

Stabilisation des sols argileux par puits au lait de chaux dans le département de la Haute-Garonne

Stabilisation of clay soils by lime slurry wells in the Haute-Garonne department

Philippe LAHEURTE¹, Olivier MARTIN¹, Sandrine MARNAC², Pierre MÉTAIS-LAGOVARDE³

1 Cerema Occitanie, Toulouse, France

2 Conseil Départemental de la Haute-Garonne, Toulouse, France

3 Groupe Lhoist, Sauveterre-la-Lémance, France

RESUME : Le département de la Haute-Garonne est un territoire fortement exposé à l'aléa retrait-gonflement des argiles. Ainsi, les variations volumétriques saisonnières des argiles dégradent les chaussées départementales à faible trafic en zone rurale et péri-urbaine. Dans la perspective de limiter les volumes et coûts d'entretien, de trouver des solutions de confortation pérennes et respectueuses de l'environnement, le Conseil Départemental, l'entreprise Lhoist et le Cerema ont constitué un groupe de travail en 2018 afin de tester la faisabilité de puits au lait de chaux, réalisés en régie. La diffusion du lait de chaux dans le contexte local est un sujet majeur, son étude constitue l'un des objectifs de cette expérimentation.

Le croisement des données géologiques disponibles avec les relevés des dégradations des chaussées a permis de sélectionner une macro-zone expérimentale. En parallèle du développement des moyens matériels envisagés pour la mise en œuvre des puits de chaux (forage, formulation et injection du lait de chaux, malaxage), des reconnaissances géotechniques ont été menées ; des prélèvements d'échantillons ont conduit à des essais de laboratoire afin de qualifier les sols en place. Plusieurs planches d'essai ont eu lieu dans le temps, faisant varier le maillage des puits, leurs implantations, le dosage en lait de chaux, la technique de malaxage. Cet article rend compte de l'avancement des travaux engagés par les partenaires, et des orientations qui en découlent.

ABSTRACT: The Haute-Garonne department is an area highly exposed to the hazard of shrink-swell behaviour of clay soils. Consequently, seasonal volumetric variations in clays cause deterioration of low-traffic departmental roads in rural and peri-urban areas. With the objective of reducing maintenance volumes and costs and of identifying durable and environmentally friendly reinforcement solutions, the Departmental Council, the Lhoist company and the Cerema formed a working group in 2018 to test the feasibility of lime slurry columns, constructed using in-house resources. The diffusion of lime slurry under local conditions is a major issue, and its study constitutes one of the objectives of this experiment.

By cross-referencing available geological data with pavement deterioration surveys, a macro-scale experimental zone was selected. In parallel with the development of the equipment intended for the construction of lime columns (drilling, formulation and injection of the lime slurry, mixing), geotechnical investigations were carried out; soil samples were collected and laboratory tests conducted in order to characterise the in-situ soils. Several test sections were implemented over time, varying column spacing, their layout, lime slurry dosage and mixing technique. This paper presents the progress of the work undertaken by the partners and the outcomes and perspectives.

Mots-clés : argiles ; expérimentations ; puits ; chaux ; chaussées

1 CONTEXTES

1.1 Un territoire impacté par le changement volumique des argiles

Quatre-vingt pour cent du territoire du département de la Haute-Garonne est caractérisé par une exposition qualifiée de forte pour l'aléa changement volumique des argiles. Sur les 6138 km de routes départementales, il a été recensé près de 300 km de

voies potentiellement impactées par cet aléa. Pour la plupart d'entre elles, ces routes s'intègrent dans le réseau secondaire non structurant, à faible trafic.

Ainsi, certaines routes départementales subissent des déformations en surface, de la fissuration longitudinales, suite aux variations hydriques des argiles se trouvant sous les structures de chaussées, ce qui rend la circulation dangereuse notamment pour les deux-roues. Les désordres sont d'autant plus marqués lorsque de la végétation arborée se trouve à proximité

immédiate des voiries. Ce phénomène de changement de volume des terrains argileux est connu du gestionnaire depuis déjà plusieurs années. Le Cerema, auparavant le Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE), avait eu à diagnostiquer l'origine de ce type de désordres sur différentes voiries Hautes-Garonnaises à faible trafic routier, en remblai de très faible hauteur, ou inscrites en profil rasant.

