Valorisation des sols par traitement aux LHR

Décembre 2025

La solution pour des plateformes de haute qualité, PF3 au minimum, garantissant l'optimisation globale et la durabilité de la chaussée

Le pulvimixeur mélange intimement le sol naturel avec le LHR pour donner un matériau homogène qui, après compactage et durcissement, acquiert des performances mécaniques très élevées. ©Cimbéton

Introduction

Le traitement des sols en place aux liants hydrauliques : enjeux et perspectives

Pour construire des routes, des autoroutes, des aires aéroportuaires, des plateformes ferroviaires et portuaires ou tout aménagement d'aires à caractère industriel, commercial, logistique, résidentiel, il est nécessaire au préalable de concevoir et de réaliser une plateforme support constituée :

- Du sol (déblai ou remblai, sol en place ou rapporté) formant la partie supérieure des terrassements (PST) sur 1 m d'épaisseur environ ;
- D'une couche de forme sur la PST.

De façon à bien remplir son rôle, cette plateforme doit :

- Présenter des caractéristiques minimales de nivellement pour garantir la régularité de l'épaisseur des couches d'assise de chaussée ;
- Offrir un support de portance convenable pour assurer le bon compactage des couches de chaussée ;
- Présenter une portance suffisante et régulière ;
- Être peu sensible aux intempéries (la rigidité ne doit pas se détériorer pendant la période qui sépare l'exécution des terrassements de celle de la chaussée) ;
- Participer au fonctionnement de la chaussée : une meilleure plateforme permet de réduire ou d'optimiser l'épaisseur de la chaussée, moins coûteuse et moins impactante sur l'environnement ;
- Assurer la protection du sol support contre le gel.

Le niveau de portance PFi (dans l'ordre croissant de performance : PF1, PF2, PF2qs, PF3 et PF4) est un paramètre d'entrée du dimensionnement de la structure de chaussée. Plus le niveau de portance de la plateforme PFi est élevé, plus la structure de la chaussée est optimisée sur les plans technique, économique et environnemental. Cela entraîne une meilleure tenue de la structure de chaussée sous l'effet des sollicitations du trafic et des conditions climatiques (pluie, gel) et, par conséquent, une plus grande durabilité.

Pour améliorer la portance de la plateforme, on peut :

- Améliorer ou stabiliser le sol support (l'arase des terrassements) en effectuant un traitement à la chaux ou au liant hydraulique (liant hydraulique routier [LHR] ou ciment) ;
- Réaliser une couche de forme qui peut être soit granulaire, soit en sol traité à la chaux ou au liant hydraulique ;
Combiner les deux solutions précédentes.

Le résultat est l'obtention d'une plateforme support dont le niveau de portance varie entre PF2 (solution généralement obtenue avec une couche de forme granulaire) et PF3 - PF4 (solutions utilisant le traitement au liant hydraulique). En outre, pour des raisons liées à l'environnement et, en particulier, pour limiter l'épuisement des ressources naturelles, éviter des transports de matériaux neufs et la création de déchets – à évacuer ou à stocker – et réduire les consommations énergétiques, la tendance actuelle est de penser la structure de chaussée dans sa globalité. Cela consiste à optimiser le dimensionnement de la structure en augmentant les performances des plateformes supports et cela contribue à réduire l'apport de matériaux nobles dans l'assise et à générer des avantages environnementaux et écologiques.

RN88 entre Baraqueville et La Mothe (aussi appelée « déviation de Baraqueville ») (12). Cazal TP a réalisé une plateforme de haute qualité PF3 en renforçant la PST au liant Rolac Optimum et en confectionnant une couche de forme traitée au même liant Rolac Optimum de Lafarge (cf. Routes info #19). ©Fenêtre sur cour

Points de vue



Yves Krattinger

Président d'honneur de l'Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité (IDRRIM)
Ancien président du conseil départemental de la Haute-Saône

Les infrastructures routières sont particulièrement sollicitées par le changement climatique et le trafic des poids lourds. Dans ce contexte et afin de garantir le bon état de nos routes, infrastructures essentielles aux échanges économiques et sociaux, les collectivités locales doivent veiller, lors de la conception des ouvrages, à choisir la solution constructive qui offrira une durabilité optimisée, minimisant l'entretien et procurant une résilience adaptée aux aléas climatiques.

Le choix de la solution constructive des routes doit s'appuyer sur l'ensemble des critères décisionnels : durée des travaux, coût global, nuisances, durabilité, impact sur l'environnement et sur les ressources naturelles. Dans cette optique, il est important, pour les décideurs, d'ouvrir leurs projets aux variantes pouvant être proposées par les entreprises.

En effet, en tant que président, désormais honoraire, de l'IDRRIM et ancien président d'un conseil départemental, il m'apparaît crucial de soutenir l'innovation et le développement de nouvelles stratégies d'optimisation des ressources en permettant aux entreprises de proposer des techniques alternatives dans le cadre de leur offre.

Ainsi, dans certains cas, l'entreprise pourra innover en proposant des stratégies permettant de réduire les consommations de ressources naturelles et d'énergie grâce à une optimisation du dimensionnement global des chaussées. Sous certaines

conditions, la conception et le dimensionnement de la plateforme support selon une classe supérieure à celle classiquement utilisée (PF3, voire PF4, au lieu de PF2 ou PF2qs) peuvent se révéler techniquement, économiquement et environnementalement intéressants en permettant de réduire les couches d'assise hydrocarbonées et d'optimiser la durée de vie de l'infrastructure face aux aléas climatiques.

Chaque opération routière est spécifique et doit être abordée comme un prototype. C'est pourquoi, dans un contexte budgétaire contraint, les gestionnaires de voirie devront travailler en lien étroit avec les géotechniciens de leur propre structure et des entreprises titulaires des marchés de travaux afin d'étudier finement les solutions possibles en matière de « surdimensionnement » de la plateforme-support. Cette stratégie, pour laquelle peu de maîtres d'ouvrage opteraient naturellement, requiert de leur part un niveau d'expertise élevé et ne pourra donc se développer, à mon sens, qu'à la condition d'un travail collaboratif fort entre les gestionnaires de voirie, les bureaux d'études et les entreprises maîtrisant tous les volets de l'optimisation des structures de chaussée.



Benoît Denizot

Président du Syndicat professionnel des terrassiers de France (SPTF)

Le Syndicat professionnel des terrassiers de France (SPTF) regroupe 22 entreprises membres, employant en France plus de 10 000 salariés. Le SPTF est adhérent de l'Union des métiers de la terre et de la mer (UMTM), deuxième syndicat de la Fédération nationale des travaux publics (FNTP).

Les entreprises du SPTF sont parties prenantes de tous les projets d'infrastructures. Leur vocation est de lever les contraintes de site afin de livrer les plateformes de capacité portante adéquate nécessaires à tous les types d'aménagements, et notamment les aéroports, les infrastructures ferroviaires, les plateformes industrielles et logistiques, les infrastructures routières et autoroutières, etc.

En outre, compte tenu de la très forte empreinte de ces projets sur les territoires, elles ont été très tôt sensibles aux aspects environnementaux et ont développé des techniques visant à optimiser les ressources naturelles et à limiter leurs impacts sur l'environnement.

Ainsi, pour la construction des plateformes supports, deux techniques peuvent être mises en œuvre :

- Les remblais en matériaux granulaires : ceux-ci sont élaborés à partir des déblais rocheux du projet ou en provenance de carrières ;
- Le traitement des sols en place : valorisation des sols naturels du projet, amendés avec un liant hydraulique ou de la chaux et de l'eau.

Ces deux techniques présentent des avantages et des limites tant sur les plans technique, sociétal et économique que sur le plan environnemental.

Ainsi, en fonction du contexte propre à chaque projet (localisation du chantier, disponibilité des ressources sur le projet et régionalement, distance carrière-chantier, distance chantier-décharge, caractéristiques mécaniques des déblais rocheux et physico-chimiques des sols, dosage du liant et distance usine-chantier, stratégie globale de dimensionnement de la structure, etc.), l'une ou l'autre technique peut s'imposer sur les plans technique, sociétal, économique et environnemental.

