



TERRASSEMENT ET TRAITEMENT DES SOLS

DOSSIER RECHERCHE ET INNOVATIONS
RETOURS D'EXPÉRIENCE
ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

TRAITEMENT DES SOLS : 70 ANS D'INNOVATION POUR DES INFRASTRUCTURES DURABLES



Benoît Denizot
Président de Vinci
Construction
GeolInfrastructure
Président
du Syndicat
professionnel
des terrassiers
de France (SPTF)

Le traitement des sols en techniques routières est à l'honneur de ce numéro de RGRA. Et c'est justifié, car il est ancré dans les pratiques du quotidien des travaux publics : peu de remblais ou de plateformes routières, ferroviaires ou d'aménagements sans traitement, tant cette technique améliore les performances du plus commun des matériaux de construction – les sols fins.

L'amélioration des propriétés géotechniques des sols par le traitement, quelle que soit la nature des sols considérés, est très largement reconnue par les praticiens, qui l'observent dans la réalisation des travaux : baisse de la plasticité, augmentation des performances mécaniques, réduction de la sensibilité au retrait-gonflement ou encore amélioration de la résistance aux cycles gel-dégel et à l'érosion.

On distingue deux niveaux de progression des performances :

- une amélioration de court terme, essentiellement utilisée pour corriger les conditions de réalisation des travaux et dont on n'attend pas nécessairement une durabilité ;
- une amélioration de court, moyen et long terme, exploitée pour optimiser la conception des ouvrages, dont on attend une durabilité maîtrisée.

C'est cette dernière qu'il convient de garantir pour généraliser l'usage du traitement des sols à des ouvrages, comme les barrages et les digues, pour lesquels la sécurité des usagers, des territoires et des populations sont des enjeux incontournables.

Fort d'une expérience acquise depuis plus de 70 ans, tous les acteurs (entreprises, établissements publics, ingénieries, producteurs de liants...) se mobilisent pour que la mise en œuvre des traitements réponde à des objectifs de résilience des infrastructures face au changement climatique, d'économie des ressources naturelles et de réduction des coûts des projets.

Leurs principales actions en cours concernent notamment :

- la révision du guide technique *Traitement des sols* (GTS) ;
- l'élargissement des usages des sols traités aux remblais hydrauliques ou de protection à l'érosion, par la validation de la durabilité dans les ouvrages existants (+ de 500 retours d'expérience consolidés) ;
- le soutien aux guides et politiques de revalorisation des matériaux excédentaires (> 100 millions de tonnes/an) pour protéger les territoires et les populations.

L'ensemble de ces actions vient confirmer le leadership des acteurs français en matière de traitement des sols, ce qui constitue un différenciant dans la compétition mondiale et un vecteur de développement durable.



Revue générale des routes
et de l'aménagement
- RGRA - S.A.S.
9, rue de Berri - 75008 Paris - France
Tél. : +33 (0)1 40 73 80 00
Fax : +33 (0)1 44 13 32 98

Commission paritaire n° 1026 T 80258
Dépôt légal : décembre 2025
ISSN 1290-256X

N°1013

NOVEMBRE- DÉCEMBRE 2025

Président

Jean-Pierre Paseri

Rédactrice en chef

Olga Dubost
olga.dubost@editions-rgra.com

Comité de rédaction

Thierry Delcroix, Pierre Hornych,
Gaëlle Le Bars, Cédric Le Gouil,
Jean-Marie Masson, André Orcesi,
Nathalie Pâquet, Ludovic Périssé,
Thierry Sedran

Publicité et abonnements

Jalila Taouilab
jalila.taouilab@editions-rgra.com
Tél. : +33 (0)1 40 73 80 00

Prix au numéro : 65 € TTC
Abonnement 1 an (6 numéros)
France : 355 € TTC
Abonnement 1 an (6 numéros)
Reste du monde : 365 € TTC

Création graphique

Marc Degois

Mise en pages

Studio Pinkart

Imprimeur

Chirat
744 rue de Sainte-Colombe
42540 Saint-Just-la-Pendue

EDITORIAL

**Traitement des sols : 70 ans d'innovation
pour des infrastructures durables / 1**
Benoît Denizot

ACTUALITÉS / 4

Olga Dubost

État des ponts communaux / 8



Empreinte carbone de la France / 12
**Nouveaux matériels et méthodologies
innovantes du Cerema / 16**



INNOVATIONS ET DURABILITÉ DANS LE TERRASSEMENT ET LE TRAITEMENT DES SOLS



P 20

Recherche et innovations

P 62

Traitements des sols pour ouvrages hydrauliques

P 92

Traitement des sols et décarbonation

Recherche et innovations

Révision du GTS - Point d'avancement des travaux / 20

Sébastien Hervé, Yasmina Boussafir, Daniel Puiatti, Cédric Le Gouil, Patrice Chardard

STLH : étude de formulation accélérée pour petits chantiers de couche de forme / 27

Sébastien Hervé

BC2R TextuR : un matériau durable au service des mobilités douces / 30

Yohann Cantegreil, Guillaume Gutierrez, Aurélia Nicolaï, Pierre-Yves Mahieux, Thierry Sedran, Simon Martinez

Nouveaux essais en lien avec les terrassements / 37

Delphine Jacqueline, Lucile Saussaye, Sébastien Hervé

Essais sismiques pour caractériser les couches de forme traitées / 44

Delphine Jacqueline, Jérôme Varillon

Évaluation et comportement des traitements de sol en conditions hivernales / 50

Jacques Leite, Christian Raynaud



Emploi de la cohésion effective dans les ouvrages en terre traités à la chaux / 56

Délia Labat, Peter Coombes, Alastair Dewar

Traitements des sols pour ouvrages hydrauliques

Quand les techniques routières inspirent les barrages et les digues / 62

Daniel Puiatti



Avantages des sols traités à la chaux pour les remblais d'ouvrages hydrauliques / 68

Federica Bertola, Stéphane Bonelli, Sylvie Nicaise

Retours d'expérience sur la durabilité des sols traités à la chaux / 72

Federica Bertola, Sylvie Nicaise, Lucile Saussaye, Kristof Verelst, Henk van Hemert

Amélioration de la résistance à l'érosion des sols / 78

Lucile Saussaye, Yasmina Boussafir

Application à la construction d'un batardeau au Malawi / 84

Daniel Puiatti, Michel Lino

Traitement des sols et décarbonation

Mesurer et réduire l'empreinte carbone des terrassements / 92

Jocelyn Bouchut

Chaux et liants hydrauliques : deux filières en marche vers la neutralité carbone / 97

Amandine Gambin, Cédric Le Gouil

PF3-PF4 : optimisation et valorisation en place des matériaux aux LHR / 106

Cédric Le Gouil

Traitement des sols dans les ouvrages en terre : la durabilité ne se subit pas, elle se décide / 111

Valéry Ferber, Yasmina Boussafir, Lucile Saussaye, Sébastien Hervé, Simon Bonne



RECHERCHE ET INNOVATIONS

Évaluation du vieillissement long-terme des liants bitumineux : limites et perspectives / 120

Arthur Delaboissière, Thomas Lebarbé



Index des annonceurs : Cimbéton : 4^e de couv.

Les articles figurant au sommaire de la Revue générale des routes sont publiés sous l'entière responsabilité de leurs auteurs. Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, en France ou à l'étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (Copyright by RGRA). Ouvrage protégé ; photocopie interdite, même partielle (loi du 11 mars 1957), qui constituerait contrefaçon (Code pénal, article 425).



© EGIS

Vinci Autoroutes

Comportements des usagers de la route

Une enquête Ipsos pour la Fondation Vinci Autoroutes révèle des comportements routiers préoccupants en France, où le non-respect des règles de partage de la route met en danger les usagers vulnérables.

Parmi les constats marquants, on peut citer que :

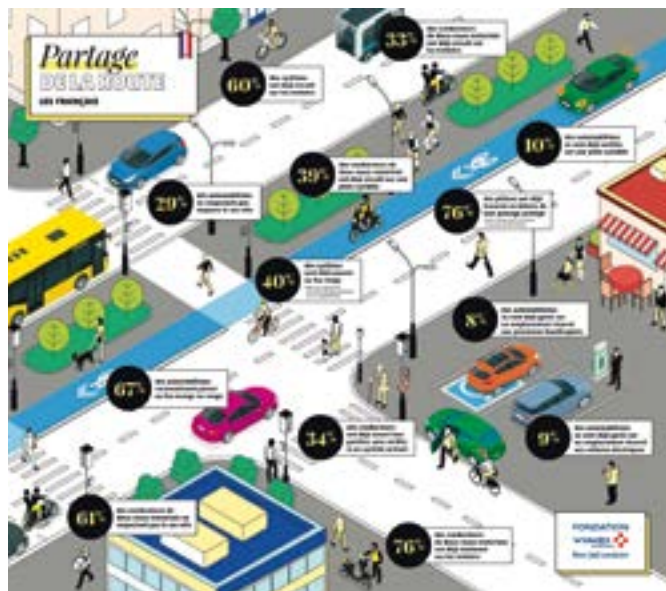
- 58 % des automobilistes omettent d'utiliser leur clignotant pour doubler ou changer de voie.
- 61 % des conducteurs de deux-roues motorisés empiètent sur les sas vélo.
- 40 % des cyclistes passent au feu rouge.
- 70 % des piétons traversent malgré un feu rouge.

L'étude, menée auprès de 12 403 Européens dont 2 403 Français, souligne une peur généralisée des comportements à risque (95 % des usagers), tout en révélant que ces mêmes usagers admettent enfreindre régulièrement les

règles. Ainsi, les trottoirs, réservés aux piétons, sont souvent occupés par des cyclistes (60 %) ou des deux-roues motorisés (33 %), créant des situations dangereuses. Quant aux automobilistes, ils sont 34 % à ouvrir leur portière sans vérifier la présence de cyclistes.

En ville, les tensions sont exacerbées par la cohabitation entre modes de déplacement et le non-respect des espaces dédiés (pistes cyclables, voies de bus). Malgré une légère progression de l'usage du vélo (+1 % en 2025), la France reste en retrait par rapport à ses voisins européens, avec seulement 12 % de cyclistes réguliers. Le sentiment d'insécurité à vélo est particulièrement fort (57 %), plaçant la France en dernière position en Europe.

Bernadette Moreau, déléguée générale de la Fondation Vinci Autoroutes, appelle à une prise de conscience collective pour réduire les accidents et améliorer la sécurité des usagers vulnérables, qui représentent près d'une victime sur deux en milieu urbain.



Egis

Téléporté monocâble d'Angelo

Le téléporté monocâble d'Angelo, première ligne de transport par câble de Corse, est ouvert au public depuis le 18 octobre. Le projet, lancé en mars 2022, a nécessité 21 mois d'études et 21 mois de travaux et essais. Avec ses 3 km de câble, ses 4 stations et ses cabines spacieuses, le téléporté d'Angelo, situé à Ajaccio, offre une capacité de 1 000 passagers par heure et par direction – extensible à 1 500 (l'équivalent de 30 bus). Les usagers profitent ainsi d'un trajet de 12 minutes et d'une vue sur le parc naturel régional de Corse.

Egis a joué un rôle central dans la conception et la réalisation de ce projet, avec des missions clés : études hydrauliques, conception des réseaux et équipements électriques connexes (VRD/CFO/CFA) ; conception et déploiement de la billetterie ; procédures environnementales.



© DR

FRTP Île-de-France

Enjeux 2026

À l'approche des municipales de 2026, la FRTP Île-de-France alerte sur le ralentissement des investissements publics, malgré une activité historiquement élevée (+70 % en 10 ans, portée par le Grand Paris Express et les JOP 2024). En 2025, le secteur enregistre un recul de 3 %, avec une chute des appels d'offres en construction routière (-8 %). Pour 2026, une baisse jusqu'à -10 % est redoutée, en raison d'un climat politique instable, d'une visibilité budgétaire réduite et de l'attente des collectivités du montant des subventions départementales, régionales et nationales.

La fédération insiste sur l'urgence d'entretenir les infrastructures (voirie, réseaux, ouvrages d'art) pour éviter des coûts futurs exponentiels et préserver la qualité de vie des Franciliens. Elle

lance la campagne « Améliorer la vie des Franciliens, ça se fait au quotidien » pour inciter les élus à maintenir les programmes d'entretien et à préparer un redémarrage rapide post-élections. L'acceptation des matériaux recyclés par les maîtres d'ouvrage reste inégale. La feuille de route Économie circulaire de la FRTP Île-de-France, soutenue par l'Ademe et la région, vise à structurer les filières de réemploi.

Autre enjeu majeur : les délais de paiement (60 à 90 jours), qui menacent la trésorerie des PME. La FRTP rappelle que deux tiers de l'activité dépendent des collectivités et que tout blocage financier affecte l'ensemble des projets. Enfin, la filière mise sur la formation pour répondre aux besoins en compétences (environnement, numérique, maintenance). Un partenariat avec l'université Paris-Est Créteil a été signé pour développer des cursus adaptés aux transitions écologique et numérique.



NOMINATIONS

ARCADIS

Arcadis annonce la nomination de Benoît Coulon au poste de directeur pays pour la France. Parallèlement à ses nouvelles fonctions, il conserve son rôle de Global Accounting Officer, qu'il occupe depuis décembre 2021 et dont la mission est d'assurer la supervision des comptes du groupe Arcadis et de diriger la transformation globale de son activité comptable.

Benoît Coulon succède à Philippe Autuori, qui se recentre sur son rôle de directeur des activités Mobilités en France.

ATMB

Autoroutes et Tunnel du Mont Blanc (ATMB) annonce le départ de son directeur général, Erwan Le Bris, qui quittera ses fonctions le 31 décembre 2025. Arrivé en janvier 2023, Erwan Le Bris a marqué son mandat par des projets structurants pour l'entreprise : lancement des chantiers tests de rénovation de la voûte du tunnel du Mont-Blanc, préparation du péage en flux libre, création de la fondation ATMB et développement d'offres favorisant la mobilité durable (covoiturage, véhicules électriques). En attendant la nomination d'un successeur, Philippe Deloire, actuellement directeur de la communication, de la transformation et des relations humaines d'ATMB, est nommé directeur général délégué.

EUROBITUME

Siobhan McKelvey, ancienne directrice générale d'Eurobitume, devient la première lauréate du prix Carl Robertus, créé en hommage à un ancien président emblématique de l'association.

Ce prix récompense son engagement, ses contributions et son impact sur le secteur du bitume.

Parmi les principales réalisations de Siobhan McKelvey à la tête d'Eurobitume (trois ans comme présidente et sept ans comme directrice générale), on peut mentionner :

- une stratégie à moyen terme qui a transformé l'association en une organisation européenne unique et unifiée ;
- le fort accroissement du nombre de membres d'Eurobitume, qui a presque triplé ;
- le pilotage de la restructuration de l'équipe Eurobitume.

FAYAT

Éric Ferrari a pris la présidence de la division Fayat Métal, en plus de ses fonctions à la tête de Fayat Bâtiment. Arrivé dans le groupe en 2001, il avait fondé la division Fayat Bâtiment en 2011, qui compte aujourd'hui 27 agences en France et réalise un chiffre d'affaires proche de 900 M€, positionnant Fayat parmi les cinq premiers constructeurs nationaux. Éric Ferrari affiche une ambition claire pour Fayat Métal : « créer les conditions d'une performance durable et d'une croissance maîtrisée » dans un contexte économique complexe et sur des marchés en mutation. Cette nomination renforce la stratégie du groupe Fayat, qui mise sur l'expertise et l'innovation pour consolider sa position dans les secteurs du bâtiment et de la métallurgie.

Sécurité routière

Les Clés de l'éducation routière

La 12^e édition du concours des Clés de l'éducation routière, organisée par les associations Prévention Routière et Assurance Prévention avec le soutien du ministère de l'Éducation nationale, est lancée. Ce concours annuel vise à sensibiliser les jeunes aux enjeux de la mobilité citoyenne et de la prévention des risques routiers, en récompensant les projets les plus innovants.

Ouvert aux établissements scolaires (1^{er} et 2^e degrés), aux structures spécialisées (IME, EREA) et aux conseils municipaux d'enfants et de jeunes, le concours propose quatre catégories : communication visuelle, orale, écrite et par le jeu ou la construction. Les candidatures doivent être soumises au plus tard le 31 mars 2026.



© FFVÉLO

- la formation des cyclistes de tous âges, notamment à travers le programme Savoir rouler à vélo pour les enfants.

Le fédérateur rappelle que les voies vertes et pistes cyclables doivent être prioritaires, bien signalées et entretenues, avec des revêtements adaptés (enrobé ou béton). Elle plaide aussi pour une meilleure intégration des cyclistes dans les zones urbaines, par le biais de vélorues, de bandes cyclables de qualité et d'une signalisation claire.

Elle appelle enfin à une concertation renforcée avec les collectivités locales et les techniciens, et à la formation des élus et aménageurs pour garantir des infrastructures sûres et durables.

Encadrement de chantier

Enjeux, compétences et évolutions

Une étude de l'Observatoire prospectif des métiers et des qualifications (OPMQ) du BTP révèle les défis et transformations majeurs des fonctions d'encadrement de chantier et d'atelier dans les travaux publics. En 2021, le secteur comptait 297 713 salariés, avec une prédominance masculine (88,2 %) et une répartition géographique inégale, l'Île-de-France concentrant 21 % des effectifs.



© DR

Les métiers d'encadrement – conducteurs de travaux, chefs de chantier, chefs d'équipe et chefs d'atelier – sont au cœur des mutations du secteur :

- Les conducteurs de travaux, dont les effectifs augmentent de 3,7 % par an, sont particulièrement affectés par la

transition numérique (maîtrise du BIM, outils collaboratifs) et la transition écologique (gestion des matériaux durables, conformité réglementaire).

- Les chefs de chantier et chefs d'équipe doivent intégrer de nouvelles compétences en productivité (Lean Construction, préfabrication) et en management intergénérationnel, face à des équipes dont les attentes évoluent.

L'étude souligne un besoin accru en formations, notamment pour les compétences réglementaires (97 % des entreprises) et managériales (91 %), tandis que les formations continues se développent sur les thématiques numérique (BIM, IA) et environnementale (ACV, matériaux biosourcés). Cependant, la fidélisation des talents et le recrutement restent des défis, avec une préférence marquée pour la promotion interne dans les petites structures.

Enfin, les projections indiquent une croissance continue de l'emploi dans ces fonctions, avec une hausse annuelle moyenne de 1,8 %, portée par les conducteurs de travaux. Les entreprises doivent anticiper ces évolutions pour adapter leurs stratégies de formation et de gestion des compétences.

Egis

Acquisition de RockSol Consulting Group

Egis annonce l'acquisition de RockSol Consulting Group, société américaine spécialisée dans les services d'ingénierie des transports. Basée dans le Colorado, RockSol renforce ainsi la position d'Egis dans l'ouest des États-Unis, une région en forte croissance.

Conception et reconstruction de sections de l'Interstate 25. l'un des projets menés par RockSol.



© ROCKSOL

Fondée en 1996, RockSol compte plus de 240 collaborateurs qui accompagnent les municipalités, les comtés, les autorités de transport des États et les agences fédérales civiles dans la réalisation de leurs projets routiers, ferroviaires, de ponts et d'ouvrages publics. Cette acquisition s'inscrit dans la stratégie d'expansion nord-américaine d'Egis, après sa fusion avec Lochner en août 2025.

Un jury, composé d'experts en éducation routière et pédagogie, désignera les lauréats en juin 2026. Les gagnants recevront un bon d'achat de 800 € pour financer du matériel pédagogique.

FFVélo

Charte cyclable 2025

La Fédération française de cyclotourisme (FFVélo) publie la quatrième édition de sa Charte pour des aménagements cyclables sécurisants, un document de référence destiné aux collectivités et aménageurs. Cette charte actualisée vise à harmoniser les infrastructures cyclables à l'échelle nationale, tout en les rendant accessibles et compréhensibles pour tous les usagers.

Le document propose des recommandations concrètes, illustrées par des exemples de bonnes et mauvaises pratiques (ralentisseurs non conformes, pistes cyclables mal entretenues, rétrécissements de chaussée...), pour sécuriser les voies cyclables, les routes et les zones urbaines.

Parmi les priorités :

- l'entretien régulier des infrastructures ;
- le signalement des défauts via l'application Suricate (développée avec le ministère des Sports) ;

LMI

Financement de la mobilité inclusive

En 2024, le secteur de la mobilité inclusive en France, porté par plus de 350 structures issues de l'économie sociale et solidaire, a mobilisé 150 M€ pour accompagner 200 000 personnes en situation de précarité mobilité. Pourtant, avec 15 millions de Français concernés par cette précarité, le Laboratoire de la mobilité inclusive (LMI) estime qu'un passage à l'échelle nécessiterait 300 M€ supplémentaires par an pour toucher 600 000 bénéficiaires.



Les financements publics (70 % du total, soit 106 M€) dominent, avec une contribution majeure des collectivités territoriales (53 %), suivies par l'État (29 %) et l'Europe (18 %). Les recettes générées par l'activité (18 %) et les financements privés (4 %) complètent ce paysage. Cependant, ces sources restent instables et fragmentées, avec des appels à projets souvent courts et des délais de versement longs, créant des tensions de trésorerie pour les acteurs de terrain.

Le LMI recommande une meilleure coordination entre financeurs, une intégration systématique de la mobilité inclusive dans les délégations de service public (DSP) des réseaux de transport et un renforcement des compétences en ingénierie financière pour les porteurs de projets. Parmi les pistes de financement, le rapport suggère de mobiliser le versement mobilité, les amendes de sécurité routière, les certificats d'économies d'énergie (CEE) et les fonds européens.

OPPBTP

Risque de heurt engin-piéton

L'OPPBTP prépare une campagne nationale pour sensibiliser les acteurs du BTP au risque de heurt entre engins et piétons, responsable de 10 à 20 acci-

Travaux publics

Crise de confiance et ralentissement des investissements des collectivités

À quatre mois des élections municipales, Alain Grizaud, président de la FNTF, a souhaité alerter sur un ralentissement inédit du secteur des travaux publics, marqué par une chute de 8 % du nombre d'appels d'offres d'août à septembre 2025 et une projection de décroissance de 2 % pour 2025 et 2026. Il souligne une « défiance croissante » entre l'État et les collectivités territoriales, qui paralyse la mise en œuvre de projets répondant pourtant à un besoin. Même si leur trésorerie est globalement en bon état, les collectivités reportent leurs investissements en raison de l'incertitude politique et budgétaire, notamment sur le financement des infrastructures locales. Les besoins financiers pour la rénovation ou la construction d'infrastructures restent « colossaux », tant dans le domaine de l'énergie que dans celui

Alain Grizaud, président de la FNTF.



des transports. C'est pourquoi Alain Grizaud insiste sur l'urgence d'une loi cadre pour sécuriser les budgets dédiés aux travaux publics et restaurer la confiance, à l'image de la loi de programmation militaire.

Le secteur des travaux publics, qui représente 138 Md€ de CA, est tiraillé entre une crise locale (baisse de 7 % des investissements

départementaux) et une résilience à l'international (50 % du CA réalisé hors de France). Les PME, très exposées aux marchés publics locaux, sont les plus vulnérables.

Dans ce contexte, le président de la FNTF se prépare à un tour de France pour sensibiliser les élus locaux à l'impact socio-économique des infrastructures et prévoit l'organisation d'un forum en 2027 pour placer l'investissement au cœur du débat présidentiel.

dents graves ou mortels par an en France. Les travaux publics, particulièrement exposés (70 % des cas), sont au cœur de cette mobilisation, soutenue par les organisations professionnelles, les SPST et la Direction générale du travail.



Une enquête nationale menée en septembre 2025 révèle que 47 % des professionnels travaillent quotidiennement à proximité d'engins et 14 % ont déjà été confrontés à un accident. Les causes identifiées ? Inattention (conducteurs et piétons), mauvaise organisation des flux et sous-estimation des risques. Malgré une bonne connaissance théorique (85 % des répondants s'estiment informés), les pratiques quotidiennes restent insuffisantes.

La campagne, qui sera menée 15 janvier au 14 mars 2026 sous l'intitulé « Le chantier, c'est pas un crash test », mise

sur un message choc et des supports variés (affiche, vidéos, e-learning, webinaires) pour ancrer la prévention. Elle encourage les entreprises à organiser des quarts d'heure sécurité et à partager leurs actions via le hashtag #HEP2026. Des événements régionaux et des ateliers pratiques (angles morts, manœuvres, solutions techniques...) compléteront la mobilisation.

NGE

Contournement nord de Valenciennes

Le contournement nord de Valenciennes, inauguré le 24 novembre 2025, marque l'aboutissement d'un projet majeur pour le département du Nord. Déclaré d'utilité publique en 2013, ce chantier de 5 km, mené par NGE de 2016 à 2025, a mobilisé sept filiales du groupe pour un montant de 55 M€ sur un investissement total de 129,1 M€.

Les principales étapes du projet :

- Création du giratoire dénivelé de Saint-Saulve, réalisé en maintenant la circulation. Quatre ouvrages d'art ont été construits pour rehausser le giratoire ovale.



- Construction de la trémie Jean-Jaurès à Bruay-sur-l'Escaut, incluant la dépose et la repose de la voie du tramway. La trémie permet au contournement de passer sous la ligne de tramway.

- Travaux de terrassements, ouvrages d'art et rétablissement de chaussées (TOARC) pour relier les giratoires de Poléco et de Saint-Saulve. Ils comprennent trois ouvrages d'art : un pont « bow-string » de 75 m, lancé par barge en deux jours au-dessus de l'Escaut, le pont du Vieil Escaut, pont mixte à poutres latérales de 33 m, et un passage inférieur d'une dizaine de mètres pour permettre d'enjamber le cours d'eau du Jard.

Durant le chantier, une plateforme de tri a permis le traitement de 27 000 m³ de terres polluées.

Chiffres clés

- 5 km de voirie
- 11 ouvrages d'art, dont 1 bow-string de 75 m
- 370 000 m³ de terrassements
- 8 000 ml de réseaux hydrauliques
- 50 000 tonnes d'enrobés

Le contournement améliore la fluidité du trafic, réduisant les temps de trajet vers l'autoroute et désenclavant les zones économiques comme Poléco et le port de Saint-Saulve. Avec une capacité de 20 000 véhicules par jour, il renforce aussi la qualité de vie des riverains et le dynamisme économique local.

Soutien à la décarbonation des transports

L'Union européenne a alloué plus de 600 M€ (dont 100 M€ pour la France) à 70 projets d'infrastructures de recharge et de ravitaillement, visant à décarboner les transports et à renforcer la compétitivité industrielle. Ces financements, attribués au titre de l'AFIF (*Alternative Fuels Infrastructure Facility*) dans le cadre du mécanisme pour l'interconnexion en Europe (MIE), ciblent les villes, ports, aéroports et routes du réseau transeuropéen de transport (RTE-T).

Les projets retenus déploieront des infrastructures d'approvisionnement en carburants alternatifs (stations de recharge électrique, stations de ravitaillement en hydrogène, installations de production d'électricité...) dans 24 pays de l'UE.

Le réseau de transport européen sera électrifié grâce à l'installation de :

- 1 000 bornes de recharge pour véhicules légers d'une puissance de 150 kW ;
- 2 000 bornes de recharge de 350 kW et 586 bornes de 1 MW pour poids lourds.

L'économie de l'hydrogène sera également dynamisée par l'installation de 38 stations de ravitaillement en hydrogène pour voitures, camions et bus.



© DAIMLER TRUCK

Par ailleurs, 16 aéroports européens électrifieront leurs services d'assistance au sol et 24 ports maritimes bénéficieront d'installations d'alimentation électrique à quai et de soutage d'ammoniac pour alimenter les navires.

Ces projets s'inscrivent dans le cadre de la stratégie de l'UE pour généraliser les carburants renouvelables et bas carbone, en complément des règlements ReFuelEU Aviation et FuelEU Maritime. En raison de l'épuisement des fonds, le troisième volet de l'appel à projets est annulé, mais une réaffectation des crédits est envisagée pour de futures initiatives.



Grèce

Vinci Highways inaugure l'autoroute Patras-Pyrgos

La Grèce étend son réseau routier avec l'ouverture de la dernière section de l'autoroute Patras-Pyrgos, un projet mené par Vinci Highways et ses partenaires. Cette autoroute de 75 km s'intègre à la concession Olympia Odos et sera exploitée jusqu'en 2044.

D'un investissement de 331 M€, cette infrastruc-

ture transforme l'ancienne route nationale en une autoroute moderne, qui réduit les temps de trajet, améliore la sécurité routière et facilite l'accès au Péloponnèse occidental. Le projet intègre des technologies innovantes : péage automatisé, bornes de recharge pour véhicules électriques et une future alimentation par énergie solaire.



Finlande

Destia signe un contrat de construction de lignes de tramway

La ville de Vantaa en Finlande a confié au groupement mené par Destia, filiale finlandaise de Colas, la réalisation de la partie Ouest du tramway de Vantaa, un projet de 750 M€. Le tramway, qui reliera l'aéroport d'Helsinki au quartier de Tikkurila, prévoit la construction d'un tunnel sous la gare ferroviaire. Destia, associée aux concepteurs Sitowise Oy et Ramboll Finland Oy, ainsi qu'à la ville de Vantaa et aux services environnementaux d'Helsinki, pilotera le chantier.

Destia a reçu l'ordre de service pour la première phase du projet pour environ 230 M€.

Ce montant correspond aux opérations préparatoires, à la construction des fondations, aux travaux de voirie et d'ingénierie municipale, aux éléments structurels, ainsi qu'à la superstructure du tramway dans certaines zones géographiques le long du tracé.

Outre la mise en œuvre des rails, les travaux comprennent le réaménagement des structures routières (voies de circulation, pistes cyclables et cheminements piétons), ainsi que la rénovation de tous les réseaux souterrains (approvisionnement en eau, autres canalisations et câbles).



Espagne

Eiffage décroche un nouveau contrat pour les infrastructures du Grand Prix de Madrid 2026

Déjà lauréat en avril 2025 du marché de conception du circuit urbain de Madrid (83,2 M€), Eiffage décroche un second contrat pour la construction des infrastructures du Grand Prix de Madrid 2026 : l'extension des pavillons 1 et 2 du parc des expositions IFEMA, pour un montant de 68 M€.

Ce marché de conception-construction comprend la réalisation de deux bâtiments de 17 m de haut pour prolonger les pavillons existants, ainsi que la mise en place de structures temporaires destinées

à héberger les stands, les espaces logistiques et les zones VIP pendant la course automobile. Après la course, les extensions temporaires seront démontées, mais les pavillons resteront au sein du parc IFEMA.

Le projet intègre une démarche environnementale ambitieuse : calcul de l'empreinte carbone, optimisation des matériaux (béton bas carbone, aciers recyclés, bois certifié FSC/PEFC) et privilège des solutions locales et bas carbone.



Qatar

Egis remporte deux contrats d'exploitation et de maintenance routière

Le groupe Egis a remporté deux contrats majeurs avec Ashghal, l'autorité des travaux publics du Qatar, consolidant ainsi sa présence au Moyen-Orient :

- L'un des contrats, d'une durée de cinq ans, porte sur l'exploitation et la maintenance de 700 km d'autoroutes stratégiques et 1 600 km de routes secondaires.
- L'autre, conclu pour trois ans, concerne la gestion

du centre de gestion du réseau routier, l'exploitation de 23 tunnels et la maintenance des systèmes de transport intelligents (ITS) sur l'ensemble du réseau routier qatari.

Ces contrats s'inscrivent dans un accord-cadre de dix ans qui ouvre la voie à d'autres projets visant à moderniser les infrastructures qatariennes et à soutenir la vision du pays en matière de mobilité sûre, durable et digitalisée.

Cerema et CDC Biodiversité

Partenariat en faveur de la biodiversité

Le Cerema et CDC Biodiversité ont signé un partenariat stratégique pour renforcer l'intégration de la biodiversité dans les politiques locales.

Le Cerema et CDC Biodiversité signent un partenariat pour accélérer la protection de la biodiversité.



© CEREMA / J.-C. GUILLOUX

Cette collaboration vise à accompagner les collectivités territoriales dans la protection, la restauration de la biodiversité et l'adoption de solutions fondées sur la nature pour s'adapter au changement climatique.

Actions phares du partenariat :

- Mesure de l'empreinte biodiversité - CDC Biodiversité partage sa méthodologie Global Biodiversity Score (GBS), adaptée aux collectivités, et forme 15 experts du Cerema pour déployer cet outil dans leurs services. Objectif : intégrer la biodiversité dans les stratégies environnementales publiques.
- Club B4B+ - Le Cerema rejoint le groupe de travail « secteur public » du Club B4B+, prévu pour 2026, afin d'échanger des retours d'expérience et diffuser les bonnes pratiques.
- Programme Nature 2050 - Le Cerema promeut ce programme auprès des collectivités pour financer des projets d'adaptation climatique fondés sur la nature.

Région Grand Est

Sauvegarde des LDFT

La région Grand Est lance un plan historique pour régénérer son réseau ferroviaire, notamment les 840 km de lignes de desserte fine du territoire (LDFT), dont certains tronçons dépassent 70 ans d'exploitation. Face à des décennies de sous-investissement, elle



© GRAND EST

crée la société publique locale Grand Est Infrastructures (SPLi), une structure 100 % publique, pour reprendre la gestion, la modernisation et l'entretien des infrastructures.

Ce projet transfère la propriété des lignes capillaires à la région, marquant la fin d'un modèle centralisé au profit d'une gouvernance locale. 1,145 Md€ seront investis d'ici 2036 pour rénover les voies, construire quatre ateliers de maintenance et garantir la pérennité du réseau jusqu'en 2075. L'objectif : atteindre un taux de disponibilité supérieur à 95 %, améliorer la qualité de service et préparer l'ouverture à la concurrence.

Le montage financier retenu – un contrat de concession « in-house » – garantit une maîtrise publique totale, tout en donnant à la SPLi la souplesse nécessaire pour agir efficacement. Le financement s'appuiera sur un partenariat équilibré entre la région, la SPLi, les exploitants ferroviaires, les établissements bancaires publics et les institutions européennes.

Egis

Plateforme pour des villes résilientes

À l'approche des municipales de 2026, Egis lance la plateforme « Les ingénieurs entre dans le débat ». Objectif : proposer aux élus, acteurs locaux et citoyens des solutions pour des villes résilientes, inclusives et adaptées au changement climatique.



© STUDIOCABRELLI-204

La plateforme s'appuie sur des cas concrets issus de projets menés en France et en Europe et met à disposition des outils pratiques pour guider la transition urbaine, structurés en six principes d'action :

- Placer la recherche de co-bénéfices au cœur des projets : concevoir des infrastructures à impact positif (mobilités décarbonées, efficacité énergétique, gestion durable de l'eau...).
- Ne pas considérer que tout est permanent : rendre les infrastructures évolutives pour résister aux crises climatiques et sociales.
- Toujours reconstruire en mieux : profiter de chaque réparation pour renforcer la résilience, la qualité et la performance environnementale.

Cerema

État des ponts communaux

Le Cerema a publié un bilan sur l'état des 64 004 ponts et murs de soutènement du réseau routier communal en France, recensés entre 2021 et 2025. Parmi ces ouvrages, 52 799 ont été évalués, révélant un patrimoine vieillissant :

- Seuls 28 % des ponts et 52 % des murs sont en bon état.
- 43 % des ponts et 30 % des murs présentent des défauts structuraux nécessitant des travaux sous 5 à 10 ans.
- 29 % des ponts et 18 % des murs exigent des interventions urgentes.
- 6 % des ouvrages (3 019) nécessitent même une fermeture ou une limitation de tonnage immédiate pour des raisons de sécurité.

Bilan du programme national Ponts.



© IMAHES

Les pathologies les plus fréquentes concernent la maçonnerie, la corrosion des aciers et l'érosion des appuis par les cours d'eau.

Le Cerema estime le coût annuel d'entretien des ouvrages recensés entre 128 et 241 M€ pour l'Hexagone et le rattrapage global à 3,3 Md€, dont 800 M€ pour les cas critiques.

Un programme national de financement (55 M€) a été lancé fin 2023 pour rénover 500 ouvrages prioritaires d'ici 2026. À ce jour, 348 d'entre eux ont bénéficié de subventions (39,7 M€ attribués, soit 115 000 € en moyenne par projet), avec un taux moyen de subventionnement de 55 %.

Le service SOS Ponts, opérationnel depuis 2022, accompagne les petites communes (moins de 1 000 habitants) dans leurs démarches, avec 2 500 recommandations émises en trois ans.

- Explorer le potentiel de l'existant avant de construire du neuf : valoriser, rénover et adapter les infrastructures existantes pour maximiser l'impact écologique et social, tout en limitant l'empreinte carbone.
- Faire de la ville un écosystème vivant et partagé : réintégrer la nature au cœur des espaces urbains, en favorisant biodiversité, convivialité et qualité de vie.
- Disposer des données pour agir vite et bien : donner aux élus des outils fiables et accessibles pour piloter efficacement leurs décisions.

alertant le conducteur contre les risques de somnolence ou d'inattention. Cette technologie repose sur une engravure par microrobotage de la couche de roulement, testée avec succès en 2024 sur un tronçon de 10 km entre Alençon et Sées. Les résultats ont confirmé son efficacité et sa durabilité.

Les travaux, prévus jusqu'au 20 au 24 octobre, se dérouleront en chantier mobile sur voie lente, combinant robotage, aspiration et balayage.

Cette initiative qui s'inscrit dans une campagne globale de sensibilisation vise à prévenir les sorties de route, un enjeu majeur alors que 23 accidents mortels ont été recensés dans l'Orne en 2025.



© CD 61

RD924 dans Orne

Dispositifs sonores d'alerte

Le conseil départemental de l'Orne intensifie ses actions pour améliorer la sécurité routière sur son réseau de 6 000 km : il installera des dispositifs sonores d'alerte sur deux tronçons de la RD924.

Ces équipements, déjà utilisés sur autoroutes, émettent un signal sonore et vibratoire en cas de déport de voie,

IGEDD

Modernisation des gares routières

En France, avec 15,5 à 17,5 millions de voyageurs annuels en 2023, les services librement organisés (SLO) de voyageurs par autocar séduisent par leur prix bas et leur couverture territoriale, mais leur développement est freiné par des gares routières aux services défaillants (accueil, sécurité, intermodalité) et une gouvernance floue.