1.2 Des dépenses d'entretien devenues excessives

Jusqu'à récemment, la politique d'entretien du Conseil Départemental de la Haute-Garonne (CD 31) consistait principalement en un reprofilage de la chaussée avec de la grave-émulsion (GE), ce qui permettait de rétablir une circulation sécurisée, mais ne résolvait pas les problèmes de retrait/gonflement des sols argileux. Avec le changement climatique, les périodes de sécheresse se faisant plus fréquentes et plus intenses, les interventions des agents départementaux se sont multipliées, devenant même annuelles sur certaines routes, ce qui n'est plus compatibles avec la fréquence de l'entretien courant, et les budgets de plus en plus contraints des collectivités territoriales. Cela a conduit à une accumulation de couches de GE et à des coûts d'entretien prohibitifs.

Par ailleurs, la mise en œuvre de structure de chaussées plus rigide (traitées au liants hydrauliques) ont conduit à une évolution plus rapide des désordres.

1.3 Les objectifs du Conseil Départemental de la Haute-Garonne

Face à ce constat, le Conseil Départemental s'est fixé un triple objectif : mettre en œuvre des solutions de confortations durables et respectueuses de l'environnement, limiter les volumes et les coûts d'entretien, et privilégier des solutions de travaux en régie.

1.4 Plusieurs solutions techniques envisagées

En l'état des connaissances, trois approches techniques avaient été envisagées pour réduire l'impact des variations de volume de ces argiles :

- Agir sur le gonflement des argiles en réduisant le volume des argiles gonflantes (substitution partielle ou totale des matériaux), et/ou en réduisant la sensibilité des argiles : traitement à la chaux pour les insensibiliser ;
- Limiter les variations de teneur en eau au sein du matériau par l'imperméabilisation des fossés et accotements, par la mise en place de

barrière anti-racines afin de réduire l'impact de la végétation de haute tige.

- Renforcer la structure de voirie par la mise en œuvre d'armatures (treillis soudés ou armature géosynthétiques) sous la chaussée afin de limiter la remontée des fissures.

1.5 La technique retenue

Parmi les solutions techniques évoquées, il a été choisi d'étudier la possibilité de réaliser des puits de chaux. La réalisation de puits au lait de chaux est une technique développée dans les années 1960, principalement en Australie et en Amérique du Nord (Wilkinson, 2007 ; Thompson, 1976).

L'application du lait de chaux est particulièrement adaptée aux chaussées à faible trafic, pour lesquelles une reconstruction complète serait économiquement inenvisageable. Son mode de mise en œuvre, par injection dans des puits verticaux, permet une intervention peu invasive, rapide et ciblée, sous chaussée existante. Contrairement à la chaux vive ou à la chaux éteinte, le lait de chaux peut être injecté en profondeur, favorisant une diffusion plus homogène dans la matrice argileuse sans nécessiter le décapage de la couche de roulement.

Le lait de chaux injecté a pour effet de combler les vides de réseau de fissures, et modifier les paramètres de plasticité du sol ; il réduit le potentiel de gonflement des sols argileux et augmente la résistance mécanique du sol traité. Deux mécanismes essentiels sont à l'œuvre : une floculation-agglomération rapide, réduisant la plasticité, et des réactions pouzzolaniques progressives, conduisant à la formation de composés cimentaires stables.

Cette technique a été employée quelquefois en Haute-Garonne dans les années 1990 ; il était confectionné sur place un coulis de chaux versé dans des forages (Figure 1).



Figure 1. 1990, puits de chaux réalisés à Laffite-Toupière, RD 52 (Dpt. 31)

Les désordres ultérieurs observés sur les sections de chaussées concernées étaient nettement plus réduits, et ce malgré des périodes de sécheresse de plus en plus fréquentes et importantes. L'emploi de cette méthode est cependant resté marginale, contrairement aux réparations en enrobés bitumineux ou enduits superficiels d'usure.

Ainsi, un accord a ainsi été passé en 2018 par le CD 31 avec le Cerema et le groupe Lhoist, pour tester la faisabilité de puits au lait de chaux.