Mais la raréfaction des ressources granulaires dans plusieurs régions et la prise de conscience collective en faveur de la préservation des ressources naturelles et de la réduction des impacts sur l'environnement rendent de plus en plus difficile la mise en œuvre de matériaux granulaires issus de carrières dans les travaux de terrassement, ces derniers étant réservés à des usages à plus forte valeur ajoutée (charges minérales, béton, enrobés, etc.).

Aussi, aujourd'hui, encore plus qu'hier, nos entreprises sont convaincues que la valorisation des sols du site par un traitement aux liants hydrauliques ou à la chaux constitue une alternative sûre et fiable aux carrières granulaires.

Et ce d'autant que le traitement des sols aux liants hydrauliques possède un avantage technique (pas souvent exploité en dimensionnement de structure) par rapport aux matériaux granulaires : il permet d'améliorer fortement la qualité de la plateforme support et d'atteindre un niveau de portance très élevé PF4 ($EV2 \geq 200$ MPa), alors que le granulaire peine à dépasser le seuil PF2qs ($80 \leq EV2 < 120$ MPa), réduisant de fait l'épaisseur des couches hydrocarbonées d'assise de chaussée, le recours aux matériaux issus de carrières, les coûts et les impacts sur l'environnement.

L'initiative de Cimbéton est donc tout à fait en adéquation avec la vision des entreprises du SPTF. Le Guide des terrassements routiers (GTR) et le Guide de traitement des sols (GTS), respectivement révisé et en cours de révision, proposent de nombreuses solutions de traitement de l'arase et de la couche de forme, permettant d'augmenter les portances des plateformes supports dans l'objectif d'optimiser le dimensionnement global (terrassements et chaussées) des structures et de réduire à la fois le coût de l'infrastructure et les impacts sur l'environnement.

Plateforme support et chaussée

Introduction

Pour construire des infrastructures de transport ou pour aménager tous types de zones d'activité et de logement, il est nécessaire au préalable de concevoir et de réaliser une plateforme support de capacité portante minimale, permettant de satisfaire des caractéristiques suffisantes à court et à long terme :

Exigences à court terme

Elles sont indispensables à la réalisation des couches de chaussée : traficabilité, portance, nivellement, protection du sol support vis-à-vis des intempéries.

Exigences à long terme

Elles sont nécessaires au dimensionnement de la chaussée : homogénéisation de la portance et pérennité, drainage et protection contre le gel le cas échéant (empêcher le front de gel d'atteindre le sol support).

La réalisation de la plateforme support, qui fait partie du domaine des terrassements routiers (*cf.* figure 1), consiste à effectuer des travaux de nivellement (déblais, remblais), à améliorer ou à stabiliser l'arase des terrassements et à exécuter, le cas échéant, une couche structurelle qu'on désigne par le terme « couche de forme » afin d'obtenir une plateforme support de portance minimale PFi.

Typologie des terrassements routiers et terminologie.

La classe de la plateforme PFi se détermine à partir de :

- L'appréciation du comportement à long terme de la PST, défini par la classe d'arase ARi (*cf.* tableau 1) ;
- La nature, l'épaisseur et les caractéristiques de la couche de forme retenue.

Cinq classes de plateforme sont considérées : PF1, PF2, PF2qs, PF3 et PF4 (*cf.* tableau 2).

Classes de portance à long terme au niveau de l'arase de terrassement (surface de la PST).

NOTA 1.

La classe AR0 n'est pas acceptable. Elle correspond à des sols classés selon le nouveau GTR 2024 (ancien GTR 2000) F(A), S(B2), G(B4), I1(B5), I2(B6) et VC2(C1) très humides (zones marécageuses ou inondables). Il est indispensable soit de purger les mauvais sols et de les remplacer par des matériaux insensibles à l'eau, soit d'éliminer l'eau par drainage ou rabattement de nappe. L'objectif étant d'aboutir au minimum à la classe AR1.

NOTA 2.

La couche de forme n'est pas nécessaire si l'arase présente les caractéristiques suffisantes à court et à long terme (AR3 et AR4). Une couche de fin réglage est alors recommandée.

Classification de la portance des plateformes supports de chaussée.

NOTA 3.

Compte tenu de l'incidence du niveau de portance de la plateforme support de chaussée sur le comportement des chaussées à long terme, la réalisation d'une plateforme PF1 est déconseillée pour des structures comportant des couches d'assise en matériaux liés (grave-bitume, grave-ciment, grave-LHR, béton compacté routier, etc.). Pour des structures à assise granulaire, une portance minimale de 35 MPa est recommandée (GTR, 2024, GTS, 2000, Manuel de dimensionnement des chaussées neuves à faible trafic, Cerema/IDRRIM, 2020).

Influence de la qualité de la plateforme support sur la structure de chaussée

Le niveau de portance PFi est un paramètre d'entrée du dimensionnement de la structure de chaussée. Plus le niveau de portance de la plateforme PFi est élevé, moins la structure de chaussée sera épaisse pour un matériau donné. Et plus les caractéristiques des couches d'assise de la chaussée (couche de fondation, couche de base), en matière de compacité et de performances mécaniques, seront élevées par suite de l'effet d'enclume apporté par la plateforme support lors du compactage (cf. figure 2). Cela entraîne une meilleure qualité d'exécution des couches d'assise – synonyme d'une meilleure tenue de la structure de chaussée sous l'effet des sollicitations du trafic et des conditions climatiques (pluie, gel) – et, par conséquent, une plus grande durabilité.

Coupe en travers-type d'une structure routière et terminologie.

NOTA 4.

Dans le cas d'une structure à couche de forme traitée aux liants hydrauliques, il est conseillé de viser l'objectif PF3 au minimum et de tendre vers PF4, pour lesquels le dimensionnement des chaussées est optimisé.

Dans le cas d'une structure à couche de forme granulaire, on dépasse difficilement le niveau de portance PF2qs, ce qui va limiter l'optimisation du dimensionnement des chaussées.

Il est donc souvent pertinent de chercher à maximiser le niveau de portance de la plateforme support soit en cherchant à améliorer celui de l'arase, soit en cherchant à optimiser la couche de forme, soit en combinant les deux solutions précitées.

Stratégie adoptée pour la conception des plateformes supports

Les plateformes supports de chaussée sont conçues en prenant en compte un ensemble de facteurs environnementaux et économiques liés au contexte du projet (durabilité de l'ouvrage, disponibilité et coût des ressources granulaires, stratégie d'aménagement de la structure de chaussée – progressive ou totale –, distance d'approvisionnement des liants, etc.).

Pourquoi et comment améliorer le niveau de portance de l'arase ?

Le recours au traitement au liant hydraulique, éventuellement associé à un prétraitement à la chaux, est une pratique courante dans le cadre de travaux de terrassement. Il est même prépondérant, dès que l'on a affaire à des sols fins et argileux. Les objectifs recherchés sont :

• L'accroissement temporaire de la portance à court terme, permettant, d'une part, la traficabilité des sols plastiques détrempés et, d'autre part, la bonne réalisation des remblais.

On recherche ici une portance minimale que l'on caractérise par des essais d'indice portant immédiat (IPI ≥ 10) et par le California Bearing Ratio (CBR), traditionnellement mesuré sur la fraction 0/20 mm, après 4 jours d'imbibition, pour lequel on exige : CBR (4 j) ≥ IPI.

Satisfaire à cette condition constitue une garantie de tenue à l'eau correcte du sol traité formant la PST.

• L'amélioration des caractéristiques géotechniques du sol afin de :

- Augmenter la portance de la PST avec des effets bénéfiques pour la mise en œuvre de la couche de forme (ou de fondation) et pour la portance de la plateforme ;
- Réduire la perméabilité ou la sensibilité à l'eau du sol, ce qui aura pour conséquence :
> La diminution, voire l'annulation, de la sensibilité au gel de la PST ;
> La protection des parties basses de remblai en zones inondables.

On recherche ici une portance minimale de l'arase à long terme, que l'on caractérise par l'essai à la plaque ou à la dynaplaque (EV2 ≥ 35 MPa) ou bien que l'on déduit de mesures de déflexion.

Il existe deux techniques d'amélioration de l'arase :

La technique d'amélioration du sol à la chaux :

Elle nécessite l'utilisation de chaux vive, dont la fabrication représente un impact certes élevé sur les plans économique et environnemental, mais ce liant est utilisé en dosage faible (1 à 2 %) et les quantités à fabriquer et à transporter sont faibles.

