

JOURNÉE TECHNIQUE NATIONALE

Routes exposées à la sécheresse et au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux (RGA)



STABILISATION DES SOLS ARGILEUX PAR BIO-CIMENTATION
POUR CONFORTER LA RD151 (CD45)

Auteurs : Samuel CHARPENTIER (CD45), Dimitrios TERZIS (MeduSoil) et Lamine IGHIL AMEUR (Cerema)

14 novembre 2023

SOMMAIRE

- **Chaussées du Loiret : Contexte routier du département**
- **Loiret : contexte géologique et climatique**
- **Expérimentations en cours au CD45**
- **Expérimentation 2023 – Bio-cimentation**
- **Introduction à la bio-cimentation**
- **Instrumentation in situ**



Le Loiret en chiffres :

682 304 habitants (2020)

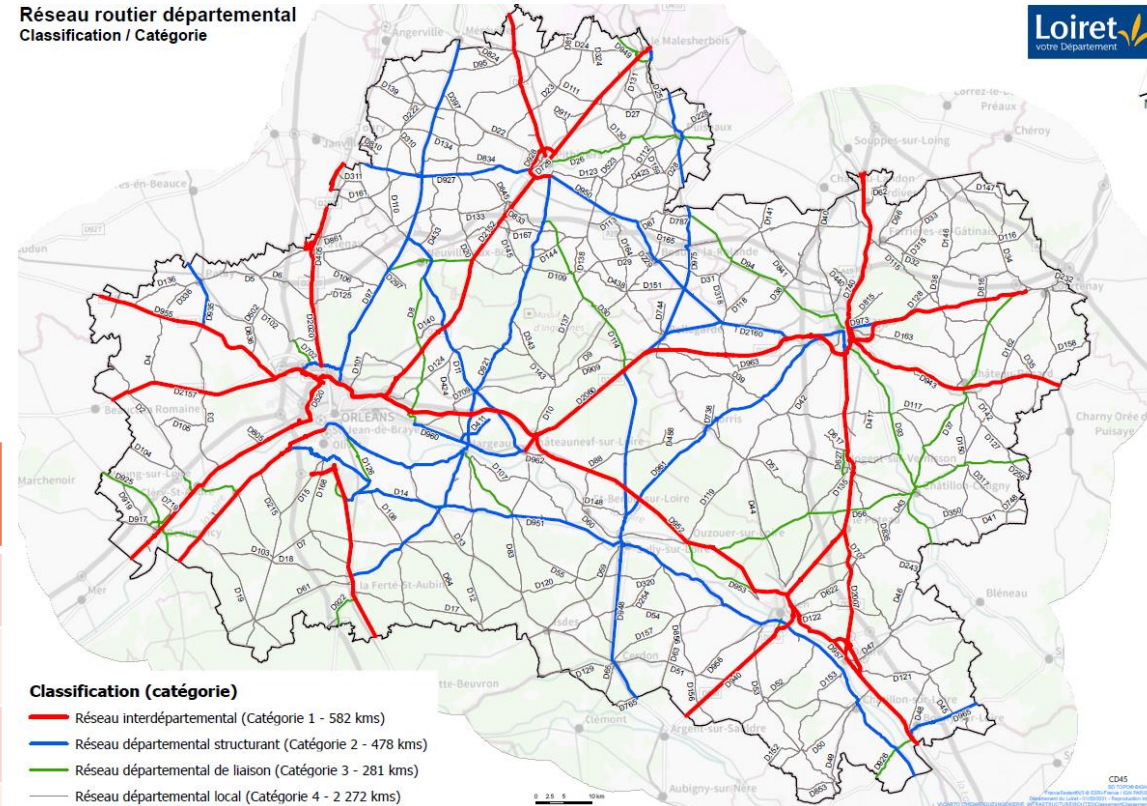
6 775 km²

21 cantons

325 communes

Réseau Routier Départemental du Loiret (3 613km) :

Réseau routier départemental
Classification / Catégorie



Chaussées du Loiret : Contexte routier du département

	Catégorie	Linéaire (km)
Réseau Interdépartemental	1	582
Réseau Départemental Structurant	2	478
Réseau Départemental de liaison	3	281
Réseau Départemental local	4	2 272

Stabilisation des sols argileux par bio-cimentation pour conforter la RD151 (CD45)

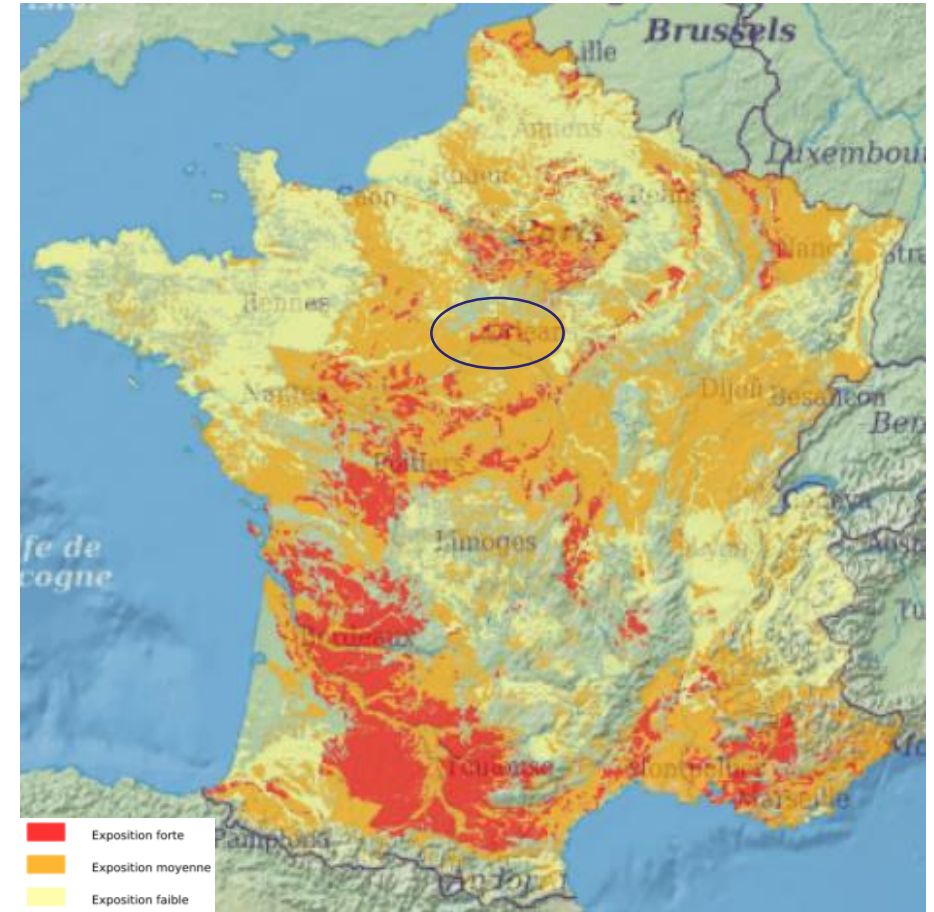
CHAUSSÉES DU LOIRET : CONTEXTE ROUTIER DU DÉPARTEMENT

Répartition du linéaire par typologie de route :

Typologie de voie	Linéaire (km)
1 voie	47
2 x 1 voie (avec séparateur)	6
2 voies	3 402,5
3 voies	49
2 x 2 voies sans séparateurs	35
2 x 2 voies avec séparateurs	73,5

Une grande diversité dans le réseau routier départemental et des niveaux de trafic également très disparates en fonction de cette typologie.