1.6 Choix des sites expérimentaux

Le croisement des données géologiques disponibles avec les relevés des dégradations des chaussées a permis de sélectionner une macro-zone expérimentale au Sud-Ouest du département, à proximité de la ville de Saint-Gaudens ; cette macro-zone comprend sept sites d'étude, réparties sur six communes (Figure 2).

Elle se situe dans le chaînon des petites Pyrénées (zone plissée sous-pyrénéenne). Il s'agit une région au relief jurassien typique avec une alternance de crêtes calcaires et de combes marneuses ou sableuses, d'orientation globale ONO-ESE, traversée en cluse par la Garonne. Le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM) y qualifie l'exposition à l'aléa retrait-gonflement des argiles comme forte.

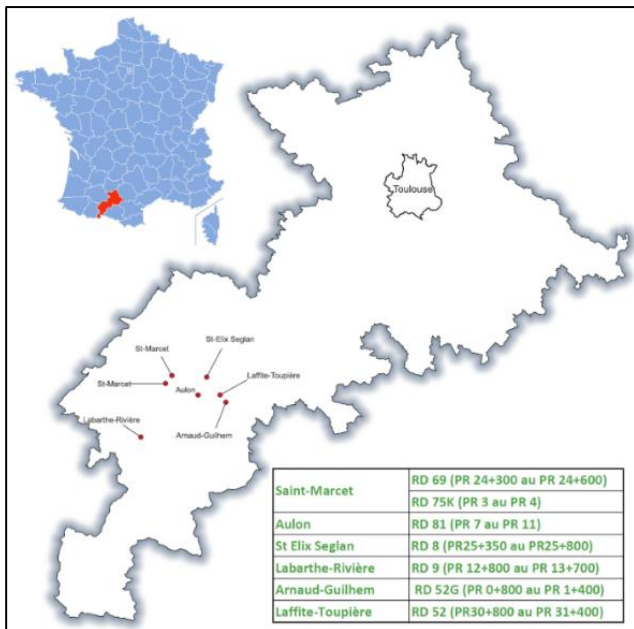


Figure 2. Localisation des sites d'étude

2 PREMIERES EXPERIMENTATIONS

Le premier site sélectionné se situe sur la RD 9 à Labarthe-Rivière, au droit d'une section boisée avec un revêtement de chaussée très dégradé. Une reconnaissance préalable des terrains a été réalisée en

2019, en rive de chaussée, via quatre sondages carottés (Figure 3).

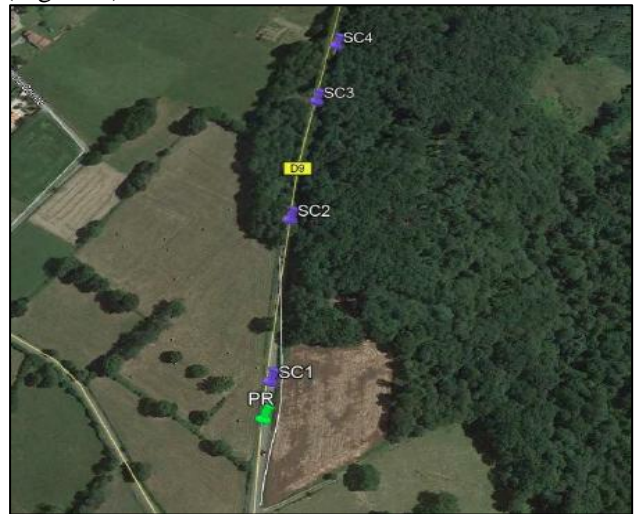


Figure 3. Premier site expérimental, 2019

Les sols prélevés ont été identifiés au laboratoire du Cerema comme des limons argileux, majoritairement classés A3 et A4, d'après le guide de réalisation des remblais et des couches de forme (GTR, 2000), à l'état hydrique sec ou très sec, avec une plasticité qualifiée de très élevée, selon la norme NF EN ISO 14688-2 (Figure 4).

