   lamine.ighil-ameur@cerema.fr