Gare routière de Vesoul (Haute-Saône).



© WDFSGDOI

Un rapport de l'Inspection générale de l'environnement et du développement durable (IGEDD) préconise un schéma national des gares routières, décliné par région, pour clarifier leur définition, leurs niveaux de service et leur financement. Parmi les 10 recommandations clés, on peut citer :

- Classer les gares selon leur taille et leur fréquentation pour standardiser les services (billetterie, sanitaires, accès PMR...).
- Renforcer le rôle de l'ART (Autorité de régulation des transports) pour réguler les tarifs des « touchers de quai » et éviter les fermetures arbitraires, comme celle projetée de Paris-Bercy.
- Intégrer les gares routières aux contrats opérationnels de mobilité (COM) et aux services express métropolitains (SERM), en les positionnant comme des hubs multimodaux.
- Mobiliser 2 à 3 Md€ sur 10-15 ans pour moderniser 400 équipements, via des financements État-régions-Union européenne, et adapter les modèles économiques (redevances, subventions, partenariats publics-privés).

Le rapport souligne aussi l'urgence de décarboner les infrastructures (bornes de recharge, autocars électriques) et d'améliorer leur insertion urbaine, à l'image des gares routières de Madrid ou Bilbao.

Une concertation avec les Autorités organisatrices de la mobilité (AOM), les exploitants (FlixBus, BlaBlaCar...) et les collectivités est essentielle pour trans-

former ces gares en leviers de mobilité durable, tout en évitant une fracture territoriale entre métropoles et zones rurales.

Cerema

Enquêtes de mobilité

Les dernières enquêtes de mobilité certifiées Cerema (EMC²), menées entre 2021 et 2023 dans dix grandes aires urbaines françaises, révèlent une baisse inédite de 10 % de la mobilité quotidienne par résident, tant en nombre de déplacements qu'en kilomètres parcourus, par rapport au début des années 2010. Cette tendance, observable dans tous les types de territoires (centres-villes denses, zones périurbaines et rurales), s'explique notamment par la réduction des déplacements liés au travail (-15 %), favorisée par l'adoption du télétravail, et par la diminution des trajets pour achats, en lien avec l'essor du e-commerce.

Les transports en commun progressent dans les grands centres urbains, représentant désormais 13 % des déplacements (contre 11 % il y a dix ans), tandis que la part des modes actifs (marche et vélo) atteint 44 % pour les trajets de moins de 10 km (+9 %). À l'inverse, la voiture reste dominante pour les longs déplacements quotidiens (plus de 10 km), qui représentent 56 % des kilomètres parcourus, avec un taux d'usage supérieur à 80 %.

Le Cerema tire les enseignements de la mobilité dans les aires urbaines à l'appui des EMC² réalisées depuis 2021.



© CEREMA

Les jeunes (18-40 ans) et les résidents des centres-villes sont moins nombreux à posséder le permis de conduire, signe d'un recul de l'usage de la voiture chez les nouvelles générations.

La voiture électrique représente moins de 2 % des kilomètres parcourus et son adoption reste inégale, dépendant du niveau de revenu et de la localisation. Pour réduire les émissions de CO₂ et améliorer l'accessibilité, les experts du Cerema recommandent de développer les transports collectifs hors des centres-villes, de favoriser le covoiturage, de maintenir les services de proximité et de sécuriser les infrastructures pour la marche et le vélo, notamment dans les zones périurbaines et rurales.



RENDEZ-VOUS

PARIS

Congrès Mobil'in Pulse 20-21 janvier 2026

Le 53^e congrès Mobil'in Pulse (anciennement ATEC ITS France) aura lieu les 20 et 21 janvier 2026 au beffroi de Montrouge.

Ce congrès est le rendez-vous des professionnels impliqués dans la mobilité : chercheuses et chercheurs, industriels, opérateurs de transport, gestionnaires d'infrastructures, fournisseurs d'ITS, développeurs de services, organisations, collectivités locales...

Les conférences seront organisées autour de quatre thèmes :

- Innovations numériques pour une mobilité connectée et partagée
- Les services de transport au défi de la décarbonation
- Adapter et gérer les infrastructures face aux enjeux émergents
- Territoires et usages : faire face à l'impératif climatique

PARIS

Événement Eurobitume 22 janvier 2026

Eurobitume organise un événement le 22 janvier 2026 à la Maison des travaux publics (3, rue de Berri, 75008).

Au programme :

- Actualités et chiffres-clés d'Eurobitume
 - Activités d'Eurobitume en matière de HSE, technique et développement durable
 - Nouveau règlement des produits de construction et exigences de normalisation pour les produits routiers (CPR Acquis)
 - Aperçu des recherches menées à l'université Gustave Eiffel sur les liants alternatifs et innovants
 - Infrastructures routières et carbone biogénique dans les matériaux biosourcés
 - Développement d'une méthode rapide de détermination du caractère émissif d'un bitume
- Les présentations techniques seront suivies d'un cocktail.

NANTES (LOIRE-ATLANTIQUE) Journées techniques Route 26 janvier 2026

Les inscriptions aux Journées techniques Route (JTR) 2026,

qui se dérouleront les 4 et

5 février 2026 à la Cité des congrès de Nantes, sont ouvertes jusqu'au 26 janvier 2026 (tarif majoré à partir du 13 janvier 2026 inclus).

Le programme prévisionnel de ces journées se déclinera en :

- Une session transversale
 - 4 sessions thématiques : Comportement mécanique et durabilité des couches de roulement - Évaluation des impacts environnementaux des infrastructures routières et comparaison des variantes environnementales - Pistes cyclables : entretien, gestion, exploitation, viabilité hivernale et sécurité routière - Apport de l'intelligence artificielle dans le domaine des infrastructures
 - 2 ateliers : Comment aborder la révision de la doctrine routière pour prendre en compte le réchauffement climatique ? - Collecte et analyse des données pour la gestion du trafic routier lourd
 - Des brèves
- Par ailleurs, le concours des meilleurs posters de doctorants est maintenu.

CHAMBERY (SAVOIE)

Congrès mondial de la viabilité hivernale, de la résilience et de la décarbonation de la route 10-13 mars 2026

Le 17^e Congrès mondial de la viabilité hivernale, de la résilience et de la décarbonation de la route aura pour thème « Garantir l'excellence routière en toutes saisons ». Cet événement vise à promouvoir le partage d'expériences et de bonnes pratiques internationales. Il proposera des présentations d'experts routiers, d'universitaires et de praticiens du monde entier, ainsi que des associations partenaires internationales de PIARC.

BEAUNE (CÔTE-D'OR)

Congrès de l'Iddrim 6-7 octobre 2026

La 7^e édition du congrès de l'Iddrim se tiendra au Palais des congrès de Beaune.

Eurométropole de Strasbourg

Tram vers l'Ouest

Le prolongement de la ligne F du tramway strasbourgeois vers l'Ouest, après deux ans de travaux et un investissement de 122 M€ (dont 79 M€ pour les travaux), sera mis en service samedi 15 novembre 2025.

Le tram vers l'Ouest de l'Eurométropole de Strasbourg est sur ses rails.



© EUROMÉTROPOLE DE STRASBOURG

Cette extension de 4 km (dont 30 % en site banalisé) dessert désormais les quartiers de Koenigshoffen, Hohberg, Poteries, ainsi que les communes d'Eckolsheim et Wolfisheim, avec 8 nouvelles stations. Près de 20 000 habitants et 7 000 salariés bénéficieront ainsi d'un accès à moins de 500 m de leur lieu de vie ou de travail.

Le projet de prolongement du tramway, qui s'inscrit dans la continuité du maillage des transports collectifs de l'Eurométropole de Strasbourg, inclut des aménagements urbains connexes : 6 km de pistes cyclables sécurisées, des trottoirs élargis et un parking-relais (P+R) de 100 places au terminus Henri-Rendu (Wolfisheim), connecté au réseau express métropolitain européen (REME) via la ligne 240. Le réseau de bus sera également réorganisé pour optimiser les correspondances et réduire le temps de parcours de -5 à -12 minutes.

À terme, cette extension devrait augmenter la fréquentation de la ligne F de 35 %, passant de 29 000 voyageurs/jour (2021) à 39 500, tout en renforçant l'accès au centre-ville via les transports en commun.

Montpellier Métropole

Restructuration du réseau de transport

À partir du 20 décembre 2025, Montpellier Méditerranée Métropole lancera une ambitieuse restructuration de son réseau de transport, visant à optimiser la mobilité urbaine et à réduire la dépendance à la voiture.

Ce projet, qui s'appuie sur un million de kilomètres supplémentaires parcourus chaque année sur l'ensemble du réseau (tramway, bus-tram et bus), intègre l'extension de la ligne 1 de tram-

way, l'arrivée de la ligne 5 de tramway (connectant le nord et l'ouest en 45 minutes) et le déploiement du bus-tram A, un bus à haut niveau de service (BHNS) en fonction depuis mai 2025.



© F. DAMEROU / VILLE ET MÉTROPOLE DE MONTPELLIER

Parmi les principales innovations de ce projet, la métropole annonce :

- le déploiement de 77 nouvelles rames de tramway et d'une flotte de bus 100 % électrique ;
- l'optimisation de 24 lignes de bus, dont la ligne 15 prolongée jusqu'à la gare Sud de France et la ligne 17 réaménagée pour apaiser le trafic sur le boulevard Berthelot ;
- un plan de rénovation des infrastructures ferroviaires doté de 70 M€ ;
- l'intermodalité, avec des pôles d'échange multimodaux (PEM) aux extrémités de la ligne 5 de tramway et 450 places de stationnement en parking-relais (P+R) pour faciliter les correspondances ;
- l'amélioration de l'accessibilité des rames de tramways, bus-trams et bus grâce à une collaboration avec le Comité de liaison et de coordination des associations de personnes en situation de handicap (CLCPH).

OPPBTP

Prévention des TMS

L'OPPBTP, dans le cadre du Fonds d'investissement dans la prévention de l'usure professionnelle (Fipu), a mené en 2024 huit études ergonomiques ciblant des métiers du BTP particulièrement exposés aux troubles musculosquelettiques (TMS). Ces études, réalisées par des cabinets spécialisés, analysent les risques et proposent des solutions opérationnelles pour améliorer les conditions de travail.

Les huit métiers étudiés (maçons finisseurs, paveurs, poseurs de voies ferrées, scaphandriers, serruriers-métalliers, compagnons asphalteurs porteurs de seau, tailleurs de pierre et techniciens CVC (chauffage, ventilation, climatisation)) cumulent trois facteurs de risque ciblés : les manutentions manuelles, les postures pénibles et les vibrations mécaniques. Les préconisations pour prévenir les TMS, issues



© OPPBTP

d'une démarche participative avec les entreprises et les salariés, incluent des améliorations organisationnelles et techniques. Ainsi, pour les tailleurs de pierre, l'adaptation des échafaudages et l'utilisation d'outils de manutention mécanique sont encouragées. Pour les compagnons asphalteurs porteurs de seau, les recommandations concernent notamment le matériau, l'organisation et la planification du travail, les outils de travail, les EPI...

Ces études soulignent l'importance d'une approche proactive, intégrant la prévention dès la phase de conception des chantiers, et d'une collaboration entre les acteurs pour réduire durablement les risques de TMS. Les solutions proposées, souvent simples et transférables, visent à rendre les chantiers plus sûrs et plus performants.

SER

Prix des produits de balisage plastique

Le Syndicat des équipements de la route (SER) propose une formule paramétrique de révision des prix pour les marchés de fourniture de produits de balisage plastique, afin de mieux refléter l'évolution réelle des coûts tout au long de l'exécution des travaux.

Cette initiative vise à s'adapter à la forte volatilité des prix des matières premières, notamment dans le secteur de la signalisation temporaire et du balisage de chantier, à éviter l'utilisation d'index inadaptés et à faciliter la rédaction des dossiers de consultation des entreprises (DCE).



© SIGNALUX GIRON

La formule suggérée est la suivante : $(0,40 \times (\text{ICHT-IME} / \text{ICHT-IMEo})) + (0,60 \times (010764159n / 010764159o))$

Avec :

- ICHT-IME : indice du coût horaire du travail dans l'industrie, qui reflète la part de la main-d'œuvre ;
- 010764159 : indice de production de l'industrie française des produits en plastique, qui couvre les coûts liés aux matières premières.

La pondération des indices est modulable en fonction du type de panneaux susceptibles d'être commandés dans le cadre du marché, de leurs spécificités techniques et du lieu de leur livraison. Elle doit être adaptée aux besoins résultant du marché à passer.

FNTP

Normalisation dans les travaux publics

La FNTP publie un guide pratique dédié à la normalisation, un levier stratégique souvent sous-estimé par les entreprises du secteur. Destiné aux professionnels des travaux publics, cet ouvrage vise à démystifier les enjeux normatifs et à renforcer la compétitivité des acteurs des travaux publics.

Conçu comme un outil d'accompagnement, le guide répond aux attentes de la profession en sensibilisant aux bénéfices de la normalisation, en développant les compétences et en favorisant le partage d'expériences.

Il s'inscrit dans une démarche globale visant à ancrer une culture de la normalisation au sein des entreprises, tout en valorisant l'expertise des professionnels engagés.



© FNTP

Builders École d'Ingénieurs

Appel d'offres pour son campus normand

Builders École d'Ingénieurs vient de lancer un appel d'offres pour la réhabilitation et l'extension de son campus normand à Épron, près de Caen (14). Ce projet de 16 M€, financé à 50 % par la région Normandie et soutenu par le CCCABTP, vise à moderniser les infrastructures existantes et à créer des espaces pédagogiques innovants. Le démarrage des travaux est prévu au printemps 2026 pour une livraison à la rentrée 2028.

Vue du projet du nouveau campus.



© L2 ARCHITECTES

Le campus, qui accueille actuellement 800 étudiants, vise une capacité de 1 200 étudiants et 100 salariés d'ici 2030.

L'extension de 3 200 m² inclura un atrium, un foyer étudiant agrandi avec une salle multisports, des locaux administratifs, d'enseignement et de recherche, ainsi qu'un *Living Lab* de 570 m². Le bâtiment, labellisé E3C2, intégrera des matériaux biosourcés (bois, paille, bauge) et recyclés, ainsi que 520 m² de panneaux photovoltaïques, afin de réduire la consommation énergétique de 60 %. Chauffé par le réseau urbain, il respectera la norme RE2020.

La maîtrise d'œuvre du projet est assurée par le cabinet L2 Architectes d'Hérouville-Saint-Clair, qui a conçu le projet en collaboration avec TJ Archi (Lyon), Egis pour la partie bureau d'études techniques et BIM et Orféa pour la partie acoustique.

PACA

Volet Mobilité du CPER

L'État et la région Provence-Alpes-Côte d'Azur ont signé le volet Mobilité du contrat de plan État-région 2021-2027, mobilisant 1,8 Md€ pour désenclaver les territoires, optimiser la logistique portuaire et verdier les mobilités, en phase avec les enjeux des Jeux olympiques et paralympiques d'hiver 2030 et la transition écologique.

Cet accord cible trois priorités :

- le désenclavement des Alpes (532 M€) : modernisation de la ligne Marseille-Briançon, sécurisation des axes routiers et rénovation des gares pour améliorer l'accessibilité ;

Signature du volet mobilité du contrat de plan État-région 2021-2027.



© REGIS CINTAS-FLORES

- l'amélioration de la desserte routière (210 M€) : contournement de Martigues-Port-de-Bouc et liaison Fos-Salon pour fluidifier les accès à la zone industria-lo-portuaire de Fos et l'étang de Berre ;
- la modernisation des transports quotidiens (1 Md€) : rénovation des lignes ferroviaires secondaires (Nice-Breil, Coni-Vintimille, Nice-Digne), développement du fret ferroviaire et création de pistes cyclables.

Le département des Bouches-du-Rhône bénéficiera de 900 M€ pour des projets clés, dont la régénération de la ligne de la Côte Bleue, la création d'un pôle multimodal à Arles et le développement du fret ferroviaire à Fos, Arles et Miramas.

Charente

2x2 voies sur la RN141

Un nouveau tronçon de 12 km à 2x2 voies de la RN141, reliant Roumazières-Loubert à Exideuil-sur-Vienne (Charente), sera mis en service le 30 octobre 2025.

Ce projet, piloté par la DREAL Nouvelle-Aquitaine et la DIR Centre-Ouest, vise à fluidifier le trafic, notamment en détournant les poids lourds des zones urbanisées et à améliorer la sécurité routière ainsi que le cadre de vie des riverains en réduisant les nuisances sonores et les émissions polluantes.

L'investissement total s'élève à 151,6 M€, cofinancé par l'État (60 %), la région Nouvelle-Aquitaine (22 %) et le département de la Charente (18 %), dans le cadre du contrat de plan État-région (CPER). Les travaux, réalisés par des groupements d'entreprises spécialisées (Guintoli, PASS, Aximum), s'inscrivent dans une démarche de modernisation des infrastructures et de reconquête des espaces locaux.

Les inspections de sécurité préalables ont été validées, garantissant une mise en service optimale de ce tronçon structurant pour l'attractivité du territoire charentais.



© PRÉFECTURE DE LA CHARENTE



BIBLIOGRAPHIE

ENPC

La Galerie des modèles



L'École nationale des ponts et chaussées (ENPC) publie le premier volume de sa collection « Histoire(s) de fonds », dédiée à la valorisation de son patrimoine scientifique et technique. Intitulé *La Galerie des modèles*, cet ouvrage explore l'histoire de cet espace unique, créé en 1747 et disparu en 1954, qui abritait des maquettes de phares, ponts et ouvrages d'art, outils majeurs de formation

et de démonstration pour les ingénieurs.

Anne Lacourt, *La Galerie des modèles*, ENPC, 46 pp., 12 €

INSTITUT TERRAM

Infrastructures du quotidien



Une étude de l'institut Terram menée sur la base de questions posées à plus de 3 000 Français, révèle que les infrastructures du quotidien (routes, réseaux d'eau, d'assainissement et d'électricité) sont devenues un enjeu central de confiance entre les citoyens et les pouvoirs publics. Plus de la moitié des Français (56 %) déclarent avoir constaté des dégradations

sur la voirie de leur commune au cours de l'année écoulée, tandis que 28 % signalent des pannes de réseaux enterrés.

Victor Delage, « *Infrastructures invisibles : ce que les Français disent de leurs réseaux du quotidien* », Institut Terram, 44 pp.

CEREMA

Nuisances sonores



Pour aider les collectivités territoriales à réduire les nuisances sonores, et en particulier à celles qui sont dues aux transports, le Cerema vient de publier un cahier intitulé « Réduire les nuisances sonores : méthodes et leviers pour les collectivités ». Plusieurs leviers permettent en effet de les limiter : réduire le bruit à la source, limiter la propagation, améliorer l'isolation acoustique des

bâtiments, intégrer la lutte contre le bruit dans les documents d'urbanisme, recourir à des outils numériques comme Motor ou diagBruit...

Cerema, « *Réduire les nuisances sonores : méthodes et leviers pour les collectivités* », 48 pp.

GART-UTPF-FRANCE SILVER

ECO

Mobilité des seniors



Le guide *Mobilité des seniors - On en parle et on agit ensemble* dresse un état des lieux de la mobilité des seniors et propose des bonnes pratiques à mettre en œuvre et à dupliquer : formation des conducteurs à l'accueil des seniors, aménagements adaptés (trottoirs sécurisés,

assises adaptées, parcours piétons accessibles, abris bioclimatiques, fontaines à eau...), services dédiés (transport à la demande, accompagnement personnalisé), tarification attractive, communication ciblée, formation aux outils numériques...

Gart, UTPF, France Silver Eco, *Mobilité des seniors - On en parle et on agit ensemble*, 32 pp.

HCSP

Réduire l'impact sanitaire du bruit

Le Haut-Commissariat à la stratégie et au plan (HCSP) a publié un rapport sur la sous-estimation du bruit dans les politiques publiques françaises. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), 23 % des décès prématurés et 26 % des décès infantiles dans le monde sont liés à des facteurs environnementaux, dont le bruit, qui coûte 145 Md€ par an à la société française.



Le HCSP souligne que le bruit, principalement issu des transports, industries et activités urbaines, affecte le sommeil, génère du stress et favorise les pathologies cardiovasculaires. Pourtant, sa gestion reste fragmentée et inefficace, avec des inégalités territoriales dans la mesure et la réglementation. Pour y remédier, le HCSP propose 22 recommandations structurées en six axes :

- Cadre national renforcé : objectifs chiffrés, observatoires régionaux et sanctions pour non-respect des plans de prévention.
- Mesures coercitives : cartographie des points noirs, radars sonores, taxes accrues sur les nuisances aériennes et restrictions de circulation pour les véhicules bruyants.
- Normes sanitaires : alignement sur les seuils de l'OMS et prise en compte des pics de bruit.
- Sensibilisation : indicateur de qualité sonore, campagnes ciblées (notamment vers les jeunes) et journée nationale organisée par le CidB.
- Évaluations d'impact : méthodologies stabilisées pour les projets aériens et révision des valeurs monétaires tutélaires.
- Prévention professionnelle : suivi audiométrique obligatoire et mise à jour des maladies professionnelles liées au bruit.

Le rapport insiste sur la nécessité d'une coordination État-collectivités et d'une harmonisation européenne, la France

ayant joué un rôle clé dans les réglementations de Union européenne

Vinci Autoroutes

Trophées de la maîtrise d'ouvrage Ouest

Vinci Autoroutes a organisé, le 29 octobre 2025, la première édition des Trophées de la maîtrise d'ouvrage Ouest, récompensant quatre entreprises pour leurs performances en sécurité, inclusion et environnement sur des chantiers menés en 2024-2025. Ces distinctions visent à encourager l'innovation et l'excellence opérationnelle, en alignement avec les piliers stratégiques du groupe : zéro accident, réduction de 50 % des émissions de CO₂ d'ici 2030 et insertion professionnelle :

- Soubestre a remporté le prix de la Sécurité pour ses travaux sur le parking de covoiturage de Bénése-Mareme et l'échangeur de Bayonne-sud (A63), illustrant une mobilisation exemplaire en matière de prévention des risques.
- Spie Batignolles Travaux Publics – Le Foll TP s'est distingué avec le prix de l'Inclusion, dépassant les objectifs initiaux avec 12 260 heures réalisées en insertion et des parcours professionnels pérennes pour les salariés en difficulté.
- Colas France a été primé pour l'Environnement, réduisant de 59 % les émissions de CO₂ sur le chantier de l'A64N grâce à des solutions innovantes comme une usine mobile et un approvisionnement optimisé.



© QUENTIN SALINIER / VINCI AUTOROUTES

Ces trophées soulignent l'engagement de Vinci Autoroutes à décarboner les chantiers, favoriser l'économie circulaire et intégrer des publics éloignés de l'emploi, tout en renforçant la collaboration avec ses partenaires.

Egis

Contournement de Blanzay sur la RCEA

Le contournement de Blanzay, section clé de la route Centre-Europe Atlantique (RCEA), a été officiellement mis en service après plusieurs années de travaux. Ce projet, piloté par Egis pour le compte de la DREAL Bourgogne-Franche-Comté, transforme un tronçon autrefois surnommé « route de la mort » en une infrastructure moderne et sécurisée.

CGDD

Empreinte carbone de la France

Le Commissariat général au développement durable (CGDD) publie une étude sur l'empreinte carbone de la France de 1990 à 2024.

En 2024, l'empreinte carbone de la France s'élève à 563 Mt CO₂ éq, soit 8,2 tonnes par habitant, marquant une baisse de 3,4 % par rapport à 2023 et de 20 % depuis 1990. Cette réduction s'explique principalement par la diminution des émissions intérieures (-34 %), tandis que les émissions liées aux importations, représentant 50 % de l'empreinte, ont légèrement augmenté (+2 %).

Répartition des émissions de gaz à effet de serre de l'empreinte carbone :

- 74 % proviennent du CO₂, principalement issu de la combustion d'énergies fossiles et des procédés industriels.
- 18 % sont attribués au méthane (CH₄) et 5 % au protoxyde d'azote (N₂O).
- Les secteurs les plus émetteurs incluent l'industrie (22 %), la production d'électricité (15 %) et l'agriculture (15 %).

Les émissions associées aux importations représentent la moitié de l'empreinte (50 %, soit 284 Mt CO₂ éq) et 13 % des émissions importées proviennent de l'Union européenne (UE hors France), tandis que la Chine, les États-Unis et la Russie contribuent respectivement à 11 %, 3 % et 3 %.

L'empreinte carbone moyenne d'un Français reste 42 % supérieure à la moyenne mondiale (6,4 t CO₂ éq/habitant en 2022), mais inférieure à celle de l'UE (10,7 t CO₂ éq/habitant) ou de la Chine (10,2 t CO₂ éq/habitant).

La décarbonation de la production d'électricité et la stabilité des émissions des ménages (-0,6 Mt CO₂ éq) sont les principaux leviers pour poursuivre cette tendance. Cependant, la dépendance aux importations et les modes de vie restent des défis majeurs pour atteindre les objectifs climatiques.

D'une longueur de 3 km, ce contournement à 2x2 voies (limitées à 90 km/h) améliore la sécurité et la fluidité pour les 20 000 véhicules, dont 25 % de poids lourds, qui l'empruntent chaque jour. Il s'intègre dans le cadre de la modernisation globale de la RCEA, reliant désormais Chalon-sur-Saône à Digoin en 2x2 voies.

Pour ce projet, Egis a assuré l'ensemble des missions suivantes : diagnostic, avant-projet, projet, assistance aux contrats de travaux, direction de l'exécution

des travaux, assistance aux opérations de réception et élaboration des dossiers environnementaux. Le chantier a été mené en collaboration avec la DIR Est dans le respect des normes de sécurité et environnementales, malgré les contraintes urbaines et de circulation. Ce projet renforce l'attractivité économique de la région, réduit les nuisances sonores et les risques d'accidents et confirme le rôle stratégique de la RCEA dans le réseau routier national et européen.



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS RÉGION FRANCE

Crue majeure en Île-de-France

L'Institut Paris Région a publié une Chronique des crues et inondations en Île-de-France, qui souligne la complexité d'une gestion de crise à grande échelle.

En cas de crue majeure de la Seine, près de 50 000 ha et 1 million de personnes en Île-de-France seraient exposés. La montée lente des eaux (50 cm à 1 m par jour) permet une anticipation, mais complique la gestion de crise pour une agglomération de 10 millions d'habitants.



© DR

Les réseaux d'électricité, d'eau potable et d'assainissement et les équipements stratégiques (data centers, hôpitaux, infrastructures de transport...) en bordure des cours d'eau seraient gravement affectés, dégradant les conditions de vie et la continuité des services publics. L'évacuation de centaines de milliers de personnes pose également un défi logistique majeur. Trois groupes de populations sont identifiés selon leur exposition :

- groupe 1 : évacuation obligatoire (635 000 personnes) ;
- groupe 2 : évacuation recommandée (990 000 personnes) ;
- groupe 3 : maintien en zone dégradée, sous conditions de ravitaillement sécurisé.

Les 15 communes les plus exposées concentrent plus de 50 % des évacuations obligatoires. La dépendance aux réseaux énergétiques et les interdépendances urbaines amplifient les risques, notamment pour les immeubles collectifs et les personnes vulnérables.

La stratégie d'auto-évacuation, encouragée par les autorités, se heurte à des réalités socio-économiques (faible motorisation, barrières culturelles). Les retours d'expérience soulignent la nécessité d'anticiper les comportements individuels et les inégalités territoriales.

La Stratégie locale de gestion du risque d'inondation vise à renforcer les plans communaux de sauvegarde et la culture du risque, intégrant gestion de crise, aménagement urbain et prévention pour réduire la vulnérabilité francilienne.

Projets de route électrique

Charge as you drive

Vinci Autoroutes et ses partenaires viennent de franchir une étape décisive dans le cadre du projet Charge as you drive : le 22 octobre, un poids lourd électrique a été rechargé par induction en roulant sur l'A10, près de Paris, sur une portion de 1,5 km équipée de 900 bobines de cuivre. Ces bobines, alimentées par le réseau électrique, génèrent un champ électromagnétique transmettant de l'énergie aux véhicules compatibles.



© VINCI AUTOROUTES

Cette innovation, développée en collaboration avec Electreon, Vinci Construction, l'université Gustave Eiffel et Hutchinson, permet de réduire la taille, le coût et l'empreinte carbone des batteries. Selon une étude de Carbone 4, cette technologie pourrait diminuer significativement les émissions de CO₂ du transport routier, qui représente 95 % des mobilités en France et un tiers des émissions de gaz à effet de serre.

Les premiers essais, menés en conditions réelles, montrent des résultats prometteurs : jusqu'à 300 kW de puissance transférée, offrant un gain d'autonomie de 1 km par kilomètre parcouru pour un poids lourd et jusqu'à 3 km pour un véhicule léger. Ce projet, soutenu par BPI France, renforce également la souveraineté industrielle européenne en favorisant la production locale de composants.

eRoad Mont Blanc

Le projet eRoad Mont Blanc, piloté par ATMB et soutenu par un consortium d'acteurs français (Alstom, université Gustave Eiffel, Pronergy et Greenmot), vient de réussir une phase clé de ses essais sur la plateforme Transpolis, dans l'Ain.

Un démonstrateur de 420 m, équipé d'un système d'alimentation par le sol adapté au contexte routier, a confirmé sa fiabilité, sa robustesse mécanique et sa compatibilité électrotechnique avec des véhicules lourds : des segments conducteurs intégrés à la chaussée ont fourni de l'électricité à 750 V, captée par un bras articulé sous le véhicule. Ce système, inspiré des technologies ferroviaires d'Alstom, permet une recharge dynamique compatible avec tout type de véhicule, des utilitaires aux poids lourds.

eRoad Mont Blanc vise à valider, en conditions réelles, une solution d'électrification des routes pour véhicules lourds, s'inscrivant dans le cadre de la stratégie nationale de décarbonation. Après les essais en laboratoire, une phase de test grandeur nature est prévue d'ici 2027-2028 sur 1 km de la RN205, en Haute-Savoie, un axe fréquenté chaque jour par 10 000 à 12 000 véhicules.



© EROAD MONT BLANC

Le coût global du projet reste à préciser, mais les deux phases de test sont déjà financées à hauteur de 21 M€ par France 2030 et l'Union européenne.

Place aux piétons

Sondage sur les aménagements piétons

Les résultats du sondage 2025 sur la marche en ville, réalisé par le collectif Place aux piétons et la Fédération française de randonnée en interrogeant 2 000 personnes représentatives, révèlent une forte attente des Français pour des aménagements urbains favorisant la marche quotidienne.

L'étude montre que 71 % des Français marchent régulièrement pour se promener, tandis que 57 % le font pour leurs achats. Cependant, 42 % des répondants estiment habiter trop loin de leurs destinations et 40 % pointent des trottoirs inadaptés comme principaux freins.

Les priorités identifiées pour améliorer la marche en ville sont :

- la création de cheminements piétons (94 % de soutien) ;
- l'élargissement des trottoirs (91 %) ;
- le traitement des points noirs urbains (92 %) ;
- les zones piétonnes (87 %) ;
- la verbalisation du stationnement sur trottoirs (86 %) ;
- la généralisation du 30 km/h en ville (70 %) ;
- le développement des rues scolaires (76 %).

L'étude souligne aussi que 84 % des Français jugent les véhicules motorisés trop rapides et 83 % estiment les déplacements difficiles pour les personnes âgées ou à mobilité réduite.

Enfin, 69 % des répondants considèrent la marche bénéfique pour la santé, confirmant son rôle potentiel dans les politiques de mobilité durable.

Ces résultats appellent à une refonte des espaces urbains pour rendre la marche plus sûre, accessible et attractive.



© CEREMA

WorldSkills France

Lauréats 2025

La 48^e édition de la compétition WorldSkills France, organisée à Marseille du 16 au 18 octobre 2025, a distingué 12 jeunes professionnels des travaux publics dans les catégories « aménagement urbain » et « réseaux de canalisations ».

De gauche à droite : médaille d'argent (Romain Dobin et Simon Beuret), médaille d'or (Henri et Louis Levray), médaille de bronze (Adrien Ladevie et Yann Garnier-Boile).



© L. ALLAVOINE / CCA-BTP

Douze binômes, représentant 12 régions, ont rivalisé pendant 18 heures pour concevoir un ouvrage mixte éco-responsable, combinant voirie urbaine et réseau de canalisations. L'épreuve, axée sur la collaboration et la maîtrise technique, a fait appel à leurs connaissances techniques :

- pose d'un réseau d'eau pluviale, d'un AEP (réseau d'adduction d'eau potable), de pavés et de bordures ;
 - réalisation manuelle d'une grave non traitée ;
 - mise en œuvre d'un banc en gabion.
- Les résultats attendus, évalués au fur et à mesure de l'exécution des différentes parties d'ouvrage jusqu'à l'issue des travaux et la livraison, portaient sur :
- les contrôles intermédiaires des parties d'ouvrages ;
 - les réglages ;
 - la mise en service des réseaux ;
 - les essais fonctionnels ;
 - le respect du planning, du cahier des charges et des règles de sécurité ;
 - le travail en équipe ;
 - la tenue du poste de travail ;
 - la qualité et la quantité des déchets ;
 - la qualité et l'aspect final du travail réalisé.

Les lauréats suivants ont été distingués :

- Médaille d'or : Louis et Henri Levray (Hauts-de-France, BTS TP).
- Médaille d'argent : Romain Dobin et Simon Beuret (Bourgogne-Franche-Comté, Bac Pro TP).
- Médaille de bronze : Adrien Ladevie et Yann Garnier-Boile (Auvergne-Rhône-Alpes, salariés de Colas).

Victoires de l'investissement local

Les lauréats

Lors du Salon des maires et des collectivités locales, la FNTF a décerné les Victoires de l'investissement local 2025, récompensant des projets d'aménagement territorial alliant transition écologique et cohésion sociale.

Le Grand Prix revient à Romans-sur-Isère pour la découverte de la rivière Savasse, qui a redonné vie à une rivière longtemps enfouie sous le béton, en recréant un lit naturel de 250 m et en reconnectant la rivière à sa nappe phréatique. L'évaluation socio-économique du projet a montré qu'un euro investi a généré 3 € de valeur socio-économique : hausse de l'activité économique pour les commerces riverains, gains de santé liés à la pratique des mobilités actives, réduction des risques d'inondation et des îlots de chaleur urbains...

Cinq autres collectivités ont été distinguées :

- Angers (prix « Cadre de vie ») : réaménagement de la promenade de Reculée ;
- Vernon (Prix « Aménagement urbain ») : rénovation du cœur de ville ;
- Nîmes Métropole (Prix « Résilience ») : barrage de Méjean et aménagement du Grand Bois ;

Romans-sur-Isère obtient le Grand Prix des Victoires de l'investissement local 2025 pour son projet écologique exemplaire.



© DPA

- Strasbourg (Prix « Mobilité durable ») : aménagement multimodal de la M351 ;
- Loiret (Prix « Cohésion des territoires ») : déviation de Jargeau.

Pour Alain Grizaud, président de la FNTF, ces projets illustrent que l'investissement public local est un levier de développement durable, créant des infrastructures au service de la qualité de vie et de la résilience des territoires.

- Médaille d'excellence : Thomas Lagarde et Damien Duroudier (Nouvelle-Aquitaine), Lucas Thouvenin et Augustin Guyot (Grand Est), Hugo Denise et Liam Thebault (Normandie).

Transdev

Presqu'île de Guérande Atlantique

La communauté d'agglomération de la presqu'île de Guérande Atlantique, baptisée CapAtlantique La Baule-Guérande Agglo, a confié à Transdev, pour cinq ans à partir du 1^{er} janvier 2026, la gestion de son réseau de transport Lila Presqu'île. Ce contrat vise à transformer l'offre de mobilité locale en un système plus connecté, durable et accessible, avec un objectif de +30 % de fréquentation d'ici 2030.



© HADRIEN BRUNNER

Le réseau, qui comprend 11 lignes régulières, 2 lignes régionales, des services scolaires et un transport à la demande (TAD) avec un parc de 130 véhicules, sera modernisé dès l'été 2026. Les améliorations comprennent des connexions renforcées avec les

gares et le réseau de Saint-Nazaire, ainsi qu'une fréquence accrue sur les lignes principales.

En complément, Transdev développera une offre cyclable saisonnière avec 1 450 vélos en location, 400 vélos en libre-service dès juin 2026 et 580 stationnements sécurisés. Des animations vélo seront organisées toute l'année. Côté numérique, une application mobile et un site web intuitifs seront lancés en janvier 2026, intégrant la réservation du TAD, la billetterie dématérialisée (2027) et l'information en temps réel. Une Maison des mobilités ouvrira à Guérande, complétée par deux agences mobiles.

Transdev s'engage également à garantir la reprise du personnel existant et à créer de nouveaux emplois, avec un accompagnement individualisé pour une transition fluide.

Métropole Européenne de Lille (MEL)

Pôle cycliste et patrimonial

La MEL et la ville de Roubaix engagent un projet d'aménagement durable de 40 M€ pour transformer le site du vélodrome André Pétrieux de Roubaix en un pôle cycliste et patrimonial d'envergure. À partir de 2026, ce projet de 15 ha intégrera :

- un musée immersif de la course Paris-Roubaix valorisant la mémoire de la course et du cyclisme ;

- le développement du siège de la Van Rysel Pro Cycling Team, des locaux pour le Vélo Club de Roubaix, ainsi que la rénovation des gradins Est du vélodrome ;
- la création de nouveaux espaces : hôtels, bureaux, commerces et logements ;
- un grand parvis piéton entre le vélodrome et le parc pour favoriser les mobilités douces et les événements sportifs ou culturels ;
- la rénovation et l'aménagement des espaces verts et des zones ouvertes au public ;
- une trame verte cohérente qui assurera la continuité écologique, la qualité de vie et l'ouverture du site sur la ville.



© MEL

Le projet, fruit d'une concertation citoyenne, met l'accent sur la préservation du patrimoine, l'accès au sport pour tous, la valorisation des espaces verts et la mobilité durable.

La SPL Ville Renouvelée, désignée comme concessionnaire, pilotera ce projet phasé sur 8 ans, en articulation avec les événements sportifs et la vie du site.