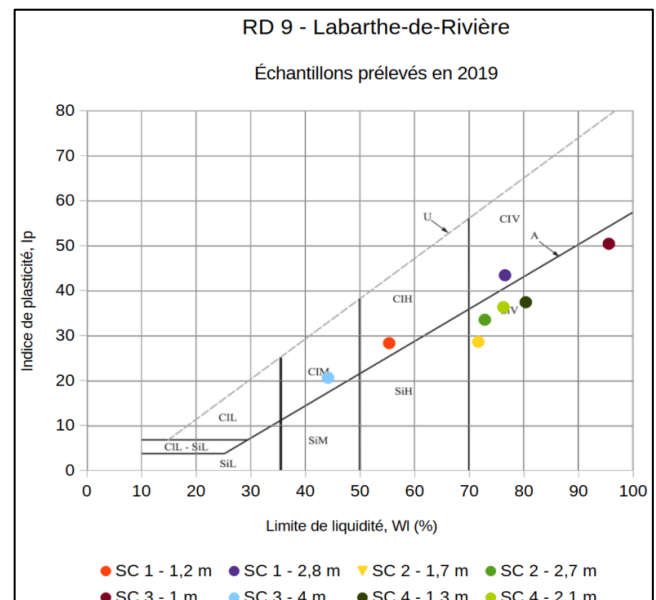


Figure 4. Sondages RD 9, diagramme de plasticité

Quatre essais de gonflement à l'œdomètre donnaient des valeurs de pressions de gonflement comprises entre 72 et 530 kPa, avec une moyenne de 262 kPa.

Un premier essai de forage et d'injection avec une tarière creuse a ensuite été réalisé la même année. Le groupe Lhoist a fourni un lait de chaux avec les caractéristiques suivantes : un produit de classe CL90-

S ML conforme à la norme NF EN 459-1 « Chaux de construction » et titulaire d'un marquage conforme au Règlement (UE) des Produits de Construction, ayant une concentration de 600 grammes par litre (g/l), une densité apparente de 1,33 et une viscosité moyenne de 350 centipoises (cP). Ce test avec la tarière s'est avéré non concluant :

- Quasi-totalité du sol refoulée à la remontée du train de tige, fort remaniement du sol ;
- Consommation de lait de chaux importante ;
- Pas de mélange sol-chaux.

Par conséquent, il a été décidé de concevoir un outil en interne (CD 31, secteur routier de Saint-Gaudens – Cerema) permettant un mélange sol – lait de chaux sur deux mètres de profondeur.

Le premier prototype se composait d'une tige en acier plein de 2 m de longueur, insérée dans un tube en acier de 60 mm de diamètre (permettant l'injection), à l'extrémité de laquelle étaient soudées des couteaux d'épaveuse en acier répartis sur le périmètre (Figure 5) ; le diamètre de l'outil était de 180 mm.

Un système hydraulique de fermeture et d'ouverture du tube permettait l'injection du lait de chaux, via une pompe péristaltique de type Bredel (Figure 6). Le matériel de forage et d'injection était monté sur un camion plateau avec grue élévateur, le lait de chaux étant contenu dans une cuve (Figure 7).



Figure 5. Tête de forage et d'injection expérimentale, 2019

Des premiers essais, dits de calage, consistaient à définir une méthodologie d'intervention, et valider le choix du premier site d'étude (sols plastiques avec des potentiels de gonflement importants). La réalisation d'un avant-trou était nécessaire pour traverser les structures de chaussée. Des adaptations ont ensuite été apportées pour améliorer ce prototype, notamment pour l'injection (contrainte sur la pompe d'injection par rapport à la viscosité du lait de chaux, et agressivité vis-à-vis du matériel). Avec le matériel élaboré, la durée de réalisation d'un puits au lait de chaux sur 1,5

m de profondeur (hors carottage de chaussée) est de l'ordre de 4 à 5 minutes.



Figure 6. Système hydraulique d'injection et pompe Bredel APEX20



Figure 7. Premiers tests in situ sur accotements, 2019-2020

3 PLANCHES D'ESSAIS 2021-2022

Les premières conditions expérimentales pour la réalisation des puits au lait de chaux ont été affinées sur le site de la RD 9, à Labarthe-Rivière.