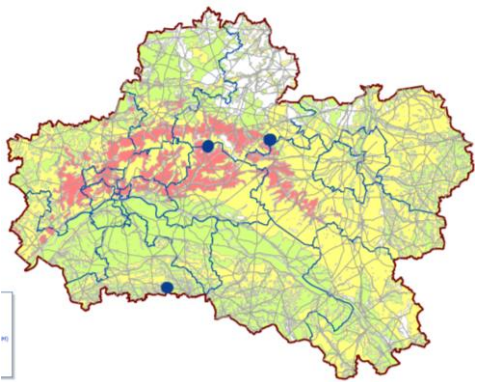
Loiret : contexte géologique et climatique



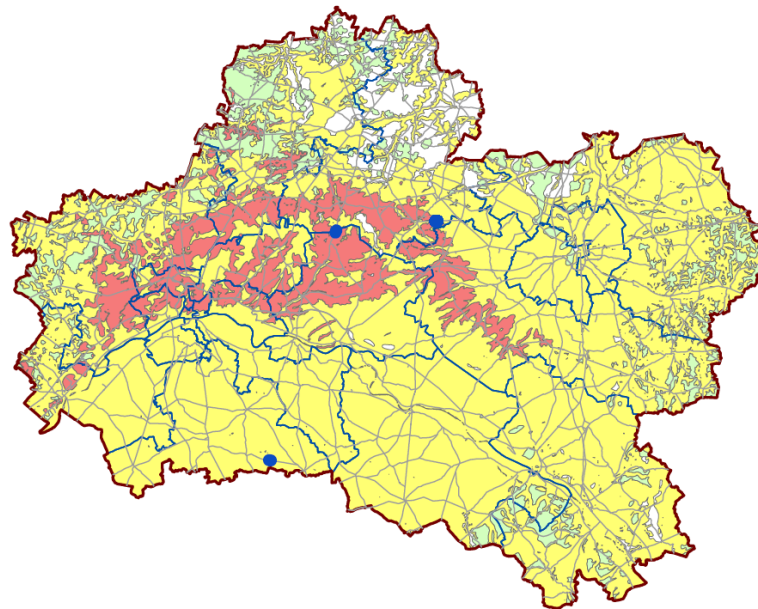
Le travail de révision mené par le BRGM, tenant compte des nouvelles connaissances et l'évolution climatique, aboutit à requalifier une grosse partie des zones faiblement exposées en zones moyennement sensibles

LOIRET : CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET CLIMATIQUE

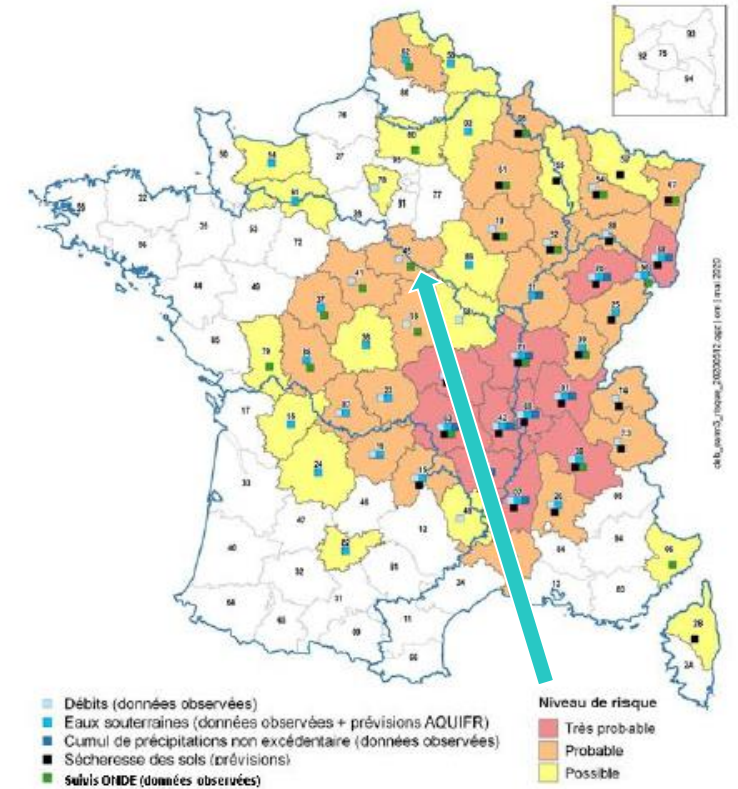
Evolution cartographique du niveau d'exposition au phénomène R.G.A.



Bilan BRGM 2010



Bilan BRGM 2022



Crédit photo : © Ministère Transition Écologique Solidaire, 2020

Niveau de risque de sécheresse (projection 2020)

EXPÉRIMENTATIONS EN COURS : LOCALISATIONS

Chantiers ORSS45



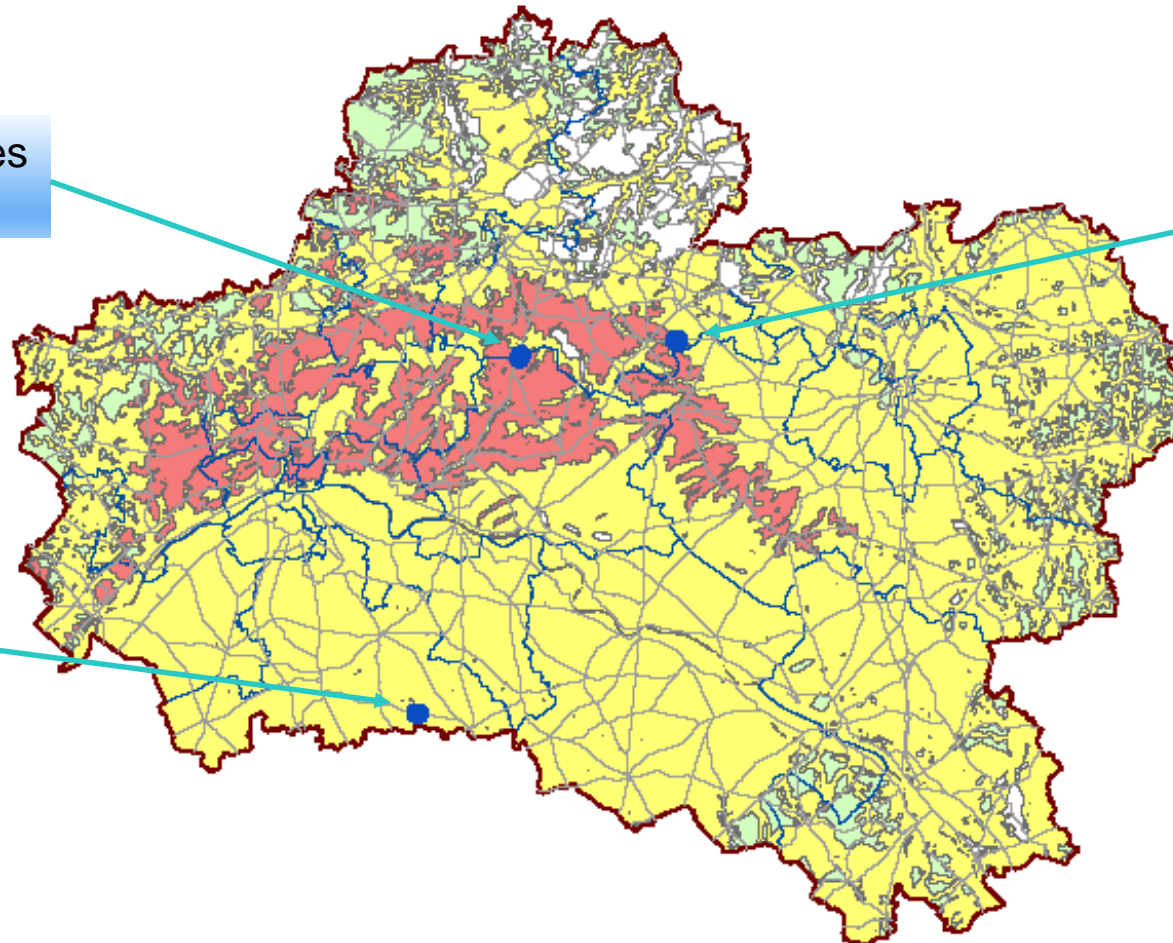
RD921 Courcy aux Loges
chantier 2021

RD151 Saint Loup des Vignes
chantier 2023

Tensar



RD17 Menestreau / Sennely
chantier 2018



EXPÉRIMENTATIONS EN COURS :

RD17 Menestreau-Sennely

Tensar/Colas (2018) :

- Principe :

Restructuration d'une chaussée sur 0,60m de profondeur avec l'intégration de 2 couches d'une géogrille triaxial en polypropylène (TriAx TRF 170- Tensar) avant et après la couche de forme en GNT (également appliquée en 2 couches (0,30+0,15cm)). Les couche de base et de roulement ont été réalisé en enrobé froid à l'émulsion (Colas). Pas d'instrumentation spécifique sur cette planche expérimentale.

- Objectifs :

Stabiliser le sol support et éviter les déformations et fissuration résultantes du retrait gonflement des argiles.

- Constat au 18/10/23 :

Le constat visuel à 5 ans laisse apparaître une réapparition de fissuration éparses avec 2 débuts de déformations légères plutôt localisées en rive.



RD921 Courcy aux Loges

Keller - RemediaClay (2021) :

- Principe :

Injection liquide d'un produit composé d'eau, de potassium et de lignine (extrait de bois), selon le procédé RemediaClay® développé par KELLER. Ces injections ont été réalisées sous accotements (2 lignes d'injection) selon un calepinage précis et sur des profondeurs oscillant entre 1,50m et 2,50m en fonction des planches d'essais.

Le site a été équipé de capteurs de tensiométrie, sur les trois planches spécifiques (1 avec traitement des deux accotements, 1 avec traitement d'un seul accotement et 1 témoin) lors de la réalisation du chantier d'injection.