Pont des Trois-Continents de Nantes

Bouygues Travaux Publics Régions France, via ses filiales VSL France et Métal & Bois, lance la transformation du pont des Trois-Continents à Nantes, un axe stratégique reliant l'Île de Nantes à Rezé. Ce chantier, qui s'inscrit dans une démarche de mobilité décarbonée, vise à élargir l'ouvrage de 2,5 m côté aval pour accueillir les mobilités douces et préparer le passage des futures lignes 6 et 7 du tramway, ainsi que de la ligne 8 de bus.



© BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS RÉGIONS FRANCE

L'opération, phasée pour assurer la continuité des circulations, intègre un renforcement structurel innovant destiné à prolonger la durée de vie du pont tout en réduisant son empreinte carbone :

- précontrainte par câbles en acier pour compenser les charges futures ;
 - utilisation de composites carbone ultra-légers et résistants pour renforcer les zones sensibles ;
 - remplacement des appareils d'appui.
- La livraison de l'ouvrage est prévue fin 2027.

OPPBTP

Lab Innovation Santé & Prévention

Le Lab Innovation Santé & Prévention dans le BTP, porté par l'OPPBTP, le CCCA-BTP, la fondation Excellence SMA et Impulse Partners, entre dans une nouvelle phase pour accélérer l'innovation en matière de sécurité et de santé au travail. L'objectif : répondre aux besoins des entreprises et organismes de formation en impliquant directement les acteurs du terrain.

La démarche s'articule autour de quatre temps forts : écoute des besoins, identification de solutions innovantes, expérimentation sur le terrain et partage des retours d'expérience.



© KRYOLE

Transports en France

Bilan 2024

Selon dernier bilan annuel publié par le SDES (Statistique publique de l'énergie, des transports, du logement et de l'environnement), en 2024, le secteur des transports en France affiche une croissance modérée de 1,2 % du PIB, marquée par une baisse de l'inflation à 2,0 % et une diminution des prix des carburants. Malgré un ralentissement économique global, les investissements en infrastructures de transport ont augmenté de 4,7 %, atteignant 27,5 Md€, avec une hausse notable pour les réseaux routiers (+4,1 %), les transports collectifs urbains (+8,1 %) et le réseau ferré principal (+3,4 %).

Les transports collectifs urbains, notamment en Île-de-France, bénéficient d'un renforcement des infrastructures (prolongements de lignes de métro et tramway) et d'une hausse de 7,4 % des dépenses des administrations publiques locales. Les vélo-



routes progressent également, avec 610 km ouverts en 2024, portant le schéma national à 84 % de réalisation.

Le transport routier reste dominant, représentant 67 % des dépenses totales de transport (355 Md€). La circulation des véhicules diesel recule (-4,7 %), tandis que les véhicules électriques et hybrides gagnent du terrain, avec 25,7 % des ventes de voitures neuves. Les émissions de GES des transports diminuent de 1,2 %, mais le secteur reste le premier contributeur en France (34 %).

Les dépenses publiques en transport atteignent 78,7 Md€, avec une hausse de 5,1 % par rapport à 2023, soutenue par des investissements accrus dans les mobilités durables et les infrastructures ferroviaires. LAFIT France joue un rôle clé, avec 4,3 Md€ de dépenses d'intervention, dont 39 % dédiés au ferroviaire.

Lors d'une première session le 14 octobre 2025, 24 entreprises et centres de formation ont défini les priorités, parmi lesquelles la santé mentale, la culture prévention, l'alerte sécurité et l'assistance aux compagnons.

Les solutions sélectionnées seront présentées le 27 novembre 2025 lors d'un événement ouvert à tous, qui offrira l'opportunité aux acteurs du BTP de découvrir des innovations adaptées à leurs enjeux. Les expérimentations seront accompagnées par les partenaires du Lab, avec un partage des résultats prévu au printemps 2026.

NGE

Chantier numérique innovant à Nice Saint-Roch

Le groupe NGE a été récompensé dans la catégorie « Chantier numérique » aux Trophées Tech for Construction. Ce prix salue son utilisation pionnière d'outils numériques pour la réhabilitation du centre de maintenance ferroviaire de Nice Saint-Roch (06), un projet déterminant pour la performance des lignes régionales.

Parmi les différentes solutions déployées :

- La simulation 4D a permis d'optimiser le planning et de réduire délais et coûts.
- La réalité augmentée a sécurisé l'exécution des travaux en comparant maquette et réalité.



© NGE

- Des modules dédiés ont centralisé le suivi des ressources et des problèmes, renforçant la productivité et la qualité. Ce chantier, mené en partenariat avec la SNCF, vise une autonomie totale pour la maintenance des trains, avec un nouveau bâtiment de 136 m de long et des équipements spécifiques (tour en fosse, station-service...). Le projet s'inscrit dans une démarche environnementale ambitieuse, avec des certifications HQE, Bâtiments durables méditerranéens et le label E+C- (niveau E2C1).

Île-de-France Mobilités et RATP

Métro MF19

Île-de-France Mobilités et la RATP ont officiellement lancé le métro MF19 sur la ligne 10 du réseau parisien. Ce projet, fruit d'une collaboration entre Alstom, la RATP et Île-de-France Mobilités, marque une étape majeure dans la modernisation du réseau francilien, avec un investissement total de 7 Md€. Le MF19 se distingue par ses performances écologiques : 20 % de matériaux recyclés, 98 % de valorisation en fin de

vie et une consommation énergétique réduite de 25 % grâce au freinage électrique et à l'éclairage LED. Il offre aussi un confort accru avec une ventilation réfrigérée, des sièges ergonomiques et une intercirculation intégrale pour une meilleure répartition des voyageurs.

Ce métro modulable, disponible en versions « confort » et « capacitaire », s'adapte aux besoins spécifiques des lignes 3, 7, 8, 10, 12, 13, 3bis et 7bis. Il intègre des technologies innovantes comme la vidéoprotection, des écrans d'information en temps réel et des ports USB.

La modernisation inclut également :

- la transformation des ateliers de maintenance, comme ceux de Saint-Fargeau, Vaugirard et Créteil Valenton, pour accueillir ces nouvelles rames ;
- le déploiement du système de pilotage automatique Octys, déjà en place sur les lignes 1, 4, 5, 6, 9 et 11, pour renforcer la régularité et la sécurité du réseau.

Le MF19, récompensé par le label Janus de l'Industrie, incarne une avancée technologique et environnementale majeure pour les transports franciliens, avec un déploiement progressif prévu jusqu'en 2034.



© ÎLE-DE-FRANCE MOBILITÉS

Nouveaux matériels et méthodologies innovantes du Cerema

Mercredi 26 novembre, à l'occasion de la journée « Penser les infrastructures de demain en France avec le changement climatique » organisée par le Cerema Hauts-de-France sur son site de Sequedin, ont été inaugurés deux nouveaux équipements dédiés à l'auscultation des chaussées : le Tigre3D et l'InfraGrip3D. L'occasion de revenir sur les récentes innovations du Cerema dans le domaine de l'auscultation et de gestion du patrimoine routier.

Le Tigre3D et InfraGrip3D sur le site de Sequedin du Cerema Hauts-de-France.



© RGRA

Dans un contexte de changement climatique, le Cerema déploie une large gamme de matériels et de méthodologies pour moderniser la gestion du patrimoine routier. De l'auscultation 3D à la création de jumeaux numériques, en passant par des solutions bas carbone et des outils d'aide à la décision, ces innovations offrent la possibilité aux gestionnaires de routes de mieux connaître, entretenir et adapter leurs réseaux aux aléas climatiques.

L'AUSCULTATION À GRAND RENDEMENT

Tigre3D : évaluer la déflexion des chaussées en conditions réelles

Le Tigre3D complète la dernière génération de matériels d'auscultation récemment acquis par le Cerema. Construit par la société danoise Ramboll, ce camion articulé de 13 m de long peut, en un passage :

- mesurer la déflexion des chaussées sous charge et la géométrie de la voie ;
- acquérir des images de l'environnement, toutes les données étant géolocalisées.

Il permet ainsi d'obtenir une image de la réponse structurelle de la chaussée,

indispensable pour évaluer sa durée de vie résiduelle et programmer les interventions.

Fondé sur une technologie laser de type surfacique, le Tigre3D mesure la déformation de chaussée à des intervalles pouvant aller jusqu'à 15 cm. Compte tenu de sa vitesse d'acquisition (entre 20 et 90 km/h), aussi bien le jour que la nuit, il se fond dans le trafic routier et n'impose donc aucune contrainte d'exploitation.

Les données acquises, géolocalisées et post-traitées, sont intégrées dans des systèmes d'information géographique (SIG) pour une analyse fine et une planification optimisée.

InfraGrip3D : mesurer l'adhérence pour une sécurité accrue

L'InfraGrip3D, successeur du Scrim, est un camion de mesure qui embarque plusieurs technologies avancées pour mesurer l'adhérence et la macrotexture des chaussées en trace droite et gauche, à 60 km/h, sans interruption de trafic.

Connecté en 5G, il transmet ses données presque en temps réel, alimentant les jumeaux numériques et contribuant ainsi à une gestion proactive de la sécurité routière.

C'est le seul matériel français combinant mesure de l'adhérence (microtexture – CFT – et macrotexture – PMP), de la géométrie de la route et relevés photographique pour améliorer la sécurité routière.

Son déploiement dans le cadre de l'IQRN3D, notamment dans les régions Grand Est et Auvergne-Rhône-Alpes, marque une avancée majeure pour la surveillance des réseaux.

Aigle 3D : le laser au service de la surface des chaussées

L'Aigle 3D, équipé de capteurs LCMS (Laser Crack Measurement System), assure une auscultation rapide et précise de la surface des chaussées à 80 km/h, sans interruption de trafic (**photo 1**).

Avec une résolution verticale de 0,5 mm et une densité de 1x5 mm, il détecte fissures, arrachements, macrotexture et orniérage, et produit un jumeau numérique haute résolution de l'état de surface du réseau.

Cet outil, utilisé dans le cadre de l'IQRN (Indicateur de qualité du réseau national) depuis 2018, alimente une base de données nationale. Il peut suivre l'évolution des dégradations dans le temps, information essentielle pour anticiper les besoins d'entretien et optimiser les budgets.

CereMap3D : numériser la route et son environnement

Le CereMap3D (**photo 2**), acquis en 2021, va plus loin en numérisant non seulement la chaussée, mais aussi son environnement (signalisation, glissements, talus, végétation, mouvements de terrain).

Grâce à ses deux scanners et ses caméras panoramiques, il permet une évaluation automatisée de l'infrastructure et de son contexte, ouvrant la voie à une gestion intégrée et prédictive.



© CEREMA

AUTEUR

Olga Dubost
RGRA

En 2025, le Cerema a lancé la construction d'une plateforme de jumeau numérique de l'infrastructure routière (JNIR), en partenariat avec des collectivités et des entreprises, pour centraliser et exploiter ces données.

DES MÉTHODOLOGIES ADAPTÉES À CHAQUE ÉCHELLE DE RÉSEAU

IQRN3D : une méthode pour le réseau national

Développée par le Cerema pour le réseau routier national, la méthode IQRN3D s'appuie sur l'Aigle 3D pour ausculter 30 000 km de routes par an. Elle propose trois indicateurs d'état (superficiel, profond, très profond) et un indicateur d'usage, ainsi qu'un indicateur de programmation (IQP) en neuf classes, pour guider les choix d'entretien et de réhabilitation. Cette approche contribue à une capitalisation des données depuis 2018 et une optimisation des stratégies d'intervention.

GRD : une approche cartographique pour les départements

La méthode GRD (Gestion des réseaux départementaux), construite avec les directions territoriales du Cerema, s'inspire de l'IQRN3D mais utilise des relevés LCMS sur 4 m de largeur. Elle propose des indicateurs d'état et d'aide à la programmation, visualisables sur des cartes interactives. Plus de 6 500 km de routes ont déjà été auscultés dans ce cadre, avec une approche dynamique et cartographique pour une meilleure lisibilité des besoins.

Gerese et Gevoc : pour les réseaux secondaires et voiries

La méthode Gerese (Gestion du réseau secondaire), développée avec neuf départements, intègre des indicateurs d'état pour la chaussée, les ouvrages d'art, la signalisation et les accotements. Elle permet une priorisation des travaux et une estimation des coûts, adaptée aux contraintes des réseaux secondaires.

Quant à la méthodologie Gevoc (Gestion des voiries communales), en cours de développement, elle accompagne les communes dans l'auscultation et la gestion de leur patrimoine routier, avec un focus sur les enjeux de transition écologique et de sobriété budgétaire.

Gipcy : une méthode dédiée aux pistes cyclables

Avec le DiagVélo, vélo instrumenté équipé d'une caméra GoPro et d'une centrale inertielle, le Cerema propose la méthode Gipcy pour ausculter les

pistes cyclables. Les données, géolocalisées et analysées via le logiciel Ireve, facilitent la cartographie des zones critiques et la planification des travaux.

En 2025, huit DiagVélo sont opérationnels au Cerema, et la méthode est déployée dans plusieurs départements.

VERS DES INFRASTRUCTURES RÉSILIENTES ET BAS CARBONE

L'innovation au service de la décarbonation

En 2025, l'appel à projets « Routes et Rues » du Ministère de l'Aménagement du territoire a retenu six innovations majeures, testées en conditions réelles :

- Libarot® (Eiffage Route) : liant bas carbone à base de coquilles Saint-Jacques, pour le retraitement en place des chaussées.

- Enrobés UP® (Vinci Construction) et Biostar B25C (NGE Routes) : enrobés à faible empreinte carbone.

- Diamanti (Carsey 3D, Sika, Ævia, Eiffage Génie Civil) : solution pour les ouvrages d'art.

- Monolit-C (Campeon Bernard) : technique de réhabilitation des chaussées.

Ces innovations répondent aux enjeux de sobriété énergétique, de recyclage et de réduction des coûts, tout en s'adaptant à toutes les classes de trafic.

La résilience face aux aléas climatiques

Le Cerema propose une approche systémique en 10 étapes pour améliorer la résilience des infrastructures face au changement climatique. Baptisée Asait (Approche systémique d'adaptation des infrastructures de transport), cette méthode, déjà appliquée dans plusieurs départements et régions, peut assurer l'identification des vulnérabilités, la priorisation des actions et l'optimisation des investissements.

Des fiches pratiques, comme celle sur le retrait-gonflement des argiles (RGA), aident les gestionnaires à anticiper les risques et à adapter leurs stratégies.

Le jumeau numérique

Le projet Road-AI, mené avec Inria, vise à créer un jumeau numérique dynamique des infrastructures routières, intégrant des données issues de l'Aigle 3D, du CereMap3D, du Tigre 3D et de l'InfraGrip3D. Ce modèle virtuel contribuera à une gestion prédictive, une simulation des scénarios d'entretien et une optimisation des coûts et des impacts environnementaux.

En 2025, la plateforme JNIR (Jumeau numérique de l'infrastructure routière) est en cours de déploiement, avec des partenariats européens pour enrichir ses fonctionnalités.



© CEREMA

—Photo 2—

Véhicule CereMap3D en action.

PERSPECTIVES ET ENJEUX POUR LES GESTIONNAIRES

Une gestion optimisée et anticipative

Les outils et méthodologies du Cerema offre l'opportunité aux gestionnaires de :

- connaître précisément l'état de leur réseau, grâce à des données haute résolution et géolocalisées ;
- prioriser les interventions, en fonction des indicateurs d'état et des enjeux climatiques ;
- réduire les coûts et l'empreinte carbone, via des solutions innovantes et une planification optimisée ;
- anticiper les risques, en intégrant les aléas climatiques dans les stratégies d'entretien.

Un accompagnement sur mesure

Le Cerema propose aux gestionnaires de réseaux d'infrastructures de transport un accompagnement personnalisé, de l'auscultation à la formation des équipes, en passant par la mise en place de jumeaux numériques et l'intégration des données dans les SIG.

Des sessions de sensibilisation, comme celles organisées pour SNCF Réseau, favorisent la montée en compétence sur les enjeux de résilience et d'adaptation.

CONCLUSION

En 2025, le Cerema confirme son rôle de référence nationale pour l'innovation en matière de gestion des infrastructures routières. Ses nouveaux matériels et ses méthodologies offrent aux gestionnaires des outils puissants pour relever les défis du changement climatique et de la décarbonation.

En combinant auscultation à grand rendement, jumeaux numériques et solutions bas carbone, le Cerema trace la voie vers des infrastructures plus durables, sûres et résilientes. ■



Chantier de la mise à 2x2 voies de la
RD438 à Héricourt, en Haute-Saône.

LE TERRASSEMENT ET LE À L'ÈRE DES DÉFIS ENVIRONNE

Confrontés aux défis climatiques et technologiques, le terrassement et le traitement des sols se réinventent. Entre décarbonation des infrastructures, innovation et adaptation aux événements extrêmes, ce secteur devient un pilier de la construction durable. Comment les normes, les outils numériques et l'économie circulaire transforment-ils les pratiques ? Ce dossier de la RGRA propose un panorama des enjeux et des solutions pour des infrastructures plus résilientes et respectueuses de l'environnement.

Le terrassement et le traitement des sols constituent le socle invisible mais essentiel des infrastructures modernes. Qu'il s'agisse de routes, de voies ferrées, de plateformes industrielles ou d'ouvrages hydrauliques, la qualité des sols traités détermine la durabilité, la sécurité et la performance des ouvrages. Ce domaine, longtemps perçu comme une étape technique purement fonctionnelle, est aujourd'hui au cœur d'enjeux majeurs : réduction de l'empreinte carbone, économie circulaire, adaptation au changement climatique et innovation technologique.

DÉCARBONATION ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE

La réduction de l'empreinte carbone est un défi majeur pour le secteur. Les granulats recyclés issus de la déconstruction d'ouvrages existants et les liants bas carbone (laitiers de haut-fourneau, cendres volantes, ciments à faible teneur en clinker) contribuent à diminuer significativement les émissions de gaz à effet de serre (GES).

L'analyse du cycle de vie (ACV) constitue désormais un outil incontournable pour évaluer l'impact environnemental des projets. Elle facilite la comparaison entre différentes solutions techniques (traitement

des sols vs apports de matériaux nobles) en intégrant des critères tels que la consommation de ressources, les émissions de GES et la durabilité des ouvrages.

RÉSILIENCE CLIMATIQUE

Les infrastructures sont de plus en plus exposées aux événements climatiques extrêmes (inondations, sécheresses, gels/dégels répétés). Les sols traités doivent donc répondre à des critères de résilience pour garantir leur pérennité.

Les essais normalisés, comme le *Hole Erosion Test* (HET) et le *Jet Erosion Test* (JET), permettent d'évaluer la résistance à l'érosion interne et externe, un enjeu déterminant pour les ouvrages hydrauliques (digues, barrages).

Les retours d'expérience montrent que les sols traités à la chaux présentent une meilleure résistance au gel que les sols non traités, grâce à la modification de leur structure microtexturale. Cependant, des températures inférieures à -5 °C peuvent ralentir, voire interrompre, la prise hydraulique, nécessitant des adaptations des méthodes de mise en œuvre en période hivernale.

Les revêtements perméables, comme les bétons compactés poreux (BCRP), favorisent l'infiltration des eaux pluviales, réduisant ainsi les risques

AUTEUR

Olga Dubost
RGRA



© UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL

TRAITEMENT DES SOLS MENTAUX ET TECHNIQUES

d'inondation et de ruissellement urbain. Leur albédo élevé limite également les îlots de chaleur urbains.

INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES

Les méthodes traditionnelles de contrôle des sols traités (essais de déflexion, mesures de portance) sont progressivement complétées par des techniques non destructives et des outils de modélisation numérique.

Les méthodes sismiques, comme le MASW (*Multi-channel Analysis of Surface Waves*) ou le *Crosshole*, peuvent évaluer la rigidité des sols traités en mesurant la vitesse de propagation des ondes. Ces techniques, non destructives et rapides, offrent une caractérisation fine des couches traitées, même au jeune âge.

Des modèles prédictifs, fondés sur l'apprentissage automatique (*Machine Learning*), contribuent à optimiser les formulations de sols traités en fonction des contraintes locales (climat, type de sol, trafic).

PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION

La révision du GTS (guide technique *Traitement des sols*), dont la publication est prévue en 2027, s'inscrit dans une démarche d'harmonisation avec les normes européennes (série NF EN 16907). Les principales évolutions attendues concernent :

- l'élargissement des domaines d'application (ouvrages hydrauliques, plateformes industrielles, remblais techniques) ;

- l'intégration de nouveaux essais (résistance à l'érosion, potentiel de gonflement, émissivité des poussières) ;
- la prise en compte des liants bas carbone et des matériaux recyclés ;
- l'adoption de méthodes de contrôle non destructives (géophysique, FWD).

CONCLUSION

Le terrassement et le traitement des sols sont en pleine mutation, portés par des enjeux de décarbonation, de résilience climatique et d'innovation technologique. Les normes européennes et les guides techniques évoluent pour intégrer ces nouvelles exigences, tandis que les acteurs du secteur doivent s'adapter à ces changements.

Les perspectives sont prometteuses :

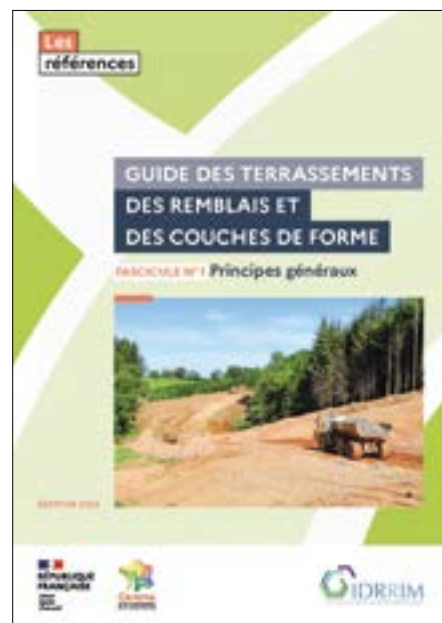
- des infrastructures plus durables, grâce à l'utilisation de matériaux recyclés et de liants bas carbone ;
- des méthodes de contrôle plus performantes, avec le développement des essais géophysiques et de la modélisation numérique ;
- une meilleure résilience face aux changements climatiques, grâce à des solutions adaptées aux gels, inondations et îlots de chaleur ;
- une économie circulaire renforcée, avec la valorisation systématique des déchets de chantier.

Cependant, ces avancées nécessitent une collaboration étroite entre les acteurs publics, les entreprises, les centres de recherche et les institutions normatives. Seul un effort collectif permettra de relever les défis et de construire des infrastructures durables, performantes et respectueuses de l'environnement. ■

RÉVISION DU GTS

POINT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

Le guide technique *Traitement des sols* (GTS)¹, publié en 2000 par le LCPC et le Sêtra, fait l'objet d'une révision profonde. Les normes européennes de 2018 sur les terrassements et la nouvelle version du *Guide des terrassements des remblais et des couches de forme* (GTR)², parue en 2024, imposent une mise à jour intégrant progrès techniques, élargissement des usages et exigences environnementales. La parution du nouveau GTS est prévue en 2027. Cet article en présente les premières orientations et les principales évolutions envisagées.



Différentes générations de documents sur le traitement et les terrassements : GTS, norme NF EN 16907-4 (BNTRA 2018) et GTR.

Les premières recommandations pour le traitement des sols, datant de 1972, portaient uniquement sur le traitement à la chaux. La première édition du Guide technique *Traitement des sols* (GTS) a été publiée en 2000, après treize années d'élaboration. Résultat d'une collaboration étroite entre entreprises spécialisées, services de l'État, maîtres d'œuvre, producteurs de liants et constructeurs de matériels, elle s'appuyait déjà sur plus de trente ans de recherche, d'innovation et de retours d'expérience issus des grands chantiers d'infrastructures.

Ce travail a abouti à un document de référence, qui a unifié et ordonné des pratiques jusque-là dispersées grâce à l'instauration de règles communes. Celles-ci constituent depuis un socle solide, qui a permis d'améliorer considérablement la qualité des ouvrages réalisés en sols traités. Ce document a fortement inspiré la norme européenne EN 16907-4, publiée en décembre 2018 : "Soil treatment with lime and/or hydraulic binders".

DÉMARCHE ET OBJECTIFS DE LA RÉVISION

Dès lors, pourquoi a-t-il été envisagé de réviser ce document, qui fait toujours référence dans le domaine des terrassements ?

- Depuis 2000, d'importantes évolutions techniques et de nouveaux retours d'expérience ont émergé dans les pratiques et les matériels de traitement, les méthodes d'études, les procédures de contrôle et les liants utilisés.
- La publication en 2018 des différentes normes européennes des terrassements EN 16907-1 à 6, elles-mêmes issues d'échanges pendant plus de 10 ans entre de nombreux pays, a constitué un

AUTEURS

Sébastien Hervé
Chef de groupe Géotechnique
Cerema Angers

Yasmina Boussafir
Ingénieure chercheuse
Université Gustave Eiffel

Daniel Puiatti
Consultant
DPST Consulting

Cédric Le Gouil
Directeur Routes et Terrassements
Cimbéton / France Ciment

Patrice Chardard
Directeur technique
Eiffage GC Infra Linéaires

À noter

Ce nouveau guide ne se substituera pas aux règles de conception en vigueur pour les différents usages considérés*. Il a pour finalité de préciser les modalités d'étude, de caractérisation physique et de réalisation propres aux couches ou massifs de sols traités, de manière à assurer la conformité avec les spécifications de conception établies par les référentiels techniques dédiés.

* À l'exception des couches de forme routières, pour lesquelles le GTS fixe explicitement les critères de dimensionnement en fonction des performances de plateforme requises.

nouveau socle de ces métiers. À l'instar du GTR révisé en 2024, il s'avérerait alors nécessaire d'harmoniser ce guide avec les nouveaux référentiels.

- Initialement utilisées dans le cadre des projets d'infrastructures routières, les solutions de traitement des sols ont progressivement vu leur domaine d'application s'étendre à de nouvelles applications : lignes LGV, projets portuaires et aéroportuaires, plateformes industrielles, parkings, ouvrages hydrauliques, remblais techniques... Le GTS se devait d'intégrer ces nouvelles applications.
- Le traitement des sols constitue depuis longtemps une démarche d'économie circulaire, en valorisant les matériaux de qualité médiocre, ce qui limite la production de déchets et réduit l'usage de ressources nobles comme les granulats, améliorant ainsi le bilan environnemental des projets. Désormais, cette approche doit aussi intégrer les enjeux, méthodes et pratiques apparus depuis les années 2000 : impact carbone, analyses de cycle de vie (ACV), démarche Éviter-Réduire-Compenser (ERC), recours à des produits bas carbone et à des matériaux alternatifs, afin de proposer une vision globale prenant en compte les spécificités du traitement des sols.

La révision du guide a été engagée par le comité « Gestion de patrimoine d'infrastructures » de l'Idrim, à la demande des professionnels du secteur, et confiée au pilotage du Cerema. Au printemps 2023, une enquête a identifié les besoins d'évolution du document ; 153 propositions en sont ressorties, aboutissant à la création de six groupes de travail :

- GT0 - Domaines d'application, périmètre, définitions, structure du document et intégration de nouveaux usages
- GT1 - Caractérisation des matériaux traités (sols, essais, performances en laboratoire, paramètres de modélisation)
- GT2 - Études et caractérisation des matériaux traités (type d'ouvrages, usages, petits chantiers, durabilité...)
- GT3 - Démarche qualité (prescriptions, spécifications), qualité de réalisation, contrôles et réception
- GT4 - Évolutions technologiques (matériels, liants) – Influence sur les performances – Qualification des matériels
- GT5 - Environnement et développement durable (impact climat, bilan carbone, décarbonation, bilan global, poussières, eau, hygiène et sécurité, déchets)

ÉLARGISSEMENT DU DOMAINE D'APPLICATION

Le GTS de 2000 concernait avant tout les applications routières du traitement des sols, à savoir la construction de remblais et la réalisation de couches de forme. L'essentiel des essais, des études, des principes de conception et des prescriptions

d'exécution a été défini en fonction de ces deux applications.

Bien qu'il mentionne d'autres usages, telles que l'amélioration de la portance des parties supérieures des terrassements (PST), le remblaiement en zones d'accès difficile, la construction de hauts remblais ou encore le raidissement de talus, ceux-ci restent peu développés dans le document (seulement six pages pour l'ensemble) et demeurent très proches des prescriptions établies pour les applications routières initialement visées.

L'application du traitement aux assises de chaussées a quant à elle fait l'objet d'un guide spécifique, édité en 2007³.



© DIGUE ELITE

-Photo 1-

Construction de la digue expérimentale du programme de recherche DigueELITE en 2015 avec un sol traité en centrale à 2 % de chaux vive.

Or, depuis les années 2000, l'utilisation des techniques de traitement des sols s'est étendue à d'autres applications, ouvrages ou parties d'ouvrages, sur des projets d'infrastructures routières et ferroviaires, de plateformes industrielles, d'ouvrages hydrauliques (**photo 1**), de dispositifs d'étanchéité, de remblais techniques (soutènements, fondations)...

Pour capitaliser les retours d'expérience de ces nouvelles applications et les prescriptions qui leur sont associées, la prochaine édition du GTS leur consacra pour chacune un chapitre spécifique, qui présentera les particularités liées au traitement des sols au travers des rubriques suivantes :

- essais et études spécifiques ;
- paramètres de dimensionnement ;
- retours d'expérience et état des connaissances ;
- exigences de performance ;
- matériels et techniques de mise en œuvre ;
- dispositifs d'assurance qualité et contrôles adaptés.

PRISE EN COMPTE DES ÉVOLUTIONS TECHNIQUES

Depuis 2000, le domaine du traitement a vu émerger des nouveaux matériels, produits de traitement et dispositifs de contrôle de la qualité.

Ces évolutions visent à optimiser les solutions de traitement, d'un point de vue technique, économique et/ou environnemental ainsi qu'à favoriser l'innovation.

MATÉRIELS

Les matériels de traitement ont connu d'importantes évolutions qui améliorent les conditions d'exécution des chantiers :

- Les techniques d'humidification se sont perfectionnées afin d'assurer une meilleure maîtrise des quantités d'eau ajoutées, avec l'utilisation systématique de débitmètre, de systèmes d'enfouissement de l'eau à l'intérieur de la couche ou encore les dispositifs d'humidification à l'intérieur de la cloche du pulvérisateur de sol.
- Pour les épandeurs, les progrès ont porté sur l'élargissement de la gamme en capacité de cuves, la technologie d'épandage, les systèmes de pesage et d'enregistrement, les GPS embarqués et les dispositifs de sécurité lors du remplissage des cuves. Selon le contexte du chantier ou plus précisément de la zone à traiter, les épandeurs assurent une bonne régularité de l'épandage avec un coefficient de variation très souvent inférieur à 5 %. Un système d'évaluation de la performance des épandeurs est en cours de mise en place sur les paramètres suivants : le coefficient de variation, la possibilité de faire varier la largeur d'épandage et les systèmes de pesage embarqués.
- Les malaxeurs ou pulvérisateurs de sol, qu'ils soient tractés ou automoteurs, se sont adaptés à une grande variété de matériaux (photo 2). La puissance du rotor, le nombre et le type de pics, la profondeur de malaxage, le système de maintien à la profondeur et éventuellement le guidage GPS contribuent à une meilleure qualité du traitement. Là aussi, un système d'évaluation de la performance est en cours de mise en place ; il sera basé sur les paramètres déjà utilisés en assises de chaussées.

- Les centrales de traitement sont devenues compactes, fixes ou mobiles, pour s'adapter aux besoins de valorisation de matériaux divers sur des chantiers de toute taille. Les quantités de matériaux, d'eau, de chaux ou de liant hydrauliques sont enregistrées.

L'évolution des équipements de chantier a ainsi largement contribué à améliorer la qualité des couches de sols traités. Afin de prendre en compte des matériels désormais plus performants, la prochaine édition du GTS introduira un système de classification similaire à celui en vigueur dans le GTS Chaussées. Ce dispositif permettra d'identifier plusieurs catégories de matériels, allant des équipements destinés aux applications courantes jusqu'à ceux offrant un niveau de performance élevé.

La combinaison de ces catégories d'équipements, du niveau des études géotechniques conduites, des contrôles réalisés lors de la mise en œuvre et des modalités de suivi et d'exploitation contribuera à définir deux classes de qualité de couches traitées : une qualité « courante », adaptée à la majorité des chantiers, et une qualité « supérieure », répondant à des exigences de performance renforcées. Ainsi, une couche de forme traitée en place pourrait être considérée comme appartenant à la même classe mécanique que celle définie dans l'étude de traitement (suppression du déclassement), dès lors que les critères correspondant à la qualité « supérieure » seront satisfaits.

PRODUITS DE TRAITEMENT

Dans le domaine des produits de traitement, la période qui s'est écoulée depuis la publication du GTS 2000 a vu apparaître de nouvelles normes relatives aux liants hydrauliques routiers ainsi que l'émergence de produits minéraux, non normalisés, mais dont les propriétés s'apparentent à celles des produits normalisés de type chaux, ciment ou liant hydraulique routier (LHR).

—Photo 2—
Pulvérisateur auto-moteur
puissant.



Le principal intérêt de ces nouveaux produits réside dans l'utilisation de constituants différents de ceux employés dans les produits normalisés. Afin de ne pas faire obstacle à l'innovation, le nouveau GTS fixera les conditions à remplir pour que ces produits puissent être autorisés en traitement des sols. Elles porteront sur les contrôles de production, la vérification des performances techniques, ainsi que sur la conformité aux règles environnementales en vigueur. Ces produits devront être couverts par un avis technique délivré soit par le CEN, soit par un organisme français autorisé comme l'Idrri ou le Cerema.

En ce qui concerne la chaux ou les liants hydrauliques normalisés, la révision du GTS 2000 offrira l'opportunité de faire le point sur :

- Les principales évolutions en ce qui concerne les compositions des chaux et des liants et leurs caractéristiques. Elle précisera également l'intérêt de prendre en compte le type de liant en fonction des contraintes du chantier et/ou locales : humidité et argilosité du sol, délai de remise en circulation, conditions climatiques, maniabilité du mélange et interaction avec le sol...
- L'utilisation privilégiée, et préférée aux ciments, des LHR, tel que repris dans les normes européennes actuelles.
- Les données environnementales actuelles et les perspectives des producteurs.

NOUVELLES APPROCHES D'ÉTUDES

Les modalités d'études établies dans le GTS (édition 2000) concernaient essentiellement deux usages.

USAGE 1 : LA CONSTRUCTION DE REMBLAIS

Les études consistent dans ce cas à déterminer les dosages en chaux ou en LHR nécessaires pour garantir des conditions de mise en œuvre et de compactage adaptées à l'état hydrique des matériaux et satisfaisant un niveau minimal de portance. Ce cas de traitement vise généralement les sols fins trop humides. Les performances attendues sont définies par des plages minimums/maximums d'IPI (indice de portance immédiat) selon la classe de sol. Dans la nouvelle version du GTS, la méthodologie restera sensiblement la même, avec toutefois une actualisation des valeurs de référence en fonction des nouvelles classes du GTR 2024 (conformes aux normes européennes) et des retours d'expérience.

USAGE 2 : LA RÉALISATION DE COUCHES DE FORME TRAITÉES

La démarche actuelle s'appuie sur des études de formulation (de niveau 1, 2 ou 3) dépendant du type de liant utilisé (chaux seule ou liant hydraulique éventuellement combiné à de la chaux). Plusieurs critères viennent attester des performances à court et à long terme, notamment la classe mécanique

obtenue à 90 jours, la résistance au trafic poids lourds ainsi que l'insensibilité au gel, de façon à répondre aux exigences fixées par la conception. Dans la nouvelle version du GTS, des compléments seront apportés à ces études de formulation :

Âge autorisant la circulation sur la couche traitée

La valeur actuelle est fondée sur l'obtention d'une résistance unique $R_c > 1,0$ MPa. Cette dernière pourrait être modulée en fonction de l'exposition de la couche traitée, de son usage et du niveau d'agressivité auquel elle est soumise.

Résistance au gel

Les précisions sur les critères à vérifier, spécifiés dans le GTR 2024, seront intégrées et adaptées aux sols traités.

Performances escomptables à long terme

Fondées sur le couple E/R_t à 90 jours de cure, elles définissent une zone, puis une classe mécanique dimensionnante. Deux évolutions sont envisagées sur la détermination de ces performances :

- Il sera possible, dans certaines conditions, de ne plus déclasser systématiquement la zone mécanique en cas de traitement en place des sols. Un chapitre spécifique définira les conditions à remplir, notamment : la qualité et l'homogénéité du gisement, les études à conduire, les classes de matériels à utiliser en chantier, les contrôles à réaliser...
- La mesure du module élastique sera autorisée en compression simple, en introduisant un coefficient de calage entre E_c et E_{it} . D'autres méthodes, comme la méthode sonique, sont également à l'étude. Une réflexion est également conduite pour analyser l'impact de la durée de cure, au-delà de 90 jours, sur les performances mécaniques et leur intégration dans le modèle. En effet, on observe fréquemment un gain de performances mécaniques entre les valeurs à 90 jours et celles à 360 jours dans les conditions d'analyse en laboratoire. Ce gain est-il transposable aux chantiers ?

Spécificités des petits chantiers

Pour les formulations de stabilisation destinées aux couches de forme des petits chantiers :

- Le tableau de modalités de traitement envisageables sans étude sera révisé en y introduisant des LHR normalisés, en complément des formulations proposées avec des ciments purs.
- La procédure de formulation accélérée par chauffage, présentée dans la note Idrri n°52⁴, sera introduite comme méthode alternative au tableau cité ci-avant, en précisant son domaine d'application et ses limites.

Traitement des sols tropicaux

Enfin, une réflexion est en cours pour apporter un éclairage sur les pratiques spécifiques du traitement des sols tropicaux en contexte ultramarin.

AMÉLIORATION ET STABILISATION

Plus généralement, la nouvelle version du GTS déclinera ses différentes rubriques (études, contrôles, matériels...) en considérant deux finalités se substituant aux applications « remblai » ou « couche de forme » :

- L'amélioration : le traitement vise, à court terme, à optimiser les caractéristiques mécaniques des matériaux afin de réaliser les terrassements dans de bonnes conditions de mise en œuvre et de compactage. Il agit principalement sur la maîtrise de l'état hydrique et sur l'ouvrabilité en phase chantier.
- La stabilisation : le traitement recherche, à moyen et long terme, une amélioration durable des performances mécaniques des sols pour se conformer au modèle géotechnique retenu lors de la conception. Cette stabilisation s'inscrit dans une logique de pérennité des ouvrages en terre. Cette notion sera définie de manière plus générale, afin de pouvoir être déclinée à tous les usages en stabilisation.