3.1 Choix du dosage en lait de chaux

Préalablement aux planches d'essais, plusieurs échantillons de sol issus des prélèvements réalisés sur la RD 9 en 2019 ont été malaxés en laboratoire au Cerema Occitanie avec du lait de chaux, suivant quatre dosages différents ; des éprouvettes ont ensuite été constituées afin d'effectuer des mesures de gonflement à l'œdomètre (une éprouvette par dosage). Les pressions de gonflement mesurées étaient les suivantes (Tableau 1) :

Tableau 1. RD 9 – Pressions de gonflement mesurées à l'œdomètre sur mélanges sol-lait de chaux

Dosage massique en en équivalent chaux vive	Contraintes de gonflement (kPa)
0 %	327
2 %	86
4 %	89
6 %	39
8 %	50

Pour ces dosages de lait, les premiers résultats en laboratoire ont montré une forte réduction de la pression de gonflement des matériaux testés, plastiques et sensibles à l'eau. On peut s'interroger cependant sur une diminution non linéaire de la contrainte, avec l'augmentation du dosage (incertitude de l'essai avec une préparation des échantillons compliquée). Pour les tests in situ à venir, il a été retenu des dosages à 2% et 6%.

3.2 Protocole de réalisation

Le protocole de réalisation pour les test in situ était le suivant :

- Forage jusqu'à 2 m de profondeur en déstructurant les terrains avec le tube en position fermée permettant d'éviter le colmatage de la zone d'injection ;
- Ouverture de la zone d'injection par remontée du tube sur la tige ;
- Injection du lait de chaux pendant la remontée de l'outil par rotation, permettant un malaxage du sol avec le lait de chaux ;
- Répétition de la séquence, soit deux passes au total.

Deux critères ont amené au choix de cette profondeur de puits :

- L'augmentation des fréquences, des durées et des intensités des sécheresses avec le changement climatique, la présence de végétation en bord de route, nous ont amené à retenir une profondeur de puits de 2 m ;
- Au-delà de 2 m de longueur, l'outil n'aurait pas pu être utilisé avec un engin « classique » présent dans les secteurs routiers du CD 31.

3.3 Tests in situ

Quatre planches d'essai, d'une dizaine de mètre de longueur chacune, ont été réalisées en avril 2021 ; une cinquième a eu lieu en février 2022. Quatre concernaient des puits en accotements, et une des puits sur chaussée. Ces planches avaient plusieurs objectifs : faire varier la distance entre puits (maillage de 0,50 m, 1,00 m et 1,50 m), leur implantation (en accotement,

en rive, sur chaussée), le nombre de lignes, le dosage en chaux du lait (2% et 6%), la profondeur des puits (1,0 m, 1,50 m et 2,0 m), l'orientation des puits (verticale, inclinée). Des avant-trous avaient été fait au préalable avec un carottier pour traverser la structure de chaussée (Figure 8).

Au total, soixante-quinze puits au lait de chaux ont été réalisés sur ces cinq planches d'essai. La quantité maximale de lait de chaux injectée dans un puits était de l'ordre de trois litres par mètre linéaire (dosage de 6% visé).



Figure 8. Planche d'essai 2021 avec deux lignes de puits verticaux en quinconce, en rive de chaussée de la RD 9

3.4 Contrôles de la diffusion du lait de chaux dans les terrains

Un prélèvement de terrains au carottier à piston stationnaire sur cent cinquante centimètres de longueur a été réalisé aux abords immédiats d'un puits au lait de chaux réalisé le jour même. Des tests avec un réactif de basicité avaient montré la présence de lait de chaux sur toute la longueur de carotte (Figure 9).



Figure 9. Test de réactivité à l'indicateur TA

Six mois plus tard, cinq sondages au carottier triple ont été réalisés sur deux mètres de profondeur, entre des puits précédemment réalisés sur trois planches

d'essai. Les sols prélevés avaient des indices de plasticité compris entre 46 et 55, ils ont été classés A4. Une diminution sensible de la pression de gonflement a été mesurée à l'œdomètre par rapport aux valeurs obtenues en 2019 : 262 kPa en moyenne pour les essais de 2019, et 132 kPa en moyenne pour les pressions de gonflement mesurées sur ces prélèvements d'octobre 2021.