L'arase traitée à la chaux vive permet d'améliorer la portance de certains types de sols et d'atteindre les exigences requises à court et à long terme, mais sous certaines conditions (sols argileux, sols humides, épaisseur élevée).

La technique d'amélioration du sol au LHR :

Elle nécessite l'utilisation d'un liant hydraulique spécifique, dont la fabrication représente un impact certes élevé sur les plans économique et environnemental, mais ce liant est utilisé à faible dosage (2 à 3 %) et les quantités à fabriquer et à transporter sont faibles.

L'arase traitée aux LHR améliore rapidement la portance du sol naturel et permet d'atteindre un niveau de portance, à court et à long terme, élevé AR2 ou AR3.

Ainsi, en fonction du contexte de chaque projet (localisation du chantier, dosage du liant et distance usine-chantier), l'une des deux techniques peut s'imposer sur le plan économique ou sur le plan environnemental.

NOTA 5.

Depuis peu, l'on assiste à une évolution technique dans les projets de terrassement. Au-delà des objectifs d'amélioration, on cherche à conférer à l'arase les performances mécaniques les plus élevées possibles afin d'optimiser la couche de forme et de permettre à la plateforme support d'atteindre un niveau de portance maximal PF3 ou PF4.

Pourquoi et comment optimiser la couche de forme ?

Le recours à la couche de forme, dans les projets routiers, est courant. Les objectifs recherchés sont :

• D'augmenter la portance de la plateforme support avec des effets bénéfiques pour la mise en œuvre de la couche de fondation ;

• De réduire la perméabilité ou la sensibilité à l'eau du sol, ce qui aura pour conséquence :

- La diminution, voire l'annulation, de la sensibilité au gel de la PST ;
- La protection des parties basses de remblai en zones inondables ;
- L'amélioration de la résilience des infrastructures face au changement climatique (meilleure résistance à la sécheresse et aux inondations).

On recherche ici une portance minimale de la plateforme support, que l'on caractérise par l'essai à la plaque ou à la dynaplaque (EV2 ≥ 50 MPa) ou bien que l'on déduit de mesures de déflexion.

Il existe trois techniques de construction des couches de forme :

La technique des emprunts granulaires

Certes, l'extraction et la fabrication des granulats ont un impact modéré en matière économique et d'émissions de gaz à effet de serre (GES, exprimé en « empreinte carbone »), mais la technique des emprunts granulaires peut être handicapée par les impacts générés :

- Par la consommation importante de ressources naturelles non renouvelables ;
- Par la production de déchets ou de matériaux à stocker ou à valoriser ;
- Par le transport (les granulats sont un produit pondéreux), dès que la distance carrière-chantier dépasse un certain seuil ;
- Par le transport des excédents de terrassements du chantier à l'installation de stockage des déchets inertes.
- Par la détérioration prématurée des axes routiers empruntés pour accéder au chantier dans le cadre des nombreux transports de matériaux.

La couche de forme granulaire peut améliorer la portance d'un sol support naturel. La portance maximale que l'on peut obtenir est généralement PF2 (50 ≤ EV2 ≤ 80 MPa), voire PF2qs (80 ≤ EV2 ≤ 120 MPa), rarement PF3 (120 ≤ EV2 ≤ 200 MPa).

De plus, la raréfaction des ressources granulaires dans plusieurs régions et la prise de conscience collective en faveur de la préservation des ressources naturelles rendent de plus en plus difficile l'exploitation et l'utilisation des emprunts granulaires dans les travaux de terrassements.

La technique de traitement des sols en place à la chaux

Certes, la fabrication de la chaux a un impact élevé sur les plans économique et environnemental, mais ce liant est utilisé en dosage relativement faible (de l'ordre de 1 à 3 %) et les quantités à fabriquer et à transporter sont faibles, comparées à celles des emprunts granulaires.

La couche de forme traitée à la chaux améliore la portance de certains types de sols et permet d'atteindre un niveau de portance généralement de l'ordre de PF2 à PF2qs et, sous certaines conditions (sols argileux, dosage élevé en chaux supérieur à 5 %, forte épaisseur), une portance maximale de niveau PF3 (120 ≤ EV2 ≤ 200 MPa). L'effet sur la portance peut être relativement long et doit être compatible avec le planning du chantier.

La technique de traitement des sols en place aux liants hydrauliques

Certes, la fabrication du liant hydraulique a un impact élevé sur les plans économique et environnemental, mais ce liant est utilisé à faible dosage (de 4 à 6 %) et les quantités à fabriquer et à transporter sont faibles, comparées à celles des emprunts granulaires.

La couche de forme traitée aux liants hydrauliques améliore la portance du sol naturel et permet surtout d'atteindre un niveau de portance très élevé, généralement PF3 et potentiellement PF4 (EV2 ≥ 200 MPa : maximum de l'échelle des portances de plateforme). L'obtention d'une portance très élevée en un temps limité constitue un atout dans le planning des travaux.

Ainsi, en fonction du contexte de chaque projet (localisation du chantier, disponibilité des ressources ou non, distance carrière-chantier, distance chantier-décharge ou plateforme de recyclage, dosage du liant et distance usine-chantier), l'une des trois techniques peut s'imposer sur le plan économique ou sur le plan environnemental.

Témoignages

Que pensez-vous du traitement des sols aux liants hydrauliques en général ? Intérêts et limites



Emmanuel Delaval

Cerema Hauts-de-France

Les principaux intérêts du traitement des sols sont de :

• Préserver les ressources granulaires ;
• Obtenir des plateformes supports de bonne qualité, meilleures que celles réalisées avec des matériaux granulaires et d'un niveau de portance élevé (supérieur ou égal à PF3), ce qui engendre deux avantages :
- Un effet d'enclume, bénéfique pour le compactage des couches d'assise ;
- La réduction de l'épaisseur de l'assise et, donc, la diminution de la consommation des matériaux nobles.



Thomas Lenoir & Thierry Sedran

Université Gustave-Eiffel (UGE)

L'intérêt du traitement des sols aux liants hydrauliques est :

• Économique ;
• Environnemental :
- Limitation de l'utilisation de granulats (protection des ressources) ;
- Limitation de la circulation de camions transportant des granulats à l'extérieur des chantiers (d'où moins de nuisances aux riverains).



Fabienne Dermenonville

Responsable de l'ingénierie des matériaux Grands ouvrages et géotechnique | Infrastructures et plateformes Egis

Jean-Philippe Pinchart

Directeur de projet Egis

Le traitement des sols est, à notre sens, un vrai savoir-faire français ! En effet, en tant que concepteurs, nous avons l'habitude, depuis de nombreuses années, de prendre en compte le traitement des sols aussi bien pour optimiser le mouvement des terres et réduire le volume des matériaux mis en dépôt définitif que pour optimiser la conception du complexe PST-couche de forme-chaussées. Cette démarche, qui nous paraît évidente pour les grands projets d'infrastructures en France, est encore loin d'être systématique à l'étranger.



Valéry Ferber

Bureau d'études Talnia

Les techniques de traitement des sols à la chaux ou aux liants hydrauliques constituent le moyen de pouvoir utiliser quasiment n'importe quel matériau déjà présent dans l'emprise du chantier. Aucun autre métier de la construction ne dispose d'une technique aussi simple et ayant des effets économiques et environnementaux aussi efficaces.

Nous avons la chance, en France, d'avoir su capitaliser les connaissances théoriques et pratiques sur ces techniques afin d'en massifier l'usage. Pour autant, il y a encore un potentiel de déploiement très important, car toutes les régions françaises n'en sont pas au même stade d'utilisation. Les régions les plus riches en granulats de carrière, en particulier, ont mis plus de temps à le faire, car le bénéfice économique du traitement y était historiquement moins fort. Mais la contrainte croissante sur l'évacuation des déchets va immanquablement les conduire à en développer l'usage.



Sébastien Hervé

Responsable du groupe Géotechnique, enrochement et matériaux
Cerema Angers

La valorisation des matériaux en place diminue la production de sols excédentaires, limite l'apport de matériaux nobles (préservation des ressources granulaires), réduit les transports (économie d'énergie et réduction des impacts) et préserve les infrastructures existantes. C'est une technique maîtrisée, fiable, codifiée, connue et utilisée en France depuis plus de cinquante ans, tout d'abord dans les régions dépourvues de ressources granulaires, puis dans les grands projets d'infrastructures (réseau routier structurant, plates-formes aéroportuaires et lignes ferroviaires) en vue d'optimiser les mouvements de terre.