- Objectifs :

limiter les échanges hydriques entre le corps de chaussée et les zones hors chaussée à proximité immédiate de la route. Mesurer l'intensité de la réduction de retrait gonflement des argiles.

- Constat 2023 : Aucune anomalie de surface et structurelle ne sont apparues à ce jour.

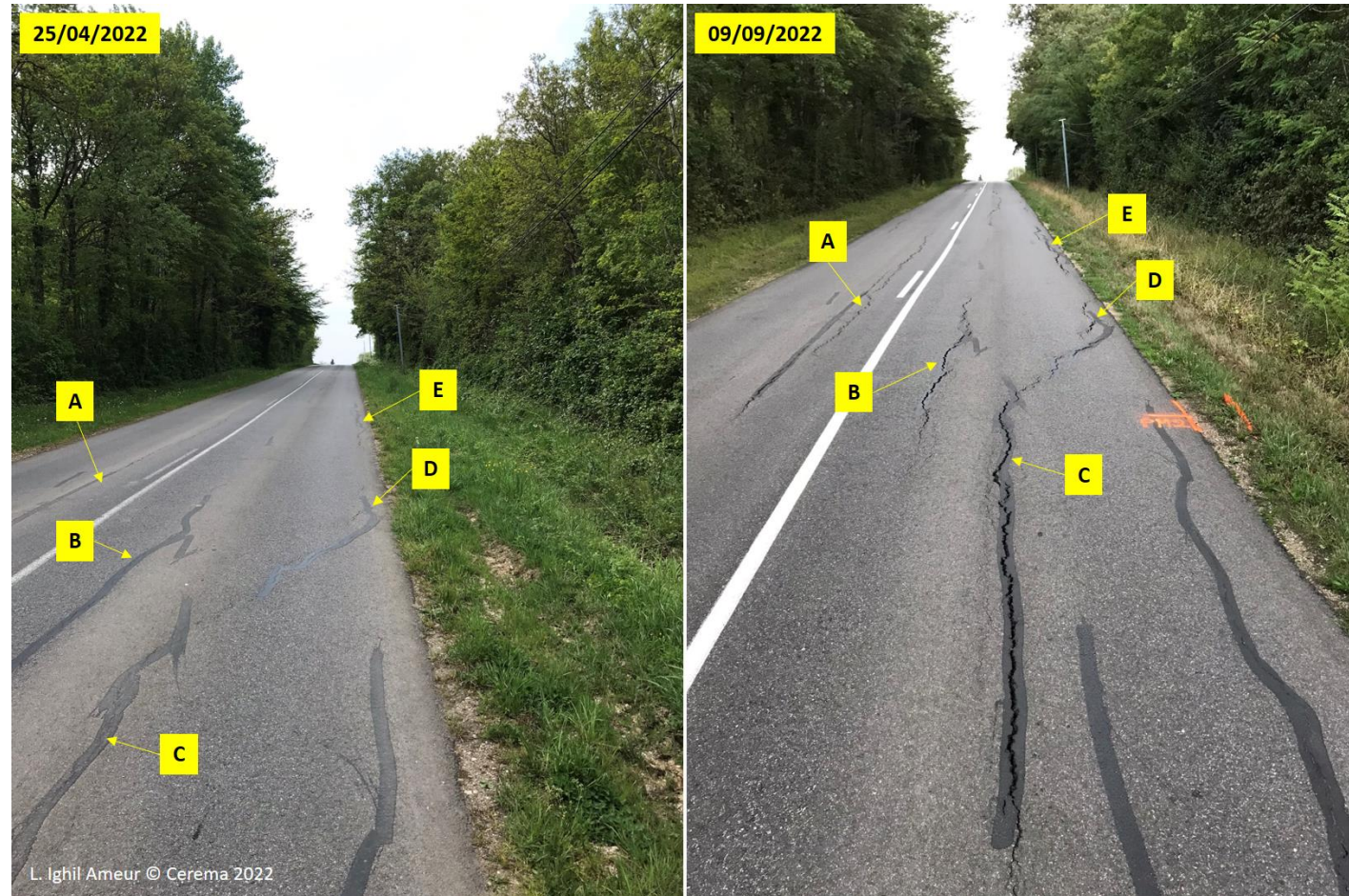
EXPÉRIMENTATION 2023 :

RD151 Saint Loup des Vignes - MeduSoil – Bio cimentation BS1 (2023) :

- Evaluation visuelle in situ du phénomène R.G.A. :

- Objectifs :

Limiter les échanges hydriques entre le corps de chaussée et les zones hors chaussée à proximité immédiate de la route afin d'obtenir une stabilisation des sols argileux en place.



EXPÉRIMENTATION 2023 :

RD151 Saint Loup des Vignes - MeduSoil – Bio cimentation BS1 (2023) :

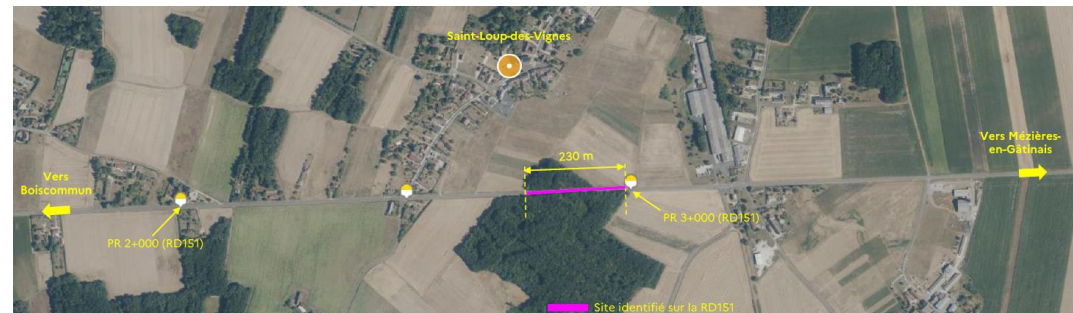
- Principe :

Injection liquide d'un produit composé de calcite biochimique développé par MeduSoil devant permettre, par « bio-stabilisation », de minéraliser les particules de calcite présente en tant que liant. Ces injections Bio-cimentation ont été réalisées sous accotements selon un calepinage précis et sur des profondeurs théorique initiales prévues entre 2,00 et 3,00m.

- Site d'expérimentation :

Site en pente légère (4%) avec 1 section en zone boisée des 2 côtés de la chaussée et 1 zone avec un côté en zone dégagée et un côté en zone boisée.

Dernière intervention sur ce site en 2019 (réfection de couche de roulement avec purges préalables éparses)
Réapparition d'une fissuration de sécheresse significative dès l'été 2020

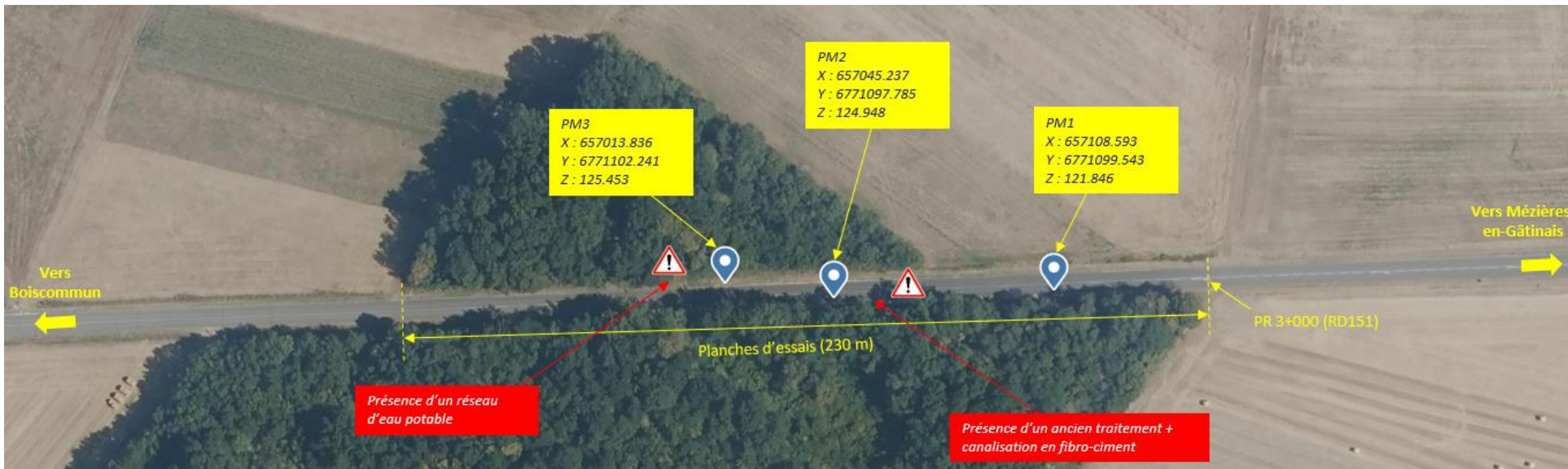


Stabilisation des sols argileux par bio-cimentation pour conforter la RD151 (CD45)