3.5 Enseignements tirés de ces planches d'essai

Les premiers contrôles réalisés étaient prometteurs. La réalisation de puits au lait de chaux sous chaussée a été assez problématique. Le développement de l'outil doit être poursuivi pour accroître sa robustesse, sa capacité à augmenter la quantité de matériaux traitée (avec un diamètre de forage et un volume de lait injecté plus importants), ainsi que l'ajout d'un compteur volumétrique afin de déterminer la quantité de lait de chaux injectée précisément.

Des réflexions se sont portées sur la mise en œuvre d'instrumentation afin d'acquérir des données, et les méthodes de réfection des chaussées, suivant l'apparition ou non de fissures après réalisation des puits.

3.6 Poursuite des expérimentations in situ

En 2022, huit autres planches ont été réalisées à la fois sur la RD 9 et sur la RD 8 à Saint-Élix-Séglan (4 planches en accotement et rives de chaussée et 4 planches sur l'ensemble de la chaussée avec des distances inter puits de 1,0 m et 1,50 m), suivant les mêmes protocoles et tests préalablement établis. Au total, 734 puits ont ainsi été faits.

Des rendements de cent puits par jour ont pu être atteints, en mobilisant quatre agents.

Il avait été convenu d'attendre un an et demi minimum (temps de stabilisation des sols traités au lait de chaux) avant de réaliser la réfection de la couche de roulement au droit des planches d'essais (Figure 10 et Figure 11).



Figure 10. RD 8, état de surface de la chaussée après réalisation des puits



Figure 11. RD 9, état de surface de la rive après réalisation des puits

4 DIFFUSION DU LAIT DE CHAUX DANS LES SOLS ET EFFICACITE DU TRAITEMENT

En 2023, un travail de stage encadré par Lhoist, et réalisé dans leurs locaux au centre de recherche et d'innovation à Nivelles en Belgique, a porté sur l'évaluation de la diffusion du lait de chaux. Celui-ci, s'est déroulé en trois étapes :

- Caractériser des terrains naturels avant et après traitement au lait de chaux ;
- Estimer la faisabilité et la pertinence du traitement dans l'objectif d'amélioration du comportement des terrains ;
- Evaluer l'efficacité du traitement par des essais de laboratoire.

4.1 Caractérisation des terrains naturels

Plusieurs centaines de kilogrammes de matériaux naturels provenant de la RD 9 à Labarthe-Rivière ont été expédiés pour réaliser des essais et utiliser les résultats afin d'avoir des valeurs de référence. La série d'essais suivante a été faite : teneurs en eau, valeurs au bleu, limites d'Atterberg, granulométries, analyses thermogravimétriques (ATG), analyses chimiques (XRF), caractérisation des phases cristallines (XRF).

Ces essais ont permis de mettre en évidence le caractère plastique des échantillons naturels, avec la présence de montmorillonite et de kaolinite, ainsi qu'une quantité non négligeable d'oxyde de calcium ; De la matière organique a également été identifiée (près de 10% de perte de masse à 550°C).

4.2 Faisabilité du traitement

Le point de fixation de la chaux (PFC) a été estimée à 2,5 %. Cela signifie que le pH du sol a atteint la valeur de 12,4 pour une proportion de 2,5 % de chaux vive (CaO) dans le sol. À cette valeur de pH, la réaction pouzzolanique se produit apportant ainsi une amélioration des propriétés des sols (meilleure résistance mécanique et capacité de portance). Des mesures d'indice portant immédiat (IPI) et d'indice California Bearing ratio après quatre jours d'immersion (CBRi) ont donné les résultats suivants (Tableau 2) :

Tableau 2. Résultats pour les essais de faisabilité du traitement à la chaux

Mesures	Sol naturel	Sol traité
Indice IPI	7	21
Indice CBRi	5	15
Gonflement 4j immersion (mm)	5	0

Ces résultats confirment la faisabilité du traitement sur ces matériaux naturels.

4.3 Efficacité du traitement

Des échantillons avaient été prélevés auparavant sur les sites expérimentaux (RD 9 et RD 8) entre 2 puits d'injection, pour savoir si la diffusion du produit était présente ou non. Les essais réalisés ont montré qu'au-delà de 75 cm de distance d'un puits, aucune trace de diffusion n'a été décelée. Une aire de diffusion a pu être caractérisée jusqu'à 25 cm au-delà du puits, et sur 1,50 m de profondeur. Entre 25 cm et 75 cm des puits, la quantité d'oxyde de calcium présente naturellement dans les sols naturels, ne permet pas d'affirmer que le lait de chaux a pu se diffuser. Des investigations supplémentaires devront être menés afin de pouvoir obtenir une meilleure compréhension de la diffusion.