Gilles Lacassy

Responsable du service de l'ingénierie pour l'exploitation et l'entretien de la route
DIR Atlantique

L'intérêt principal du traitement des sols est de pouvoir valoriser les sols en place à l'aide d'un liant hydraulique et de les utiliser dans la construction de l'ouvrage routier au lieu de matériaux granulaires. Cela permet donc de :
• Préserver les ressources granulaires non renouvelables ;
• Diminuer fortement le transport et réduire la consommation des ressources énergétiques ;
• Supprimer le transport des sols excédentaires et leur mise en dépôt en optimisant la réutilisation des sols ;
• Obtenir des niveaux élevés de portance (≥ PF3).

Dimensionnement des couches de forme

Épaisseur fixée empiriquement par le GTR

Le GTR préconise l'épaisseur de couche de forme nécessaire pour supporter, par tous les temps, la circulation du chantier, permettre une mise en œuvre correcte des couches de chaussée et garantir à long terme la portance minimale de la plateforme. Pour une classe de sol donnée, un état hydrique et des conditions météorologiques définies, le GTR précise les conditions d'utilisation permettant d'obtenir une classe de plateforme PFi à partir d'une arase de terrassements ARj. Ces conditions sont définies par rapport au code GWTS :

G : action sur la granularité ;
W : actions sur l'état hydrique ;
T : traitement ;
S : protection superficielle.

En pratique, si l'arase de terrassements est de classe AR3 ou AR4, aucune couche de forme n'est nécessaire. Simplement, si le nivellement de l'arase n'est pas totalement satisfaisant, on procède au fin réglage en appliquant une couche de matériau de quelques centimètres. L'exercice se résume donc au passage de AR1 ou AR2 à PF2, PF3 ou PF4. Pour cela, les épaisseurs « empiriques » préconisées par le GTR 2024 sont :

- Entre 25 et 55 cm, selon le GTS (couramment 35 cm), pour les couches de forme traitées avec un liant hydraulique,

éventuellement associé à la chaux ;
- Entre 45 et 70 cm (couramment 50 cm) pour les couches de forme traitées uniquement à la chaux (portance limitée à PF3, sous réserve) ;
- Entre 25 et 90 cm (couramment de 50 à 70 cm) pour les couches de forme granulaires, en fonction de la nature du matériau utilisé et de la qualité de la PST (portance limitée à PF2qs, PF3 sous réserve et justification).

Réduction de l'épaisseur à performances équivalentes. À gauche : structure de chaussée avec couche de forme non traitée. À droite : structure de chaussée avec couche de forme traitée aux LHR.

En partant d'une hypothèse de classe d'arase ARi (AR1, AR2) et pour atteindre un niveau de portance PFi (PF2, PF2qs, PF3 et PF4), le tableau 2 donne le dimensionnement d'une couche de forme en fonction de la nature du matériau utilisé (emprunts granulaires, traitement des sols à la chaux, traitement des sols aux liants hydrauliques). Il indique clairement que les couches de forme traitées aux liants hydrauliques sont moins épaisses à performances égales et, de plus, elles sont les seules à pouvoir conférer à la plateforme support un niveau de portance élevé PF4.

Dimensionnement des couches de forme. Épaisseurs des couches de forme établies à partir des règles d'utilisation des matériaux traditionnels en couche de forme, édictées par le GTR et le GTS.

Retours d'expérience

Avez-vous utilisé le traitement des sols aux LHR dans des projets d'infrastructures ?



Emmanuel Delaval

Cerema Hauts-de-France

Dans la zone d'activité du Cerema Hauts-de-France, nous avons utilisé la technique de traitement des sols aux liants hydrauliques pour réaliser les plateformes supports de nombreux projets routiers. Nous avons préconisé une plateforme PF3 pour les projets de voies du réseau structurant VRS et, au cas par cas, pour les projets du réseau non structurant. Le retour d'expérience est positif et je suis donc favorable à la valorisation des sols en place par traitement aux liants hydrauliques. Toutefois, je suis plus mesuré quant à la préconisation de plateforme support PF4, car celle-ci :

• Exige un processus de suivi de la qualité plus important que les PF3 ;
• Nécessite une vigilance accrue quant à l'optimisation des couches d'assise (minceur des couches et qualité du matériau) et un soin particulier au niveau des couches d'accrochage, à l'interface entre l'assise et la couche traitée.



Dominique Phelippeau

Ancien chef de service des marchés routiers et actuellement chargé de projets Mobilités cyclables
Conseil départemental du Morbihan

Dans le département du Morbihan, les sols en place sont globalement de bonne qualité et possèdent naturellement de bonnes portances.

Pour les couches de forme, il y a une concurrence forte de nombreuses carrières locales et l'intérêt de l'exigence de classes de portance est limité, vu le peu de linéaire de sections à fort trafic par rapport aux 4 000 km du réseau départemental.

Lorsqu'un traitement d'arase est possible, les entreprises locales ne sont pas forcément spécialistes et la plupart disposent de carrières.

Néanmoins, l'évolution réglementaire (loi Climat et résilience, loi AGEC, loi Industrie verte) et la volonté d'utiliser des produits « bas carbone », de préserver les ressources naturelles et, plus globalement, de tenir compte de l'impact environnemental des chantiers conduisent les maîtres d'ouvrage à modifier leurs pratiques et à s'orienter vers les techniques de traitement des sols en place aux liants hydrauliques.



Fabienne Dermenonville

Responsable de l'ingénierie des matériaux Grands ouvrages et géotechnique | Infrastructures et plateformes Egis

Jean-Philippe Pinchart

Directeur de projet Egis

Les chantiers où il est visé un objectif de plateforme PF4 restent encore assez rares. Beaucoup de conditions doivent en effet être réunies : un gisement bien connu et homogène, des études exhaustives dès la phase de conception et jusqu'à la phase de réalisation, où de nombreuses planches d'essais peuvent s'avérer nécessaires, ainsi qu'un process de réalisation et de contrôle parfaitement maîtrisé par l'entreprise de travaux.

Par contre, les chantiers où il est demandé un objectif de plateforme PF3 sont beaucoup plus nombreux, la plupart étant réalisés sans difficultés particulières.



Valéry Ferber

Bureau d'études Talnia

Il me paraît intéressant de rappeler que la pratique actuelle est relativement homogène dans la très grande majorité des cas et vise à obtenir, pour les voies du réseau structurant, une plateforme de classe PF3.

La classe PF4, qui est théoriquement prévue dans le Guide de traitement des sols, n'est que très rarement utilisée.

J'avoue que je n'ai jamais réussi à en comprendre complètement la raison, mais je pense que cela résulte à la fois d'une sous-estimation de la qualité réelle des couches de forme traitées et d'une crainte intuitive de la part des maîtres d'œuvre de voir trop se réduire les épaisseurs des couches d'assise.

Pour les voies du réseau non structurant, c'est une tout autre histoire. Dans mon expérience de direction technique, ce qui m'a le plus frappé, c'est la difficulté, pour certains maîtres d'ouvrage, d'ouvrir leurs marchés aux variantes. Ils se privent ainsi trop souvent d'économies importantes. C'est d'ailleurs l'une des clés qui m'a conduit à créer la société Talnia, dont la vocation est d'apporter de nouveaux outils de décision.



Sébastien Hervé

Responsable du groupe Géotechnique, enrochement et matériaux
Cerema Angers

Pour les projets du réseau structurant, l'objectif visé pour la plateforme est en général PF3 et, dans une moindre mesure, PF4 (contournement d'Angers, contournement ouest de Strasbourg, RN14 entre Paris-Pontoise-Rouen, etc.).

La classe de plateforme PF4 est en effet possible, à condition de traiter l'arase et la couche de forme et de faire réaliser les travaux par une entreprise ayant la maîtrise technique globale (depuis les études jusqu'à la réalisation avec un matériel adapté et un plan précis d'assurance de la qualité).