EXPÉRIMENTATION 2023 :

RD151 Saint Loup des Vignes - MeduSoil – Bio cimentation BS1 (2023) :

- Phase préparatoire :

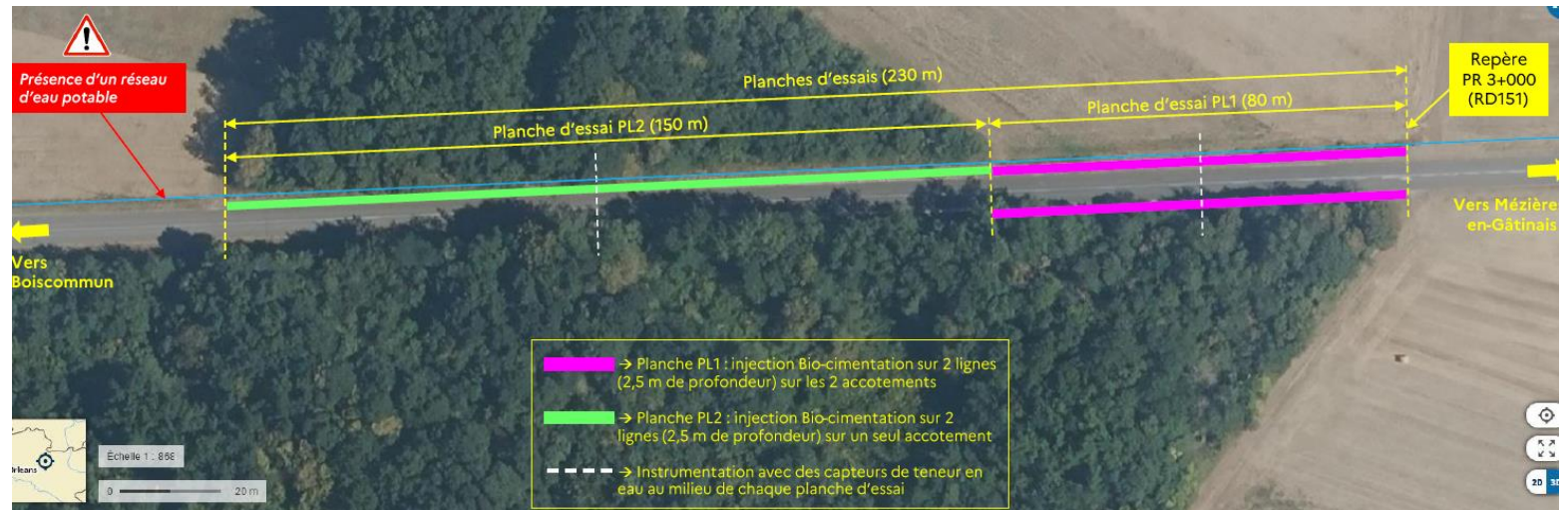


EXPÉRIMENTATION 2023 :

RD151 Saint Loup des Vignes - MeduSoil – Bio cimentation BS1 (2023) :

Le chantier s'est déroulé de mi-juillet à fin août 2023.

- Définition des planches d'essais :



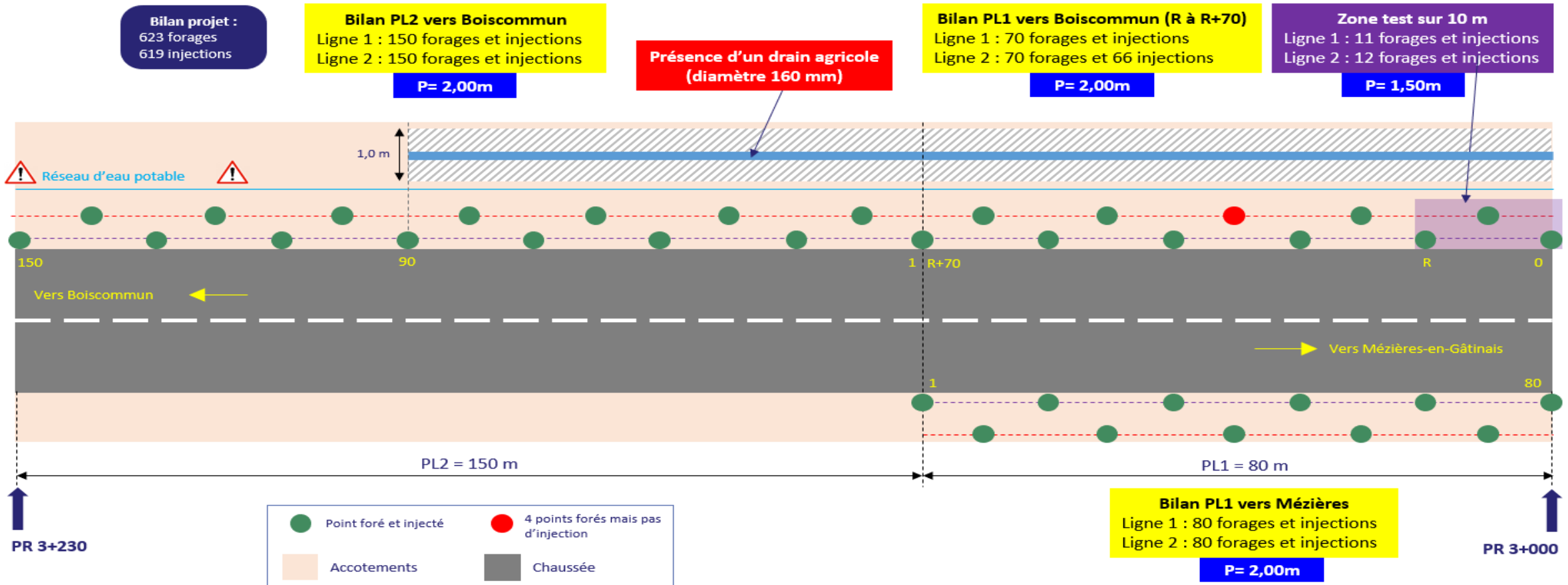
- Produit injecté :

1 solution de carbonate (pH entre 7 et 8,9) + 1 solution de calcium (pH entre 7 et 8,8)

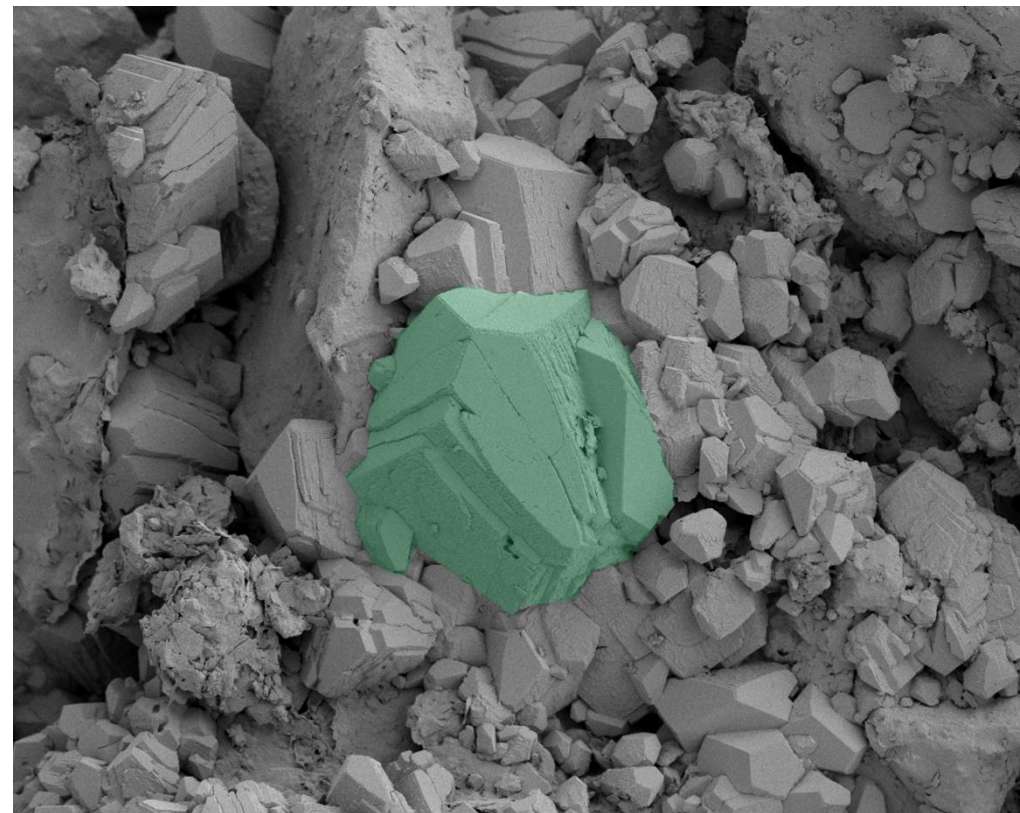
EXPÉRIMENTATION 2023 :

RD151 Saint Loup des Vignes - MeduSoil – Bio cimentation BS1 (2023) :

- Cartographie des travaux de forages et d'injections du 17/07 au 08/08/2023



Introduction à la bio-cimentation



LES PRINCIPES DE LA BIO-CIMENTATION

L'utilisation de microorganismes est déjà une réalité dans les industries alimentaires, biomédicales et pharmaceutiques. Nous nous en inspirons pour fournir des produits à base de biominéraux dans le domaine de la construction.