La première partie du document fournira les données communes et générales applicables à ces deux approches ; la seconde détaillera les spécificités relatives à chaque usage, avec un chapitre dédié par application.

NOUVEAUX ESSAIS

De nouveaux essais seront proposés pour améliorer la connaissance du comportement des sols traités sur différents aspects (physico-chimie, résistance à l'érosion...).

ESSAI DE DÉTERMINATION DU POINT DE FIXATION DE LA CHAUX (LFP : LIME FIXATION POINT)

Cet essai sera introduit comme un nouvel outil pour tester le comportement d'un sol argileux en présence de chaux pulvérulente. Également appelé « essai pH », il est utilisé pour déterminer la quantité minimale de chaux à partir de laquelle il

convient d'engager les études de stabilisation d'un sol plastique (matériaux de classe F2, F3 ou F4 au sens du GTR 2024).

La détermination de la quantité de chaux par cet essai constitue une aide à la décision en matière de dosage en chaux, notamment en vue d'une stabilisation : il identifie le dosage en chaux à partir duquel le phénomène d'échange cationique avec le sol peut s'amorcer et permettre le déroulement des réactions sol-chaux. La quantité de chaux ajoutée au sol et excédant celle correspondant au LFP constitue une réserve disponible pour assurer l'initiation des réactions pouzzolaniques et le gain de performances mécaniques et hydrauliques du matériau sol-chaux à long-terme.

Le LFP sert donc de référence au démarrage des études sur la mesure des performances mécaniques, mais aussi de la contrainte critique d'érosion pour les ouvrages hydrauliques.

Cet essai ne fournit toutefois pas d'informations sur les performances mécaniques obtenues par l'adjonction de la chaux. Il n'est pas destiné à remplacer les essais classiques d'étude de la performance (essai d'aptitude, IPI, CBR, Rc...). Il complète ce panel déjà existant, notamment pour certains cas de stabilisation (couche de forme traitée à la chaux seule, ouvrages hydrauliques...).

ESSAIS D'ÉROSION HET (HOLE EROSION TEST) ET JET (JET EROSION TEST)

Ces essais contribuent à évaluer l'érodabilité des sols, en particulier dans le contexte des ouvrages hydrauliques.

Complémentaires, ils visent à mesurer la résistance des sols vis-à-vis des phénomènes d'érosion interne ou externe. Ils participent à l'élargissement du domaine d'application du traitement des sols aux ouvrages hydrauliques ; réalisés sur des ouvrages anciens, ils apportent des informations intéressantes sur la durabilité des performances des couches en sols traités vis-à-vis des sollicitations hydrauliques.

ESSAIS À L'ÉTUDE

Pour les couches stabilisées, de nouvelles approches de réception sont à l'étude, comme les mesures au FWD (*Falling Weight Deflectometer*) (photo 3) ou le recours à des méthodes sismiques. Des expérimentations sont actuellement menées afin d'évaluer leur pertinence avant d'envisager leur intégration au référentiel du GTS.

VERS UNE GESTION PLUS DURABLE DES PROJETS DE TERRASSEMENT

La nouvelle version du GTS s'attachera à apporter des éléments plus complets sur l'impact environnemental du traitement des sols, pour proposer au concepteur une approche globale et multicritères.

—Photo 3—
Déflectomètre à masse tombante ou FWD.



© CEREMA - AGENCE DE SAINT-BRIEUC

Pour mesurer les impacts d'une opération de terrassement, l'analyse doit en effet dépasser la seule dimension technique et intégrer des critères environnementaux et socio-économiques au cours de trois étapes : la conception, la réalisation du chantier et la vie de l'ouvrage.

EN PHASE DE CONCEPTION

Les choix techniques concernant les sols terrassés, les matériaux d'apport et leur provenance influencent fortement l'empreinte carbone :

- Un support terrassé rendu plus performant permet de limiter les apports de granulats extérieurs ou de réduire les épaisseurs de structures d'infrastructure.

- Le recours à des liants pour stabiliser les sols constitue une alternative stratégique, car il valorise les déblais et réduit les besoins en transport.

Néanmoins, la production de chaux et de liant hydraulique reste fortement émettrice en CO₂, conduisant généralement à des solutions constructives plus « émissives », en fonction du type de liant utilisé, de la distance entre chantier et carrière... Cela incite d'ailleurs au développement de liants bas carbone ou biosourcés. La question de la durabilité de ces solutions reste essentielle.

Il convient de considérer l'intérêt d'une solution de traitement des sols bien au-delà de la phase du chantier pour pouvoir prendre en compte, grâce à des analyses comparatives fondées notamment sur l'analyse de cycle de vie (ACV), l'avantage d'une plus longue durée de service des ouvrages utilisant des matériaux stabilisés de plus grande durée de vie et nécessitant moins d'entretien.

À L'ÉCHELLE DU CHANTIER

L'évaluation environnementale s'étend aux activités de mise en œuvre et de logistique :

- Le traitement des sols en place limite les flux de camions et les émissions liées aux engins.
- L'adoption d'équipements hybrides ou électriques accentue ces gains.

Toutefois, l'usage de liants minéraux doit être encadré pour prévenir les risques de pollution locale, notamment dans les sites sensibles. Le chantier doit ainsi être géré comme un système complexe, conciliant performance technique et économique et réduction des impacts.

SUR LE LONG TERME

L'ACV offre une vision plus complète du projet. Elle intègre les phases de conception, de construction, d'entretien et de fin de vie, et prend en compte des indicateurs multiples : consommation de ressources, énergie, eau, déchets, pollution, bruit, paysage, biodiversité, sécurité et bien-être des populations.

Cette approche évite les lectures monofactorielles et met en évidence les bénéfices indirects, comme

la réduction des matériaux bitumineux grâce aux structures « semi-rigides » issues de sols traités, plus performantes que leur équivalent granulaire.

La prise en compte de solutions d'ERC des impacts sera également abordée dans la nouvelle version du GTS.

Ces nouvelles approches, ACV et ERC, rendront les solutions de traitement des sols plus durables, ce qui est une attente forte des maîtres d'œuvre et d'ouvrage.

L'analyse multicritères nécessite la définition d'un périmètre clair, le choix d'indicateurs pertinents et l'utilisation de données fiables sur les matériaux et procédés. Alors que les industries de la chaux et des liants hydrauliques s'engagent dans des trajectoires de décarbonation, l'optimisation des terrassements apparaît comme un levier majeur pour concilier performance technique, sobriété carbone et durabilité des infrastructures.

DURABILITÉ DES TRAITEMENTS

La durabilité d'un ouvrage est un sujet primordial qui associe une conception adaptée et la qualité de sa réalisation. Pour cela, il convient de bien définir ce qu'on entend par durabilité au regard des performances attendues de l'ouvrage à long terme, des sollicitations auxquelles il est soumis, de son éventuelle durée de vie, de ses conditions d'entretien et d'exploitation, de son exposition aux éléments climatiques...

Jusqu'à très récemment, l'intérêt du traitement des sols dans le cadre d'un projet d'infrastructure était motivé par des avantages économiques, guidés par une optimisation du mouvement des terres, une valorisation des matériaux du site et une compétitivité (alliée à un savoir-faire) des entreprises de terrassement dans ce domaine.

Désormais, les projets d'infrastructures doivent également justifier de leur impact sociétal et environnemental, deux aspects complémentaires à une analyse en développement durable. Or, en matière d'environnement, de nombreuses études ont mis le doigt sur l'impact carbone des solutions de traitement des sols. Il convient donc d'apporter dans la nouvelle version du GTS de nouveaux outils et de nouvelles données favorisant l'examen d'une solution fondée sur le réemploi de matériaux traités au regard d'autres solutions de terrassement et l'évaluation des impacts avec un regard critique et objectif, intégrant l'aspect performanciel.

Inspirée du référentiel de l'Eurocode 0, l'étude de la durabilité prendra en compte :

- l'adaptation de la solution à son contexte environnemental (par exemple au gel ou à l'eau) ;
- la durée de service de la solution, c'est-à-dire le temps pendant lequel sa performance sera

maintenue sans intervention exceptionnelle ni renforcement, hors programme d'entretien courant. Ces deux aspects, piliers de la durabilité, permettront d'évaluer les solutions de traitement des sols en appliquant les méthodes récentes d'ACV qui intègrent non seulement les impacts liés au chantier, mais également ceux liés à la durée d'usage de l'infrastructure.

En dépassant le seul impact du chantier, on peut considérer les nombreux avantages des stabilisations des matériaux qui apportent, sous réserve d'une bonne exécution et d'un contrôle adapté, une réduction des entretiens, une plus longue durée de service et des avantages économiques et environnementaux comme la réduction des excédents de chantier ou une réduction du trafic routier.

Fortes des nombreuses expériences réussies d'opérations de traitement des sols en couche de forme et en remblai, sur plus de six décennies, cette nouvelle approche de justification des solutions de traitement intégrant les questions de durabilité nécessite la rédaction de chapitres spécifiques et une nouvelle présentation du GTS.

CONCLUSION

S'appuyant sur plus de 60 années de pratique et de retours d'expérience, la révision du Guide technique *Traitement des sols* (GTS), prévue pour 2027, a pour ambition d'intégrer les évolutions majeures survenues depuis 2000 concernant les méthodes, les matériels et les produits de traitement. Elle vise également à élargir les champs d'application du traitement des sols et à répondre aux nouvelles exigences environnementales.

Cette mise à jour s'inscrit dans le cadre d'une démarche d'harmonisation avec les normes européennes, de valorisation des innovations techniques et de prise en compte des enjeux climatiques et sociétaux contemporains. Elle a pour finalité de fournir aux acteurs du domaine une méthode actualisée, consolidant des pratiques éprouvées tout en favorisant l'innovation, la performance et la réduction de l'empreinte carbone des ouvrages. ■

À retenir

- Prévue pour 2027, la révision du Guide technique *Traitement des sols* (GTS) intègre les progrès observés depuis 2000 en matière de procédés, d'équipements et de liants hydrauliques.
- Elle vise également à élargir les domaines d'application du traitement tout en répondant aux exigences environnementales et réglementaires renforcées.
- Cette évolution s'inscrit dans le cadre d'une démarche d'harmonisation européenne et de valorisation des innovations, afin d'actualiser les référentiels techniques, d'améliorer la performance et la durabilité des ouvrages et de réduire leur empreinte carbone.

RÉFÉRENCES

1. LCPC/Sétra, *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques* (GTS). Application à la réalisation des remblais et des couches de forme, « Guide technique », LCPC, 2000.
2. Idrrim, *Guide des terrassements des remblais et des couches de forme* (GTR), Cerema, 2024.
3. Sétra, *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des assises de chaussées*, « Guide technique », 2007.
4. Idrrim, « Sols traités aux liants hydrauliques : étude de formulation accélérée », Note d'information n° 52, 2024.

SOLS TRAITÉS AUX LIANTS HYDRAULIQUES

ÉTUDE DE FORMULATION ACCÉLÉRÉE POUR PETITS CHANTIERS DE COUCHE DE FORME

L'augmentation de la température accélère la prise des sols traités aux liants hydrauliques, un phénomène bien identifié par les professionnels des terrassements. Cette caractéristique a permis de concevoir une nouvelle méthode de formulation accélérée en laboratoire, adaptée aux chantiers de couche de forme de faible importance. La procédure correspondante est détaillée dans la note d'information Idrrim n° 52¹, dont est présenté ici un court résumé.



Éprouvettes 50x50 mm en étuis fermés étanches dans un bain thermostaté.

La méthodologie de dimensionnement des couches de forme traitées, issue du GTS 2000², définit trois niveaux d'études de formulation selon la précision attendue du projet. Ces études visent à optimiser la valorisation des matériaux en fonction des performances mécaniques E/R_t à long terme, mesurées après 90 jours de cure à 20 °C.

Cette démarche impose un phasage rigoureux entre études et travaux, la durée d'essai en laboratoire étant d'environ quatre mois. Or, pour les petits projets, les délais des appels d'offres sont souvent incompatibles avec ces contraintes, surtout lorsque le traitement des sols n'est pas anticipé. Dans ce cas, le GTS prévoit des solutions sans essais, fondées sur des ciments normalisés à dosages élevés, mais celles-ci sont rarement acceptées faute de justification mécanique.

Dans ce contexte, le Cerema et ses partenaires (Routes de France, SPTF, Cimbéton, UPChaux, FNTP) ont développé, entre 2016 et 2022, une procédure d'essais accélérés à 40 °C permettant de réduire les délais de cure.

CONDUITE DE L'ÉTUDE - CHOIX DES SOLS ET DES LIANTS

L'étude a été réalisée en retenant neuf sols couvrant une large gamme de matériaux représentatifs des classes GTR³ usuellement utilisées en couche de

forme traitée. Elle a été conduite avec quatre liants routiers de caractéristiques bien différenciées et avec trois dosages :

- deux traitements avec le liant pur à 4 % et à 6 % ;
- un traitement mixte à 1 % chaux et 4 % de liant.

Chaque sol a été testé suivant 12 configurations, afin d'explorer un large spectre de traitements allant de combinaisons très performantes (avec ou sans cinétique rapide) à d'autres conduisant à des performances plus faibles.

Pour fiabiliser la représentativité des résultats, chaque série d'essais a été doublée pour une vérification croisée entre deux laboratoires indépendants (quatre laboratoires du Cerema et cinq laboratoire privés).

RÉSULTATS

La comparaison des valeurs obtenues a contribué à déterminer, pour chaque configuration de traitement, l'âge équivalent sous cure à 40 °C et à une humidité relative d'au moins 90 %, correspondant aux performances en résistance et en module mesurées à 90 jours à 20 °C. Les résultats détaillés de ces essais ont été présentés dans un précédent article de la RGRA⁴.

L'analyse des différentes configurations a montré qu'une durée de cure de 14 jours constituait la meilleure équivalence entre les performances obtenues à 20 °C et celles à 40 °C. Cependant, une

AUTEUR

Sébastien Hervé
Chef du groupe Géotechnique,
Enrochements et Matériaux
Cerema

certaine dispersion était observée autour des valeurs moyennes, ce qui conduit à appliquer les coefficients de sécurité suivants :

- réduction de 10 % sur la résistance : R_t corrigé = $0,90 R_t$ (avec $R_t = 0,8 R_{it}$) ;
- majoration de 20 % sur le module : E corrigé = $1,20 E$.

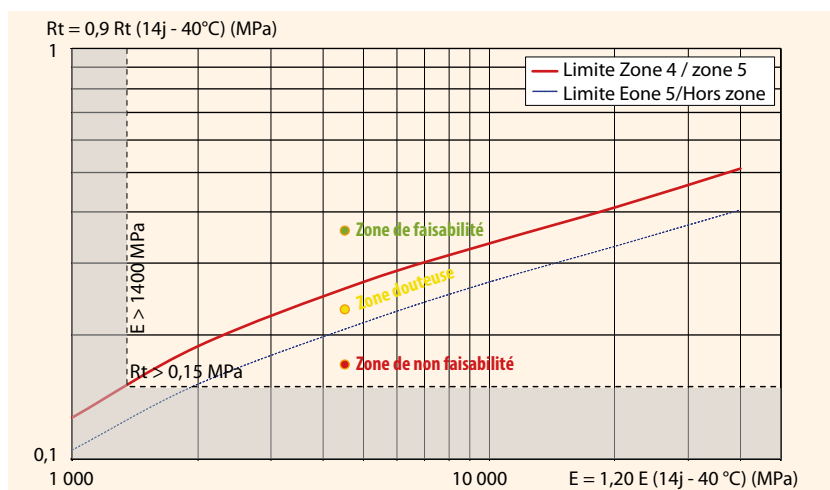
Grâce à l'exploitation de l'ensemble de ces résultats, le diagramme décisionnel représenté en **figure 1** a pu être établi.

La « zone de faisabilité » ainsi définie rassemble les couples sols/liants considérés comme compatibles avec le projet. Toutefois, certains critères supplémentaires, comme la traficabilité ou la résistance au gel, doivent encore être vérifiés (voir ci-après).

La zone dite « douteuse » correspond à la zone 5 classique définie par la norme NF EN 16907-4⁵. Avec les coefficients de sécurité retenus, elle comprend des configurations pour lesquelles une part des résultats mesurés à 20 °C respectait les critères d'acceptabilité recherchés (zone 4 minimale) alors que les valeurs obtenues à 40 °C ne les remplissaient pas.

—Figure 1—

Principe de classification des performances de sols traités obtenues à 14 jours par une étude de faisabilité accélérée par une cure à 40 °C.



Dans ces conditions, l'étude accélérée se révèle globalement plus conservatrice que l'étude classique. Elle n'autorise donc pas une optimisation du dosage, contrairement aux études de formulation de niveau 1 ou 2.

AUTRES CRITÈRES À VÉRIFIER

Les critères suivants doivent également être vérifiés :

- Homogénéité du gisement - Le gisement sélectionné doit répondre aux exigences d'homogénéité définies par le GTS. Il doit être caractérisé à partir d'un nombre suffisant d'essais d'identification géotechnique, déterminé selon le volume de matériaux nécessaires et le niveau de connaissance préalable de la formation concernée.

- Caractéristiques de mise en œuvre du mélange - Il convient de déterminer les références de compactage (w_{OPN} et $\rho_{d OPN}$) du mélange sol + liant, en

établissant la courbe Proctor normal du sol après traitement.

- Résistance à l'immersion « au jeune âge » - Cette exigence est vérifiée à partir de valeurs d' I_{PI} déterminées à une teneur en eau massique comprise entre w_{OPN} et $w_{OPN} + 2\%$ et de valeurs d' I_{CBRI} obtenues après 4 jours d'immersion. Les conditions suivantes doivent être respectées : $I_{CBRI} \geq 20$ et $I_{CBRI} \geq I_{PI}$

- Absence de gonflement - La vérification de l'aptitude au traitement doit être réalisée conformément à la norme NF P94-100⁶, avant ou en parallèle de la procédure accélérée. Cette vérification vise à s'assurer de l'absence de risque de gonflement et/ou de défaut de prise dû à la présence de perturbateurs, selon le critère « gonflement » défini dans l'annexe A de cette norme.

- Résistance au gel - Le critère $R_{it} \geq 0,25$ MPa doit être respecté sur des éprouvettes ayant subi une cure de 24h à 20 °C et au moins 90 % d'humidité, suivie de 14 jours à 40 °C en immersion avec le même degré minimum d'humidité. Ce critère est considéré comme satisfaisant si un délai d'au moins trois mois sépare le traitement du sol et la période probable de gel. Pour des délais de chantier plus courts, des essais complémentaires avec une cure à 20 °C, comme pour les études de formulation de niveau 1, sont requis. Ce critère s'applique aux sols fins et intermédiaires ; il n'est pas applicable aux craies, aux marnes, ni aux matériaux alternatifs.

- Dispositions complémentaires pour la mise en œuvre :

- Afin de tenir compte des éventuelles variabilités liées au matériau ou aux conditions de mise en œuvre, un léger surdosage en liant (par exemple +0,5 %) peut être envisagé selon les conditions particulières du chantier.
- Il est essentiel de maîtriser l'état hydrique des matériaux sur chantier : ceux-ci ne doivent pas se trouver dans des conditions extrêmes, de type « ts » ou « th ».

DOMAINE D'APPLICATION DE LA MÉTHODE

Cette méthode s'adresse aux chantiers de réalisation de couche de forme dits « de faible importance », pour lesquels le coût et les délais d'une étude de formulation complète se révèlent souvent incompatibles avec les contraintes du projet.

Remarque

La notion de « chantier de faible importance » ne se limite pas au seul critère de volume. Un chantier de petite taille peut en effet nécessiter une forte technicité pour atteindre des performances élevées ; en ce cas, les impératifs de délai ne doivent pas primer sur les exigences techniques.

La qualification de chantier comme « de faible importance » relève du maître d'ouvrage ou, le cas échéant, de son maître d'œuvre. À titre indicatif, cette classification peut être envisagée par défaut lorsque les conditions suivantes sont réunies :

- réseau non structurant ;
- absence de sollicitations exceptionnelles (trafic de chantier notable, charges d'exploitation supérieures aux charges routières usuelles...) ;
- prise en compte d'une classe mécanique 5 dans le dimensionnement, sans surclassement possible ;
- plateforme support de classe de portance PF3 au maximum, conformément au tableau de dimensionnement du GTR ;
- homogénéité de la formation sur l'ensemble du projet pour la formulation considérée. Cette condition sera fréquemment associée à un volume maximum de couche de forme de 5 000 m³, en l'absence d'analyse spécifique d'un géotechnicien permettant éventuellement de majorer cette valeur.

Important

Lorsque les matériaux utilisés présentent un caractère atypique ou disposent de peu de retours d'expérience en traitement de couche de forme, la réalisation d'études de formulation de niveau 1 ou 2 demeure indispensable.

CONCLUSION

La méthode d'étude de formulation accélérée par chauffage, présentée dans la note d'information Idrrim n° 52, constitue une alternative aux approches classiques souvent trop longues pour les petits chantiers de couches de forme routières. Elle permet d'obtenir des éléments de dimensionnement plus adaptés que les formulations « sans étude » décrites dans le GTS 2000.

Cette méthode vise les chantiers courants ne présentant pas de contraintes particulières de réalisation (contexte géotechnique complexe, trafic de chantier important...) ni d'exploitation (sollicitations exceptionnelles, exigences de portance

élevées). Elle répond ainsi aux besoins des opérations de faible envergure, où les études de formulation classiques s'avèrent disproportionnées en termes de délais. En revanche, les études de formulation de niveau 1 ou 2 demeurent indispensables pour optimiser les solutions de traitement. ■

À retenir

- Une nouvelle méthode de formulation accélérée en laboratoire a été développée pour les petits chantiers de couche de forme traités aux liants hydrauliques, afin de réduire les délais de cure de 90 jours à 20 °C à seulement 14 jours à 40 °C.
- Cette approche répond aux contraintes de temps souvent incompatibles avec les études classiques, tout en évitant les solutions sans essais, peu acceptées faute de justification mécanique.
- La méthode s'applique aux chantiers de « faible importance » (réseaux non structurants, absence de sollicitations exceptionnelles, volume limité à 5 000 m³ par défaut), mais exclut les projets nécessitant une forte technicité ou des matériaux atypiques.
- Cette alternative, détaillée dans la note d'information Idrrim n° 52, offre une solution adaptée aux petits chantiers routiers, où les études classiques sont jugées disproportionnées en termes de coûts et de délais. Elle ne remplace pas les études de formulation de niveau 1 ou 2 pour les projets complexes ou exigeants.

RÉFÉRENCES

1. Idrrim, « Sols traités aux liants hydrauliques : étude de formulation accélérée », Note d'information n° 52, septembre 2024.
2. LCPC/Sétra, *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS). Application à la réalisation des remblais et des couches de forme*, « Guide technique », LCPC, 2000.
3. Idrrim, *Guide des terrassements des remblais et des couches de forme (GTR)*, Cerema, 2024.
4. S. Hervé, T. Lambert, M. Collobert, J. Abdo, M. Prétesseille, « Sols traités aux liants hydrauliques - Synthèse de l'étude d'une procédure d'essais accélérés en laboratoire », RGRA n° 990, mai 2022.
5. NF EN 16907-4 : « Terrassement - Partie 4 : traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques », décembre 2018.
6. NF P94-100 : « Sols - Reconnaissance et essais - Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essais d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement », octobre 2022.

BC2R TextuR

UN MATÉRIAU DURABLE AU SERVICE DES MOBILITÉS DOUCES

BC2R TextuR est une déclinaison innovante du béton compacté routier distingué lors de l'appel à projets du CIRR 2022 qui intègre 100 % de granulats recyclés issus de la déconstruction locale. Conçu pour les mobilités douces, il répond aux enjeux de décarbonation et d'économie circulaire tout en garantissant des performances mécaniques conformes aux exigences normatives. Ses atouts incluent la réduction des GES grâce à des liants bas carbone, un potentiel de piégeage du CO₂ par carbonatation ainsi qu'une version poreuse pour la gestion des eaux pluviales.

Piste cyclable en BC2R TextuR à Lagord (17).



AUTEURS

Yohann Cantegreil

Chef de projets R&D
Spie batignolles travaux publics

Guillaume Gutierrez

Chargé d'études R&D
Spie batignolles travaux publics

Aurélia Nicolai

Responsable R&D
Spie batignolles travaux publics

Pierre-Yves Mahieux

Enseignant-chercheur
Laboratoire des Sciences de l'ingénieur pour l'environnement (LaSIE)

Thierry Sedran

Ingénieur-chercheur
Directeur du laboratoire Matériaux pour infrastructures de transport
Université Gustave Eiffel

Simon Martinez

Chef de projets
Tipee

Les territoires urbains font face à des défis majeurs : réduction des émissions de gaz à effet de serre, adaptation au changement climatique et préservation des ressources naturelles. Ces enjeux imposent une approche intégrée des aménagements, conciliant mobilité douce, gestion durable des eaux pluviales et économie circulaire. La conception des infrastructures ne peut plus se limiter à la seule performance mécanique : elle doit intégrer des critères de décarbonation, de désimperméabilisation et de confort thermique.

Dans cette perspective, le projet « La Rochelle territoire zéro carbone » (LRTZC) illustre la capacité des acteurs à innover en développant des solutions qui s'inscrivent dans une logique multifonctionnelle. La gamme de bétons compactés routiers TextuR de Spie batignolles travaux publics, qui se décline en 100 % recyclé (BC2R) et en version poreuse, répond à cette ambition. Elle associe valorisation des granulats issus de déconstruction, réduction de l'empreinte carbone et lutte contre la surchauffe locale grâce à son fort albédo, et à sa capacité à laisser les eaux pluviales s'infiltrer pour la version poreuse.

Au-delà de ses performances techniques, le BC2R s'inscrit dans la démarche écosystémique suivante :

- optimiser l'usage des ressources par l'intégration de matériaux recyclés et de liants bas carbone ;
 - améliorer le confort thermique en luttant contre les îlots de chaleur urbains grâce à des revêtements clairs et réfléchissants ;
 - répondre aux enjeux urbains en proposant des revêtements adaptés aux mobilités douces assurant, le cas échéant, l'infiltration des eaux pluviales.
- Cette approche globale, qui conjugue innovation technique et responsabilité environnementale, ouvre la voie à des infrastructures urbaines durables, capables de répondre aux exigences réglementaires et aux attentes sociétales.

UNE RESSOURCE LOCALE AU CŒUR DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

La gamme développée permet de formuler des BCR intégrant jusqu'à 100 % de granulats recyclés issus de déchets inertes du BTP afin de s'inscrire dans une démarche d'économie circulaire en diminuant la consommation de matières premières.



–Photo 1–
Concasseur-cribleur.

Le BC2R développé dans le cadre de la fiche action LRTZC est formulé avec les granulats recyclés de la plateforme de valorisation Valosphère, qui récupère les déchets de chantiers locaux de démolition. Une première étape importante de tri est réalisée à la réception, avant la campagne de concassage-criblage (photo 1) spécifique aux besoins. Concernant la formulation du BC2R, trois coupures (0/4, 4/10 et 10/14) sont produites afin de recomposer le squelette granulométrique selon l'annexe A de la norme NF P98-128¹.

Selon l'essai de tri réalisé conformément à la norme NF EN 933-11², les granulats recyclés (photo 2) contiennent en moyenne pour majeure partie des granulats de bétons de démolition (Rc = 60 %), des granulats naturels (i.e. de calcaire, Ru = 30 %), des granulats de terre cuite (Rb = 10 %). Ces proportions peuvent légèrement varier entre les différentes campagnes.

–Photo 2–
Granulats recyclés.



Les différentes coupures de granulats recyclés produites sont caractérisées afin de vérifier leurs caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques selon les critères de qualité attendus (tableau 1). Les analyses environnementales réalisées valident l'usage de type 3 des granulats recyclés selon le guide du Cerema de 2025³. En effet, l'usage de type 3 correspond dans ce guide à l'application visée pour une couche de roulement non revêtue pour mobilités douces.

Les résultats des essais de caractérisation physiques et mécaniques réalisés doivent respecter les catégories CRB, CRC selon la norme NF EN 12620+A1⁴,

ce qui permet ensuite de classer les granulats recyclés comme des gravillons de type 2 ou 3 (NF EN 206+A2/CN⁵) selon le pourcentage de Rcu présent dans le stock.

Le contexte normatif actuel n'autorise pas la valorisation de ce type de granulats recyclés dans des proportions visées dans les formulations (100 % de granulats recyclés), ce qui représente un des caractères « innovants » de la solution de Spie batignolles travaux publics. Pourtant, en assurant la qualité de production de ces granulats recyclés et en maîtrisant leur absorption et leur teneur en eau, il est tout à fait possible d'assurer la bonne reproductibilité industrielle de la production jusqu'à la mise en œuvre afin d'obtenir un matériau performant et durable pour l'application visée.

–Tableau 1–
Essais de caractérisation réalisés sur les granulats recyclés.

Dénomination de l'essai	Norme	Coupure	Critères	Catégorie (NF EN 12620+A1)
Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière ³	NF ISO 10694 NF ISO 16703 NF EN 16181 NF EN 16167 NF EN ISO 22155 NF EN 12457-2	0/4	Usage de type 3	-
Sulfates solubles dans l'eau	NF EN 1744-1 a. 10-2	0/4	SS0,3	CRB, CRC
Essai au bleu de méthylène	NF EN 933-9	0/4	À déclarer	-
Coefficient de friabilité du sable	NF P 18-576	0/4	À déclarer	-
Essai Los Angeles	NF EN 1097-2	6/10	LA40	CRB, CRC
Résistance à l'usure (micro-Deval) en présence d'eau	NF EN 1097-1	6/10	À déclarer	-
Détermination de la masse volumique réelle et de l'absorption d'eau	NF EN 1097-6 Article 8, 9 et F	0/4 4/10 10/14	À déclarer	-
Analyse granulométrique par tamisage et teneur en eau	NF EN 933-1 NF EN 1097-5	0/4 4/10 10/14	À déclarer	-

DU BAS CARBONE AU CARBONE NÉGATIF : RÔLE CLÉ DE LA CARBONATATION

Les composants des BCR sont les mêmes que ceux du béton conventionnel, mais avec un dosage en liant et en eau plus faible pour des performances mécaniques équivalentes.

Par ailleurs, en techniques routières, les graves traitées aux liants hydrauliques (GTLH) et les BCR sont formulés avec des liants « routiers » moins dosés en clinker, utilisant des co-produits issus de l'industrie tels que les laitiers de haut-fourneaux, les cendres volantes...

L'intégration de graves recyclées dans le squelette granulométrique constitue également un atout en termes de carbonatation naturelle, processus chimique de vieillissement naturel qui se traduit par la dissolution des hydrates cimentaires et la précipitation de carbonates de calcium CaCO_3 au contact du CO_2 atmosphérique partiellement dissous dans la solution interstitielle du béton. Si, pour les structures en béton armé, la carbonatation compromet la durabilité en favorisant l'initiation de la corrosion des armatures, elle peut, pour les structures non armées, être avantageuse dans l'analyse de cycle de vie de l'ouvrage, car elle réduit l'empreinte carbone du béton. Les graves recyclées, dont la composition est majoritairement issue de béton de démolition, représentent une ressource supplémentaire au ciment pour le piégeage du CO_2 .

Les études réalisées avec le LaSIE (laboratoire des Sciences de l'ingénieur pour l'environnement) ont contribué à estimer le potentiel de piégeage de CO_2 (exprimé en masse de CO_2 piégé par m^2 de piste cyclable sur la durée de vie de la piste

cyclable) sur des échantillons de BCR comprenant 100 % de granulats naturels et de BC2R comprenant 100 % de granulats recyclés. Les résultats montrent que, sur des prévisions à 15 ans :

- Les pistes cyclables en BCR devraient piéger environ $1 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$.
- Celles en BC2R pourraient atteindre environ 3 à $4 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$.

Ces résultats soulignent l'impact positif de l'utilisation des graves recyclées sur le piégeage du CO_2 . Cependant, le processus de carbonatation naturelle est lent : il commence à la surface du béton, progressant vers l'intérieur à un rythme qui dépend de divers facteurs (porosité, humidité...).

Spie batignolles travaux publics poursuit ses travaux sur le potentiel de carbonatation des graves recyclées avec le LaSIE par le financement de travaux de thèse sur le potentiel de carbonatation accéléré des granulats recyclés pouvant être valorisés en techniques routières.

ANTICIPER LA TEMPÉRATURE DES REVÊTEMENTS

Les BCR présentent la particularité d'être des revêtements clairs qui réfléchissent une grande part du rayonnement solaire le jour. Ils emmagasinent ainsi beaucoup moins de chaleur que les revêtements noirs et leur température de surface est plus faible la nuit du fait de l'absence de chaleur accumulée. Ils pourraient donc contribuer à lutter contre les effets d'îlots de chaleur urbains.

Afin d'approfondir la caractérisation de l'analyse thermique de cette solution, l'entreprise Spie batignolles travaux publics s'est associée avec Tipee, un organisme de recherche technologique basé à Lagord (17).

De la théorie à la pratique : évaluer la carbonatation pour des bétons bas carbone

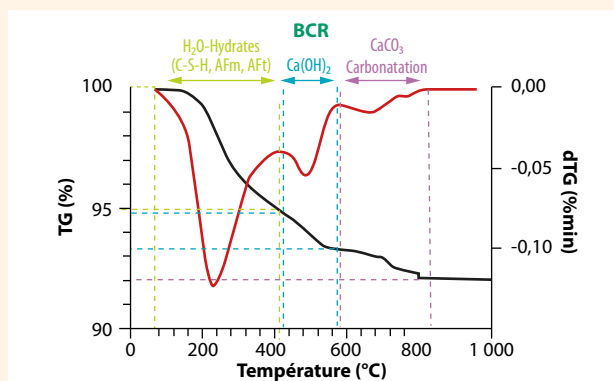
La démarche expérimentale mise en place par le LaSIE prédit, par l'étude de carbonatation naturelle à court terme du BCR et du BC2R, le potentiel de piégeage de CO_2 pendant la durée de vie d'une piste cyclable.

Ce potentiel de piégeage, exprimé en masse de CO_2 piégé par m^2 de piste cyclable (m_{CO_2} en kg/m^2), repose sur la détermination de la vitesse de carbonatation (K_c en $\text{m}/\sqrt{\text{an}}$) et du potentiel de carbonatation Q_{CO_2} en kg/m^3 selon la relation suivante :

$$m_{\text{CO}_2} = K_c \times Q_{\text{CO}_2} \times \sqrt{t}$$

Le potentiel de carbonatation Q_{CO_2} représente la quantité maximale de CO_2 qu'un volume de béton peut piéger. Il est évalué grâce à la décomposition du carbonate de calcium (CaCO_3) présent dans le béton lors d'une analyse thermogravimétrique. Cette méthode consiste à mesurer la perte de masse de l'échantillon lorsque la température augmente de 30°C à $1\,000^\circ\text{C}$. Au-delà de 550°C , la perte de masse est attribuée au dégagement de CO_2 provenant de la décomposition du CaCO_3 .

Exemple d'une analyse thermogravimétrique de 30 à $1\,000^\circ\text{C}$ réalisé sur un échantillon de BCR soumis à une carbonatation accélérée. La ligne noire continue = perte de masse du matériau (en %). Ligne rouge = dérivée de la perte de masse du matériau (en %/min). Lignes pointillées = tangentes horizontales traduisant un changement de masse significatif.



CARACTÉRISATION THERMIQUE INTRINSÈQUE DU BC2R

La collaboration avec Tipee a notamment permis d'effectuer une première caractérisation thermique intrinsèque du BC2R. Trois indicateurs ont été identifiés :

- La conductivité thermique (W/m.K) pour quantifier la capacité d'un matériau à transmettre de la chaleur. Plus sa valeur est faible, plus le matériau est un bon isolant.
- La réflectivité ou albédo (sans unité) pour quantifier la clarté d'un revêtement. Sa valeur est comprise entre 0 et 1 : l'albédo d'un matériau blanc est de 1 ; celui d'un matériau noir est de 0.
- L'émissivité (sans unité) pour quantifier la capacité d'un matériau à absorber et émettre l'énergie rayonnée. Sa valeur est comprise entre 0 et 1 : un matériau dont l'émissivité est proche de 1 émet beaucoup de chaleur ; un matériau dont l'émissivité est proche de 0 n'émet pas de chaleur, même si sa surface est chaude.

Ces indicateurs semblaient être satisfaisants pour mener une première approche thermique des matériaux. Le **tableau 2** présente les valeurs obtenues pour un BCR, un béton classique et un enrobé classique.

L'analyse des résultats se fait sous le prisme du confort thermique de l'utilisateur utilisant l'infrastructure en BC2R. On observe que le matériau est intéressant car il est un meilleur isolant que les bétons/enrobés classiques. Il émet en revanche autant de chaleur que les matériaux types de la profession. La principale limite de ces résultats serait un albédo plus élevé susceptible de gêner les usagers.

CONFORT THERMIQUE DU BC2R

Un autre travail collaboratif entre Spie batignolles travaux publics et Tipee s'est intéressé au confort thermique du BC2R pour les usagers. Il s'est focalisé sur l'élaboration d'un modèle de prédiction de température de chaussées sous la forme d'un exécutable Excel nommé Astra (*Automatic Surface Temperature for Regions with Assets*).

Ce programme contribue, en fonction d'une bibliothèque de matériaux implémentée, à créer une structure de chaussée avec lesdits matériaux et à modéliser pour un chantier donné la température de surface sur toute l'infrastructure. En données de sortie, on aura donc le spectre d'évolution de la température de surface (et ses variations en fonctions de la profondeur et des surfaces ombragées de l'ouvrage). La puissance du programme réside dans sa capacité à prendre en compte l'environnement immédiat du chantier. Ainsi, avec des bâtiments ou des arbres, il y aura une différence de température par rapport aux zones constamment exposées au soleil. L'élaboration d'Astra répond à la demande de prédiction, en amont d'un chantier, de l'impact du type de chaussée sur le confort thermique usager. Le modèle a été développé durant le premier semestre 2025, mais il doit encore être éprouvé.