Pour les autres projets, on n'est pas si exigeant en matière de performances des plateformes. Dans les appels d'offres de terrassements, on se contente d'un objectif PF2qs, qui permet de garder une certaine compétition entre les solutions granulaires et le traitement. En d'autres termes, en fonction des ressources granulaires disponibles, on fixe les objectifs de portance de la plateforme support. Les projets ne sont donc pas optimisés globalement. En outre, il existe un frein à l'optimisation globale des structures, c'est l'existence de deux lots d'appel d'offres : un pour les terrassements et un pour la chaussée.



Gilles Lacassy

Responsable du service de l'ingénierie pour l'exploitation et l'entretien de la route
DIR Atlantique

La technique de traitement des sols aux liants hydrauliques est utilisée pour réaliser les plateformes supports de nombreux projets routiers sur le réseau routier national de la DIR Atlantique.

En effet, nous préconisons, pour tout projet où le trafic de poids lourds escompté est élevé, une plateforme support PF3 : systématiquement, pour les projets de voies du réseau structurant VRS au trafic cumulé supérieur à TC5 et, au cas par cas, pour les projets de voies du réseau structurant VRS au trafic inférieur. Nous ne sommes pas très favorables à la préconisation de plateforme support PF4, car :
• Le gain escompté ne justifie pas une transition de PF3 à PF4 ;
• Le passage de PF3 à PF4 se traduit par une assise de plus faible épaisseur, situation qui n'est pas en phase avec la politique de la DIR Atlantique pour l'entretien ultérieur de la chaussée.

Tendances et évolution technique dans la conception des plateformes supports

Dans la conception et le dimensionnement classiques, on n'a pas cherché à tirer profit du potentiel de performance des plateformes supports afin de réduire l'utilisation des matériaux nobles dans l'assise de chaussée. La plupart des projets étaient conçus avec une plateforme support de classe PF2 ou PF2qs. Les couches d'assise étaient alors dimensionnées pour supporter les sollicitations du trafic et les conditions climatiques.

Pour des raisons liées à l'environnement et, en particulier, pour épargner les ressources naturelles et réduire les consommations énergétiques, la tendance est de penser la structure de chaussée dans sa globalité et de tenter d'optimiser le dimensionnement de la structure en augmentant les performances des plateformes supports (en visant PF3 ou PF4). Le but est de réduire l'apport des matériaux nobles dans l'assise et de générer des avantages économiques et environnementaux sur l'ensemble de la structure. En outre, le retour d'expérience montre que plus le niveau de portance de la plateforme est élevé, plus les caractéristiques des couches d'assise de la chaussée (couche de fondation, couche de base), en matière de compacité et de performances mécaniques, sont élevées par suite de l'effet d'enclume apporté par la plateforme support lors du compactage. Cela entraîne une meilleure qualité d'exécution des couches d'assise – synonyme d'une meilleure tenue de la structure de chaussée sous l'effet des sollicitations du trafic et des conditions climatiques (pluie, gel) – et, par conséquent, une plus grande durabilité.

On est en train de passer d'une conception où la prépondérance est donnée à l'assise de chaussée (structure de chaussée en

matériaux élaborés plus épaisse) à une conception globale de la chaussée (PST + couche de forme + couches d'assise de chaussées). Dans cette nouvelle vision, la prépondérance est donnée à la plateforme support et au traitement des sols en place avec un liant hydraulique (recherche d'une arase de bonne qualité AR2 et d'une couche de forme en sol traité d'épaisseur adéquate, permettant de conférer à la plateforme support un niveau de portance élevé PF3 ou PF4).

Effet du traitement de la PST sur le dimensionnement

Le module de la PST influe directement sur le niveau de portance non seulement de l'arase de terrassements, mais aussi de la plateforme supportant la chaussée. La réflexion concernant le dimensionnement de l'ouvrage doit donc démarrer dès le stade des terrassements. Un gain de performance mécanique à long terme pour la PST ne représente pas nécessairement un supplément de coût important, mais il peut amener une économie substantielle pour les couches de forme ou d'assise. Un apport de liant ou un dosage de liant un peu plus élevé peut ainsi s'avérer globalement bénéfique pour le projet sur les plans économique et environnemental.

Cette nouvelle approche va entraîner :

• Une réduction de l'épaisseur de la chaussée et de la consommation des matériaux élaborés, contribuant ainsi à la préservation des ressources naturelles ;
• Une réduction significative des déchets générés par le chantier et donc des éventuels besoins de stockage ou de valorisation ;
• Une réduction de la consommation énergétique à deux niveaux :
- Par la réduction des besoins de fabrication des matériaux nobles (moins de matériaux nobles, moins d'énergie de fabrication) ;
- Par la réduction des transports de matériaux (fabriquer les matériaux sur place en traitant les sols aux liants hydrauliques entraîne une réduction importante de la consommation de fioul).
• Une meilleure qualité d'exécution des couches d'assise et, par conséquent, une plus grande durabilité de la chaussée ;
• Suivant le contexte, une réduction des impacts environnementaux, tels que les émissions de GES, la consommation d'eau, l'acidification et l'eutrophisation (cf. exemple de simulation environnementale ci-après).

Choix d'une épaisseur différente : règles de surclassement de portance de la plateforme

D'autres considérations que celles conduisant aux épaisseurs ci-dessus peuvent jouer. L'optimisation techno-économique globale du projet peut amener à retenir une épaisseur de couche de forme différente de l'épaisseur proposée dans le GTR. Assez rarement, la recherche d'économies peut faire choisir une épaisseur moindre (par exemple, si l'on dispose de matériaux de chaussée peu coûteux, dont il est avantageux d'augmenter l'épaisseur). Toutefois, le cas le plus fréquent est celui où l'on veut augmenter la portance de la plateforme afin de gagner sur le dimensionnement global de la chaussée, mais aussi, par ricochet, sur les plans économique et environnemental.

L'épaisseur de couche de forme nécessaire pour un surclassement de portance de la plateforme par rapport aux indications du GTR se calcule ainsi :

• en examinant l'incidence de l'épaisseur et des propriétés de la couche de forme sur les contraintes et les déformations dans les couches de chaussée ;
• en vérifiant que les contraintes de traction restent admissibles dans la couche de forme en sol traité.

Les effets d'une variation d'épaisseur de la couche de forme dépendent des caractéristiques propres de la chaussée. Néanmoins, par souci de simplification, des règles de surclassement identiques sont préconisées pour les différents types de chaussées : souples (granulaires ou bitumineuses), semi-rigides ou mixtes. Les épaisseurs indiquées dans les figures 3a et 3b ci-après découlent de la combinaison de calculs de mécanique des chaussées et de constatations sur les performances en place.

Influence de la qualité de la couche de forme traitée sur le dimensionnement de l'assise confectionnée en grave non traitée et en grave-bitume de classe 3. L'augmentation de la portance de la couche de forme entraîne une réduction significative de l'épaisseur de l'assise.

Influence de la qualité de la couche de forme traitée sur le dimensionnement de l'assise confectionnée en grave-ciment et en sol traité aux LHR. L'augmentation de la portance de la couche de forme entraîne une réduction significative de l'épaisseur de l'assise.

ZAC d'Ozans, Indre (44). Le groupement Sétec (mandataire et pilote) / Eurovia a réalisé une plateforme support de haute qualité PF3 en mettant en œuvre une couche de forme traitée au liant LV-TS 03 de Vicat (cf. Routes n° 125). ©Cimbéton

Retours d'expérience

Actuellement, pensez-vous que les structures de chaussée sont optimisées sur les plans technique, économique et environnemental ?



Dominique Phelippeau

Ancien chef de service des marchés routiers et actuellement chargé de projets Mobilités cyclables
Conseil départemental du Morbihan

Les structures de chaussée ne sont pas du tout optimisées sur les plans technique, économique et environnemental. Si la doctrine technique et la volonté de « bien faire » sont présentes, les compétences techniques spécifiques, tant du côté des entreprises que de l'administration, font défaut.

Au niveau des collectivités, nous sommes contraints de modifier nos pratiques et de faire appel à la technique de traitement des sols, mais nous manquons cruellement de compétences. Il faut donc s'informer et se former. Cela doit se faire par :

• La formation à tous les niveaux (administrations, entreprises, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, bureaux d'études, etc.) ;
• Les journées techniques spécifiques, comme celles que Cimbéton organise, en mettant en avant tous ces paramètres : les aspects techniques, économiques, environnementaux, sociaux et, surtout, l'aspect qualitatif par le cycle de vie de la chaussée globale.