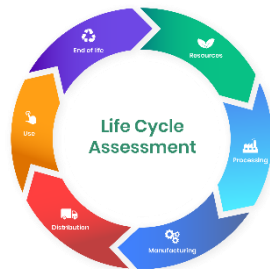
Microbiolites de calcite d'eau douce au lac Pavilion, Colombie-Britannique, Canada

Des liens cristallins de calcite produits par la solution de biocimentation.

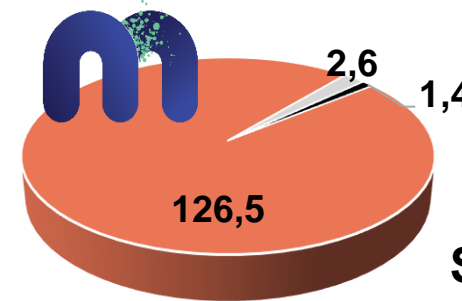
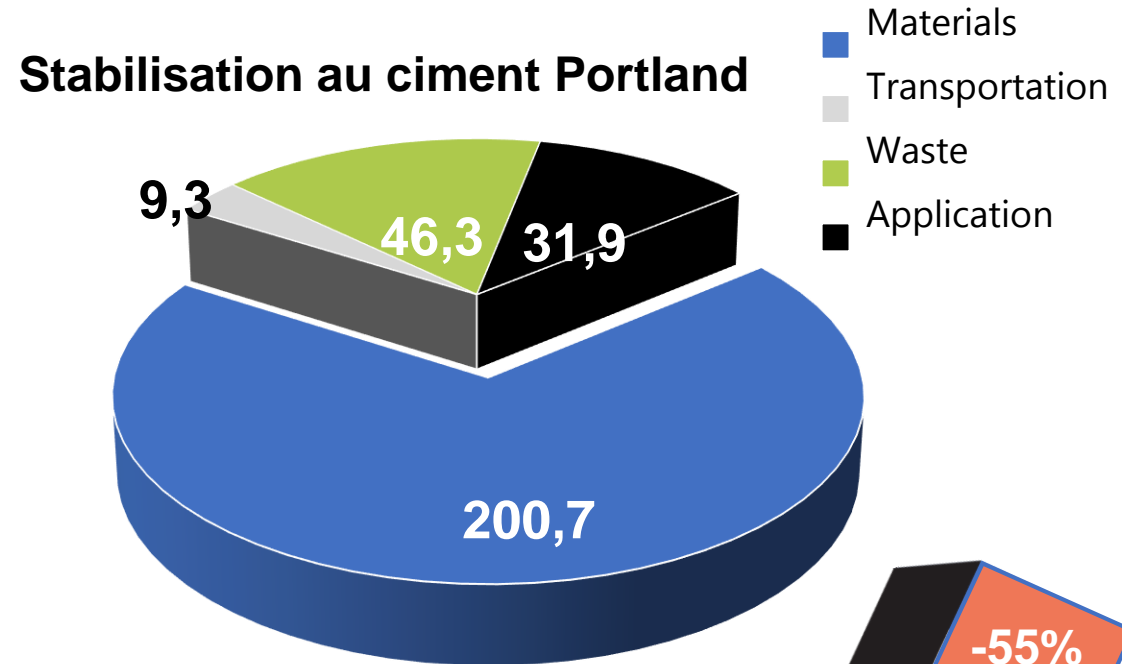
Fourniture et application de la solution de biocimentation

LES PRINCIPES DE LA BIO-CIMENTATION

- La fabrication de notre solution ne génère **aucuns déchets**
- La totalité du liquide injecté est utilisé, il n'y a **pas de gaspillage sur site**
- Notre solution émet **55% de CO2 de moins** qu'un coulis de béton traditionnel
- Certifications obtenues : ISO 9001, ISO 14006, ISO 45001



Analyse menée par:
Quantis



Stabilisation au biociment

-55%
d'empreinte CO₂

LES PRINCIPES DE LA BIO-CIMENTATION

Liquides à base de ciment / résines pétrochimiques

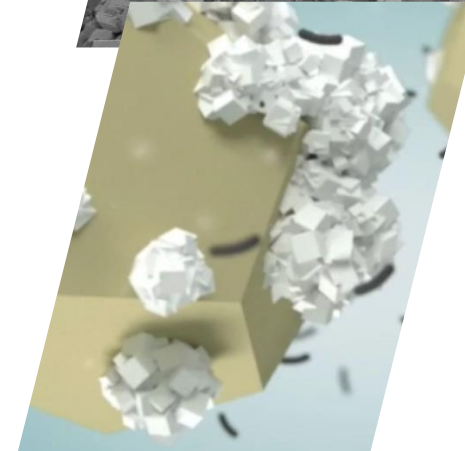
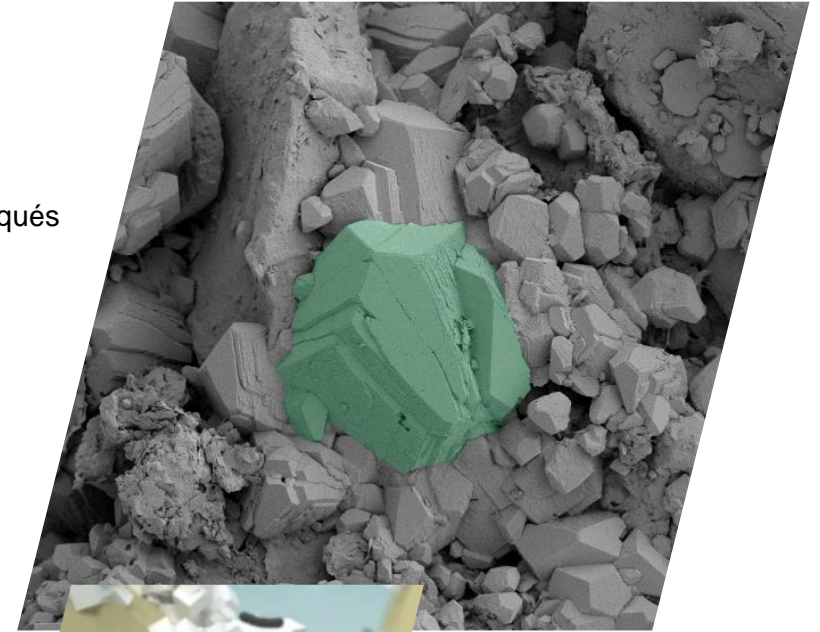
- ✗ Applications énergivores
- ✗ Machines lourdes
- ✗ Additifs, souvent alcalins qui polluent les nappes phréatiques
- ✗ Émissions élevées de CO₂ et de NO_x
- ✗ Problèmes d'imperméabilisation



Bio-cimentation

CEN/TR 17105: Tests d'écotoxicité appliqués aux produits de construction

- ✓ Faible viscosité (minimalement-invasif, faibles pressions d'application)
- ✓ Conserve la perméabilité
- ✓ pH à 8.25
- ✓ Production et application à zéro déchet (pas de gaspillage)
- ✓ Injections avec équipement largement disponible et standardisé