-Figure 3-

Valeurs thermiques caractéristiques du BCR comparées à celles d'un béton et d'un enrobé classique.

	Conductivité thermique (W/m.K)	Réflectivité ou albédo	Émissivité
BCR	0,82	0,35	0,91
Béton moyen	1,51	0,225	0,805
Enrobé moyen	0,77	0,095	0,93

Modéliser la température des chaussées : une approche scientifique appliquée

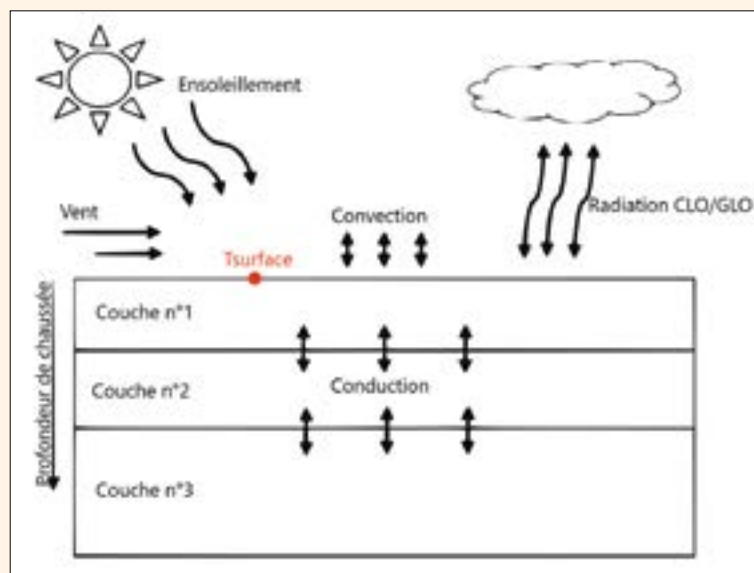
L'élaboration du modèle d'Astra s'inscrit dans une démarche scientifique progressive, débutée par une phase d'essais en laboratoire visant à caractériser des propriétés thermiques et radiatives du matériau BC2R.

Les mesures de conductivité thermique, d'émissivité et d'albédo ont constitué un premier socle de connaissances permettant de positionner ce revêtement par rapport aux matériaux routiers conventionnels du point de vue du confort thermique usager. Cette étape a fourni une première hiérarchisation des solutions techniques sur la base de paramètres physiques mesurés, pertinents pour appréhender les phénomènes d'accumulation et de restitution de chaleur.

Dans un second temps, l'objectif a été de dépasser la simple comparaison de propriétés pour être en mesure d'estimer la température de surface d'une chaussée en conditions réelles d'application. Cela implique de résoudre le bilan énergétique d'une surface soumise au rayonnement solaire, aux échanges convectifs et radiatifs avec l'atmosphère, et aux transferts thermiques dans le sol. Ce bilan, déjà établi dans la littérature scientifique et présenté dans la figure ci-dessous, n'était toutefois pas directement disponible sous forme d'outil opérationnel *open-source* pour des besoins applicatifs dans le domaine routier. Le travail mené dans le cadre d'un stage a ainsi consisté à développer un modèle interne pour estimer la température de surface en fonction de différents matériaux et contextes environnementaux.

La résolution du problème a été conduite au moyen d'un schéma numérique de type Crank-Nicolson appliqué au milieu semi-infini, afin de calculer le profil de température dans le sol et son évolution temporelle. À ce stade, le modèle ne prend pas encore en compte les phénomènes d'humidité ou de rétention d'eau, dont l'intégration représente une piste d'amélioration future pour tendre vers une modélisation thermo-hydrrique plus complète. Par ailleurs, bien qu'une validation sur données in situ soit prévue, le modèle a déjà fait l'objet d'une comparaison avec un outil de calcul développé par le Cerema de Clermont-Ferrand (équipe de Frédéric Bernardin), montrant une cohérence satisfaisante des résultats. Ce travail a ainsi abouti à un premier simulateur opérationnel de température de surface routière, ouvrant la voie à une exploitation sur chantiers pilotes pour consolidation et montée en maturité.

Schéma de principe du bilan thermique de la chaussée.



Le BC2R a été mis en œuvre en juin 2025 à Lagord (17), dans le cadre d'un chantier CIRR (Comité innovation routes et rues), de création d'une piste cyclable (voir ci-après). Ce chantier est particulièrement intéressant pour tester le modèle Astra :

- La couche de surface est en BC2R, soit l'un des premiers matériaux enregistrés servant à l'élaboration d'Astra.
- Il concerne une infrastructure destinée aux mobilités douces, pour lesquelles la question du confort thermique usager est plus importante. C'est pourquoi il accueillera une sonde cryopédomètre, un instrument capable de mesurer la température du sol à des profondeurs connues et précises. L'installation de ce matériel assurera le recueil de données afin de confronter Astra à des mesures in situ.

L'installation et le recueil des données du cryopédomètre feront l'objet d'une nouvelle collaboration entre Spie batignolles travaux publics et Tipee durant l'été 2026. En fonction des données recueillies et analysées, Astra pourra être corrigé et déployé afin de pouvoir comparer plusieurs revêtements pour un même chantier.

CONJUGUER INFILTRATION ET RÉSISTANCE : LES BCR POREUX

L'entreprise Spie batignolles travaux publics a développé une version « poreuse », le BCRP, afin de proposer un revêtement perméable garantissant une infiltration des eaux pluviales. Cette solution poreuse est rendue possible par la discontinuité granulométrique de la formule et par son fort pourcentage de vides communicants qui assurent une infiltration de l'eau au sein du matériau.

—Photo 3—

Trottoir en BC2R poreux à Lagord.



Cette solution a notamment été appliquée à Lagord dans le cadre de la réalisation d'un trottoir, avec l'intégration de 90 % de granulats recyclés de la plateforme Valosphère, d'un sable local et d'un ciment ultra bas carbone à base de laitiers de haut-fourneaux activés à froid (0 % clinker) (photo 3).

En collaboration avec le laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions (LMDC), les propriétés d'infiltration de cette solution ont pu être caractérisées en laboratoire et in situ⁶. Plus récemment, Spie batignolles travaux publics a également cherché à caractériser la durabilité de ces propriétés vis-à-vis du colmatage. Cette caractérisation s'est organisée en trois phases :

- une première phase de caractérisation intrinsèque des matériaux (structure poreuse, perméabilité, infiltration et ruissellement) ;
- une deuxième phase de colmatage (protocole expérimental, durée de service, cycles) ;
- une troisième phase de caractérisation après colmatage.

L'objectif, à travers cette étude, est de démontrer que la solution de BCR poreux se classe comme très perméable ($K_v \geq 10^{-3}$ m/s) et qu'elle reste classée comme perméable ($K_v > 5 \times 10^{-4}$) durant toute sa durée de vie⁷.

Mais la formulation d'un BCR poreux (BCRP) présente encore de nombreux défis pour trouver le meilleur compromis entre les propriétés d'infiltration et les performances mécaniques. C'est pourquoi une recherche menée dans le cadre d'un stage de master en collaboration avec le laboratoire Matériaux pour infrastructures de transport (MIT) de l'université Gustave Eiffel a été récemment réalisée à ce sujet (cf. encadré ci-contre). Les modèles proposés à cette occasion devraient ouvrir la voie à une méthode de formulation rationnelle pratique des BCRP prenant en compte les différentes propriétés requises, parfois contradictoires. Ces travaux communs devraient se poursuivre afin de préciser et confirmer les premiers résultats obtenus.

CHANTIER PILOTE AU SERVICE DE L'INNOVATION

Le Comité innovation routes et rues (CIRR) a retenu le procédé béton compacté routier intégrant 100 % de granulats recyclés (BC2R) pour être testé en situation réelle. Cette expérimentation et le suivi technique associé devront vérifier si cette solution répond effectivement aux enjeux environnementaux et d'aménagement urbain listés précédemment.

Dans le cadre des travaux d'aménagement de la piste cyclable Lagord/L'Houmeau, la communauté d'agglomération de La Rochelle a accepté qu'une partie de cette piste soit le siège de cette expérimentation.

Ajuster pour optimiser : comprendre l'influence des paramètres clés

La démarche expérimentale a consisté à déterminer l'influence du rapport eau/ciment, de la proportion volumique de sable dans le mortier et du volume de mortier sur diverses propriétés du matériau. À partir d'une formule « référence » et en faisant varier ces trois paramètres, 27 formules de BCRP et 9 formules de mortiers associés ont été caractérisées sur le plan de l'ouvrabilité à l'état frais, la porosité à l'état durci, la résistance mécanique en compression et les références Proctor.

L'ouvrabilité a notamment été évaluée par l'intermédiaire de l'essai traditionnel et empirique dit de « la boule ». Cet essai consiste à compacter manuellement un échantillon de matériau à l'état frais et d'évaluer sa tenue sous la forme de boule afin d'ajuster sa composition pour obtenir un matériau ni trop sec (qui se compacte mal) ni trop mouillé (qui matelasse).

Les résultats ont permis d'identifier une formule « optimisée » présentant de meilleures performances mécaniques et d'infiltration que la formule « référence ». De plus, un abaque a été proposé pour anticiper à partir de la composition du béton l'ouvrabilité suivant l'essai de « la boule ». Un premier modèle a été développé afin de prédire la résistance à la compression des BCRP selon leur formulation et la porosité visée, avec une précision satisfaisante (erreur moyenne de 2,1 MPa). Un second modèle prenant également en compte la fluidité du mortier composant les BCRP a contribué à améliorer la précision de la prédiction (erreur moyenne de 1 MPa).

BCR à l'état frais : (a) matériau trop sec ; (b) matériau de bonne consistance.



Le chantier expérimental, situé le long de l'avenue du Clavier à Lagord, s'étend sur une longueur de 350 m linéaires divisés en deux parties distinctes composées :

- du tronçon expérimental, dédié à la réalisation du BC2R ;
- du tronçon témoin, séparé en deux sections constituées d'un béton coulé pervibré et d'un béton compacté composé à 100 % de granulats naturels.

Le BC2R et les bétons témoins ont été fabriqués par Lafarge dans leur centrale à béton de La Pallice. Le BC2R a été mis en œuvre le 6 juin 2025 (photo 4) et le tronçon témoin la semaine suivante.

Le suivi technique du chantier est réalisé par l'université Gustave Eiffel et le Cerema dans le cadre du CIRR, de la mise en œuvre jusqu'à une durée de trois ans. Il pourra juger le procédé en termes :

- d'homogénéité de la fabrication et de la mise en œuvre ;
- de performances mécaniques ;
- de durabilité de la structure et de son état de surface ;
- d'adhérence, de confort de roulement et de confort thermique ;
- de limitation des émissions de gaz à effet de serre (bilan SEVE et carbonatation) ;
- d'économie des ressources minérales.

OPTIMISER ÉPAISSEUR ET RÉSISTANCE DE SURFACE

DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement représente un enjeu important pour le BC2R afin qu'il puisse se positionner comme une solution viable, notamment économiquement, pour les structures dédiées aux mobilités douces.

—Photo 4—
Mise en œuvre du BC2R.



Ce type de structure est généralement très peu sollicité, avec un usage principalement réservé aux piétons et aux mobilités douces (vélos, trottinettes...). Cependant, le dimensionnement peut prendre en compte le passage très occasionnel de poids lourd dans le cadre de l'entretien de la chaussée (balayeuse) ou d'une intervention des services de secours. D'après les guides existants⁸⁻⁹, il serait alors impossible d'avoir une épaisseur inférieure à 20 cm pour une classe de plateforme PF2. La mise en œuvre de BC2R à de telles épaisseurs pour ce type d'application pénaliserait à la fois les gains environnementaux mis en avant précédemment et le prix du produit au mètre carré.

Depuis trois ans, Spie batignolles travaux publics a réalisé différents chantiers mettant en œuvre ses solutions de la gamme TextuR sur 12 cm d'épaisseur. Aucun désordre structurel n'a été constaté à ce jour. Quant au chantier expérimental effectué dans le cadre du CIRR, il a mis en œuvre la solution BC2R à deux épaisseurs différentes (12 cm et 16 cm) afin de

À retenir

- Le BC2R TextuR est un béton compacté routier innovant, intégrant 100 % de granulats recyclés, conçu pour les mobilités douces.
- Il répond aux enjeux de l'économie circulaire et de la décarbonation, tout en garantissant des performances mécaniques conformes aux normes. Son empreinte carbone est réduite grâce à des liants bas carbone et un potentiel de piégeage du CO₂ par carbonatation naturelle.
- Une version poreuse (BCRP) de cette solution permet l'infiltration de l'eau, limitant ainsi les ruissellements urbains.
- Développé en partenariat avec plusieurs laboratoires (LaSIE, MIT, Cerema) et des acteurs locaux, le BC2R s'appuie sur des modèles prédictifs pour optimiser sa performance thermique et mécanique.
- Divers essais réalisés en laboratoire et des chantiers pilotes attestent du confort thermique qu'il peut conférer aux usagers, de sa résistance mécanique et de son adaptabilité aux usages légers.

vérifier l'impact du dimensionnement sur la durabilité structurelle de cette solution pour l'application envisagée.

Il semble toutefois nécessaire d'avancer collectivement au sein de la profession afin d'optimiser et de définir le dimensionnement des BC2R pour les pistes cyclables.

DURABILITÉ DE L'ÉTAT DE SURFACE

Un autre enjeu de cette technique est la durabilité de l'état de surface pour une application en couche de roulement non revêtue. En effet, le faible volume de pâte de ciment peut être préjudiciable pour assurer le bon enrobage des gravillons de surface afin de garantir l'esthétique et la durabilité.

Pour monter en compétence sur le sujet, les outils susceptibles de caractériser cette durabilité de surface ont été cherchés. Des essais de résistance au brossage selon la norme NF P12697-43¹⁰ ont mis en évidence sa pertinence pour caractériser l'état de surface des BCR, poreux et non poreux. Il peut notamment vérifier l'impact de la cure ainsi que l'impact de l'utilisation d'un minéralisant en traitement de surface (figure 1).

Des essais ont également été réalisés avec le Triboroute, en s'appuyant sur la norme NF P18-579¹¹, en partenariat avec le laboratoire MIT de l'université Gustave Eiffel. Les mêmes tendances ont été observées sur les résultats obtenus, même si le test d'abrasion semble plus sévère au vu des pertes de masses obtenues. Par ailleurs, pour obtenir une différence significative entre certaines formules, il faut adapter le protocole et augmenter la durée de sollicitation au-delà de ce qui est préconisé par les normes.

CONCLUSION

Le BC2R TextuR (béton compacté routier 100 % recyclé) complète la palette de revêtements disponibles pour les territoires engagés grâce aux réponses aux défis environnementaux actuels :

- la circularité, par l'intégration de 100 % de granulats recyclés, garantissant une gestion optimisée des ressources locales ;
- la décarbonation, grâce aux liants hydrauliques bas carbone et au piégeage du CO₂ par carbonatation ;
- la résilience urbaine, en luttant contre les îlots de chaleur (fort albédo) et en proposant une solution d'infiltration des eaux pluviales (version poreuse : le BCRP).

Les perspectives de ce revêtement sont soutenues par une approche scientifique rigoureuse, notamment le développement d'un modèle numérique du confort thermique ou l'optimisation des formulations. Les efforts doivent être poursuivis afin que les BCR en revêtement puissent être validés par un cadre normatif.

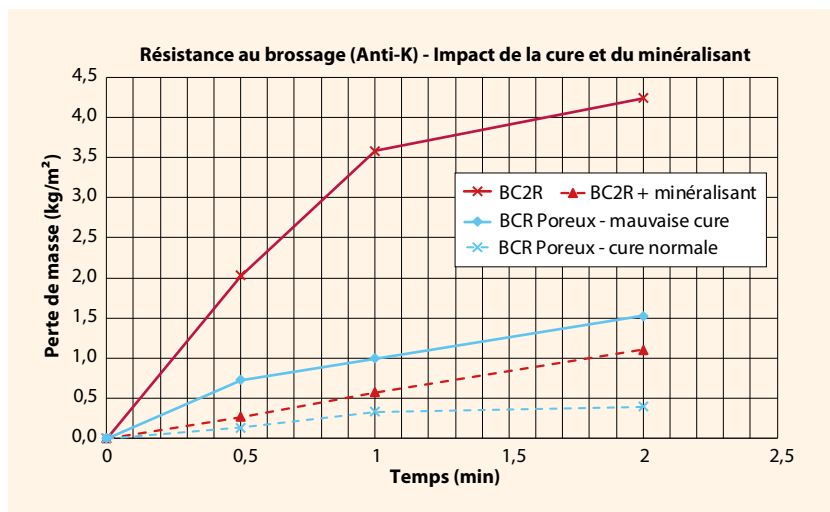
La collaboration avec des institutions académiques et techniques (Cerema, université Gustave Eiffel, LMDC, Tipee) est la clé pour valider les données in situ et participer activement aux valorisations des solutions techniques pour des infrastructures adaptées à l'usage. ■

Remerciements

Les auteurs de cet article tiennent à remercier :

- le Cerema de Clermont-Ferrand, et tout particulièrement Frédéric Bernardin, pour sa collaboration avec Tipee et Spie batignolles travaux publics concernant la modélisation et l'instrumentation thermique des chaussées ;
- le LMDC de l'université de Toulouse pour l'ensemble de leurs partenariats, et notamment Franck Cassagnabère et Gilles Escadeillas, pour les travaux sur la durabilité des bétons routiers, ainsi que sur la caractérisation de la perméabilité et l'impact thermique des solutions grises.

— Figure 1 —
Impact de la cure
et du minéralisant sur la
résistance au brossage.



RÉFÉRENCES

1. NF P98-128 : « Assises de chaussées et plates-formes - Bétons compactés routiers et graves traitées aux liants hydrauliques - Définition, composition et classification », janvier 2023.
2. NF EN 933-11, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 11 : essai de classification des constituants de gravillons recyclés », juillet 2009.
3. Cerema, Valorisation de matériaux alternatifs en infrastructures linéaires de transport terrestre - Étude environnementale et sanitaire, Les références, 2025.
4. NF EN 12620+A1 : « Granulats pour béton », juin 2008.
5. NF EN 206+A2/CN : « Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206+A2 », novembre 2022.
6. S. Auger, Y. Cantegreil, P. Broillard, A. Nicolai, F. Cassagnabère, « Revêtements perméables - Optimisation de la caractérisation au service de l'aménagement urbain », RGRA n° 1008, janvier-février 2025.
7. Meng et al. "Research on morphology and distribution characteristics of clogging particles in permeable asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, n° 402, 2023.
8. Idrim, *Manuel de dimensionnement des chaussées neuves à faible trafic*, Cerema, 2020.
9. TSO, *Voiries et aménagement urbains en béton - Tome 1 : Conception et dimensionnement*, Cimbéton, 2019.
10. NF P12697-43 : « Mélanges bitumineux - Méthodes d'essais - Partie 43 : résistance aux carburants », avril 2023.
11. NF P18-579 : « Granulats - Détermination des coefficients d'abrasivité et de broyabilité », février 2013.

NOUVEAUX ESSAIS EN LIEN AVEC LES TERRASSEMENTS



© CEREMA

Pour faire face aux défis climatiques et environnementaux à venir, les terrassements évoluent. L'Afnor et le comité européen TC 396 Earthworks normalisent de nouveaux essais pour optimiser la gestion des sols : mesure de la matière organique, évaluation des émissions de poussières, résistance à l'érosion, stabilisation à la chaux... Ces innovations, intégrées dans les normes françaises et européennes, visent à réduire l'empreinte carbone, sécuriser les chantiers et garantir la durabilité des infrastructures.

En France, la normalisation des essais géotechniques est encadrée par l'Afnor. Cet organisme national de normalisation française est aussi groupe miroir de la normalisation française à l'échelle européenne au sein de comités techniques parmi lesquels le TC 396 Earthworks s'intéresse spécifiquement aux terrassements.

L'Afnor délègue ses activités de rédaction et de révision des normes françaises à plusieurs bureaux sectoriels, dont le Bureau de normalisation des transports, des routes et de leurs aménagements (BNTRA), qui traite de sujets au sein de nombreuses commissions. L'une d'entre elles, la commission de normalisation des Terrassements, suit environ 23 normes dédiées aux ouvrages de terrassement. Les normes d'essai établissent le cadre pour leur réalisation : elles précisent le champ de validité de l'essai, l'équipement, la procédure opérationnelle et les méthodes d'analyse des données. Elles assurent la reproductibilité de l'essai, établissent une terminologie commune et permettent la comparaison entre différents laboratoires. Les terrassements constituent une étape essentielle pour garantir la stabilité et la durabilité des

ouvrages de génie civil. Les méthodes de traitement des sols s'adaptent aux problématiques grandissantes du changement climatique, de l'environnement et de la santé des travailleurs. De nouveaux essais contribuent désormais à optimiser les pratiques afin de réduire l'empreinte carbone, notamment par une utilisation raisonnée de la chaux pour l'amélioration ou la stabilisation des sols, à mieux caractériser la teneur en matière organique des sols et à évaluer la toxicité potentielle des matériaux à travers leur propension à générer des poussières. Cet article dresse un panorama de ces nouveaux essais et de leur impact sur la maîtrise des terrassements, tout en recensant les nouvelles normes inscrites au sein du programme de travail de la commission de normalisation des Terrassements.

NORMES PUBLIÉES

La matière organique est constituée en moyenne de 58 % de carbone¹. Ainsi, en déterminant la teneur en matière organique d'un sol, il est possible de connaître la quantité de carbone que le sol peut stocker.

AUTEURS

Delphine Jacqueline

Chargée de missions techniques en expérimentation
Secrétaire de la commission de normalisation des Terrassements
Cerema

Lucile Saussaye

Chargée d'études en mécanique des sols
Membre associée à l'équipe de recherche ENDSUM
Cerema

Sébastien Hervé

Chef de groupe Géotechnique
Cerema

Quelques définitions

- Amélioration des sols : opération qui modifie à court terme les propriétés physiques d'un matériau – par exemple la teneur en eau, la plasticité, la sensibilité à l'eau et au gel, l'aptitude au compactage et le potentiel de gonflement –, notamment par l'ajout de chaux (chaux vive, chaux hydratée ou lait de chaux).
- Stabilisation des sols à la chaux : opération consistant à obtenir un mélange homogène de sol avec de la chaux et éventuellement de l'eau, qui, correctement compacté, modifie de façon significative, à moyen et long termes, les caractéristiques du sol de manière à le rendre stable, notamment vis-à-vis de l'action de l'eau et du gel.

Ce paramètre, important vis-à-vis des objectifs de neutralité carbone à horizon 2050, peut être quantifié à partir :

- d'une part, d'un essai par perte au feu normalisé en 2023 ;
- d'autre part, avec une méthode chimique au permanganate de potassium, dont l'essai est en cours de consultation avant publication.

Le TC 396 a proposé de normaliser ces deux méthodes pour déterminer la teneur en matière organique d'un sol et d'un matériau anthropique. Ce suivi du carbone organique des sols est un levier majeur d'évaluation de la lutte pour atténuer le changement climatique.

NF EN 17685-1² : TENEUR EN MATIÈRE ORGANIQUE PAR PERTE AU FEU

La détermination de la perte au feu (W_{LOI} en %) de la masse sèche d'un échantillon solide des sols fins, intermédiaires, composites et grossiers, des sols organiques et des matériaux anthropiques (selon la norme NF EN 16907-2³) est obtenue après calcination sous air à 550 °C. La différence de masse avant et après le processus de combustion est utilisée pour calculer la perte au feu.

La perte de masse subie par les matériaux à 550 °C est généralement due à la libération de composés volatils, d'eau (absorbée, cristallisée ou structurale), de gaz provenant de la décomposition de la

matière organique et de substances inorganiques telles que le soufre, les sulfures ou les hydroxydes (par exemple H_2O , CO_2 , SO_2).

Une méthode est donnée dans l'annexe B de cette norme afin d'estimer la teneur en matière organique (C_{OM}) des argiles à partir de la valeur de W_{LOI} . Cette équation $C_{OM} = W_{LOI} - 0,04 W_L$ fait suite au projet Matosol, au sein duquel 20 sols argileux belges ont été étudiés. W_L est la limite de liquidité. La perte au feu des sols argileux surestime la teneur en matière organique en raison de l'évaporation de l'eau liée.

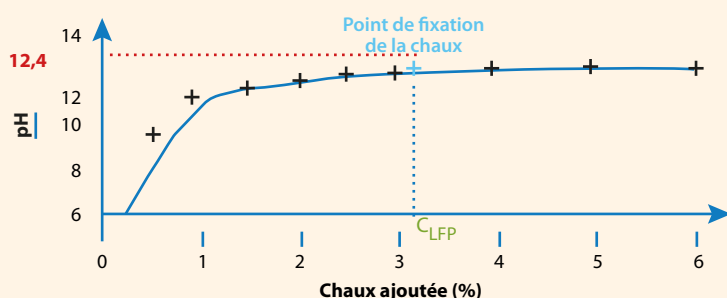
XP CEN/TS 17693-1⁴ : ESSAI DE PH POUR DÉTERMINER LE POINT DE FIXATION DE LA CHAUX

Ce document décrit la méthode de référence pour la détermination du point de fixation de la chaux – aussi appelé optimum de modification de la chaux – dans le traitement des sols pour les travaux de terrassement.

Cet essai consiste à déterminer le pH d'une dizaine de solutions contenant 25 g de matériaux secs et 100 ml d'eau et auxquelles sont ajoutés différents pourcentages de chaux, allant généralement de 2 à 6 %. Cet essai, réalisé à 25 ± 1 °C, permet ainsi de connaître la quantité minimale de chaux nécessaire à la stabilisation du sol traité, c'est-à-dire la quantité de chaux à partir de laquelle peuvent se dérouler les réactions pouzzolaniques nécessaires à l'augmentation des performances mécaniques du sol traité à la chaux, au-delà de l'amélioration initiale apportée par la chaux pour la réalisation des terrassements. Le pH de 12,4 est un indicateur du passage de la phase d'amélioration à la phase de stabilisation. Cette valeur caractéristique correspondant au pH d'une solution saturée en $Ca(OH)_2$, chaux hydratée, est appelée point de fixation de la chaux (figure 1). Elle résulte de la présence de chaux libre dans la solution (ions hydroxydes OH^-).

Cette méthode d'essai ne peut pas être utilisée pour fournir des informations sur la réactivité du sol avec la chaux ou d'autres valeurs de performance (caractéristiques mécaniques des mélanges sol-chaux) applicables à des fins d'amélioration ou de stabilisation. Ces essais de performance doivent être réalisés en laboratoire à partir d'une étude spécifique en suivant les normes en vigueur, le dosage en chaux à appliquer étant indiqué à partir de cette méthode.

– Figure 1 –
Détermination de la concentration optimale de chaux ajoutée (C_{LFP}).



Quelques abréviations

- I_{DE} : Index Dust Emission ou indice d'émission de poussière
- LFP : Lime Fixation Point ou point de fixation de la chaux
- LOI : Lost Of Ignition ou perte au feu
- LMO : Lime Modification Optimum ou optimum de modification de la chaux

Quelques pistes d'amélioration pour la prochaine révision de cette norme :

- Définir un temps de réaction minimal matériau-chaux avant la mesure du pH.
- S'assurer qu'un matériau humide ne serait pas plus représentatif qu'un matériau sec.
- Préciser le phasage de l'ajout de la chaux (matériau sec/humide + eau pour la suspension nécessaire à la mesure de pH + chaux ou matériau sec/humide + chaux + eau pour la suspension nécessaire à la mesure de pH).
- S'assurer de la représentativité de la température des essais (20 °C plus représentatif en Europe que les 25 °C, qui reflètent plus une température de référence des États-Unis. En ce cas, prévoir d'appliquer une correction, car les valeurs de pH sont légèrement différentes entre 20 et 25 °C).
- Ajouter un volume d'eau de 100 ml ± 10 ml et non de 10 ml ± 10 ml, comme décrit actuellement dans la norme.

Normes complémentaires utiles à cet essai

- NF EN ISO 10390 : « Sols, biodéchets traités et boues - Détermination du pH », mars 2022.
- NF EN 16907-4 : « Terrassement - Partie 4 : traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques », décembre 2018.
- NF EN 459-1 : « Chaux de construction - Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité », août 2015.

XP CEN/TS 17693-2⁵ : ESSAI D'ÉVALUATION DE L'APTITUDE D'UN MATÉRIAU SEC À ÉMETTRE DE LA POUSSIÈRE

Cette norme européenne a été reprise dans la collection française en 2022. Elle décrit la méthode de référence pour déterminer l'indice d'émission de poussières (I_{DE}) dans le traitement des sols pour les travaux de terrassement. L'exposition aux poussières représente un risque sur l'environnement, pour la sécurité des travailleurs (visibilité) et de santé au travail.

Ainsi, cet essai consiste à quantifier l'aptitude d'un matériau à émettre des poussières en déterminant le pourcentage de poussière emportée par un courant d'air traversant une couche du produit répandue sur un tamis. Il est réalisé dans une tamiseuse à dépression d'air équipée d'un dispositif d'aspiration capable d'assurer l'entraînement des particules par un flux d'air ascendant. Un piège à poussière est intercalé entre la tamiseuse et le dispositif d'aspiration, afin de limiter le colmatage de ce dernier. I_{DE} est calculé selon l'équation suivante :

$$I_{DE} = \frac{m_1}{m_2} \times 100$$

Avec :

- m_1 = la masse initiale de l'échantillon de matériau déposée sous forme de poudre sur le tamis ;

- m_2 = la masse de la poudre restante sur ce tamis à la fin de l'essai.

I_{DE} est la valeur moyenne sur trois essais en arrondissant au nombre le plus proche.

Cet essai concerne plus particulièrement les poussières émises par les matériaux suivants :

- les chaux (NF EN 459-1) ;
- les ciments (NF EN 197-1) ;
- les liants hydrauliques routiers à durcissement rapide (NF EN 13282-1) ;
- les liants hydrauliques routiers à durcissement normal (EN 13282-2) ;
- les cendres volantes pour mélanges traités aux liants hydrauliques (NF EN 14227-4) ;
- les cendres volantes siliceuses pour béton (NF EN 450-1) ;
- le laitier granulé de haut fourneau moulu pour utilisation dans les béton, mortier et coulis (NF EN 5167-1).

Sur chantier ou en laboratoire, des méthodes spécifiques comme l'arrosage, l'aspiration et la protection des travailleurs par des équipements de protection individuelle (EPI) peuvent être utilisées pendant la mise en œuvre et les essais in situ et/ou en laboratoire.

Ainsi, la profession s'attache fortement à quantifier et à traiter les poussières émises sur chantier. Un document de l'université Gustave Eiffel apporte des recommandations pour la gestion des émissions de poussières⁶. Cette étude expérimentale avait pour objet d'étudier les mécanismes d'envol des poussières, en particulier en termes de génération des particules à l'interface pneu/sol. Un modèle a été établi pour quantifier l'évolution de dégradations de surface en fonction des propriétés géotechniques liées à la circulation des camions sur chantier en simulant le trafic au passage d'un pneu lisse et d'un pneu sculpté. Il résulte des essais réalisés que :

- Les sols sableux résistent bien à l'arrachement des agrégats par les sculptures, à la différence des sols plus cohésifs.
- Les sols sableux se dégradent surtout sous l'effet du frottement avec le pneumatique.
- Les deux paramètres les plus pertinents pour caractériser la propension d'un sol à se dégrader sous sollicitations de trafic sont l'indice de plasticité et le produit des teneurs en argile et en sable.

PR XP P94-065⁷ : HOLE EROSION TEST

Bien que les essais de caractérisation de la résistance à l'érosion des matériaux soient utilisés pour étudier et diagnostiquer les ouvrages hydrauliques, très peu sont normalisés. Il existe principalement des normes ASTM pour les essais qualifiant le comportement dispersif des argiles et la norme ASTM D5852 pour l'essai d'érosion externe (*Jet Erosion Test* - JET) qualifiant la résistance à l'érosion par un jet impactant le matériau testé.

Pour certains essais, les procédures sont décrites dans des publications scientifiques et ne sont pas largement diffusées auprès de la communauté d'ingénieurs à des fins opérationnelles. Récemment, le ministère de la Transition écologique français a décidé de diffuser et de mettre l'accent sur les nouvelles pratiques au sein de la communauté technique des digues.

À la suite de cette demande, le *Hole Erosion Test* (HET) a été choisi pour être le premier essai normalisé (figure 2).

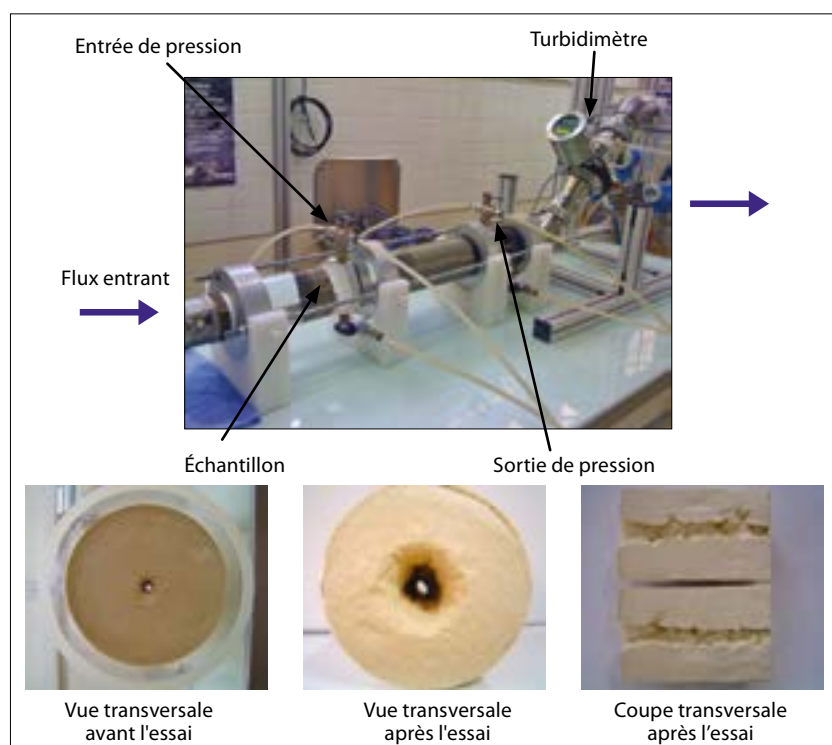
Cet essai d'érosion est pertinent pour évaluer la résistance à l'érosion qui se produit dans un conduit préformé dans un ouvrage, par exemple une fissure, un terrier, une ancienne racine d'arbre. Parmi les mécanismes d'érosion interne, l'érosion de conduit est considérée comme l'un des plus dangereux.

L'essai HET peut être effectué sur un sol fin présentant une cohésion suffisante pour que le conduit puisse être formé ; il peut être réalisé sur échantillon reconstitué au laboratoire ou bien sur échantillon intact prélevé dans un ouvrage existant.

Le statut de norme expérimentale choisi (PR XP P94-065) a répondu à la nécessité de normalisation et d'approbation de cet essai.

En 2026, le texte sera revu et il sera décidé de le maintenir comme norme expérimentale ou de l'élever au statut de norme NF, voire européenne au sein du TC 396. Dans les deux derniers cas, une étape d'enquête publique précédera la publication et toutes les parties prenantes, entreprises ou laboratoires, y compris ceux qui ne participent pas aux travaux de normalisation, pourront répondre.

—Figure 2—
Essai HET
(source Wikigeotech INRAE).



À ce stade, le texte décrit, à travers un document de 35 pages, l'appareil utilisé, le mode opératoire, quatre méthodes d'interprétation possibles pour calculer les paramètres de résistance à l'érosion de conduit : la contrainte critique $\tau_{c, HET}$ (hydraulique) et le coefficient d'érosion $C_{e, HET}$.

NORMES FRANÇAISES TRANSPOSÉES AU NIVEAU EUROPÉEN

Les normes européennes EN 17542-1 (essai de dégradabilité), -2 (essai de fragmentabilité) et -3 (valeur au bleu de méthylène d'un sol) ont été publiées en 2022 en remplacement des normes françaises existantes NF P94-066, NF P94-067 et NF P94-068.

NORMES EN COURS DE RÉDACTION

XP P 94-134^a : JET EROSION TEST

L'essai JET (*Jet Erosion Test*) est pertinent pour évaluer la résistance à l'érosion lorsqu'un des mécanismes d'érosion externe, la surverse, est susceptible de survenir. L'érosion se propage par un processus appelé « *headcut erosion* ». D'après les statistiques d'accidentologie, la surverse est l'un des mécanismes d'érosion les plus dangereux pour les ouvrages hydrauliques.

L'essai JET peut être effectué sur un sol fin, présentant suffisamment de cohésion pour qu'apparaisse une figure d'affouillement sous l'impact du jet. Il peut être effectué au laboratoire sur un échantillon compacté ou bien in situ dans le cadre d'un diagnostic d'ouvrage existant. Son domaine d'application s'étend des matériaux très érodables à très résistants. Il peut être réalisé sur des sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.

L'essai JET permet de déterminer les paramètres de résistance à l'érosion d'un matériau : la contrainte critique $\tau_{c, JET}$ (hydraulique) et le coefficient d'érosion ($k_{d, JET}$ de la norme américaine). Ces grandeurs sont utiles pour la modélisation de la surverse afin de dimensionner un ouvrage hydraulique.

Pour le dimensionnement d'un ouvrage dans le cadre d'un projet ou pour le diagnostic d'un ouvrage existant, le donneur d'ordre fera appel à l'essai HET et/ou l'essai JET, en fonction du mécanisme d'érosion prévisible.

Les deux essais sont également utiles pour comparer la résistance à l'érosion de différents matériaux (recherche de gisement par exemple) ou pour une étude paramétrique (influence du temps de cure pour des sols traités à la chaux, du compactage, de la teneur en eau...).