Fabienne Dermenonville

Responsable de l'ingénierie des matériaux Grands ouvrages et géotechnique | Infrastructures et plateformes Egis

Jean-Philippe Pinchart

Directeur de projet Egis

Le choix de l'objectif de plateforme doit être dicté par un juste équilibre entre les risques liés à la nature des matériaux traités (affinité au traitement, homogénéité du gisement), les conditions de réalisation, la maîtrise des processus par les entreprises de travaux et les économies réalisées sur les couches de chaussée.

Lorsque toutes les conditions sont réunies, il est intéressant de viser l'objectif de plateforme le plus élevé possible.

En effet, d'un point de vue économique, grossièrement, on peut estimer que « plus c'est haut, plus c'est cher ! » : les couches de chaussée sont en général plus onéreuses que les couches de forme, qui sont elles-mêmes plus onéreuses que les PST, qui sont elles-mêmes plus onéreuses que les remblais courants… On aura donc tout intérêt à améliorer les couches les plus profondes afin d'optimiser l'épaisseur des couches les plus hautes.



Emmanuel Delaval

Cerema Hauts-de-France

Le traitement aux liants hydrauliques est une solution couramment étudiée et appliquée sur les projets à fort trafic.

La démarche consiste à choisir la solution qui optimise le lot « terrassements ». On compare alors la solution « traitement » avec la solution granulaire sur les plans technique, économique et environnemental.

En revanche, le traitement des sols aux liants hydrauliques est moins envisagé ou préconisé sur les réseaux non structurants. Parmi les raisons, il y a non seulement la pertinence techno-économique pour les trafics faibles, mais aussi une compréhension et une acceptation techniques faibles dans les collectivités. Cela se retrouve aussi au niveau des entreprises locales. Il y a donc un réel besoin, une nécessité d'informer et de former, voire de reformer.

De mon point de vue, les projets doivent être étudiés dans l'optique d'une optimisation technique, économique et environnementale sur l'ensemble de la durée de vie de l'infrastructure, en prenant en compte l'entretien et le recyclage en fin de vie. Cette démarche doit être menée en comparant la solution granulaire et la solution traitée et l'analyse doit être conduite sur la structure globale (terrassements + assise). De plus, on constate une baisse continue des indices de gel et le traitement peut être une réponse pour valider une structure qui ne serait pas acceptée avec une couche de forme granulaire.

Entrepôt logistique Illies-Salomé, Hauts-de-France (59). Colas a réalisé une plateforme support de haute qualité PF3 en mettant en œuvre une couche de forme traitée au liant ROC VDS d'EQIOM (cf. Routes info #32). ©Colas/SAGL

Aire de repos de La Grolle sur la RN10 (16). Ecostab a réalisé une plateforme support de haute qualité PF3 en améliorant la PST à la chaux et en confectionnant une couche de forme traitée au liant Ligex M4 (Bussac) de Heidelberg Materials (cf. Routes info #23/24). ©D.Daguzan/Ecostab

Impacts du traitement des sols aux liants hydrauliques sur la durabilité des structures de chaussée

La pérennité d'une structure de chaussée est fortement dépendante de la qualité du sol support. En effet, le vieillissement prématuré des voies de circulation est fréquemment lié à une détérioration des propriétés de la structure sous-jacente. C'est généralement l'eau qui est à l'origine des désordres, car elle engendre différents problèmes :

> Diminution de la portance de la plateforme par infiltration ;
> Érosion de la structure ;
> Phénomènes de retrait-gonflement des sols…

Érosion régressive en talus de remblai qui attaque les structures de chaussée (sur l'A20). ©Yasmina Boussafir

La valorisation des sols en place par traitement aux liants hydrauliques, en vue d'obtenir une plateforme support performante, est un élément favorable à la durabilité de la structure de chaussée, car :

• À court terme :
- Le traitement des sols entraîne une meilleure qualité d'exécution des couches d'assise en matière de compacité et de performances mécaniques, par suite de l'effet d'enclume apporté par la plateforme support ;
- Le traitement des sols apporte une protection de la PST contre les sollicitations climatiques (pluie et gel).

• À long terme :
- Le traitement des sols leur confère une résistance à l'eau et, donc, une forte résistance à l'érosion ;
- Le traitement des sols améliore la durabilité de la chaussée par suite de la montée en rigidité de la plateforme support, qui, de fait, sera moins sensible aux sollicitations mécaniques et physiques.

Déviation et mise à 2 x 2 voies de la RN141 entre Roumazières-Loubert et Exideuil-sur-Vienne (16). Guintoli/NGE a réalisé une plateforme support de haute qualité PF4 en renforçant la PST au liant Rolac Premier ECOPlanet et en confectionnant une couche de forme traitée au même liant Rolac Premier ECOPlanet de Lafarge (cf. Routes info #39). ©Guintoli/NGE

RCEA/A79 entre Montmarault (03) et Digoin (71). Eiffage Génie civil a réalisé une plateforme de haute qualité PF4 en améliorant la PST inférieure à la chaux, en renforçant la PST supérieure au liant Ligex M4 et en confectionnant une couche de forme traitée au même liant Ligex M4 de Heidelberg Materials (cf. Routes info #18). ©Eiffage

Retours d'expérience

La contribution des plateformes PF3/PF4 à la durabilité et à la résilience des structures de chaussée face aux changements climatiques



Sébastien Hervé

Responsable du groupe Géotechnique, enrochement et matériaux
Cerema Angers

Le traitement de l'arase permet de limiter les effets du phénomène de retrait-gonflement. En plus, le traitement de l'arase et de la couche de forme va aussi apporter une amélioration de la tenue de la structure vis-à-vis des inondations.

En revanche, le traitement seul ne permet pas de régler le problème de la sécheresse, car la profondeur concernée (2 m) dépasse largement l'épaisseur de la couche traitée. Il faut compléter le traitement par la réalisation d'écrans étanches sur les accotements.

Sensible, à titre personnel et professionnel, aux problèmes de préservation des ressources et d'adaptation des infrastructures au changement climatique, j'estime que le traitement des matériaux aux liants hydrauliques est une excellente solution.



Gilles Lacassy

Responsable du service de l'ingénierie pour l'exploitation et l'entretien de la route
DIR Atlantique

Compte tenu du retour d'expérience sur le réseau de la DIR Atlantique, les avantages d'une plateforme PF3 sont nombreux. Pour le court et moyen terme, on peut citer :

• Meilleur réglage de la couche de forme ;
• Meilleure qualité d'exécution des couches d'assise en matière de compacité et de performances mécaniques, par suite de l'effet d'enclume apporté par la plateforme support PF3 ;
• Protection renforcée de l'arase des terrassements ;
• Excellente tenue à l'érosion.

Pour le long terme, il s'agit de l'optimisation des performances du couple couche de forme-couches de chaussée, mais également d'une meilleure durabilité et résilience face aux effets du changement climatique.



Emmanuel Delaval

Cerema Hauts-de-France

Sur la zone d'action du Cerema Hauts-de-France, les retours d'expérience montrent que les plateformes PF3 réalisées avec des matériaux traités présentent de nombreux avantages :

• Meilleure qualité de réalisation des couches d'assise en raison d'une meilleure planéité, d'un meilleur compactage grâce au fameux effet d'enclume ;
• Sous réserve d'un respect des règles de l'art, une plus grande possibilité de combinaison des matériaux d'assises, de réduction des épaisseurs ;
• Protection renforcée de l'arase des terrassements.

À long terme, le traitement des sols aux LHR peut être une solution pour la stabilité des ouvrages et l'adaptation au changement climatique. Cependant, il manque encore de REX pour faire changer la doctrine sur ce sujet. Cette technique a déjà une longue histoire, mais elle peut encore évoluer : elle pourrait devenir une couche de la structure de la chaussée, se rendre perméable pour laisser passer les eaux souterraines, etc.



Fabienne Dermenonville

Responsable de l'ingénierie des matériaux Grands ouvrages et géotechnique | Infrastructures et plateformes Egis

Jean-Philippe Pinchart

Directeur de projet Egis

Nous avons un REX sur des réalisations réussies qui emploient des matériaux traités en zone inondable ou utilisés pour maîtriser les gonflements de certains types de matériaux. L'amélioration des plateformes au moyen de liants est une option a minima comparable aux solutions granulaires. D'après notre retour d'expérience, il est néanmoins difficile de conclure aujourd'hui de manière absolue quant à l'avantage d'une solution par rapport à une autre.