5 REFECTION DES CHAUSSEES APRES EXPERIMENTATION

Fin 2024, soit approximativement deux ans après les dernières planches d'essais (le temps que les sols traités se stabilisent), une réfection de la couche de roulement des planches d'essais de la RD 9 a été entreprise. La structure de chaussée en place était constituée ainsi :

- ± 20 cm de différentes couches de GE + enduits superficiels d'usure ;
- ± 30 cm de grave non traitée (GNT) 0/40 mm.

La technique retenue avait deux objectifs : le premier était de recréer une chaussée souple, limitant la remontée de fissures, et le second de trouver une solution la plus économique possible, tout en limitant les apports de matériaux extérieurs. Il avait donc été convenu de raboter et d'humidifier les différentes couches de GE rabotées, afin de recréer GNT qui serait mise en œuvre sur une épaisseur de 20 cm, puis de mettre en œuvre la couche de roulement constituée d'un enduit bicouches pré-gravillonné. Le compactage de la couche de matériaux rabotés et humidifiés devait amener à une qualité q2 (qualité de compactage d'une assise de chaussée en GNT).

Le contrôle intérieur de l'entreprise a réalisé des mesures de densité en place à l'aide d'un gamma-densimètre à deux profondeurs différentes (17 cm et 10 cm). Le Cerema a prélevé des échantillons de matériaux après rabotage et humidification, pour des mesures de teneurs en eau et la réalisation d'un essai Proctor modifié. Le taux de compactage était supérieur à 97%, la qualité de compactage q2 a été atteinte.

Les déflexions caractéristiques mesurées étaient comprises entre 144 et 155 centièmes de mm, conduisant à un niveau "bon", mais en limite "moyen" pour un trafic T5.

À ce jour, aucun désordre n'est apparu sur les planches d'essais ayant fait l'objet de réfection de chaussée.

6 PERSPECTIVES

En 2025, le CD 31 a décidé de faire concevoir un nouvel outil plus robuste que celui fabriqué en interne, et permettant de réaliser des puits à une profondeur plus importante (2,50 m) ; les structures de chaussée avec les nombreux rechargements ont une épaisseur d'au moins 50 cm.

Le groupe Lhoist a également mis au point une nouvelle formulation du lait de chaux, plus fluide que celui proposé lors des premiers essais. La composition du lait de chaux (type de chaux, rapport massique ou volumique eau/chaux, concentration, température, viscosité/pompabilité, stabilité) influence directement sa capacité de diffusion et sa réactivité (Abass, 2013 ; Lhoist R&D, 2019). Identifier les paramètres physico-chimiques optimaux est essentiel pour garantir son injectabilité et l'efficacité du traitement des sols argileux.

Le nouvel matériel de forage a été testé. Les injections se font uniquement lors de la remontée de l'outil, la descente se faisant en injectant de l'air comprimé pour éviter le colmatage des trous. La réalisation des puits au lait de chaux avec le nouvel outil est satisfaisante. Un débitmètre a été installé sur

le nouvel outil afin de contrôler in-situ le dosage visé de lait de chaux (2% et 6%).

Cinq nouvelles planches d'essai devront se dérouler en 2026 sur des sections de chaussées dégradées des RD 75K et RD 69 (Saint-Marcet), RD 81 (Aulon), RD 52 (Lafitte-Toupière) et RD 52G (Arnaud-Guilhem). Des échantillons ont été au préalable prélevés et identifiés, afin de qualifier notamment leur plasticité et leur activité argileuse pour la plupart d'entre eux (Figure 12 et Figure 13).

Soixante-trois des échantillons testés en laboratoire conduisent à une classification des sols en F3/F4, selon la dernière version du GTR (IDRRIM, 2024).