Toutefois, cette norme n'intègre pas l'essai MoJET (*Mobile Jets Erosion Test*, essai d'érosion à jets mobiles), qui représente l'effet de la pluie sur les talus du remblai ou sur une digue (ruissellement, effet splash/battance). L'effet splash représente la dissipation de l'énergie cinétique des gouttes de

pluie par les agrégats de sol qui s'érodent. L'intensité ou la répétition de ce phénomène peut amener à la formation d'une croûte peu perméable à la surface du sol appelée croûte de battance. Cet essai est intéressant, en particulier pour évaluer l'impact du changement climatique sur les remblais. Ainsi, la commission de normalisation des Terrassements a décidé de rédiger une norme à part entière pour ce second essai d'érosion de surface après le JET.

PREN 17542-4⁹ : POTENTIEL D'EFFONDABILITÉ DES SOLS

Ce projet de nouvelle norme spécifie la méthode d'essai pour déterminer l'intensité de l'effondrement unidimensionnel qui se produit lorsque des sols non saturés sont inondés d'eau. Cette méthode est utilisée pour déterminer deux paramètres liés à l'effondrabilité d'un sol : l'indice d'effondrement et le potentiel d'effondrement.

La méthode d'effondrabilité est une méthode au simple œdomètre qui quantifie les tassements prévisibles d'un sol compacté (lors des terrassements) liés à sa sensibilité à l'eau.

Ce phénomène d'effondrabilité est différent du tassement d'un sol mal compacté, cette mesure de gonflement étant alors décrite dans la norme Proctor/CBR¹⁰.

Cet essai est intéressant par exemple vis-à-vis des marnes/limons de Picardie qui ont posé problème lors des travaux de la LGV Est et de la LGV Nord¹¹. Cette norme se rapproche de la norme américaine ASTM D 4546-08¹², qui présente uniquement l'essai simple œdomètre. La procédure au double œdomètre développée dans une norme roumaine¹³ n'a pas été retenue à ce stade dans le projet de norme, car manquant de recul sur son application en France et en Espagne.

La norme contribue à déterminer :

- l'indice d'effondrabilité (ou Stress Collapse Index - ISC), qui représente la diminution de hauteur d'un échantillon sous une contrainte verticale donnée (en général 200 kPa) après immersion, exprimée en pourcentage de la hauteur de l'échantillon avant imbibition ;
- le potentiel d'effondrabilité (ou Collapse Potential Index - IPC), qui représente le pourcentage de diminution de la hauteur de l'éprouvette après mouillage, lorsque le sol est consolidé sous une contrainte verticale appliquée définie, rapporté à la hauteur initiale de l'éprouvette.

Les seuils limites de cet essai devront être définis, en complément de cette norme, au sein de guides techniques.

PREN 17542-5¹⁴ : POTENTIEL DE GONFLEMENT DES SOLS COMPACTÉS

Cette norme décrit les méthodes de référence permettant de déterminer le gonflement, la pression de gonflement, ainsi que l'intensité ou le potentiel de

gonflement unidimensionnel d'un sol compacté lors des terrassements lorsqu'il est soumis, en présence d'eau, à des contraintes verticales sous conditions œdométriques. Ces méthodes sont essentielles pour évaluer le comportement des plateformes de terrassement qui peuvent être affectées par la présence de sols gonflants.

Objectifs et applications

Ces méthodes sont utilisées pour déterminer trois paramètres clés en lien avec le gonflement des sols :

- la pression de gonflement, c'est-à-dire la force exercée par un sol lorsqu'il gonfle sous l'influence de l'eau, ce qui peut provoquer des déplacements importants dans les sols ;
- l'indice de gonflement, qui quantifie la variation du volume du sol lors du gonflement, ce qui est crucial pour prédire les risques de déformation ;
- la pression de gonflement contrainte, qui correspond à la pression nécessaire pour empêcher le gonflement d'un sol.

Procédures et équipements

Les méthodes d'essai décrites dans cette norme spécifient les techniques de préparation des échantillons, les équipements nécessaires ainsi que la procédure pour quantifier la variation de hauteur associée au gonflement. Elles indiquent également les procédures pour le rapport des résultats d'essais, afin de garantir la reproductibilité et la fiabilité des mesures.

Importance de ces essais pour les plateformes de terrassement

Les sols gonflants peuvent avoir un impact majeur sur la stabilité des plateformes de terrassement. Lorsque ces sols sont exposés à l'eau (météorique, souterraine...), ils ont tendance à se dilater, ce qui peut entraîner des déformations, voire la fissuration, des infrastructures construites. L'utilisation de ces méthodes d'essai contribue à mieux comprendre et à prédire l'impact du gonflement des sols sur la durabilité et la sécurité des plateformes. Cette norme vise une application aux terrassements seuls (sols compactés). Pour d'autres ouvrages géotechniques (tunnels, fondations...) ou d'autres types de matériaux, comme les roches ou les sols indurés et roches tendres (SIRT), la CN REG et le TC 341 du Comité européen de normalisation travaillent au développement d'une norme spécifique complémentaire.

FUTURES NORMES AU SEIN DU TC 396 EARTHWORKS

PREN 17542-6 : APTITUDE D'UN SOL AU TRAITEMENT

Cette norme remplacera la norme NF P94-100¹⁵, dont les essais, bien connus en France, servent à

Autres normes en cours de rédaction ou de révision

D'autres normes en cours de rédaction au sein du TC 396 ne sont pas décrites dans le présent article, mais elles feront l'objet d'autres publications :

- TS 17685-3 : « Détermination de la teneur en carbonate des sols avec calcimètres » (en cours de rédaction)
- TS 17685-4 : « Détermination des sulfates solubles (dans l'eau) des sols » (en cours de rédaction)
- TS 17685-5 : « Détermination des sels solubles » (en cours de rédaction)
- TS 17685-6 : « pH » (en prévision de rédaction)
- TS 17685-7 : « Potentiel redox » (en prévision de rédaction)
- TS 17685-8 : « Conductivité électrique » (en prévision de rédaction)
- TS 17685-9 : « Teneur en chlorure soluble » (en prévision de rédaction)
- EN 17693-3 : « Essais sismiques en laboratoire – Détermination du module dynamique des sols par mesure de la fréquence de résonance » (en cours de rédaction à la suite d'essais sismiques comparatifs en laboratoire (Cerema-Lhoist-Vinci) réalisés à Morangis chez Vinci Construction)

Les nouvelles normes relatives à l'essai MoJET¹⁸ et à l'essai d'émiettement (issu du *crumb test*) sont en prévision de rédaction au sein de la commission de normalisation des Terrassements.

Les normes NF P94-102 parties 1 et 2¹⁹ seront prochainement révisées à la suite de la révision des normes européennes NF EN 16907-2 et 4, qui intègrent la pratique française et la révision du GTS.

déterminer l'aptitude d'un sol au traitement en accélérant les phénomènes de prise hydraulique et de gonflement potentiels grâce à l'application de conditions particulières : immersion dans l'eau à 40 °C pendant 7 jours après un temps de cure de 24 heures de 6 éprouvettes de sol traité à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (figure 3).

Cette aptitude repose sur deux critères principaux :

- le gonflement volumique Gv, qui permet de détecter une inaptitude du sol au traitement liée à la présence d'un perturbateur (substance ou agent perturbateur) ;
- la résistance à la traction indirecte R_{it} , qui vise à s'assurer que les seuils de performance minimum sont atteints et que le traitement est efficace.

Pour valider ce projet de nouvelle norme européenne, une analyse a été faite avec les normes existantes et plus spécifiquement la norme EN 13286-49¹⁶.

Similarités avec la norme EN 13286-49

Les deux normes utilisent une procédure de gonflement accéléré, qui consiste à immerger dans l'eau à 40 °C trois éprouvettes pendant 7 jours.

La mesure de l'expansion volumique Gv après immersion est commune aux deux normes.

Les deux normes utilisent le gonflement volumique Gv comme critère de comparaison et des valeurs acceptables de Gv sont données en note dans la norme EN 16907-4.

Différences par rapport à la norme EN 13286-49

Une nouvelle exigence est introduite pour vérifier un durcissement hydraulique suffisant, avec la résistance à la traction indirecte (R_{it}), nécessaire pour l'évaluation du réemploi en couches de forme. Ce critère implique la réalisation d'essais supplémentaires sur trois éprouvettes.

Les conditions de confection des éprouvettes spécifiées pour les terrassements sont plus spécifiques que celles de la norme EN 13286-49. Par exemple, la teneur en eau de compactage est fixée à $w = 1,1 w_{OPN}$ et la masse volumique sèche à $\rho_d = 96\% \rho_{dOPN}$ alors que ces conditions ne sont pas définies dans la norme EN 13286-49.

Le temps de cure avant immersion diffère : 24 heures dans le cadre du processus de terrassement, contre 1,5 à 2 fois le temps de maniabilité du mélange selon la norme EN 13286-49.

Cet essai garantit ainsi que le traitement appliqué atteint les seuils requis tant en termes de gonflement que de résistance mécanique, assurant ainsi son efficacité pour les applications de terrassement décrites dans le GTS de 2020¹⁷.

CONCLUSION

Les nouveaux essais normalisés en terrassement, mis en place par les comités de normalisation européens et français, répondent aux besoins croissants de précision et de performance dans la gestion des sols naturels ou traités pour les travaux de génie civil. L'Afnor, en collaboration avec le comité technique européen TC 396, continue de jouer un rôle clé dans

—Figure 3—
Essai d'aptitude du sol au traitement selon la norme NF P94-100.



Détail de deux éprouvettes : l'éprouvette de gauche, conservée dans son conteneur en acier, est utilisée pour évaluer la progression de la réaction hydraulique ; celle de droite, enveloppée dans un treillis, est utilisée pour mesurer le gonflement en volume.



Les deux éprouvettes sont dans un bain contrôlé en température.

l'évolution de ces normes, favorisant ainsi une meilleure caractérisation des sols et une optimisation des techniques de traitement, en particulier dans un contexte où les enjeux environnementaux et climatiques sont de plus en plus présents.

Ces essais apportent des réponses concrètes aux défis liés à la gestion des sols, qu'il s'agisse de la mesure de la teneur en matière organique pour les objectifs de neutralité carbone, de la quantification du potentiel d'effondrabilité ou du gonflement des sols, qui sont des paramètres déterminants pour la stabilité et la durabilité des plateformes de terrassement. L'évaluation des risques liés à l'émission de poussières ou la résistance à l'érosion s'inscrit dans un souci constant de sécurité des ouvrages géotechniques à protéger (route sur un remblai, digue de protection contre les inondations) et de préservation de l'environnement, contribuant à l'optimisation des processus de construction et à la gestion responsable des sites.

Enfin, ces nouvelles normes renforcent la fiabilité et la reproductibilité des essais, aidant ainsi les ingénieurs et les entreprises à mieux anticiper les comportements des sols en conditions réelles. L'intégration de ces nouvelles normes dans la pratique des terrassements est un levier essentiel

pour la construction d'infrastructures plus sûres, plus durables et respectueuses des défis écologiques actuels. À mesure que ces pratiques se développent et se perfectionnent, elles contribuent à une meilleure gestion des risques associés aux sols et à un avenir plus durable pour les projets de terrassement. ■

À retenir

- Les nouveaux essais normalisés en terrassement, élaborés par l'Afnor et le comité technique TC 396, permettent de mieux caractériser les sols traités, optimisant ainsi leur gestion pour des projets plus durables et sécurisés.
- Ils répondent aux enjeux environnementaux, comme la réduction de l'empreinte carbone, et garantissent des pratiques plus fiables et reproductibles.
- Ces normes contribuent à la sécurité des travailleurs et à la préservation de l'environnement.

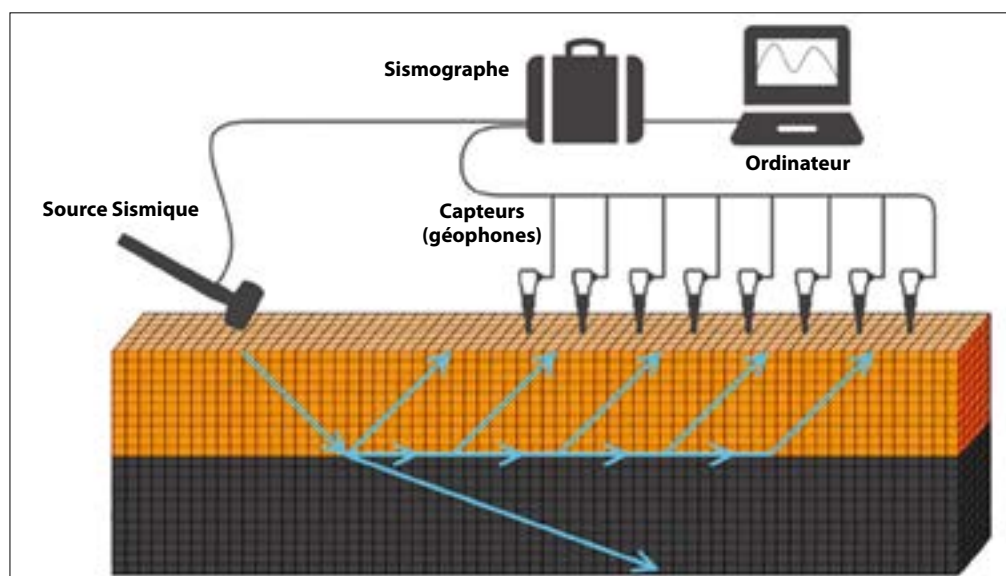
RÉFÉRENCES

1. CGDD, « La matière organique et le carbone dans les sols », 2019.
2. NF EN 17685-1 : « Terrassements - Essais chimiques - Partie 1 : détermination de la perte au feu », mars 2023.
3. NF EN 16907-2 : « Terrassement - Partie 2 : classification des matériaux », décembre 2018.
4. XP CEN/TS 17693-1 : « Terrassements - Essais de traitement de sol - Partie 1 : essai pH pour la détermination du besoin en chaux pour la stabilisation des sols (Point de fixation de la chaux LFP, Optimum de modification de la chaux LMO) », janvier 2022.
5. XP CEN/TS 17693-2 : « Terrassements - Essais de traitement de sol - Partie 2 : essai d'évaluation de l'aptitude d'un matériau sec à émettre de la poussière », janvier 2022.
6. M. Le Vern, « Étude expérimentale des mécanismes et des conditions d'envol des poussières, application aux chantiers de terrassement », thèse de doctorat, École centrale de Nantes, 2021.
7. XP P94-065 : « Sols : reconnaissance et essais - *Hole Erosion Test* - Principe et méthode d'essai en laboratoire pour la détermination des caractéristiques de résistance à l'érosion de conduit », novembre 2023.
8. XP P94-134 : « Sols : reconnaissance et essais - *Jet Erosion Test* - Principe et méthode d'essai en laboratoire et in situ pour la détermination de la résistance à l'érosion externe par jet impactant immergé », en cours de rédaction.
9. PR EN 17542-4 : « Potentiel d'effondrabilité des sols » norme européenne « Test method for measurement of collapse potential of soils », décembre 2023.
10. NF P94-093 : « Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié », octobre 2014.
11. J. Gotor Olabarria, « Étude du comportement des limons loessiques soumis aux vibrations ferroviaires », Université polytechnique de Catalogne, 2003.
12. ASTM D4546 : "Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils", 2021.
13. V. Savatier, P. Garnier, « Sol effondrable - Essai double œdomètre - Interprétation et proposition d'amélioration », Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Beauvais, 2014.
14. PR NF EN 17542-5 : « Terrassements - Essais géotechniques en laboratoire - Partie 5 : Méthode d'essai pour le mesurage du gonflement unidimensionnel des sols en condition œdométrique ».
15. NF P94-100 : « Sols - Reconnaissance et essais - Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essais d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement », octobre 2022.
16. NF EN 13286-49 : « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 49 : essai de gonflement accéléré pour sol traité à la chaux et/ou avec un liant hydraulique », octobre 2004.
17. LCPC/ISétra, *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS). Application à la réalisation des remblais et des couches de forme*, « Guide technique », LCPC, 2000.
18. T.L. Pham, M. Duc, C. Chevalier, P. Reiffsteck, S. Guédon, « Érosion des sols : deux essais complémentaires », 2019.
19. NF P94-102-1 et -2 : « Sols : reconnaissance et essais - Sol traité au liant hydraulique, éventuellement associé à la chaux, pour utilisation en couche de forme - Partie 1 : définition - Composition - Classification / Partie 2 : méthodologie des études de formulation en laboratoire » juillet 2001.

ESSAIS SISMIQUES

POUR LA CARACTÉRISATION DES COUCHES DE FORME TRAITÉES

La réception des couches de forme traitées aux liants hydrauliques est majoritairement réalisée par des mesures de déflexion après 14 à 28 jours. Toutefois, pour mieux comprendre la caractérisation mécanique des sols traités, des acteurs comme le Cerema et Vinci Construction Geolnfrastructure explorent des techniques sismiques et dynamiques, comme le FWD ou les ondes soniques. Ces approches non destructives, testées en laboratoire et sur chantier, pourraient révolutionner les contrôles en temps réel et contribuer plus encore à la démonstration de la durabilité des infrastructures.



SOURCE : [HTTPS://WWW.GEXPLORE.FR/FR/LA-SISMIQUE-REFRACTION/](https://www.gexplore.fr/fr/la-sismique-refraction/)

La réalisation des couches de forme traitées s'est démocratisée en France et en Europe depuis l'édition du guide technique *Traitement des sols* (GTS) en 2000¹. Ce guide est en cours de révision afin de le mettre en cohérence avec le nouveau *Guide des terrassements des remblais et des couches de forme* (GTR)² et avec les récentes normes européennes pour les travaux de terrassement³, et notamment la norme NF EN 16907-4³, qui décrit une méthode d'essai sismique non destructif. La révision du GTS doit aussi apporter des avancées techniques et une meilleure connaissance/caractérisation/réception des matériaux traités, en particulier en couche de forme. La caractérisation des sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques est définie grâce à des études de formulation en laboratoire fixant des caractéristiques géotechniques minimales de module, résistance en traction et résistance en compression.

La réception des sols traités est contrôlée pendant les travaux par la vérification des dosages en chaux et/ou liants hydrauliques, la validation de teneurs en eau conformes aux exigences de compactage et

la vérification de caractéristiques de densités minimales après compactage. Après travaux (7 à 28 jours après la fin des travaux de traitement), la réception définitive de la plateforme est prononcée par la vérification de seuils minimums de déflexion⁴ selon le niveau de plateforme recherché. Ces déflexions sont mesurées soit à la poutre soit par le passage d'un déflectographe Lacroix⁵.

Cette méthodologie de formulation en laboratoire, de contrôles lors des travaux et de réception définitive par mesure des déflexions a fait ses preuves sur de nombreuses infrastructures. La note d'information du Sétra relative à l'assurance qualité des couches de forme traitées⁶ rappelle l'importance de la continuité des vérifications et contrôles de l'étude de formulation en laboratoire aux travaux afin de s'assurer d'une conformité de la plateforme lors de la réception par mesure des déflexions.

Il n'existe toutefois pas de lien direct entre les paramètres géotechniques déterminés au laboratoire et les seuls seuils de déflexion mesurés sur plateforme. Si le respect des dosages, des teneurs en eau, de l'homogénéité des matériaux, des densités des sols compactés et de la météo, minutieusement

AUTEURS

Delphine Jacqueline

Chargée de missions techniques en expérimentation
Cerema

Jérôme Varillon

Directeur du service Géotechnique
Vinci Construction Geolnfrastructure

vérifiés en phase travaux, aboutit à des valeurs de déflexion conformes aux attentes, il existe des cas d'anomalies de déflexions malgré cette exigence de contrôles travaux, voire – et c'est plus problématique – des niveaux de déflexion conformes aux attentes alors qu'aucun élément de contrôles travaux n'était conforme aux études de formulation en laboratoire.

Dans le cadre de travaux de normalisation français (CN T), européens (TC 396) et des travaux de révision du GTS, Vinci Construction GeolInfrastructure (VCGI) et le Cerema travaillent sur une méthode prédictive non destructive afin de suivre l'évolution au jeune âge de ces sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. L'objectif est de :

- disposer de paramètres non destructifs mesurés en laboratoire lors de l'étude de formulation comparables à des paramètres mesurés pendant les travaux de traitement et lors de la réception des plateformes ;
- proposer une méthode de réception alternative à la seule réception par déflexions afin de caractériser/qualifier le comportement mécanique des sols traités par mesure directe.

Des méthodes géophysiques par transmission d'ondes soniques ou vibratoires dans les sols traités sont ainsi testées en continuité des travaux de recherche :

- du Cerema de Clermont-Ferrand⁷, qui a développé un matériel portatif utilisable lors des travaux de traitement des sols ;
- du Cerema de Rouen à la suite des travaux de caractérisation de la compacité du ballast ferroviaire par méthodes sismiques⁸.

DÉFLECTOGRAPHE ET FWD

DÉFLECTOGRAPHE

Le déflectographe¹⁰, notamment le modèle D04 ou modèle Lacroix, est l'outil recommandé pour la réception des couches traitées. Contrairement aux modèles D02 et D03, il offre une meilleure précision et une restitution plus fiable du bassin de déflexion, y compris sur structures rigides. Ses performances en termes de répétabilité, résolution et capacité à détecter des hétérogénéités en font un outil de référence.

Il est ainsi mieux adapté pour assurer la qualité et le suivi des couches de forme, notamment celles traitées aux liants hydrauliques. Cependant, la vitesse lente de sollicitation sous-estime la rigidité de certains matériaux. En effet, les couches traitées présentent un comportement mécanique plus rigide et réactif, ce qui nécessite une sollicitation dynamique plus représentative des conditions réelles de trafic. Dans ce contexte, le déflectographe peut montrer ses limites, notamment pour des structures rigides ou à haut

Quelques définitions

La réception d'une couche de forme repose sur des contrôles multiples incluant la vérification des matériaux, du compactage, des épaisseurs, ainsi que des essais de portance et de déflexion :

- La portance, mesurée par le module de déformation, indique la capacité d'un sol à supporter les charges sans se déformer, tandis que la capacité portante désigne la charge maximale avant rupture. Le module de déformation (E_{V2} , E_{dyn} , E_p) mesure la rigidité d'une plateforme, mais reste une valeur moyenne intégrée sur plusieurs couches. La déflexion mesurée selon les normes NF P 98-2008⁹ directement par l'essai à la poutre ou par une charge roulante (déflectographe Lacroix), est exprimée en centièmes de millimètre. Elle traduit la réponse dynamique de la plateforme auscultée à une sollicitation. Elle permet d'évaluer la structure et son homogénéité à travers des indicateurs comme la déflexion maximale, rémanente, élastique et caractéristique.
- Le traitement des sols aux liants hydrauliques (ciment, chaux) vise à renforcer la portance en favorisant une prise mécanique du matériau. Ce processus, en deux phases (hydratation et durcissement), justifie des délais spécifiques avant mesure, notamment 48h après traitement à la chaux et jusqu'à 28 jours pour les liants hydrauliques.

module, où la déflexion mesurée ne traduit pas fidèlement la véritable réponse mécanique de la plateforme.

Ainsi, bien que le déflectographe Lacroix reste un outil incontournable pour les chaussées souples ou traitées, son usage peut être limité sur des couches fortement stabilisées, justifiant le recours à des méthodes plus dynamiques et complémentaires, comme le FWD¹¹ ou des mesures géophysiques (ondes), pour mieux caractériser les caractéristiques des sols traités.

FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)

Le FWD simule l'impact d'un essieu routier en laissant tomber une masse (de 7 à 135 kN) depuis une hauteur contrôlée sur une plaque circulaire reposant sur la chaussée¹²⁻¹³ (figures 1).

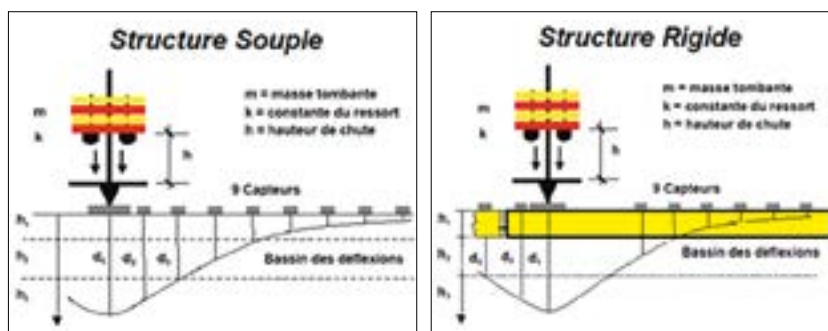
Le système comprend :

- une remorque équipée d'un système de chargement et de neuf capteurs de déplacement ;
- une unité de commande embarquée ;
- une plaque de chargement inclinable pour épouser la surface de la chaussée.

Les géophones, répartis entre 200 et 1 900 mm du centre de la plaque, permettent de mesurer la déformation induite par la charge.

Figures 1-

Mise en évidence du dispositif de mesure du FWD.



L'essai fournit une courbe de déflexion et des paramètres tels que la charge appliquée, la durée de l'impact, la déformation mesurée à chaque géophone, ainsi que la température de l'air.

APPLICATION DU FWD AUX COUCHES DE FORME TRAITÉES

Les couches de forme traitées, souvent stabilisées au ciment ou à la chaux, présentent une rigidité élevée. Le FWD utilisé communément sur des structures de chaussées rigides¹⁴ pourrait donc être bien adapté à des sols rigides traités aux liants hydrauliques, grâce à sa sollicitation brève mais intense, proche des conditions réelles de trafic. Une étude menée sur cinq sites en Chine¹⁵ a démontré la capacité du FWD à différencier clairement les performances de rigidité de trois types de sols :

- un sol traité au ciment (figures 2a et 2d) ;
- un sol pierreux (figures 2b et 2e) ;
- un sol grossier (figures 2c et 2f).

La variabilité des déflexions (CV) est plus faible pour :

- les matériaux traités en comparaison avec les matériaux non traités ;
- les charges équivalentes à 50 et 70 kN en comparaison à la charge de 30 kN (les écarts de ces charges restent inférieurs à 5 %, ce qui rend plus appropriée la mesure des déflexions des couches de forme traitées) ;
- des offsets à la source (0 cm).

Il semble donc envisageable de tester le FWD en réception de plateformes traitées, car il présente suffisamment de sensibilité pour détecter des variations de rigidité d'une plateforme. Il faudra

cependant définir si les seuils de déflexion actuellement utilisés pour réceptionner les plateformes à la poutre ou au deflectographe Lacroix sont les mêmes que les déflexions déduites par le FWD.

Un intérêt particulier du FWD réside dans sa typologie d'essai, qui génère et enregistre, pour certains matériels, un signal vibratoire. Il devient alors intéressant d'exploiter les signaux géophysiques du FWD afin d'en déduire des paramètres de vitesse d'onde, fréquence et longueur du signal, paramètres physiques qui peuvent être comparés à ceux déterminés lors de l'étude de formulation en laboratoire et pendant les travaux de traitement.

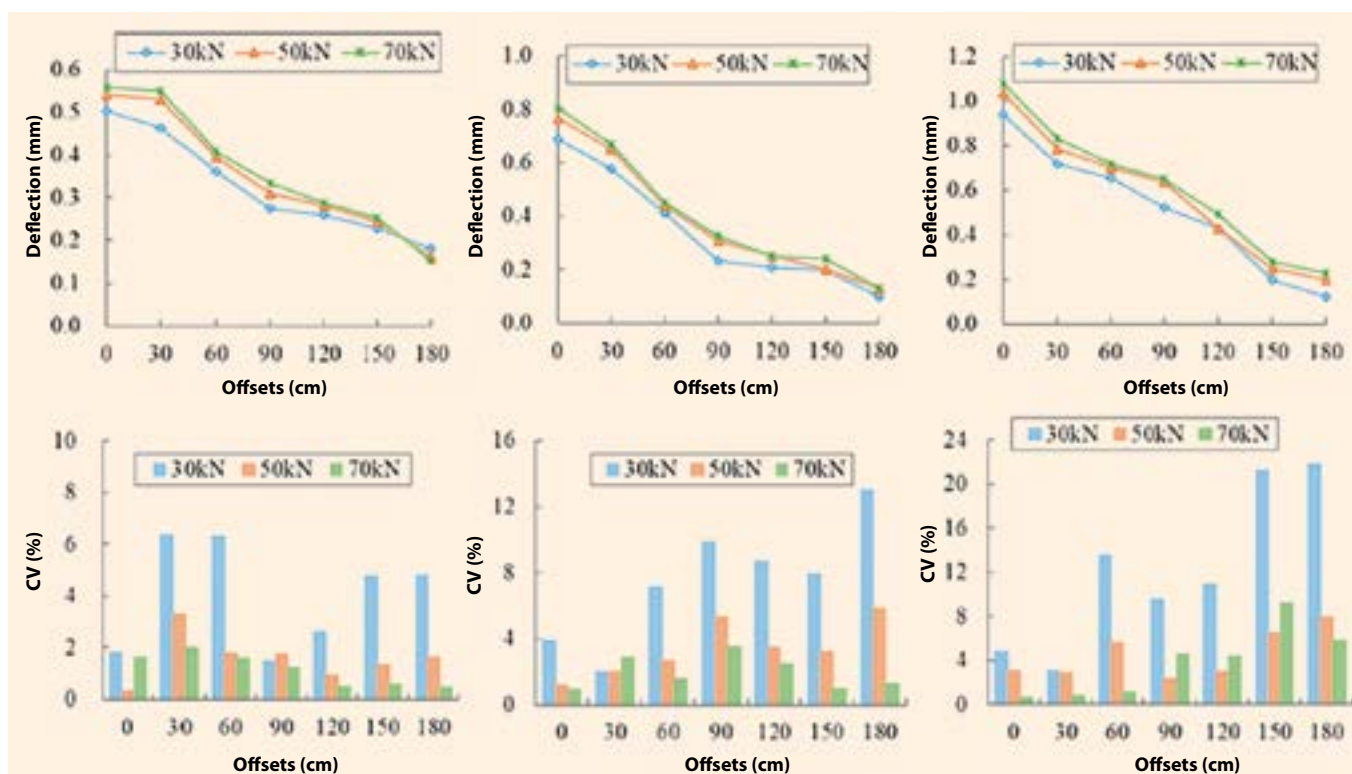
COMPARAISON DU FWD ET DU DEFLECTOGRAPHE LACROIX

Le contrôle de la portance des structures routières constitue une étape essentielle pour le dimensionnement, la réception et la maintenance des chaussées¹⁶. Parmi les outils d'auscultation disponibles, le deflectographe Lacroix et le FWD sont deux appareils performants, mais reposant sur des principes de fonctionnement distincts.

Pour comparer les deux appareils de mesure, les auteurs de cet article se sont appuyés sur certaines de leurs caractéristiques et particularités répertoriées dans le [tableau 1](#).

En juin 2025, le Syndicat professionnel des terrassiers de France (SPTF) a mis à disposition un chantier d'infrastructure routière avec couche de forme traitée. Sur ce projet, il a été comparé des mesures de déflexions à la poutre, des mesures de déflexions

—Figures 2—
Résultats des essais au FWD.



Caractéristiques	Défectographe Lacroix	FWD
Mode d'application de la charge	Charge roulante	Impulsion verticale
Vitesse d'application de la charge	10 km/h (5 Hz)	70 km/h (34 Hz)
Pas de mesure	4 à 6 m	Variable
Résolution du capteur de mesure	1/100 mm	1/1000 mm
Mesure du bassin de déflexion	Bassin réel pour les chaussées souples / 65 points	Bassin réel / 9 points
Niveau de chargement appliqué pour une mesure	Unique (50 kN ou 65 kN – essieu 10 t ou 13 t)	Réglable et mesuré (7 à 135 kN – essieu 1,4 à 24 t)
Type de superstructures auscultées	Chaussées souples et semi-rigides	Chaussées souples, semi-rigides et rigides

-Tableau 1-
Comparaison des essais
au défectographe et au FWD.

au défectographe Lacroix, des mesures de portance au portancemètre et des mesures de déflexions estimées avec le FWD. Enfin, le Cerema de Clermont-Ferrand a pu caractériser la plate-forme traitée avec son dispositif expérimental de signaux sismiques.

L'ensemble des mesures sera exploité dans le cadre de publications distinctes afin de :

- apporter de nouvelles données pour la comparaison du FWD et des déflexions normalisées (essai à la poutre ou défectographe Lacroix) ;
- donner un avis sur l'utilisation du FWD en alternative au défectographe Lacroix pour la réception des couches de forme traitées ;
- définir si le FWD contribue à une exploitation de signaux sismiques pour mieux caractériser les performances des sols traités – projet de thèse.

INTÉRÊTS DE LA CARACTÉRISATION DES SOLS TRAITÉS PAR MESURES SONIQUES OU SISMQUES

La méthode sismique est une technique géophysique non destructive utilisée pour caractériser les propriétés mécaniques du sol. Elle permet de réaliser des mesures directement sur site, sans altérer le matériau, et repose sur l'analyse de la vitesse de propagation des ondes sismiques générées par percussion. Ces ondes se divisent en deux types : les ondes de volume (P et S) et les ondes de surface (de Rayleigh et Love).

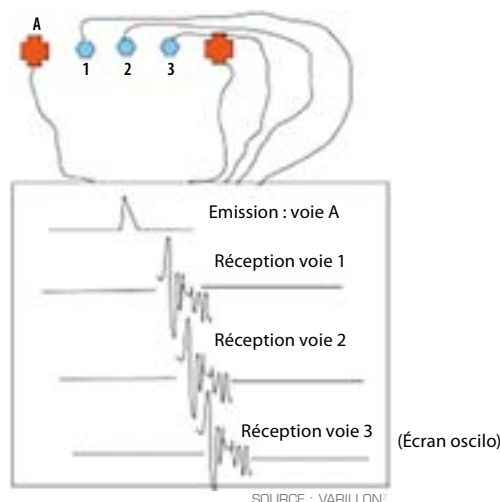
L'un des intérêts majeurs de la méthode sismique est la possibilité de relier les vitesses de propagation des ondes à des paramètres mécaniques fondamentaux du sol. En particulier, grâce aux vitesses des ondes P et S, on peut calculer le module de cisaillement dynamique G_{max} , qui reflète la résistance d'un sol aux déformations sous faible sollicitation ainsi que le module d'Young dynamique E_{dyn} , lié à la déformation longitudinale.

En 2006, le laboratoire régional des ponts et chaussées (LRPC) de Clermont-Ferrand a mis en place un protocole sismique simple mais efficace pour évaluer la rigidité des couches de forme traitées. Le dispositif comprenait un marteau de 100 à 150 g, un accéléromètre sensible et un oscilloscope analo-

gique. Des frappes étaient réalisées dans quatre directions à différentes distances du capteur, afin de mesurer la vitesse V_p d'arrivée des ondes P in situ. Les vitesses mesurées étaient homogènes ($V_p > 2000$ m/s) avec un écart-type < 200 m/s, témoignant d'un matériau rigide et bien consolidé. La constance des résultats dans toutes les directions a confirmé l'isotropie et l'homogénéité de la couche testée. En laboratoire, les vitesses étaient plus faibles et plus variables, en raison de la perte de confinement et des effets d'extraction. Toutefois, ces essais ont facilité la différenciation entre les traitements : un sol traité uniquement à la chaux présentait une vitesse V_s avoisinant ~ 1000 m/s, contre 1800–2000 m/s pour un sol traité au ciment.

En 2009, le dispositif a été optimisé avec un marteau plus lourd (550 g), deux capteurs supplémentaires et un oscilloscope numérique Le Croy Wave Surfer (figure 3), offrant une meilleure acquisition et des outils d'analyse avancés, renforçant ainsi la précision et la fiabilité des mesures.

La nouvelle configuration repose sur une disposition en ligne des capteurs à des distances connues et sur des frappes effectuées de part et d'autre du dispositif (chocs aller-retour), ce qui permet de simuler un système de sismique réfraction plus classique, avec une évaluation de la vitesse des ondes le long d'un axe. L'acquisition et le traitement des signaux ont offert l'opportunité au Cerema de Clermont-Ferrand de proposer une qualification des performances d'un sol traitée selon trois paramètres :



-Figure 3-
Dispositif de mesure utilisé
en 2009.

- La vitesse des ondes P : plus le matériau traité acquiert des performances de prise, plus la vitesse des ondes P augmente.
- La longueur du signal : plus le matériau traité acquiert des performances de prise, plus la longueur du signal diminue.
- La fréquence du signal : plus le matériau traité acquiert des performances de prise, plus la fréquence caractéristique du signal augmente (hautes fréquences).

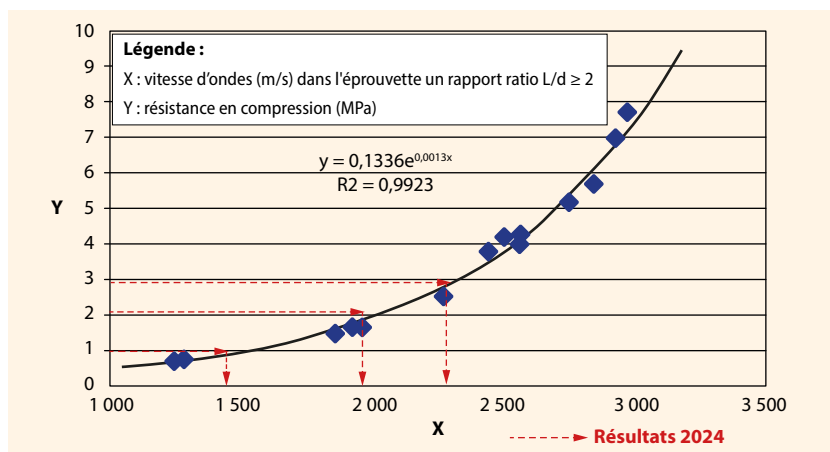
En 2024, VCGI a repris le travail de recherche du Cerema de Clermont-Ferrand en réalisant, avec le Cerema et Lhoist :

- des tests de mesures sismiques et soniques en laboratoire afin de caractériser pour différents temps de prise la propagation d'un signal (mesures de vitesses d'ondes P) ;
- des mesures sur site avec le dispositif du Cerema de Clermont-Ferrand afin de tester à nouveau les performances géophysiques d'un sol traité.

Les conclusions de VCGI ont contribué à :

- Confirmer en laboratoire, sur éprouvettes de sols traités, la corrélation des vitesses d'ondes selon le délai de prise et de valider la formule proposée par la norme NF EN 16907-4 reliant vitesse d'onde P et résistance en compression (figure 4). Ces résultats favoriseront la proposition d'un mode opératoire (et matériel d'essai) pour désormais mesurer ce paramètre en laboratoire lors des études de formulation. Cette méthode d'essai sera également reprise dans le nouveau GTS.