Valéry Ferber

Bureau d'études Talnia

Le traitement des sols aux liants hydrauliques réduit, voire élimine, durablement la sensibilité des sols aux principaux problèmes qu'une chaussée peut rencontrer lors de sa durée de vie : sensibilité à l'eau, au gel-dégel, au retrait-gonflement. Donc, cette technique va nécessairement dans le bon sens pour la durabilité des infrastructures en construction.

Mais le principal problème que rencontrent les collectivités aujourd'hui porte plutôt sur les routes du réseau secondaire existant. Et c'est dans le retraitement en place que les liants hydrauliques présentent des atouts sans égal, car ils permettent de les renforcer ou de les protéger.

Retours d'expérience

Cas de la durabilité et de la résistance à l'érosion



Ingénieure-chercheuse en terrassements et digues

Université Gustave-Eiffel (UGE), laboratoire Sols, roches et ouvrages géotechniques (SRO)

Lucile Saussaye

Cheffe du groupe DTerNC/AB Risques terrestres et nuisances environnementales
Cerema

Avec le changement climatique, on constate une modification des régimes de précipitations qui induit des phénomènes de crues plus violentes et intenses. Les remblais, les talus, les fondations et autres couches d'infrastructures, déjà susceptibles d'être sollicités par l'eau et sa vitesse d'écoulement, le seront encore plus fortement à l'avenir.

Dans le cadre des réflexions engagées pour améliorer la résilience climatique des infrastructures, les liants hydrauliques, même à faible dosage, peuvent être une voie d'amélioration significative des propriétés des sols naturels sensibles à l'érosion par l'eau. Les essais de laboratoire de type Hole Erosion Test (XP P94-065), Mobile Jet Erosion Test, et les essais d'émiettage ont été développés pour évaluer la vulnérabilité du matériau à ces phénomènes et qualifier ce que l'on appelle l'« érodabilité à l'eau ». Les matériaux sableux ou limoneux sont particulièrement érodables, car ils ont une très faible cohésion. L'apport de liant hydraulique permet d'améliorer rapidement et significativement cette résistance et diminue l'érodabilité, voire la supprime. Des essais réalisés à l'Université Gustave-Eiffel pour Cimbéton ont permis de montrer que le type de liant (durcissement normal ou rapide) ainsi que son dosage (dès 2 %) influent plus ou moins significativement sur les performances d'érosion aux différentes échéances testées.

Ces essais – même sans lien direct avec ceux nécessaires pour qualifier la performance des plateformes traitées aux liants hydrauliques – fournissent des résultats cohérents avec ceux permettant de valider des niveaux de portance supérieurs ou égaux à PF3, dans le sens où ils se présentent comme des indicateurs de durabilité pour les parties d'ouvrages sollicitées par l'eau.

Preuves à l'appui : simulation environnementale et économique

Nous avons évoqué l'intérêt technique, environnemental et économique des structures de chaussée intégrant des plateformes de niveau PF3 au minimum, via le traitement des sols en place aux liants hydrauliques et comparativement aux structures granulaires, limitées généralement à PF2/PF2qs. Nous avons voulu l'illustrer en réalisant une comparaison économique et environnementale fondée sur des hypothèses courantes entre :

• Structure avec couche de forme en GNT
et
• Structure avec arase et couche de forme en sol traité aux liants hydrauliques.

La méthodologie

Elle a été menée à l'aide des éco-comparateurs PERCEVAL, SEVE-TP et TALNIA-Voirie, qui fournissent des indicateurs équivalents ou complémentaires.

Sept indicateurs environnementaux et un indicateur économique ont été retenus.

Liste des indicateurs exprimés :

• L'épuisement des ressources, décomposé en :
- Ressources naturelles consommées en tonnes de granulats /1 000 m² ;
- Ressources naturelles consommées en éq. Sb x 10-6 (selon NF EN 15804).
• Impacts générés par le trafic PL lié au chantier (préservation du réseau routier et réduction de la gêne occasionnée aux riverains) :
- Trafic chantier en PL /1 000 m²
- Tonne.Kilomètre (tonnes transportées x nombre de km parcourus) ;
• Les déchets générés en tonnes/1 000 m² ;
• La consommation d'énergie en MJ ;
• Les émissions de GES en kg éq. CO_2/m² ;
• Le coût en €/m².

Pour les indicateurs suivants :

• Les ressources naturelles consommées en tonnes de granulats ;
• L'énergie consommée ;
• Le coût, le résultat indiqué est la moyenne des résultats obtenus sur deux éco-comparateurs sur trois.

Pour l'empreinte CO_2, elle a été déterminée avec les trois logiciels et la valeur présentée reflète la moyenne des résultats obtenus, qui présentaient individuellement moins de 20 % d'écart à la moyenne, conformément aux exigences de la norme NF EN 15-804.

Les hypothèses de calcul

Afin de comparer les deux techniques constructives sur le plan économique et sur le plan environnemental, une analyse a été menée avec les hypothèses suivantes :

• **Hypothèses relatives à la typologie de la structure :**

Le projet, objet de cette analyse, est une route ou plateforme industrielle avec un trafic T3 moyen de 200 PL/j/sens. La structure retenue est composée d'une structure « tout bitume » posée sur une plateforme support, constituée soit de matériaux granulaires en couche de forme sur une PST1/AR1, soit de matériaux traités aux LHR en couche de forme sur arase traitée afin d'obtenir une PST4/AR2.

> Structure de base : couche de forme en grave non traitée GNT 0/31,5, d'épaisseur 50 cm (en une couche), avec un objectif de portance PF2 ;
> Structure optimisée : couche de forme en sol traité avec un LHR, d'épaisseur 35 cm et de classe 4, avec un objectif de portance PF3.
• Durée de vie : 20 ans ;
• CAM 1 – Risque : 10 % ;
• Taux d'accroissement : 2 % ;
• Indice de gel de référence : 55 °C.jour.

Les structures à comparer ont été dimensionnées, conformément au guide *Conception et dimensionnement des structures de chaussée,* Sétra/LCPC, 1994, et à la norme NF P 98 086. Les structures retenues sont :

> Structure 1 : 6 cm BB / 17 cm GB4 / plateforme PF2 avec 50 cm de GNT ;
> Structure 2 : 6 cm BB / 13 cm GB4 / plateforme PF3 avec sol traité 5 % LHR, classe 4, d'épaisseur 35 cm sur arase traitée à 3 % LHR sur 35 cm.

Ces structures sont comparées uniquement à la construction, leurs séquences d'entretien ne différant pas du fait que l'assise est de même nature (bitumineuse) et donc de comportement identique. La durabilité de la structure, améliorée dans le cas de la couche de forme en sol traité, n'est pas prise en compte dans cette comparaison.

Structures routières équivalentes en dimensionnement, avec matériaux granulaires ou sols traités, comparées dans les trois logiciels. Influence de la nature et de la qualité de la couche de forme sur le dimensionnement de la structure d'une chaussée en matériaux bitumineux. La figure ci-dessus montre que l'augmentation de la portance d'une couche de forme traitée entraîne une réduction significative de l'épaisseur de l'assise en grave-bitume et donc une réduction des coûts et des impacts environnementaux.

Les hypothèses prises en compte pour les matériaux et le transport

Les hypothèses sont très importantes et influent considérablement sur les résultats. Il est donc important de préciser que cette analyse n'est valable que pour les hypothèses prises en compte ici et que chaque contexte de chantier appellera une modification des résultats, qui pourront favoriser une technique ou l'autre.

• Des distances de transport qui augmentent, c'est globalement très favorable aux techniques de valorisation en place.
• L'optimisation des structures en épaisseur sur les matériaux les plus impactants, c'est globalement favorable aux techniques de valorisation en place.
• La possibilité d'utiliser des matériaux recyclés ou moins carbonés (AE dans les enrobés, LHR « bas carbone ») peut faire basculer certains indicateurs d'une solution à l'autre.

Nous avons fait le choix de ne pas favoriser les hypothèses permettant aux solutions traitées d'être les meilleures et essayé d'être représentatifs de cas courants, pouvant être rencontrés, typiquement sur le choix des distances.