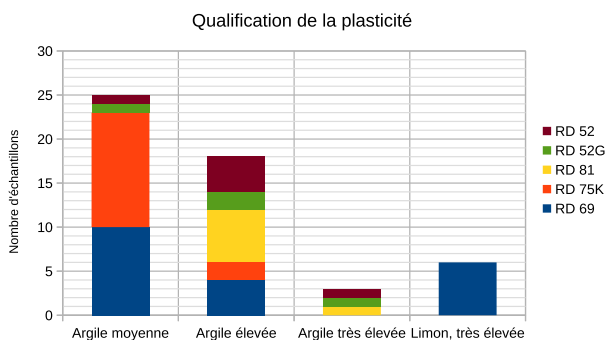


Figure 12. Qualification de la plasticité au droit des futurs planches d'essai

Les activités argileuses Ac (% de passant à $2\mu\text{m}$ /Ip) supérieures à 2 correspondent à des argiles très actives, et pour Ac compris entre 1,25 et 2, à des argiles actives. Ces argiles contiendraient de la montmorillonite (Skempton, 1953).

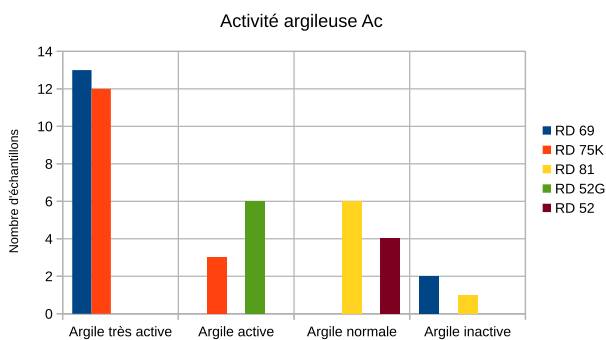


Figure 13. Activités argileuses calculées

Les terrains au droit de ces sites sont aptes au traitement via des puits au lait de chaux.

Une thèse CIIFFRE sur la diffusion de la chaux est en cours de constitution. Des essais en laboratoire et in situ permettront de mieux caractériser cette diffusion ; une étude quantitative pour des échantillons prélevés entre deux puits sera fortement utile pour vérifier/valider la diffusion de lait de chaux autour d'un puit.

7 CONCLUSION

Les investigations réalisées depuis 2019 ont confirmé la nature argileuse des terrains, à l'origine de des dégradations de chaussées. La technique de réalisation en régie des puits de chaux a donné des premiers résultats encourageants. Il s'avère nécessaire de mieux caractériser la diffusion de la chaux ; une modélisation physique et numérique de la diffusion pourrait y aider, et devra être validée sur le terrain. Un suivi des planches d'essai est indispensable après réfection des chaussées (instrumentation in situ, relevés par véhicules d'auscultation par exemple).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ensemble des acteurs qui se sont impliqués dans ce projet, et notamment les agents départementaux du secteur routier de Saint-Gaudens.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Wilkinson, A. Asadul Haque, Jayantha Kodikara, John Adamson, David Christie. 2007. Lime Slurry Pressure Injection of railway subgrades. 10th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Brisbane, Australia.
- Thompson, M. R., & Robnett, Q. L. (1976, January). Pressure injected lime for treatment of swelling soils. In One of the 4 reports Prepared for the 54th Annual meeting of the TRB, TRR-568 (pp. 24-34).
- Zineb, B., Sidi Mohamed, A. M., & Abdelmalek, B. (2012). Stabilization of expansive soils with milk of lime: The case of clays of Tlemcen, Algeria.
- Abass, I. K. (2013). Lime stabilization of expansive soil. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 17(1), 219–232.
- Lhoist Recherche et Développement. (2019). Ultra fine milk of lime composition (US 2019/0002301 A1). World Intellectual Property Organization.
- Skempton, A.W. (1953). The colloidal "Activity" of clays. *Proceedings of the 3rd International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. (1) 57-6.
- AFNOR, 2015. NF EN 459-1. Chaux de construction - Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité.
- AFNOR, 2018. NF EN ISO 14688-2. Reconnaissance et essais géotechniques - Identification et classification des sols - Partie 2 : principes pour une classification.
- IDRRIM. Guide des terrassements des remblais et des couches de forme. Bron : Cerema, 2024. Collection : Les références.