—Figure 4—
Corrélations des vitesses d'ondes avec les résistances en compression mesurées en laboratoire.



—Figure 5—
Abaque de performances selon longueur du signal (en ms), vitesses d'ondes P (en m/s) et fréquences (en Hz) d'un sol traité aux liants hydrauliques.



Préciser l'abaque de qualification d'un sol traité selon les trois paramètres géophysiques proposés par le Cerema de Clermont-Ferrand : vitesse d'onde, longueur du signal, fréquence (figure 5). Il devient alors possible de qualifier à tout âge la performance d'un sol traité. Il a également été démontré que la non-apparition d'un signal performant (vitesse élevée, haute fréquence, faible longueur du signal) à jeune âge (2 jours) pourrait être le signal d'un défaut de qualité. Il devient alors possible de disposer d'une mesure de contrôle non destructive afin de caractériser au très jeune âge la bonne qualité de prise du liant et donc d'anticiper très tôt une anomalie.

Parmi les techniques sismiques les plus utilisées pour caractériser la rigidité des sols et des couches traitées, trois approches se distinguent par leur précision, leur adaptabilité aux conditions de chantier, et leur caractère non destructif :

- la méthode MASW¹⁷ ;
- les essais Crosshole¹⁸ ;
- la mesure des ultrasons, très fréquemment utilisée pour la prise du béton.

Ces outils aident à mesurer les vitesses d'ondes sismiques, dont les ondes de cisaillement S :

- La méthode MASW analyse la dispersion des ondes de Rayleigh à l'aide de géophones alignés. Elle offre un profil de vitesse en profondeur, sensible aux variations latérales et verticales, même à des temps de cure courts.

- Le Crosshole, réalisé entre deux forages parallèles, mesure précisément la vitesse d'ondes à une profondeur donnée, sans influence des couches supérieures. Il favorise une caractérisation fine de la rigidité et du type de traitement.

Ce dispositif pourrait être complété afin de développer des post-traitements plus complets, comme décrits dans la thèse de Delphine Jacqueline⁸.

D'autres études plus récentes montrent l'intérêt d'utiliser les méthodes sismiques pour évaluer la rigidité des sols traités, comme celle menée au Portugal¹⁹, celle utilisant les ultrasons ou la méthode de rebond²⁰ et celle menée en Chine avec le FWD décrite ci-après¹⁵.

CONCLUSION

La qualification actuelle des sols traités en laboratoire repose sur des paramètres géotechniques : module, résistance en traction et résistance en compression. Les études de formulation en laboratoire et la détermination des paramètres géotechniques définis ci-dessus sont maîtrisées par les laboratoires. Le GTS et normes d'essais associées fixent précisément les méthodes et les seuils ou performances à atteindre selon les objectifs de plateforme recherchés.

La mise en application lors des travaux de terrassement « de la bonne formule de traitement »

nécessite de bien maîtriser l'homogénéité des matériaux (dont la mouture, le Dmax ne sont pas toujours les mêmes que ceux testés en laboratoire), la bonne teneur en eau, le respect des dosages en liants, les objectifs de compactage et d'engager les opérations de traitement dans des conditions météo favorables (pas trop de pluie, pas trop de soleil, pas de gel...). Ceci implique également une forte exigence de contrôles qualité quotidiens afin de bien maîtriser l'ensemble des paramètres nécessaires à la réussite du traitement. La réception des plateformes traitées intervient entre 14 et 28 jours après la fin des travaux de traitement afin de vérifier l'obtention des caractéristiques recherchées. Cette qualité est vérifiée par la mesure de déflexions à la poutre ou au déflectographe Lacroix qui sont comparées à des objectifs de déflexions minimum à atteindre pour un niveau de plateforme requis.

La réception des plateformes traitées voit également une évolution des techniques avec le développement et l'utilisation internationale de matériels de réception de plateformes avec le FWD. Ce matériel pourra devenir une alternative à la réception au déflectographe, qui souffre d'une disponibilité et de contraintes d'accessibilité/maintenance par rapport au FWD. Cette possibilité reste à valider à l'issue de tests comparatifs débutés en juin 2025.

En parallèle, les travaux de recherche du Cerema de Clermont-Ferrand puis de VCGI mettent en perspective l'intérêt de qualifier les sols traités avec des ondes sismiques ou soniques à la fois en laboratoire lors des études de formulations et sur les sites de

travaux. Il est désormais établi que des essais simples en laboratoire de mesures d'ondes P aident à qualifier la prise et à estimer une résistance en compression sur un échantillon identique (reproductibilité des mesures selon le temps de cure sur la même éprouvette grâce à des essais non destructifs).

En phase travaux, grâce à l'utilisation d'un matériel du type de celui développé par le Cerema de Clermont-Ferrand, on pourrait disposer d'un dispositif d'alerte lors des travaux de traitement anticipant d'éventuels défauts de prise à très jeune âge.

Le développement de méthodes géophysiques (vibratoires, ondes sismiques ou soniques) caractérisant les sols traités en laboratoire, pendant les travaux de traitement et lors de la réception des plateformes est probablement un axe de recherche pertinent :

- Les mesures en laboratoire sont faciles et vont désormais se démocratiser lors des études de formulation.
- En phase travaux, le développement d'un matériel du type de celui conçu par le Cerema de Clermont-Ferrand permettrait de disposer, lors des opérations de traitement, d'un matériel d'alerte facile à mettre en œuvre.
- Pour la réception des plateformes, une méthode d'auscultation dynamique telle que le FWD pourrait constituer le lien manquant entre des paramètres mécaniques de déflexion et des caractéristiques géophysiques (vitesses d'ondes, longueur et fréquence du signal) des sols traités. Une thèse est ainsi envisagée entre différents acteurs de la construction afin de développer et de valider l'intérêt de telles méthodes. ■

À retenir

- Le déflectographe Lacroix et le FWD mesurent des déflexions à l'aide de matériels très lourds sur des profondeurs importantes.
- Les méthodes sismiques favorisent une évaluation fine et non destructive de la rigidité des couches de forme, avec l'avantage d'un dispositif beaucoup plus léger et facile à déployer sur site.
- Les techniques comme le MASW, le Crosshole ou les ultrasons offrent une lecture précise des vitesses d'ondes (P et S), révélant les caractéristiques mécaniques du sol, son homogénéité et l'efficacité du traitement.
- La fiabilité des mesures sismiques dépend de nombreux facteurs : teneur en eau, nature et dosage du liant, niveau de confinement, qui influencent la propagation des ondes et la qualité du signal.

RÉFÉRENCES

1. LCPC/Sétra, *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS). Application à la réalisation des remblais et des couches de forme*, « Guide technique », LCPC, 2000.
2. Idrim, *Guide des terrassements des remblais et des couches de forme (GTR)*, Cerema, 2024.
3. NF EN 16907-4 : « Terrassement - Partie 4 : traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques », décembre 2018.
4. Sétra, Note d'information Chaussées - Plates-formes - Assainissement, Fiche n° 1 : « Méthodologie de mesure de la portance et de la déflexion des plates-formes », mars 2018.
5. J.-M. Simonin, A. Riouall, « Évaluation des déflectographes », BLPC n° 208, mars-avril 1997.
6. Sétra, Note d'information Chaussées - Dépendances, Fiche n° 118 : « Éléments clés de l'assurance qualité des couches de forme traitées », janvier 2009.
7. J. Varillon, « Caractérisation des matériaux traités par interprétation de signaux sismiques LCPC », LCPC Terrassements, 2010.
8. D. Jacqueline, « Caractérisation de la compacité du ballast ferroviaire par méthodes sismiques », thèse ENPC, 2015.
9. NF P98-200-3 : « Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 3 : détermination de la déflexion avec le déflectographe 02 », septembre 1993.
NF P98-200-4 : « Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 4 : détermination de la déflexion avec le déflectographe 03 », septembre 1993.
NF P98-200-5 : « Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 5 : détermination de la déflexion avec le déflectographe 04 », septembre 1993.
10. P. Lepert, J.-M. Simonin et R. Kobisch, « Le FWD : performances, utilisation en France et en Europe », BLPC n° 209, mai-juin 1997.
11. C. Li, G. Gao, P. Shen, Y. Wang, "Deep learning-based inversion of soil and rock compaction density utilizing Falling Weight Deflectometer (FWD) and Surface Waves", *Transportation Geotechnics*, vol. 49, 2024.
12. B. Picoux et R. Tautou, « Amélioration de l'interprétation des méthodes d'auscultation dans le cadre de l'établissement d'un diagnostic précis de la chaussée à partir de méthodes d'impact », projet national DVDC, 2017.
13. Cerema, « Information sur le Falling Weight Deflectometer », Infralab, 2001.
14. D. de Lesquen, J. Van Rompu, N. Sagnard, A. Hebtung, H. Odéon, « Déflexion des couches de roulement : état de l'art et approche théorique », projet national, 2023.
15. Z. Chen, X.T. Jin, H. Cheng, Q. Liu, X. Xing, L. Sun, X. Jin et F. Jin, "Enhanced in-situ measurement and evaluation methods for subgrade modulus utilizing falling weight deflectometer", *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2024.
16. Cerema, Note d'information Chaussées - Plates-formes - Assainissement, Fiche n° 2 : « Dimensionnement des épaisseurs de couche de forme pour PF2qs - Complément au GTR et au GTS », mars 2017.
17. M. Long, "Practical use of shear wave velocity measurements in UK clays (BGA Touring Lecture 2023)", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, vol. 178, 2025.
18. J.-S. Lee, E. Tutumluer, W.-T. Hong, "Stiffness evaluation of compacted geo-materials using crosshole-type dynamic cone penetrometer (CDP), rPLT, and LFWD", *Construction and Building Materials*, vol. 303, 2021.
19. S. Rios, I. Caetano, C. Pinheiro, A. V. da Fonseca, "Shear wave velocities to monitor curing evolution of soils treated with alkali activated binders", 8th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, 2023.
20. T. Zhou, H. Zhang, B. Li, L. Zhang, W. Tan, "Evaluation of compressive strength of cement-stabilized rammed earth wall by ultrasonic-rebound combined method", *Journal of Building Engineering*, vol. 68, 2023.
21. J. Varillon, « Caractériser les sols traités par transmission d'ondes », rapport d'étape, 2024.



Aménagement de la RD74 à Bannes.
© COLAS

ÉVALUATION ET COMPORTEMENT DES TRAITEMENTS DE SOL EN CONDITIONS HIVERNALES

Les règles de l'art définissent une température minimale de 5 °C pour réaliser des chantiers de traitement de sol. Il arrive malgré tout que certains d'entre eux se déroulent en arrière-saison dans des conditions climatiques dégradées. Quelles sont alors les conséquences de températures correspondant à un gel modéré jusqu'à -5 °C sur le comportement de la prise hydraulique d'un sol traité ? C'est l'objet des travaux présentés dans cet article qui ont nécessité 15 études complètes et plus de 600 éprouvettes moulées.

Dans le cadre des chantiers de terrassement, la réutilisation des terres excavées est un enjeu environnemental primordial. L'une des techniques pour valoriser ces matériaux en place est le traitement de sol. Cette technique qui date de la fin des années 1960 est devenue courante. Elle est particulièrement bien adaptée aux sols argileux détremés.

La maîtrise des différentes étapes du traitement des sols est acquise depuis de nombreuses années avec notamment une amélioration constante du matériel. L'un des freins de cette technique reste néanmoins le travail en conditions hivernales. En effet, en présence d'eau, les liants hydrauliques routiers (LHR)¹⁻² (**photo 1**) utilisés pour stabiliser les sols durcissent, s'agglomèrent avec les éléments des sols et leur confèrent une cohésion permanente. Cette prise hydraulique se développe en trois étapes :

- le démarrage de la prise, qui correspond au délai de maniabilité (mise en solution des éléments hydratés – quelques heures) ;
- la prise hydraulique en elle-même (formation d'éléments hydratés stables – quelques jours) ;
- le durcissement (accroissement des performances mécaniques – plusieurs mois).
- L'importance de ces réactions dépend :
 - de la qualité des sols traités et du type de LHR utilisé, paramètres maîtrisés en amont avec des études en laboratoire ;
 - de la qualité de la mise en œuvre et notamment du niveau de compacité atteint ;
 - des aléas climatiques, c'est-à-dire principalement de la température.

La cinétique de prise d'un LHR est particulièrement affectée par les températures³. Dans le guide *Traitement des sols* (GTS)⁴, une température minimale de 5 °C est préconisée pour réaliser un traitement. En dessous de cette température, la prise hydraulique

AUTEURS

Jacques Leite
Responsable Support technique client
Eqiom

Christian Raynaud
Chef de Service technique
Colas France territoire Nord-Est



–Photo 1–
Liants hydrauliques routiers.

–Tableau 1–
Les différents mûrissements étudiés.

est considérée comme interrompue. Cette valeur et cette interprétation sont reprises dans la collection technique Cimbéton T70⁵ et dans l'annexe M de la norme européenne NF EN 16907-4 sur le traitement de sol⁶, qui indique également qu'en dessous de 5 °C la stabilisation n'est généralement pas possible.

DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

Tout en respectant les règles de l'art, il arrive que des traitements de sol se déroulent en phase hivernale, le plus souvent pour des nécessités de planification. Les températures peuvent être en limite, voire basculer la nuit en dessous de 5 °C.

Le retour d'expérience sur ces chantiers réalisés dans des conditions limites n'est pas totalement négatif. L'impact d'un gel modéré n'engendre en effet pas nécessairement des désordres de prise sur chantier :

- Dans certains cas, on peut observer des portances non conformes aux objectifs, mais qui peuvent évoluer dans le temps.
- Parfois, les premiers centimètres sont affectés et nécessitent un écrémage de surface.
- Cela suggère un comportement à des températures basses peut-être un peu moins binaire qu'énoncé plus haut.

Si la prise est interrompue, peut-elle repartir ou s'arrête-t-elle définitivement ? Le type de LHR, sous-entendu sa composition, peut-il avoir un impact sur la cinétique de prise dans des conditions défavorables, notamment en phase hivernale ?

L'objectif de la démarche scientifique initiée par Colas et Eqiom est d'observer l'impact de températures basses (+5 °C à -5 °C) sur un traitement de sol en laboratoire. Le choix de ces températures est fait arbitrairement en considérant un niveau de gel (-5 °C) correspondant au gel de surface le plus communément rencontré en France métropolitaine, hors zone de montagne.

Dans cette perspective, plusieurs cures sont imaginées (tableau 1) :

Type de cure au départ			Temps cumulé de gel à -5 °C	Conservation à 20 °C
Cure 1 – 20 °C	Matériau à 20 °C avant moulage	Référence	0	0 - 360j
Cure 2 – Gel modéré		Cycle jour/nuit sur 7j	28h	7j-360j
Cure 3 – Gel modéré		Cycle jour/nuit sur 14j	56h	14j-360j
Cure 4 – Gel élevé		7j à -5 °C + 21j à 5 °C	168h	28j-360j
Cure 5- Gel élevé	Matériaux à 5 °C avant moulage	7j à -5 °C + 21j à 5 °C	168h	28j-360j

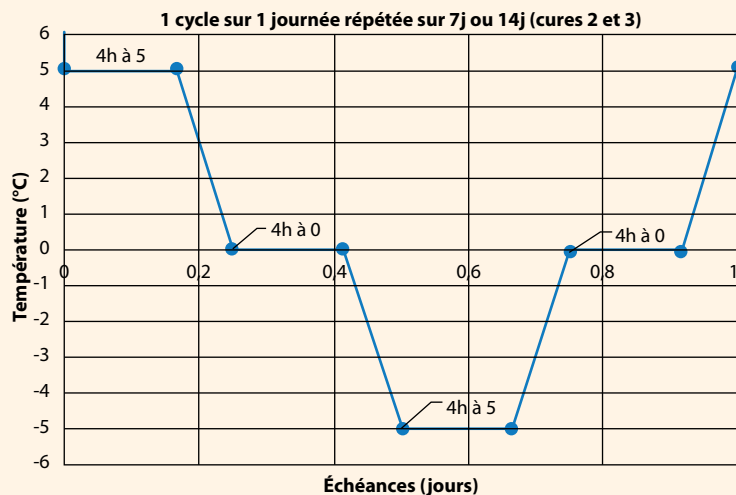
- Les éprouvettes sont conservées dans des étuis étanches pour éviter la dessiccation et dans des enceintes thermorégulées (photo 2).
- La référence est la conservation à 20 °C (cure 1).
- Un cycle simule sur une journée des conditions

–Photo 2–
Enceintes thermorégulées utilisées dans le cadre de l'étude.



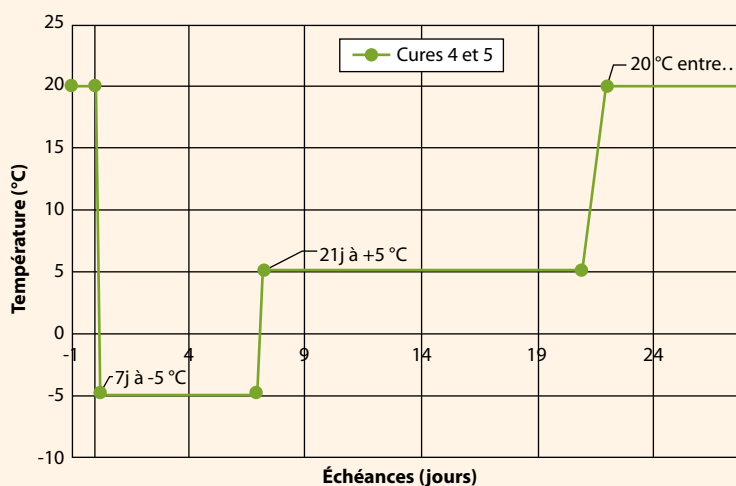
-Figure 1-

Cycle répété pour les cures 2 et 3.



-Figure 2-

Cycle de conservation en basse température des cures 4 et 5.



Classe HRB	% clinker	% laitier	Début de prise (min)	Rc 28j	RC 56j	Délai de maniabilité pour du traitement à 20 °C
N4	30<	>60	>400	–	32,5 < < 52,5	>6h
E4	50<	≥50	>200	32,5 < < 42,5	–	>4h
E-RS	>90	–	<200	> 52,5	–	<4h

-Tableau 2-

Les différents liants testés.

hivernales, à savoir une température moyenne à 0°C avec 5°C la journée et -5°C la nuit (figure 1). Ce cycle est répété pendant 7 jours (cure 2) et pendant 14 jours (cure 3). Les éprouvettes sont ensuite remises en cure à 20°C jusqu'à 360 jours.

- Des conditions beaucoup plus défavorables sont testées (cure 4) simulant un gel prolongé suivi d'une période de température légèrement positive, soit une cure pendant 7 jours à -5°C, puis 21 jours à 5°C (figure 2) et enfin remise à 20°C entre 28 et 360 jours.

- La dernière série d'essais (cure 5) est une variante de la cure 4 : les matériaux sont mis à 5°C avant le moulage, donc dans des conditions de températures proches de celles d'un chantier hivernal. Toutes les

autres séries sont moulées avec des matériaux à 20°C et il faut s'assurer que la conservation des éprouvettes avant moulage n'est pas un biais potentiel à l'approche retenue. Ensuite, c'est la même conservation après moulage que la cure 4.

Le sol testé est un sol fin argileux de type A2 au sens du GTR 2000⁷ ou F2 au sens du GTR 2024⁸. Le sol n'est pas utilisable en l'état en remblai ou en couche de forme à cause de son état hydrique et de sa plasticité. À l'état naturel, il est sensible à l'eau et au gel au sens du GTR. Ce type de sol se retrouve dans toutes les régions métropolitaines. Le traitement préconisé pour de la stabilisation est un apport de chaux vive CL90⁹ de l'ordre de 0,5 à 1,5% et un apport de LHR compris entre 5 et 8%. Les dosages en chaux et LHR sont des dosages usuels et identiques entre les différentes formulations.

Les différents liants testés ont permis de balayer une large gamme de LHR avec des cinétiques de prise très différentes (tableau 2) :

- un LHR composé majoritairement de laitier de haut-fourneau classé en prise lente HRB N4 ;
- un LHR composé d'un mélange de clinker et de laitier de haut-fourneau classé en prise rapide HRB E4 ;
- un LHR composé quasiment exclusivement de clinker classé en prise rapide E-RS. Ce type de LHR, peu utilisé du fait de son court délai de maniabilité, est réservé à des usages très spécifiques. Il n'a été testé que pour les cures les plus sévères 4 et 5.

ANALYSE DES RÉSULTATS DES PERFORMANCES MÉCANIQUES EN FONCTION DES DIFFÉRENTES CURES

Durant près de cinq années, plusieurs formulations ont été étudiées conformément aux normes NF EN 13286. Différentes itérations ont parfois nécessité de réaliser l'étude de référence (cure 1) plusieurs fois (photo 3)¹⁰⁻¹³.

-Photo 3-

Moulage des différentes formulations.



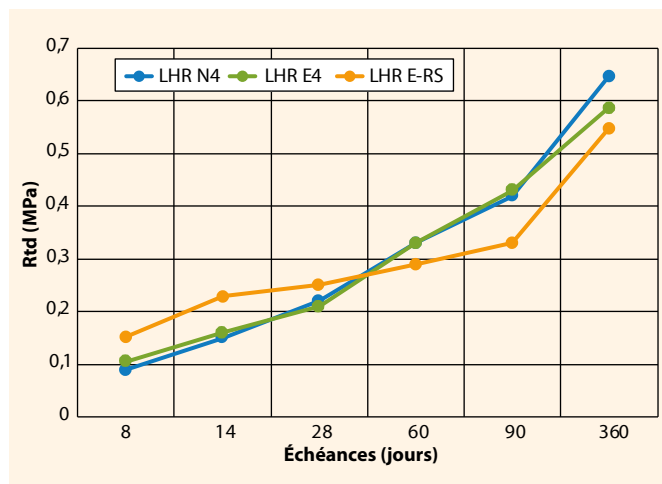
-Tableau 3-

Moyennes des modules à 20 °C pour les trois LHR.

Classe HRB	Etd 14j	Etd 28j	Etd 60j	Etd 90j	Etd 360j
N4	2 000	2 500	3 400	4 000	5 300
E4	2 000	2 500	3 400	3 900	4 500
E-RS	2 000	2 200	3 000	3 000	4 000

-Figure 3-

Évolution des résistances à 20 °C.



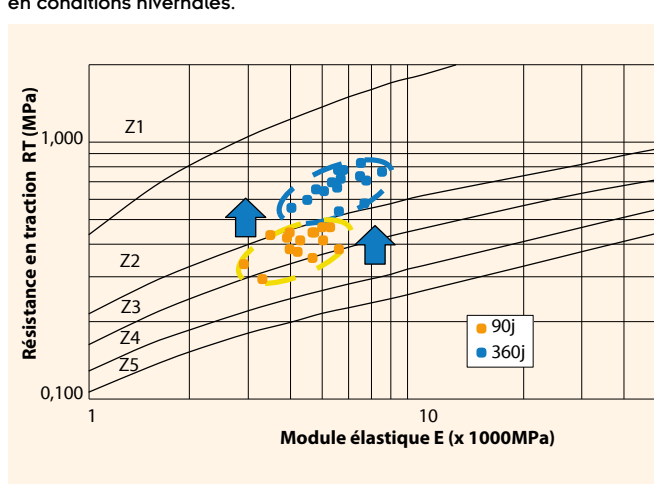
-Tableau 4-

Coefficient de correspondance 90j-360j.

	Rt90/Rt360		Et90/Et360	
	RGRA n° 1005	15 études « conditions hivernales »	RGRA n° 1005	15 études « conditions hivernales »
Moyenne	0,68	0,60	0,75	0,76
Écart-type	0,13	0,06	0,16	0,08

-Figure 4-

Évolution de classement entre 90j et 360j pour les 15 études en conditions hivernales.



La mise en basse température affecte directement la résistance en traction et par extension le module. Globalement, les modules entre les différentes formulations sont assez constants (tableau 3) et suivent les tendances des résistances en traction : plus la résistance en traction est élevée, plus le module est élevé.

En se concentrant sur les résistances à 20 °C (figure 3), le LHR très clinkérisé (E-RS) est bien supérieur aux deux autres LHR (E4 et N4) : de 30 à 60 % de performances en plus à 7j. L'effet de croissance des résistances diminue rapidement et, à 28j, les trois LHR sont équivalents.

Les LHR comprenant du laitier (E4 et N4) prennent le pas sur le liant E-RS : à partir de 90j et jusqu'à 360j, l'écart est de l'ordre de 30 %, ce qui entraîne une différence de classe de zone mécanique.

Les cinétiques de prise sont différentes en fonction des composants présents dans les LHR :

- Un liant E-RS est rapidement performant, mais plafonne dans le temps.

- Les liants E4 et N4 ont une croissance plus lente à court terme, mais ils présentent, au-delà de 28 jours, une courbe d'évolution dans le temps supérieure.

Les coefficients de correspondance pour les couples de performances mécaniques (Rt90-Rt360) et (Et90-Et360) sont situés dans le même ordre de grandeur (tableau 4) que ceux des travaux présentés sur ce sujet dans un précédent article de la RGRA¹⁴. Les résistances en traction et les modules évoluant dans le même spectre, seule l'évolution des résistances pour l'impact du gel est développée ici.

Cela se traduit par le gain d'une zone mécanique (figure 4) entre 90j et 360j quelle que soit l'évolution de la cinétique de prise.

Traiter à la chaux, au chaud, même en hiver

Daniel Puiatti, consultant (DPST Consulting)

Comme chacun sait, la réaction d'hydratation de la chaux vive est fortement exothermique : $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{chaleur}$ (1155 kJ/kg de CaO). C'est l'une des raisons pour lesquelles la chaux vive est appréciée pour l'assèchement des sols humides.

Dégagement de vapeur lors du traitement à la chaux vive d'une argile humide.



Cette réaction, ainsi que ses effets immédiats – modification des limites d'Atterberg et des caractéristiques de compactage, amélioration de la portance –, ne dépend pas de la température ambiante. Contrairement à d'autres procédés sensibles au froid, ces effets se manifestent même à basse température, ce qui présente un intérêt particulier lorsqu'il s'agit d'utiliser des sols argileux humides en période hivernale.

Après l'enlèvement de la couche superficielle lorsqu'elle est gelée, le traitement à la chaux vive des couches sous-jacentes favorise l'évaporation de l'eau grâce à la chaleur dégagée par la réaction. Il modifie les caractéristiques du sol et maintient ce dernier à une température positive durant la mise en œuvre.

L'exemple le plus marquant d'application de ce procédé remonte au début des années 1990, à la frontière germano-polonaise, lors de la construction d'un remblai de plateforme logistique réalisée sous des températures négatives. Le chantier, organisé de manière à tirer pleinement profit de la chaleur dégagée, fonctionnait 20 heures par jour pendant 10 jours sur 14. Cette organisation a permis le réemploi, dans les délais prescrits, de plus d'un million de mètres cubes de limon traité à 1,5 % de chaux vive.

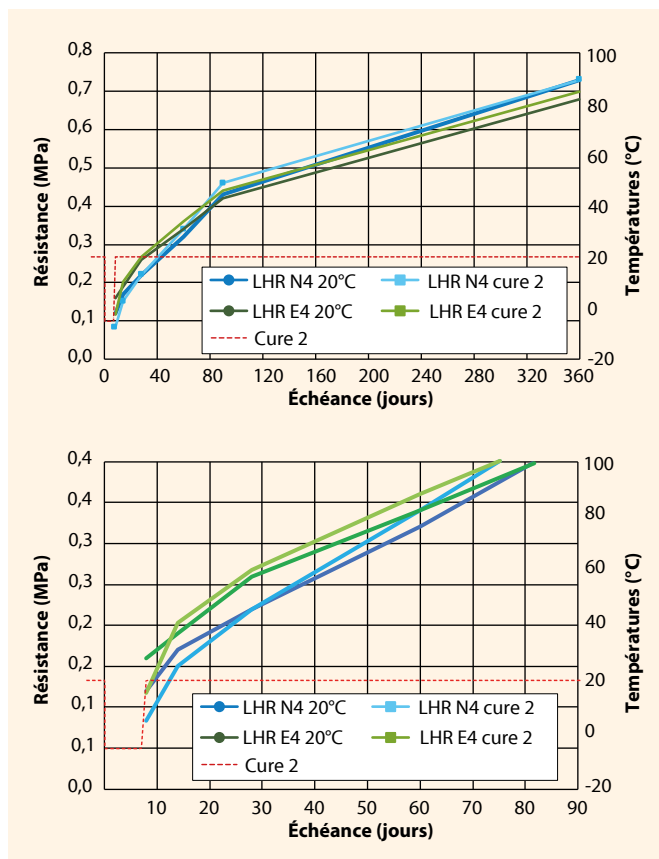
D'autres applications similaires ont été recensées, notamment en République tchèque pour la rehausse et la stabilisation de digues de protection après les inondations de 2003, ainsi que dans le nord de la France.

Traitement à la chaux vive en hiver sur une digue en République tchèque en 2003.



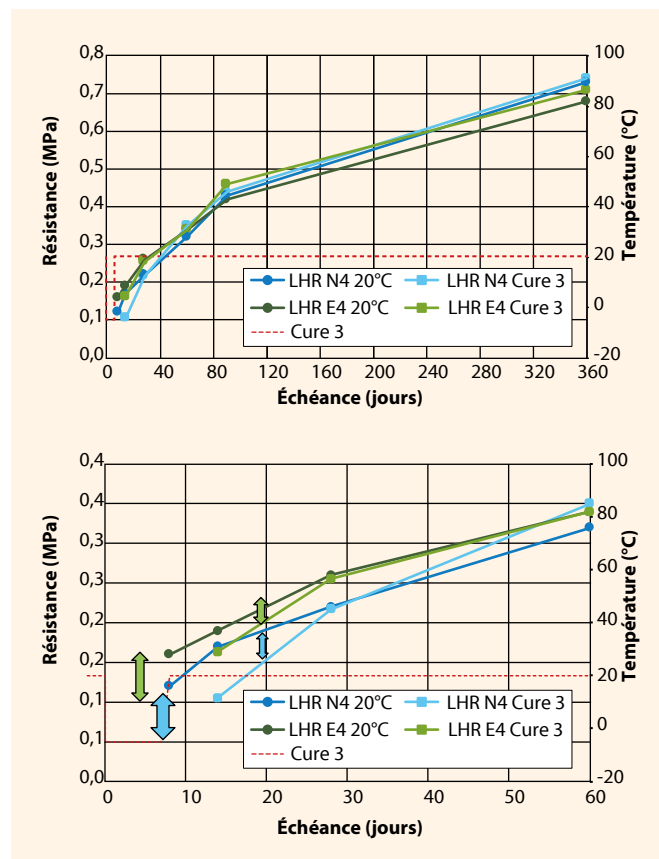
—Figures 5—

Évolution des résistances pour la cure 2.



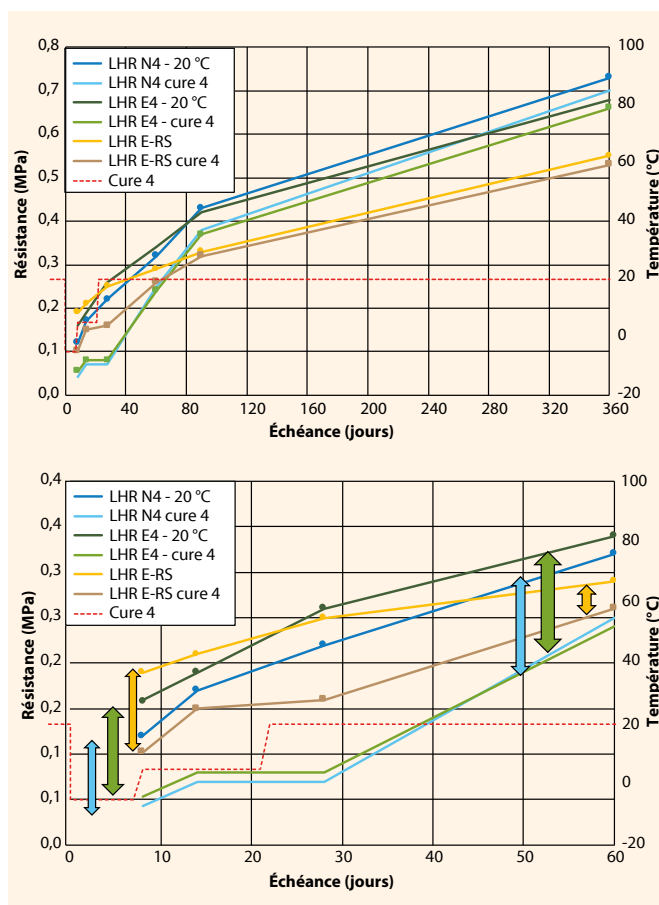
—Figures 6—

Évolution des résistances pour la cure 3.



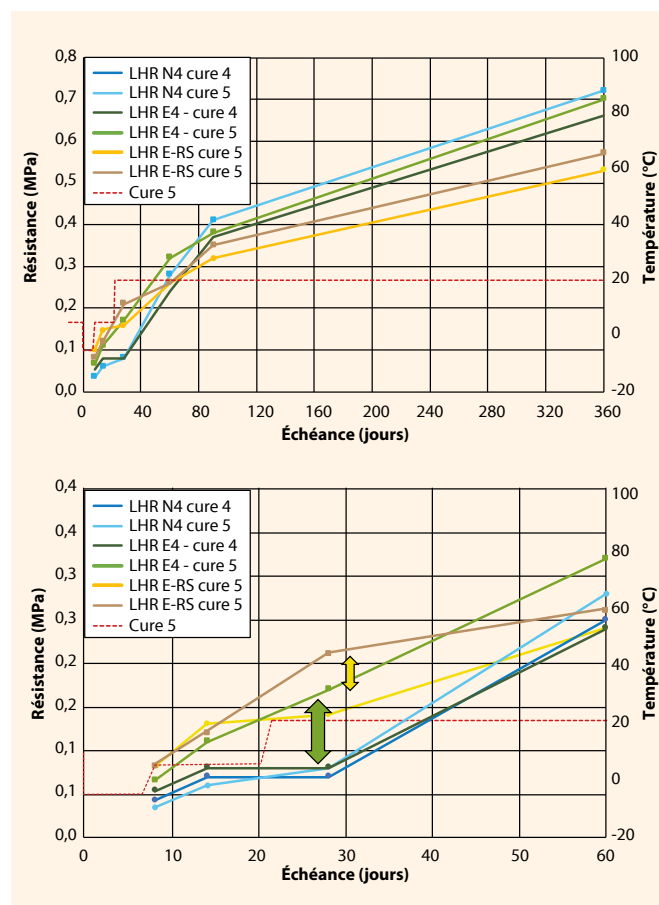
—Figures 7—

Évolution des résistances pour la cure 4.



—Figures 8—

Évolution des résistances entre la cure 4 et la cure 5.



Dans les conditions de laboratoire, l'impact du gel stoppe la prise et cela d'autant plus longtemps que la quantité de gel est importante. Cette prise reprend dans le temps et, globalement, à partir de 90j, quelle que soit la quantité de gel appliquée, les résultats rejoignent les études à 20 °C. L'arrêt de la prise n'est donc pas définitif.

Les liants contenant le moins de clinker subissent plus fortement l'impact du gel : l'arrêt de la prise et la reprise des performances sont plus lents, notamment avec le LHR N4, qui contient peu de clinker (> 30 %). Avec un gel modéré (cures 2 et 3), les liants E4 et N4 présentent un ralentissement de la prise faisant perdre entre 30 et 50 % de performances mécaniques : jusqu'à 14j pour la cure 2 (**figures 5**) et jusqu'à 21j pour la cure 3 (**figures 6**). Ensuite, les performances se rejoignent à 60j pour les deux cures. Avec un gel modéré prolongé (cures 4 et 5), les liants E4 et N4 sont très fortement affectés (-60 % de performances à 7j) et il faudrait attendre au-delà de 28j pour espérer avoir la traçabilité de la reprise de la prise. Le liant E-RS est assez fortement affecté (-40 à -50 %). Cependant, la traficabilité est quasiment atteinte à 7j au vu du niveau de Rc au départ (**figures 7**).

La différence entre les cures 4 et 5 est le conditionnement avant moulages à 20 °C ou à 5 °C : il semble avoir un impact sur les LHR contenant du clinker (E4 et E-RS) avec de meilleurs résultats avec 5 °C dès le départ. Il est possible que le conditionnement des matériaux à une température basse (5 °C) puis la mise en enceinte à une température négative (-5 °C) diminue le choc thermique par rapport à un passage de 20 °C à 5 °C en quelques minutes (**figures 8**). En quelque sorte, le liant et le matériau ont été « préparés », ce qui est aussi plus proche de la réalité.

CONCLUSION

Les études présentées dans cet article ont nécessité une multitude de manipulations (624 éprouvettes moulées, 15 études étalées sur 5 ans) et, à chaque étape, une remise en question des approches classiques de traitement des sols.

Lorsque les dosages visent à une stabilisation du sol, les résultats mettent en avant que quel que soit le type de LHR, le gel ralentit la prise sans la stopper et les performances mécaniques remontent avec un délai (7j à plus de 28j). Les LHR contenant du clinker réagissent mieux que des LHR contenant 50 % ou plus de laitier de haut-fourneau. Cependant, l'évolution de ces LHR majoritairement constitués de clinker est plus faible dans le temps, ce qui doit être pris en compte pour le dimensionnement des épaisseurs.

Grâce à ces études, un nouvel éclairage sur le comportement des sols traités à des températures allant jusqu'à -5 °C est proposé. Cette approche est considérée comme fiable pour démontrer l'insensibilité au gel d'une couche de forme intégrée dans une structure routière et donc recouverte. Ce positionnement dans la structure est fondamental pour la compréhension de la caractérisation de l'insensibilité au gel, car de nombreux retours d'expérience mettent en avant une attaque du gel à la surface des couches de forme traitées non recouvertes. À ce jour, il n'existe pas d'essai pour caractériser ces attaques de gel/dégel en surface. Il serait donc intéressant de pouvoir les qualifier au travers d'un essai qui reste à déterminer. ■

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Jérôme Pincemail (Eqiom), Christophe Priez (Colas) et Jamy Jupin (Eqiom) pour leur participation au projet, ainsi que Thierry Delcroix et Benoît Bolot (Colas) pour leur contribution à la rédaction de l'article.