PROJETS DE RÉFÉRENCE

Protection contre l'érosion



SBB CFF FFS



Stabilisation de talus



Amélioration de la capacité portante

GEOTEST



Réduction des tassements



Protection contre la dessiccation



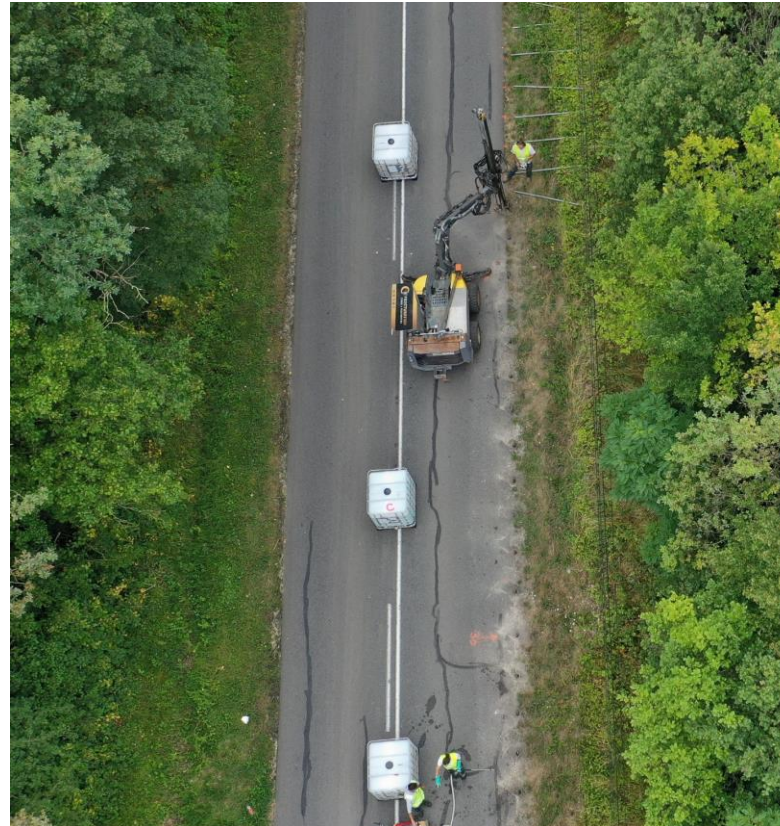
Stabilisation de pente



Stabilisation des sols argileux par bio-cimentation pour conforter la RD151 (CD45)

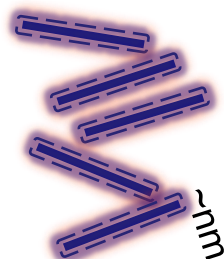
SPÉCIFICATIONS DU SITE ET EXÉCUTION DES TRAVAUX

Pour les ingénieurs géotechniciens, le problème de retrait et de gonflement lié aux argiles plastiques n'est pas simplement un **problème**, c'est un véritable **preUAb**lème. C'est une énigme où l'évaporation et la contraction/expansion des clays se rejoignent pour former un défi complexe. Dans ce casse-tête, l'amélioration du comportement hydrique des argiles émerge comme la seule solution pour atténuer les effets potentiels, où chaque modification dans l'absorption et l'évaporation de l'eau devient cruciale.

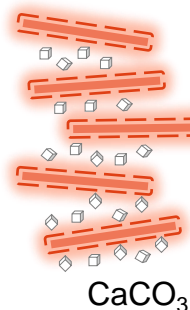
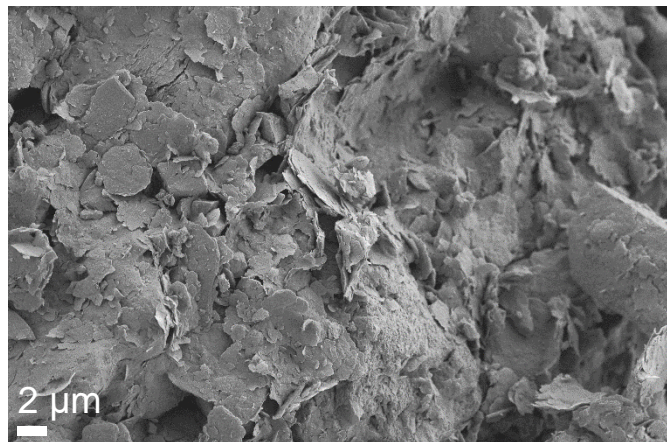


TRAITEMENT DES ARGILES

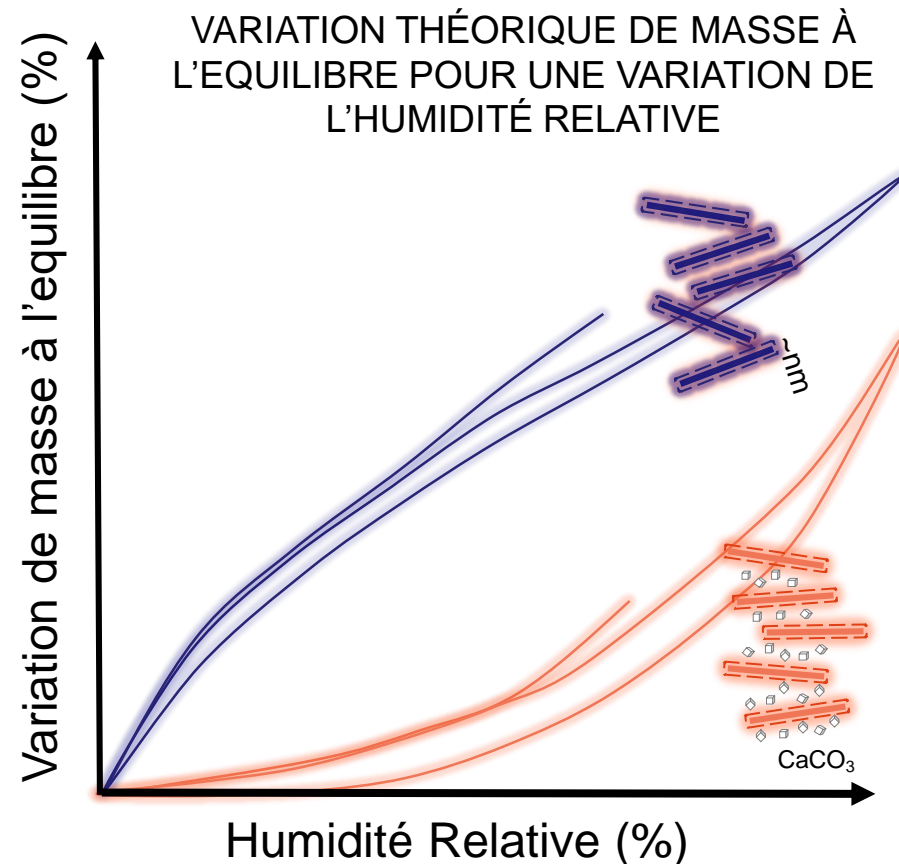
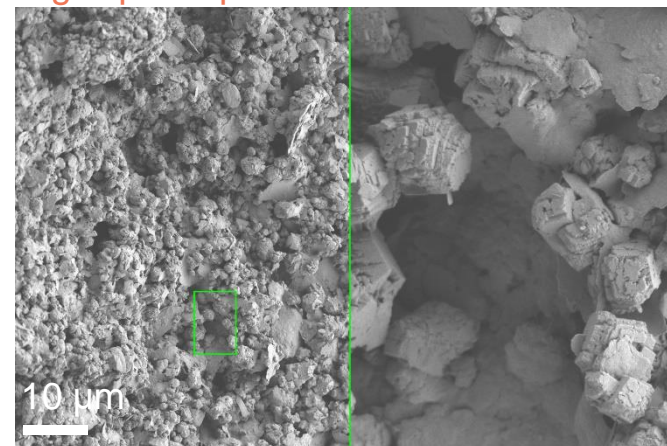
La précipitation de **calcite** à la surface des particules d'argile peut avoir un impact positif sur la résistance de l'argile à la fissuration par dessiccation. En **recouvrant partiellement les particules d'argile de calcite**, les échanges d'humidité entre l'air et l'argile peuvent être **réduits**. Les **cristaux de calcite créent une barrière protectrice** qui contribue à maintenir la teneur en humidité de l'argile, **limitant ainsi le dessèchement et le retrait** qui conduisent généralement à la fissuration par dessiccation.



Argile plastique non-traitée



Argile plastique bio-cimentée



MÉTHODE D' EXÉCUTION

Mode d'injections

Il convient de noter que la géologie ciblée est caractérisée par la présence d'anciennes canalisations et de méthodes de traitement telles que des plaques de gypse. Pour pénétrer ces formations, les méthodes de forage "par battage" n'ont pas été jugées possibles. À la place, des forages à sec (avec une tête rotative et injection d'air) ont été utilisés dans le but de saturer ensuite et immédiatement le sous-sol avec la solution de biocimentation et d'induire la calcification.



Stabilisation des sols argileux par bio-cimentation pour conforter la RD151 (CD45)

MÉTHODE D' EXÉCUTION

Suivi in-situ

Medusoil a utilisé la technologie du Radar à Pénétration au Sol (GPR) en complément des opérations de forage et d'injection pour améliorer la surveillance et l'évaluation des conditions souterraines lors de leur projet de bio-consolidation. De plus, l'Imagerie de Résistivité Électrique (IRE) a été utilisée pour surveiller les lentilles d'argile, montrant des variations de résistivité électrique après les injections, validant la pénétration réussie de la solution de biocimentation et la consolidation des lentilles d'argile.