Pour préciser l'étude environnementale et économique de vos futurs chantiers, nous vous recommandons d'utiliser l'un des éco-comparateurs mentionnés ci-dessus (ou d'autres disposant de références).

Empreinte carbone des matériaux utilisés dans les simulations :

• GNT : 2,6 kg CO_2/tonne
• LHR courant : 450-600 kg CO_2/tonne suivant l'éco-comparateur
• LHR « bas carbone » : 300 kg CO_2/tonne
• Bitume : 530 kg CO_2/tonne
• Matériaux bitumineux :
- GB4 contenant 0-20 % recyclés (AE) : 40-50 kg CO_2/tonne suivant l'éco-comparateur
- BBSG sans AE : 50-55 kg CO_2/tonne suivant l'éco-comparateur

A355, contournement ouest de Strasbourg (67). Vinci Construction Terrassement Grands Projets a réalisé une plateforme support de haute qualité PF4 en améliorant la PST inférieure à la chaux et la PST supérieure au liant ROC COS et en mettant en œuvre une couche de forme traitée au même liant ROC COS d'EQIOM (cf. Routes info #16). ©Fenêtre sur cour

Composition des liants hydrauliques routiers. DEP France Ciment : https://www.infociments.fr/

Distance de transport :

• GNT – chantier : 20-30 km suivant l'éco-comparateur
• LHR – chantier : 100-150 km suivant l'éco-comparateur
• Enrobés – chantier : 20-30 km suivant l'éco-comparateur
• ISDI – chantier : 20-30 km suivant l'éco-comparateur
Coûts hypothétiques des matériaux rendus sur chantier utilisés dans les simulations
• GNT : 10-14 €/tonne
• LHR : 130-170 €/tonne
• Transport des sols excédentaires : 0,1-0,3 €/m^3.km
• GB4 : 45-65 €/tonne
• BBSG : 50-70 €/tonne

Carte des sites des adhérents de France Ciment : https://www.infociments.fr/ La distance moyenne de livraison des liants hydrauliques est d'environ 150 km en 2023.

Présentation comparative des résultats

Résultats sur les impacts environnementaux

Sans surprise, l'impact environnemental des solutions de valorisation en place est énorme sur la consommation des ressources naturelles (de – 24 à – 75 %), la production de déchets (– 74 %) et les trafics chantiers (de – 48 à – 72 %), qui eux-mêmes génèrent de nombreux impacts connexes non comptabilisés dans les indicateurs : gêne et sécurité routière, endommagement prématuré des réseaux empruntés, etc.

L'impact sur l'énergie consommée, certes positif pour la valorisation des matériaux en place, reste non significatif dans le cas des hypothèses prises en compte ici (– 11 %). C'est en partie lié à l'économie d'énergie nécessaire pour la fabrication des matériaux nobles (couche de forme et assise).

Concernant la consommation d'eau, contrairement à certaines idées reçues, elle est ici à l'avantage de la solution de traitement (– 17 %), qui nécessite des apports d'eau, lors du chantier, pour hydrater le liant et le sol à son optimum de compactage. Mais elle reste bien inférieure aux besoins en eau de la solution granulaire, qui en consomme des quantités non négligeables dans le process d'élaboration des granulats, notamment.

Enfin, les émissions de GES, via l'indicateur CO_2 éq., sont sans surprise à l'avantage des solutions granulaires, mais dans une mesure modérée (– 25 %). Outre les distances de transport, qui peuvent faire varier notablement les résultats, l'empreinte carbone des liants reste aujourd'hui prépondérante. Si l'on prend le cas d'un liant à faible empreinte (300 kg CO_2/tonne de liant), on peut voir que l'impact CO_2 devient équivalent à celui de la solution granulaire (< 1 % d'écart).

Résultats sur l'impact économique

Sans surprise également, la solution PF3 avec matériaux traités se révèle moins coûteuse que la solution traditionnelle. C'est la raison pour laquelle elle est généralement retenue, avec la solution PF4, sur la plupart des grands chantiers.

Impacts environnementaux et économiques entre solution en couche de forme granulaire et solution traitée au liant hydraulique dans le cas de l'étude réalisée ici (le résultat exprime le gain obtenu grâce à la solution traitée par rapport à la solution granulaire). Mise à 2 x 2 voies de la RN7 dans la Nièvre (58). Roger Martin a réalisé une plateforme support de haute qualité PF4 en traitant la PST au liant LV-TS 03 et en confectionnant une couche de forme traitée au même liant LV-TS 03 de Vicat (cf. Routes info #41). ©Roger Martin

Conclusion

Ce dossier vise à rappeler l'intérêt de raisonner dans une approche globale :

- Non seulement lors de la construction des ouvrages, mais également pendant leur durée de vie ;
- Non seulement sur la structure de chaussée, mais en intégrant la couche de forme ;
- Non seulement sur le prix des fournitures, mais en intégrant toute la chaîne jusqu'à l'évacuation des déchets ;
- Non seulement sur le CO_2, mais aussi sur les consommations de ressources, les nuisances ainsi que les impacts liés au transport et la production de déchets à stocker.

La technique du traitement des sols est une solution qui permet de réaliser de fortes économies, que ce soit sur les ressources naturelles utilisées lors du chantier ou sur les transports associés. Cela engendre d'importantes réductions :

- Des impacts environnementaux ;
- De la gêne et du risque associé pour les riverains et les usagers du chantier ;
- Du coût des travaux.

On ne peut pas non plus ignorer l'intérêt du traitement des sols dans la pérennisation de nos infrastructures, à une époque où les aléas climatiques font que nos ouvrages sont de plus en plus sollicités.

La technique du traitement des sols est connue et reconnue depuis de nombreuses décennies. Son intérêt conduit à une multiplication des usages hors du domaine routier, tel que cela sera pris en compte dans la révision actuelle du GTS.

Longtemps freiné et limité aux infrastructures à fort trafic, parce que :

- « Nous sommes encore trop riches pour chercher à optimiser et à économiser systématiquement et peut-être pas assez soucieux des conséquences environnementales pour envisager des solutions moins impactantes » ;
- « Il est toujours trop facile de continuer à piocher dans les ressources naturelles et d'enterrer des déchets »,

le traitement des sols est devenu aujourd'hui, dans de nombreuses régions, la référence et doit être systématiquement étudié comme une solution pour construire de manière économique, durable et responsable.

Retours d'expérience

Avez-vous utilisé le traitement des sols aux LHR dans des projets d'infrastructures ?



Gilles Lacassy

Responsable du service de l'ingénierie pour l'exploitation et l'entretien de la route
DIR Atlantique

Sur les voies autoroutières du réseau structurant de la DIR Atlantique, les projets sont étudiés dans l'optique d'une optimisation technique, économique et environnementale sur l'ensemble de la durée de vie de l'infrastructure. Cette optimisation est acquise avec une plateforme support PF3 (couche de forme traitée au LHR) et l'analyse est conduite sur la structure globale (terrassements + assise).

Sur les autres voies du réseau structurant de la DIR Atlantique, la situation est différente. L'optimisation est faite au cas par cas, sur le lot « terrassements », en choisissant entre la couche de forme traitée au LHR et la couche de forme granulaire en fonction de l'importance et du linéaire du projet ainsi que des modalités d'exploitation retenues pour le chantier, notamment s'il n'est pas en site neuf.

Dans le contexte de la transition écologique, il convient de bien prendre en compte le cycle de vie global de l'infrastructure et de ne pas s'arrêter à la simple construction de l'ouvrage neuf. Sa durée de vie et sa maintenance sont donc bien évidemment à intégrer dans l'analyse.

Ainsi, dans le cadre de la décarbonation des infrastructures, une bonne chaussée est surtout une chaussée qui dure !

RN102 à Brioude (43). Spie Batignolles Valérian a réalisé une plateforme support de haute qualité PF3 en mettant en œuvre une couche de forme traitée à la chaux puis au liant. ©Maurice Bufalo / Spie Batignolles Valérian

Couverture du Routes Info n°43

Cet article est extrait de **Routes Info n°43**

Auteur

Cimbéton

Retrouvez toutes nos publications sur les ciments et bétons sur infociments.fr

Consultez les derniers projets publiés
Accédez à toutes nos archives
Abonnez-vous et gérez vos préférences
Soumettez votre projet

Article imprimé le 26/11/2026 © infociments.fr