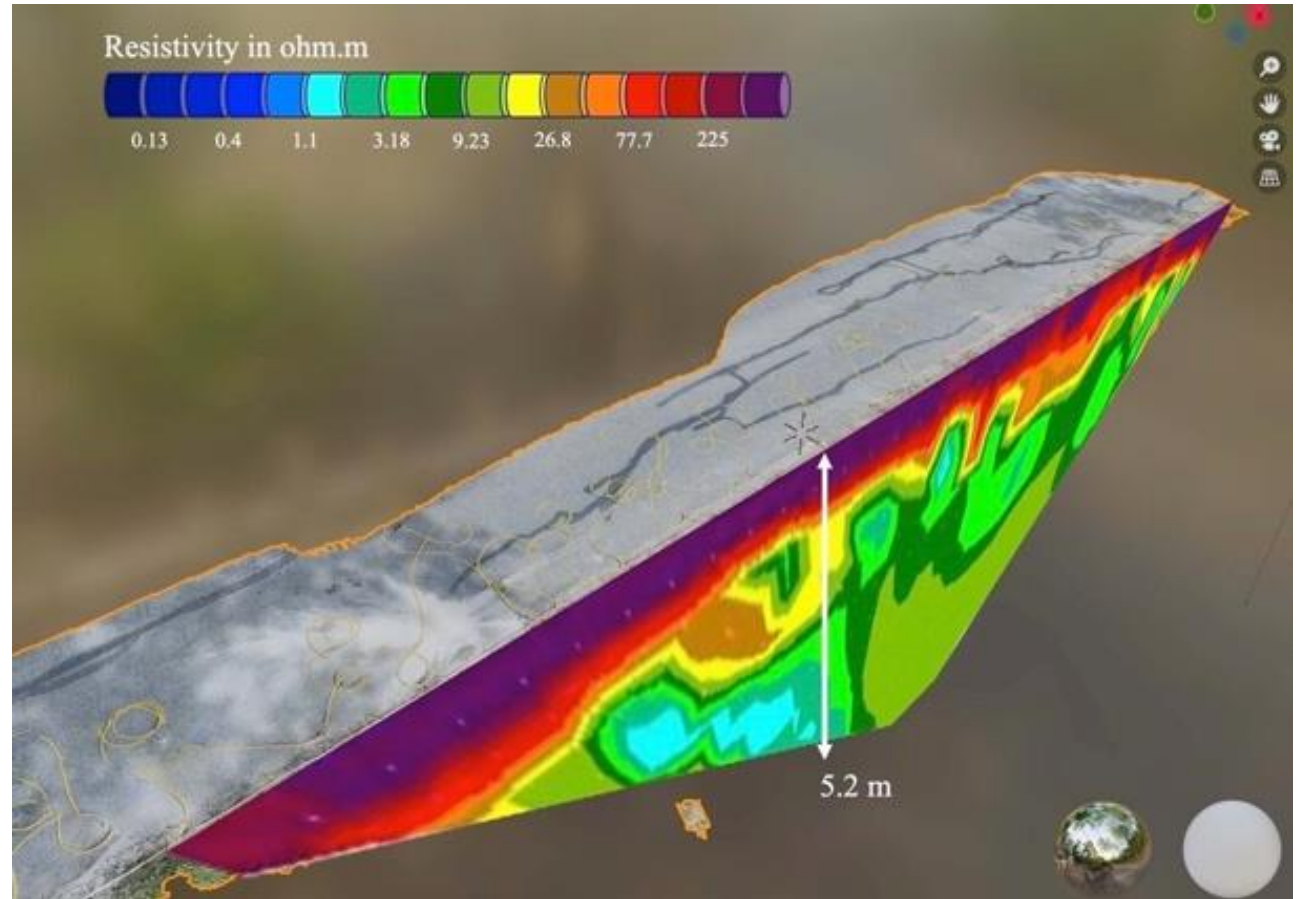


Stabilisation des sols argileux par bio-cimentation pour conforter la RD151 (CD45)

MÉTHODE D' EXÉCUTION

Suivi in-situ

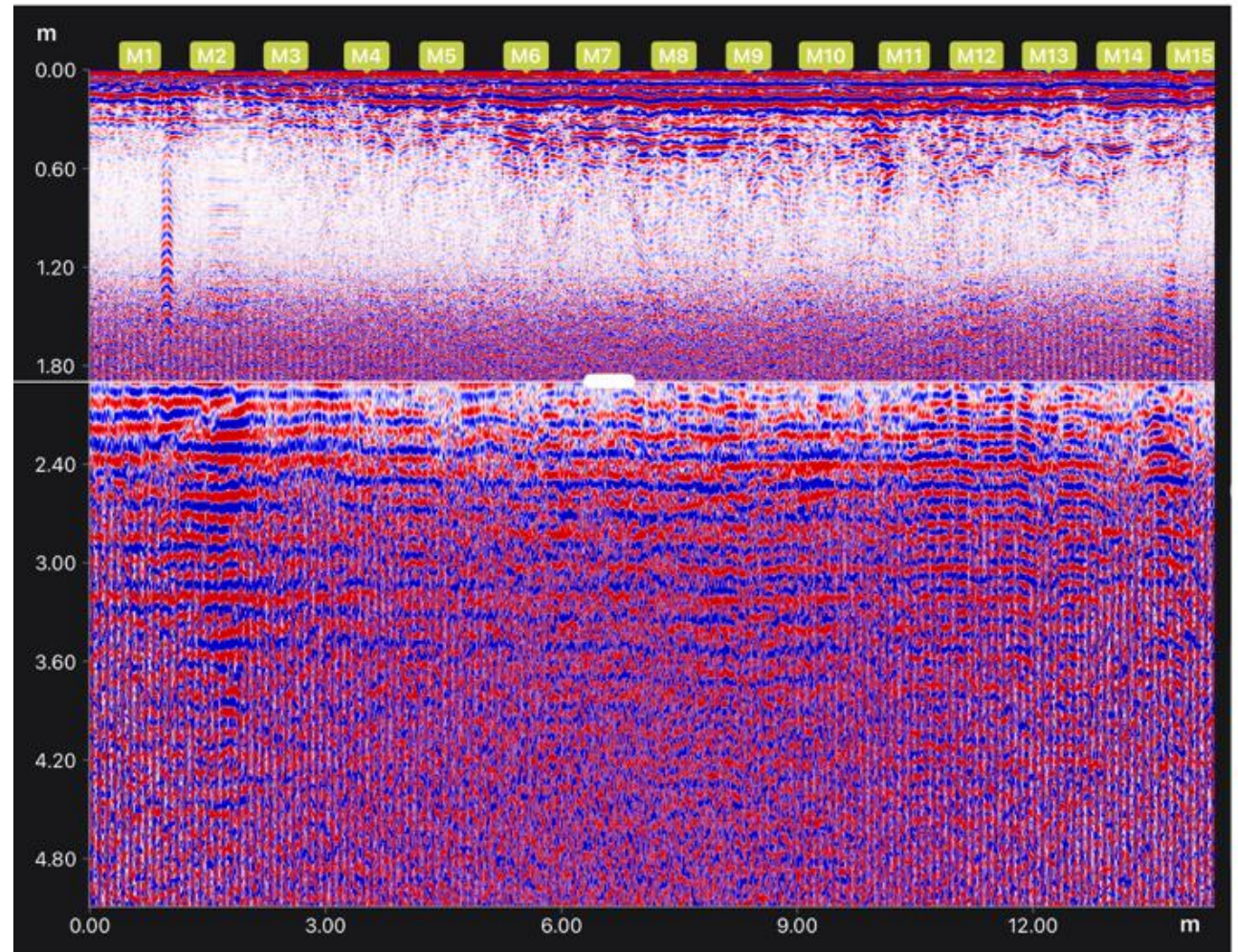
L'objectif principal de la surveillance **GPR** était d'évaluer les hétérogénéités du sol, reflétant la présence d'eau et la distribution de la solution de biocimentation. Les résultats indiquent des effets significatifs d'humidification du sol après les injections, confirmant l'adéquation de la grille d'injections choisie. L'objectif des enquêtes IRE était de surveiller les variations de résistivité électrique, qui correspondent directement aux modifications de la composition du sol et de son taux d'humidité.



MÉTHODE D' EXÉCUTION

Suivi in-situ

L'objectif principal de la surveillance GPR était d'évaluer les hétérogénéités du sol, reflétant la présence d'eau et la distribution de la solution de biocimentation. Les résultats indiquent des effets significatifs d'humidification du sol après les injections, confirmant l'adéquation de la grille d'injections choisie. L'objectif des enquêtes **IRE** était de surveiller les variations de résistivité électrique, qui correspondent directement aux modifications de la composition du sol et de son taux d'humidité.



Stabilisation des sols argileux par bio-cimentation pour conforter la RD151 (CD45)

Instrumentation in situ



EXPÉRIMENTATION 2023 :

RD151 Saint Loup des Vignes - MeduSoil – Bio cimentation BS1 (2023) :

- L'instrumentation prévue par le Cerema :

L'instrumentation doit permettre de mesurer les échanges hydriques des sols concernés et appréhender l'intensité de la réduction potentielle de retrait gonflement des argiles.

Station météo 12 en 1
ATMOS 41



Capteur de teneur en eau
TEROS 12



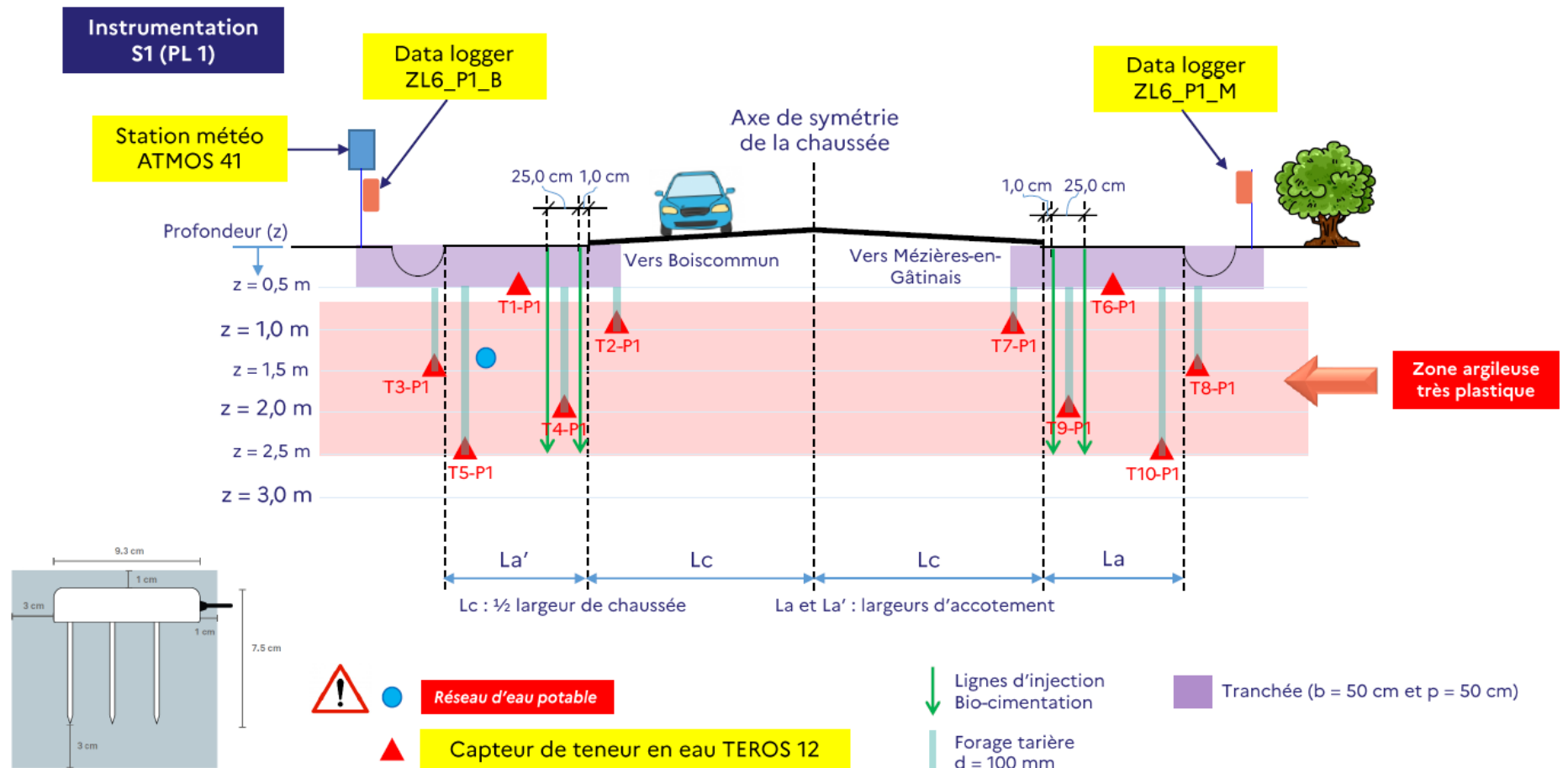
Data logger
ZL6 Pro



EXPÉRIMENTATION 2023 :

RD151 Saint Loup des Vignes - MeduSoil – Bio cimentation BS1 (2023) :

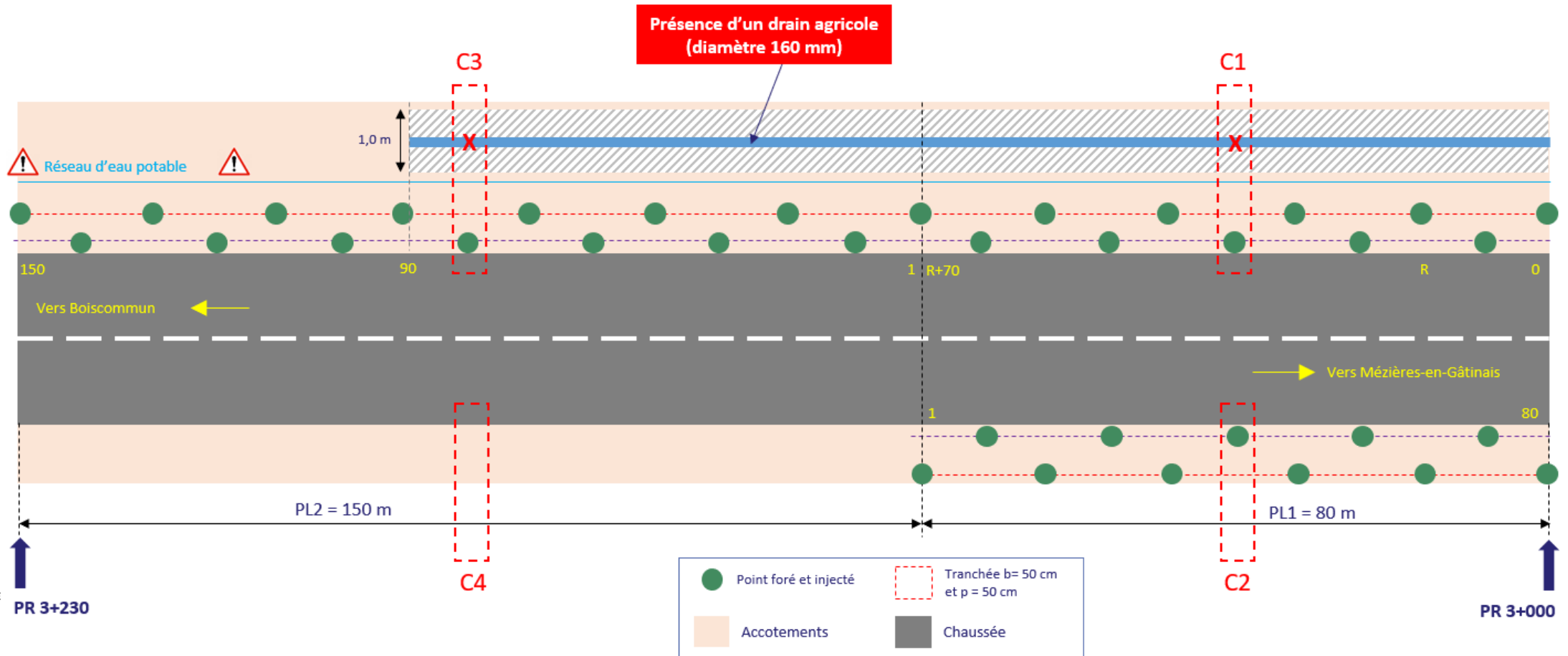
- L'instrumentation exécutée par le Cerema (exemple de la planche d'essai PL1) :



EXPÉRIMENTATION 2023 :

RD151 Saint Loup des Vignes - MeduSoil – Bio cimentation BS1 (2023) :

- Localisation de l'instrumentation :



EXPÉRIMENTATION 2023 :

RD151 Saint Loup des Vignes - MeduSoil – Bio cimentation BS1 (2023) :

- Les différentes étapes de l'expérimentation :



CONCLUSION :

Le département du Loiret recherche des solution(s) et se veut acteur de l'innovation en technique routière afin de :

- Sécuriser les routes départementales sous sa responsabilité
- Rendre plus durable les investissements consentis par le donneur d'ordre



Merci de votre attention