À retenir

- Bien que les règles recommandent une température minimale de 5 °C pour les chantiers de traitement de sol, des études montrent que des températures allant jusqu'à -5 °C n'arrêtent pas définitivement la prise hydraulique, mais la ralentissent. Les performances mécaniques se rétablissent après un délai de 7 à 28 jours, selon l'intensité et la durée du gel.
- Les liants hydrauliques routiers (LHR) riches en clinker résistent mieux au gel que ceux contenant plus de laitier, mais leur progression dans le temps est moins marquée. Les LHR à prise lente subissent un ralentissement plus important, mais rattrapent leurs performances après 90 jours.
- Les essais sur 15 études et 600 éprouvettes ont révélé que, malgré un gel modéré ou prolongé, les performances mécaniques des sols traités finissent par rejoindre celles des sols traités à 20 °C après 90 jours. Un conditionnement des matériaux à basse température avant le moulage améliore la résistance au gel.
- Ces résultats permettent de mieux comprendre le comportement des sols traités en conditions hivernales, notamment pour les couches de forme intégrées dans une structure routière. Cependant, il reste à développer des essais pour caractériser les attaques de gel/dégel en surface sur les couches non recouvertes.

RÉFÉRENCES

1. NF EN 13282-1 : « Liants hydrauliques routiers - Partie 1 : liants hydrauliques routiers à durcissement rapide - Composition, spécifications et critères de conformité », mai 2014.
2. NF EN 13282-2 : « Liants hydrauliques routiers - Partie 2 : liants hydrauliques routiers à durcissement normal - Composition, spécifications et critères de conformité », septembre 2015.
3. L. Saussaye, « Traitement des sols aux liants hydrauliques : aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification », 14 mars 2013.
4. LCPC-Sétra, *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS). Application à la réalisation des remblais et des couches de forme*, « Guide technique », LCPC, 2000.
5. Collection technique Cimbéton T70, « Terrassements et assises de chaussées - Traitement des sols aux liants hydrauliques », novembre 2009.
6. NF EN 16907-4 : « Terrassement - Partie 4 : Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques », décembre 2018.
7. LCPC-Sétra, *Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR)*, « Guide technique », Fascicule 1 : principes généraux, Fascicule 2 : annexes techniques, LCPC, 2000.
8. Cerema-Ildrim, *Guide des terrassements des remblais et des couches de forme*, 2024.
9. NF EN 459-1 : « Chaux de construction - Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité », août 2015.
10. NF EN 13286-53 : « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 53 : méthode de confection par compression axiale des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques », mai 2005.
11. NF EN 13286-41 : « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des graves traitées aux liants hydrauliques », novembre 2021.
12. NF EN 13286-42 : « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 42 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à traction indirecte des mélanges traités aux liants hydrauliques », septembre 2021.
13. NF EN 13286-43 : « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 43 : méthode d'essai pour la détermination du module d'élasticité des mélanges traités aux liants hydrauliques », septembre 2003.
14. C. Priez, B. Bolot, D. Colin, C. Raynaud, « Sols traités aux liants hydrauliques - Nouvelle approche des résistances mécaniques à 360 jours », RGRA n° 1005, août-octobre 2024.

EMPLOI DE LA COHÉSION EFFECTIVE DANS LES OUVRAGES EN TERRE TRAITÉS À LA CHAUX

UTILISATION, FIABILITÉ ET CONSIDÉRATIONS

Le rôle de la cohésion effective (c') dans les terrassements est essentiel. En pratique, les valeurs retenues pour le calcul en conception sont généralement très faibles par rapport aux résultats obtenus en laboratoire, ce qui reflète le risque que la valeur de c' ne soit pas atteinte en conditions réelles. Cet article examine cette problématique et propose une méthode d'estimation de c' plus précise permettant une réduction des coûts et de l'impact carbone.



Échelon de traitement pour la construction d'un remblai de la trace du projet High Speed Two (Royaume-Uni).

La cohésion effective est un paramètre qui caractérise la capacité des grains solides d'un matériau à coller les uns aux autres en condition drainée. Particulièrement importante pour la stabilité des terrains et des ouvrages géotechniques, elle peut être améliorée par les techniques de renforcement de sol.

RECOMMANDATIONS ET MESURE DE LA COHÉSION EFFECTIVE

RECOMMANDATIONS EN CONCEPTION

Pour les sols naturels, Nowak et Gilbert¹ recommandent d'adopter :

- une cohésion effective nulle pour les sols normalement consolidés ou légèrement surconsolidés ;
- une valeur maximale de 2 kPa pour les argiles surconsolidées fissurées ;
- un maximum de 5 kPa pour les argiles surconsolidées intactes.

Dans l'annexe nationale française de l'Eurocode 7², une valeur de c' comprise entre 5 et 10 kPa est admise. En France, les recommandations du CETMEF³ envisagent des valeurs plus élevées, pouvant atteindre 25 kPa pour les argiles raides.

Pour les matériaux traités à la chaux, Nowak et Gilbert résument les valeurs typiques de c' , de l'angle de frottement interne effectif (ϕ'), de la cohésion non drainée (c_u) et du California Bearing Ratio (CBR) comme suit : $c' > 10$ kPa, $\phi' > 25^\circ$, $c_u > 150$ kPa et CBR $> 15\%$, pour les cas où les sols sont traités avec plus de 2,5 % de chaux. Il est toutefois usuel d'utiliser un pourcentage inférieur après avoir effectué des essais en laboratoire. Pour une résistance accrue et une durabilité à long terme, Nowak et Gilbert préconisent l'emploi d'un second liant.

Dietrich et Hotz⁴ montrent que, dans le cas où plusieurs liants sont utilisés sur des échantillons traités jusqu'à 7 %, des valeurs de c' allant jusqu'à 500 kPa sont observées.

AUTEURS

Délia Labat
Chargée de missions
géotechniques
Vinci Construction
Geoinfrastructure

Peter Coombes
Ingénieur matériaux
Balfour Beatty Ltd

Alastair Dewar
Directeur géotechnique
Vinci Construction
Grands Projets

En France, les paramètres couramment retenus pour les matériaux traités à la chaux sont $c' = 10$ kPa et $\phi' = 28^\circ$. Pour les remblais contigus aux ouvrages d'art, le Sétra⁵ recommande d'utiliser des paramètres qui auraient les caractéristiques mécaniques équivalentes à celles d'un remblai granulaire avec $c' = 0$ kPa et $\phi' = 35^\circ$.

Les guides britanniques et français préconisent la prudence dans le choix de c' pour les sols naturels et traités à la chaux, bien que les résultats en laboratoire indiquent des valeurs bien supérieures à celles retenues par ces recommandations conservatrices. La démonstration de la durabilité du traitement à la chaux demeure un défi, car la quantité de données disponibles dépend fortement des essais réalisés, du budget et des contraintes de calendrier avant les travaux. Le choix du paramètre approprié repose donc souvent sur le jugement de l'ingénieur géotechnicien à partir d'une quantité limitée d'informations.

MESURE DE LA COHÉSION EFFECTIVE EN LABORATOIRE ET SUR SITE

Dans le *Design Manual for Roads and Bridges* du Royaume-Uni⁶, deux méthodes sont proposées pour déterminer la cohésion effective c' :

- par essai à la boîte de cisaillement pour les sols granulaires ;
- par essais triaxiaux pour les sols cohérents.

Saint Eve et al.⁷ considèrent que, pour les sols purement cohérents traités avec un liant hydraulique en condition saturée non drainée ($\phi' = 0^\circ$), la résistance à la compression simple (R_c) peut être utilisée pour estimer c' , selon la relation $R_c = 2C_u = 2c'$. Cette approche simplifie la prise en compte des conditions non confinées, des pressions interstitielles et des contraintes effectives.

Pour les essais in situ, la norme Highways Agency 74/07⁸ recommande de prélever des échantillons du matériau traité afin de mesurer la résistance au cisaillement post-construction. Une alternative consiste à utiliser un pressiomètre, comme l'ont discuté Nicaise et al.⁹, qui ont employé cette méthode pour évaluer l'efficacité du traitement à la chaux jusqu'à 6 mois après la construction, justifiant ainsi des valeurs de $c' = 26$ kPa et $\phi' = 40^\circ$ par corrélations. Pour la justification de la tenue de c' dans le temps, il est possible de simuler les conditions extérieures en laboratoire, par exemple en soumettant des échantillons à des cycles gel-dégel, comme l'ont étudié Aldaoud et Bouasker¹⁰ pour des sols gypseux, dont les travaux apportent un éclairage sur les risques de fissuration évoluant avec le temps.

HIGH SPEED 2 (HS2), ANGLETERRE

Des essais et expérimentations approfondis ont été réalisés en vue d'améliorer et de réutiliser les maté-

riaux destinés à la construction de 22,3 Mm³ de remblai dans le cadre du projet de la ligne à grande vitesse HS2 traversant les West Midlands en Angleterre. HS2 constitue la nouvelle liaison ferroviaire britannique entre Londres et Birmingham, avec un raccordement à la West Coast Main Line à Handsacre, dans le Staffordshire.

Afin d'optimiser le réemploi des matériaux disponibles et de garantir la conformité aux spécifications, des études et des essais sur site ont établi qu'un traitement à 1,5 % de chaux était efficace. Cette section étudie la variabilité des matériaux le long du tracé, l'efficacité du traitement à la chaux dans le temps et l'impact des conditions de chantier sur les paramètres mécaniques des matériaux traités. L'ensemble des résultats présentés dans cette section sont régis par les normes du British Standard.

VARIABILITÉ DU MERCIA MUDSTONE GROUP LE LONG DU TRACÉ DE HS2

Environ 40 % du tracé de HS2 à travers les West Midlands concerne la formation dite « Mercia Mudstone Group » (MMG). Ce matériau est largement excavé et réutilisé dans le cadre du projet, notamment en le traitant à la chaux pour améliorer ses propriétés mécaniques. Une comparaison des caractéristiques des matériaux a été réalisée là où le MMG a été rencontré le long des 90 km de la ligne HS2, afin de comprendre comment la variabilité géologique influence la réaction de la chaux avec le matériau.

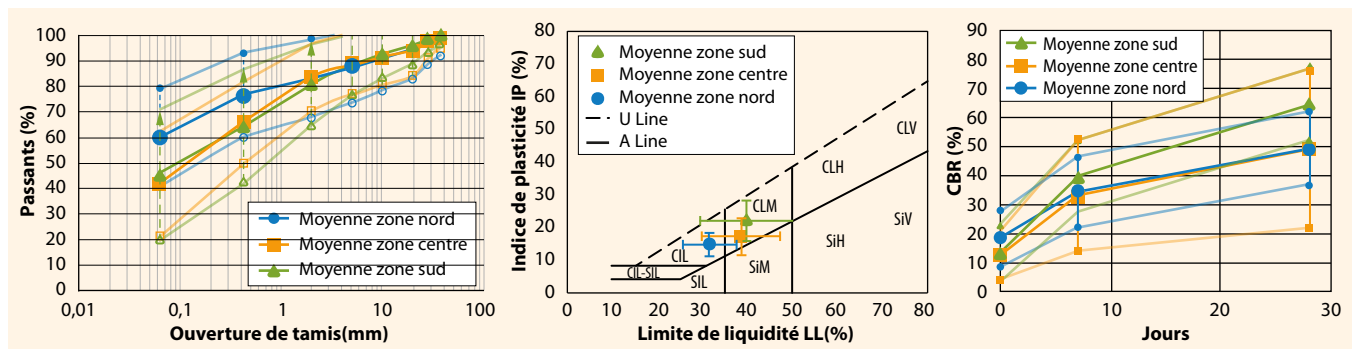
Le tracé de HS2 dans les West Midlands a été divisé en trois zones géographiques : Nord, Centre et Sud (figure 1).



—Figure 1—
Tracé du projet HS2 dans les West Midlands.

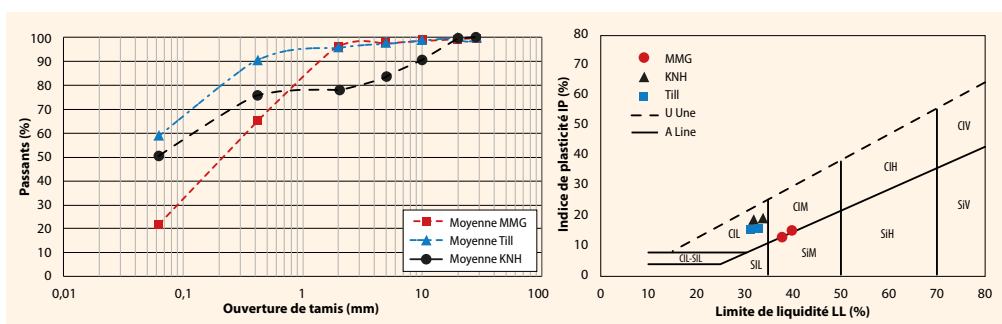
-Figures 2-

Propriétés du Mercia Mudstone Group le long des 90 km du tracé du projet HS2.



-Figures 3-

Granulométries et plasticités caractéristiques des formations étudiées.



Sur la base de 1953 granulométries et de 1 225 essais de plasticité réalisés sur cette formation, les résultats ont montré une variabilité limitée entre les zones (figures 2). En effet, les matériaux de la zone Nord sont légèrement plus fins et moins plastiques, même si les trois régions du projet présentent des caractéristiques comparables.

Les figures 2 illustrent également les valeurs de CBR après immersion issues de 1 495 essais réalisés sur des matériaux traités avec 1,5 % de chaux. Le comportement similaire mis en évidence par les résultats suggère ainsi une réponse homogène à l'ajout de chaux pour les sols du MMG rencontrés jusqu'à présent.

CONTRÔLES DE LA COHÉSION DANS LES SOLS TRAITÉS À LA CHAUX

Une comparaison a été effectuée entre des essais triaxiaux réalisés sur des échantillons ayant été traités sur site à 1,5 % de chaux, puis hydratés et mélangés au pulvimixeur, et des échantillons

soumis au même procédé en laboratoire. L'objectif est d'identifier d'éventuelles différences de résistance du matériau traité entre les conditions du site et les conditions en laboratoire. Trois types de matériaux ont été comparés : le MMG, de plasticité intermédiaire et à faible teneur en fines ; le Glacial Till (Till) et les sols cohérents de la formation Kenilworth Sandstone (KNH), tous deux caractérisés par une faible plasticité et une forte quantité de fines (figures 3).

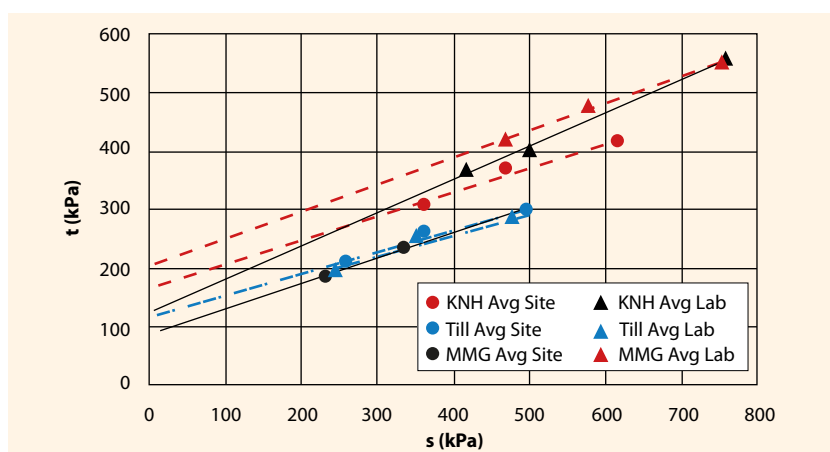
Tous les échantillons ont été compactés en laboratoire à plus de 95 % de la densité sèche maximale à l'aide d'une dame de 2,5 kg. Des essais triaxiaux en conditions non consolidées non drainées (UU) ont ensuite été réalisés sur ces échantillons à des contraintes de 50, 100 et 200 kPa 28 jours après compactage des échantillons.

La figure 4 présente les résultats moyens de trois essais réalisés sur chacun des trois matériaux. Les résultats indiquent que le matériau traité sur site n'a pas systématiquement atteint les mêmes valeurs que les échantillons traités en laboratoire. Les écarts les plus faibles ont été observés pour le Glacial Till (variance de 1 %), tandis que la plus grande divergence concerne les échantillons issus de la formation Kenilworth Sandstone (variance de 36 %).

Une comparaison des résultats des essais UU et des essais consolidés drainés (CD) réalisés pour le projet lors des investigations initiales est présentée dans la figure 5. Les essais UU ont ensuite été utilisés en remplacement des essais CD dans le cadre de cette étude en raison de contraintes de temps. Les essais UU ne permettant pas de déterminer les paramètres de contraintes effectives, la figure 5 sert uniquement à comparer les régimes de contrainte.

-Figure 4-

Diagramme de Lambe des résultats triaxiaux UU – comparaison entre traitement sur site et en laboratoire.



ÉTUDE DE LA COHÉSION EFFECTIVE DANS LE TEMPS

Afin d'observer le comportement dans le temps du MMG traité à la chaux, des échantillons ont été préparés dans la plage de l'optimum de compactage (OPN) +1 %, soit entre 10 et 12 % de teneur en eau pour des dosages à 0, 0,75, 1,5 et 3,0 %. Ils ont ensuite été conservés jusqu'à 180 jours avant d'être soumis à des essais triaxiaux consolidés non drainés (CU) sous des contraintes de 50, 250 et 500 kPa. Les résultats montrent que, lorsque les échantillons ne sont pas traités, le temps n'a aucun effet sur la cohésion effective c' (figures 6). En revanche, pour tous les échantillons traités, les essais ont mis en évidence une augmentation continue de c' au fil du temps. L'accroissement le plus marqué de c' a été observé sur les échantillons traités avec 3 % de chaux, le dosage le plus élevé testé, augmentant de 75 kPa à 28 jours à 165 kPa après 180 jours.

Aucun changement notable de l'angle de frottement au cours du temps n'a été constaté sur les échantillons. Il était envisagé de démontrer une augmentation de la cohésion sur des échantillons prélevés sur site, mais il n'a pas été possible de les échantillonner et de les tester à temps pour les besoins de cette étude. Ce sujet constituera indéniablement une piste pour des recherches futures.

ÉTUDE DE LA COHÉSION NON DRAINÉE POUR LES SOLS TRAITÉS À LA CHAUX

Dans le cadre du projet HS2, une valeur de résistance au cisaillement non drainée (C_u) de 75 kPa est requise. Des essais triaxiaux UU ont donc été réalisés pour contrôler ce paramètre.

L'ensemble des données recueillies ont été compilées dans la figure 7, qui présente la variabilité des résultats pour les trois formations principales : MMG, Till et KNH. La valeur moyenne mesurée de C_u est de 331 kPa, la plupart des résultats se situant entre 300 kPa et 450 kPa. Une hypothèse plus élevée de C_u pourrait s'avérer utile pour optimiser les calculs de stabilité à court terme. Étant donné qu'après 180 jours, la cohésion effective d'un matériau traité avec 1,5 % de chaux est de 100 kPa et que la valeur moyenne de C_u associée mesurée est de 331 kPa, il apparaît que $C_u \neq c'$, contrairement à l'hypothèse effectuée par Saint Eve et al.⁷

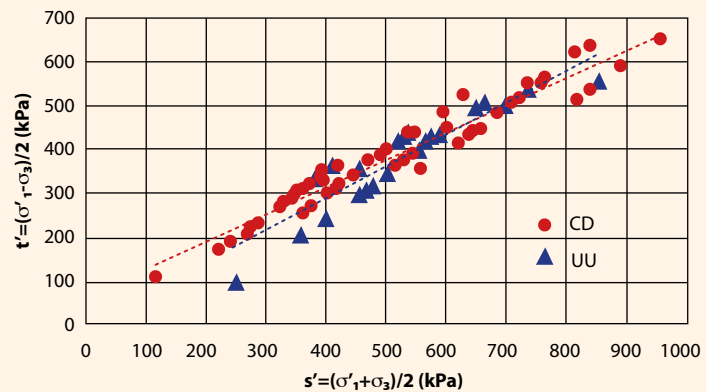
DISCUSSION

Cette étude démontre que les valeurs de c' , ϕ , C_u et CBR obtenues sur HS2 sont systématiquement et significativement supérieures à celles préconisées par Nowak et Gilbert¹, sans qu'il soit nécessaire d'ajouter un second liant.

La cohésion effective des sols traités à la chaux utilisés pour le projet HS2 et obtenue à partir des données sur site est comparable, voire sensiblement inférieure, à celle des échantillons confectionnés en laboratoire. Il serait opportun de réaliser des essais complémentaires sur des

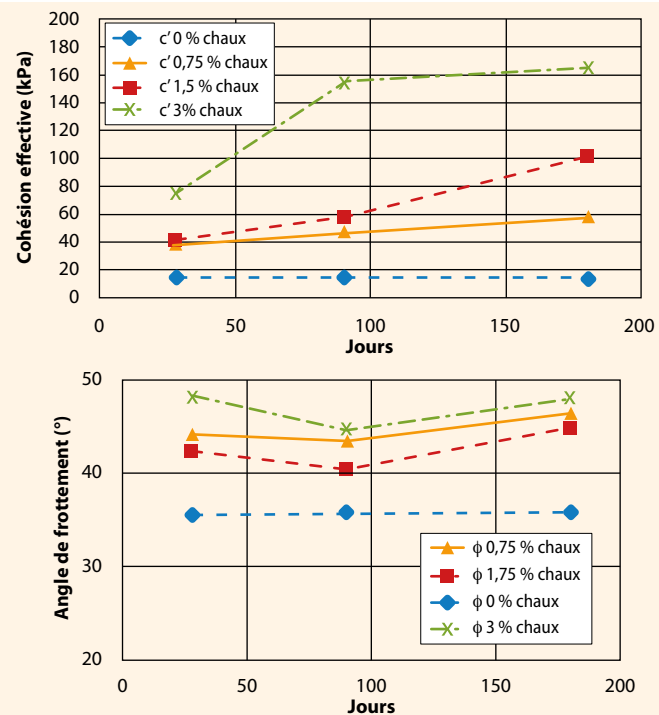
—Figure 5—

Diagramme de Lambe des résultats des essais triaxiaux CD et UU pour 1,5 % de traitement à la chaux.



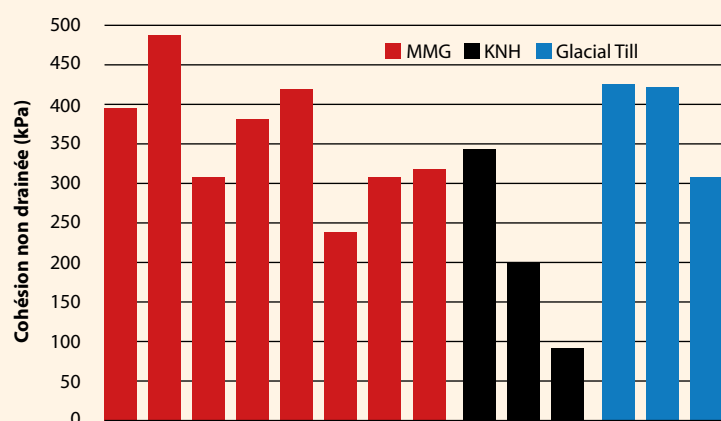
—Figures 6—

Cohésion effective et angle de frottement en fonction du temps pour différents dosages.



—Figure 7—

Variabilité des résultats de cohésion non drainée.



remblais traités à la chaux après leur construction, afin de mieux appréhender l'influence des conditions in situ sur l'évolution du c' .

Outre un contrôle potentiellement plus rigoureux, les échantillons préparés en laboratoire bénéficient vraisemblablement de conditions de cure plus favorables et de variations diurnes de température moindres, voire inexistantes. En résumé, un écart considérable subsiste entre les valeurs utilisées pour la phase de conception et celles obtenues en laboratoire comme sur le terrain.

Rehausser la valeur minimale de c' contribuerait à optimiser la conception des ouvrages en terre, qu'ils soient permanents ou provisoires, l'augmentation de la valeur de ce paramètre passant par un contrôle qualité plus strict et un dosage minimal en chaux. Une approche statistique est abordée ci-après afin de valider l'augmentation de c' .

APPLICABILITÉ DES STATISTIQUES

Bien que systématiquement supérieurs aux valeurs retenues pour la conception, les résultats des essais visant à déterminer c' présentent une large dispersion, obligeant le concepteur géotechnique à choisir une valeur caractéristique en s'appuyant sur son jugement et son expérience. Baguelin et Kovarik¹¹ proposent des méthodes pour définir une valeur caractéristique, c'est-à-dire une valeur associée à un niveau de confiance de 95 %, conformément aux recommandations du CETMEF, à partir d'une ou deux variables. Cette méthode a été appliquée aux résultats d'essais disponibles pour HS2 afin de déterminer a posteriori une valeur caractéristique de c' .

MÉTHODE À DEUX VARIABLES

Plutôt que de se concentrer uniquement sur c' , Baguelin et Kovarik proposent de définir trois courbes de régression à partir des contraintes normales et des contraintes de cisaillement (σ_i ; τ_i) où i représente le i^e couple de valeurs mesurées en laboratoire. Ces paramètres sont définis selon une loi conditionnelle de τ sachant σ' où $\tau = c' + \tau_g \varphi \cdot \sigma'$. Il est recommandé dans un premier temps de vérifier la valeur du coefficient de corrélation r entre les deux paramètres, ici τ et σ' . Avec N le nombre de données et m la moyenne d'un paramètre, r est défini comme suit :

$$r = \frac{1}{N-1} \cdot (\sum (\tau_i - m_\tau) \cdot (\sigma_i - m_\sigma)) / (\sqrt{\sum (\tau_i - m_\tau)^2} \cdot \sqrt{\sum (\sigma_i - m_\sigma)^2})$$

Équation 1

En pratique, si $r = 1$, alors les paramètres sont parfaitement corrélés. Toutefois, dans l'Équation 1, la division par $(N - 1)$ tend à faire décroître r lorsque N augmente. Ce terme sera donc négligé dans le cadre de cette étude. Après avoir regroupé tous les points maximaux des cercles de Mohr issus des essais triaxiaux CD, les coefficients de corrélation obtenus sont de 0,82 pour l'ensemble des valeurs, 0,76 pour les Till, 0,82 pour la formation Glacio-Fluvial Deposit (GFD) et 0,83 pour les MMG. Ainsi, bien que la corrélation ne soit pas parfaite, l'enveloppe de Mohr-Coulomb n'étant pas une droite linéaire, la relation entre τ et σ' est établie.

Les résultats correspondant au cas 1, conformément à Baguelin et Kovarik et aux recommandations du CETMEF, sont présentés dans le **tableau 1**. Dans ce tableau, c'_{mi} est la valeur moyenne inférieure, c'_b est la valeur basse, c'_k est la valeur caractéristique et n_{loc} est le nombre supposé de valeurs indépendantes de c' dans le volume de sol considéré. Ce dernier diffère du nombre de points de données disponibles et doit être supérieur ou égal à un.

Les résultats montrent que plus le nombre de données disponibles est élevé, plus la plage de cohésion effective est large, et donc plus il est crucial de déterminer correctement. Pour cette étude, il a été considéré la valeur $n_{loc} = N/3$. Les valeurs caractéristiques semblent surestimées lorsque $N \leq 15$. Une marge a été calculée entre la moyenne de c' (104 kPa) obtenue à partir des essais CD et la valeur c'_k . Ces résultats indiquent qu'il paraît raisonnable de retenir une marge de sécurité comprise entre 2,0 et 3,5.

Par ailleurs, les valeurs obtenues négligent la notion de cercles de Mohr, puisque τ et σ' ont été extraits des maxima des trois cercles de Mohr issus de chaque essai triaxial nécessaire à la définition des paramètres de contraintes effectives et ne correspondent donc pas au point tangent à la rupture. Par conséquent, les valeurs de c' pourraient encore être améliorées.

Méthode à une variable

Bien que Baguelin et Kovarik recommandent l'utilisation de l'approche à deux variables, l'approche à une variable a été étudiée en regroupant l'ensemble des données de c' issues des essais triaxiaux consolidés drainés. La valeur de c'_{mi} s'élève alors à 101 kPa et celle de c'_b à 26 kPa. c'_k est alors déterminée comme suit :

$$c'_k = c'_{mi} - (c'_{mi} - c'_b) / (n_{loc})^{0.5}$$

Équation 2

La **figure 8** illustre la variation de la valeur caractéristique en fonction de n_{loc} .

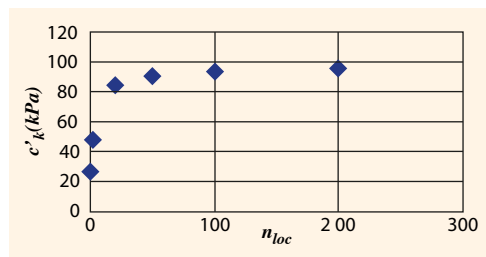
Le nombre de valeurs disponibles étant de 20, la valeur caractéristique doit se situer dans la plage comprise entre 26 kPa et 85 kPa. Le CETMEF souligne que le paramètre n_{loc} est complexe et que des recherches étaient en cours pour en préciser

—Tableau 1—
Résultats de la méthode à deux variables.

Matériau	N	n_{loc}	c'_{mi}	c'_b	c'_k	Marge de sécurité
ALL	57	19	-8	61	51	2,0
MMG	33	11	-8	47	30	3,5
Till	9	3	49	79	61	1,7

—Figure 8—

Valeur caractéristique c'_k en fonction de n_{loc} d'après les essais triaxiaux CD sur le MMG.



la détermination correcte. De plus, dans la mesure où l'objectif est de définir une valeur applicable à l'ensemble des terrassements, le choix prudent de la valeur caractéristique serait 26 kPa, conformément à la valeur la plus basse de la plage des valeurs possibles.

Cette valeur est supérieure aux 10 kPa utilisés lors de la conception et semble cohérente avec la valeur de 20 kPa retenue pour un remblai spécifique sur inclusions rigides destiné au lancement d'un viaduc dans le cadre du projet HS2. En effet, des séries de calculs supplémentaires ont été réalisées avec $c' = 20$ kPa, ce qui a permis, in fine, de supprimer les géogrilles de renforcement du matelas de répartition des inclusions rigides.

En comparant la valeur moyenne de c' issue des essais triaxiaux CD (104 kPa) à la valeur caractéristique de 26 kPa déterminée selon l'approche à une variable de Baguelin et Kovarik, il vient une marge de sécurité de 4,0. Celle-ci semble suffisante pour tenir compte des écarts observés entre les essais de terrain et de laboratoire ainsi que de la variabilité des matériaux.

Les auteurs de cet article estiment que cette approche est valide à condition qu'au moins 15 essais de ce type soient disponibles. Par ailleurs, des recommandations claires dans la détermination de n_{loc} pourraient mener à une réduction raisonnée de la marge de sécurité.

CONCLUSION

Cette étude suggère que c' , c_u et le CBR attribués aux matériaux traités à la chaux sont sous-estimés par les recommandations des normes en vigueur au Royaume-Uni et en France. L'analyse des résultats du projet HS2 démontre la possibilité de retenir une valeur caractéristique de c' , c'_k associée à une marge de sécurité comprise entre 2,0 et 4,0.

Il existerait donc un potentiel d'optimisation de la conception des terrassements. Toutefois, l'appré-

ciation du nombre d'essais disponibles doit être examinée avec soin afin de confirmer la robustesse de cette méthode pour tout projet futur.

Lorsque des dosages de chaux différents de ceux étudiés sont utilisés, ou en cas de variabilité significative des matériaux, une approche alternative pour déterminer c'_k doit être définie.

Il demeure nécessaire de poursuivre les recherches afin de mieux comprendre l'influence des conditions de chantier comparativement à celles de laboratoire. ■

À retenir

- En pratique, la valeur de la cohésion effective définie lors de la conception est inférieure ou égale à celle déterminée par les résultats de laboratoire ($c'_{conception} \leq c'_{résultats\ laboratoire}$).
- L'étude réalisée avec les données du projet HS2 démontre en effet des valeurs de c' plus élevées.
- Une approche statistique démontre qu'il est possible d'appliquer une marge de sécurité entre 2,0 et 4,0 à partir des résultats des essais triaxiaux pour un matériau traité à 1,5 % de chaux.
- Des études supplémentaires sont nécessaires afin de mieux comprendre l'influence des conditions de chantier sur les paramètres mécaniques.

RÉFÉRENCES

1. P. Nowak, P. Gilbert, *Earthworks Guide* (second edition), ICE Publishing, 2015.
2. NF P94-261 : « Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles », juin 2013.
3. CETMEF, « Recommandations pour le calcul aux états-limites des ouvrages en site aquatique », 2000.
4. J. Dietrich, C. Hotz, « Bindemittelbasierte Bodenstabilisierung in der Geotechnik: Laboruntersuchungen sowie Ableitung von Bemessungskennwerten », *Geotechnik* 40(4), 2017.
5. Sétra, *Construire des remblais contigus aux ouvrages d'art, murs de soutènement et culées de pont*, 2012.
6. Highways England, *Manual of Contract Documents for Highway Works*, Volume 1: *Specification for Highway Works*, Series 0600 – Earthworks, The Stationery Office, 2017.
7. D. Saint Eve D, S. El Bedoui, L. Duflot, « Les remplois en terrassement de marnes sèches traitées au liant hydraulique - Étude de cas (déviations de Stuckange, 57) », *Seminar Treated Soil for Sustainable Earthwork*, TerDOUEST, Marne-La-Vallée, juin 2013.
8. Highway Agency, HA 74/07: "Treatment of fill and capping materials using either lime or cement or both", in *Design Manual for Roads and Bridges*, The Stationery Office, 2007.
9. S.-Nicaise, S. Lemaire, J. Varillon, F. Byron, Y. Gremeaux, « Résistance au cisaillement de graves argileuses traitées à la chaux », *Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur*, Lyon, novembre 2020.
10. A. Aldaoud, M. Bouasker, « Les effets de cycles gel-dégel sur les propriétés géotechniques des sols gypseux traités à la chaux », *Seminar Treated Soil for Sustainable Earthwork*, TerDOUEST, Marne-La-Vallée, juin 2013.
11. F. Baguelin, J.-B. Kovarik, « Une méthode de détermination des valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques », *Revue française de géotechnique*, n° 93, 2000.

TRAITEMENT DES SOLS QUAND LES TECHNIQUES ROUTIÈRES INSPIRENT LES BARRAGES ET LES DIGUES

Longtemps cantonné aux infrastructures routières, le traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques séduit désormais le secteur des ouvrages hydrauliques. Grâce à des recherches menées depuis les années 2000 et aux retours d'expérience de différents démonstrateurs, des avancées majeures ont été réalisées. Trois documents de référence, fruit d'une collaboration internationale, synthétisent aujourd'hui ces connaissances et ouvrent la voie à une adoption plus large de cette technique prometteuse.

Traitement à la chaux, sur une plate-forme dédiée, de matériaux pour la construction d'un démonstrateur de digue à Salin-de-Giraud.



© MICHEL FROUVENTIN

Bien que le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques soit une technique largement utilisée depuis plusieurs décennies dans le domaine des infrastructures de transport, son adoption dans le secteur des ouvrages hydrauliques reste encore limitée. Cette situation s'explique par de multiples facteurs, notamment les enjeux spécifiques à ce domaine et le manque de données relatives aux performances hydrauliques des sols traités.

Les recherches sur ce sujet ont commencé à se développer en France à partir du milieu des années 2000. La communauté des ouvrages hydrauliques s'est rapidement engagée dans cette voie afin de mener ses propres expérimentations et de tirer des enseignements utiles à l'élaboration de documents d'aide à la conception et à la réalisation d'ouvrages hydrauliques en sols traités.

Cet article rend compte de la démarche adoptée, des résultats obtenus et présente les documents qui en ont découlé. En l'état actuel des connaissances,

ces documents ne couvrent pas les applications dans les ouvrages maritimes.

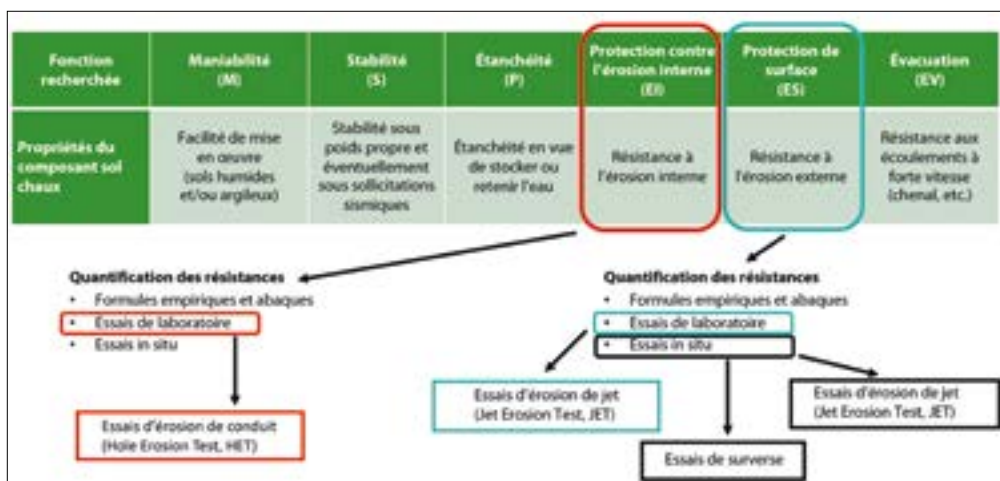
LA DÉMARCHÉ ET LES AVANCÉES

La démarche a été structurée selon une analyse fonctionnelle fondamentale :

- analyse fonctionnelle du rôle d'un ouvrage hydraulique ;
- évaluation de la capacité du composant sol-chaux à remplir chacune des fonctions identifiées. Une série de six fonctions principales a été identifiée (**figure 1**). Dans le cas de la chaux, les fonctions Maniabilité et Stabilité étant considérées comme satisfaites et codifiées (normes, guides techniques, Eurocodes 7), les travaux se sont concentrés sur la caractérisation de la perméabilité et surtout sur l'érosion des matériaux, qui constitue une préoccupation essentielle car cause majeure de la défaillance des ouvrages.

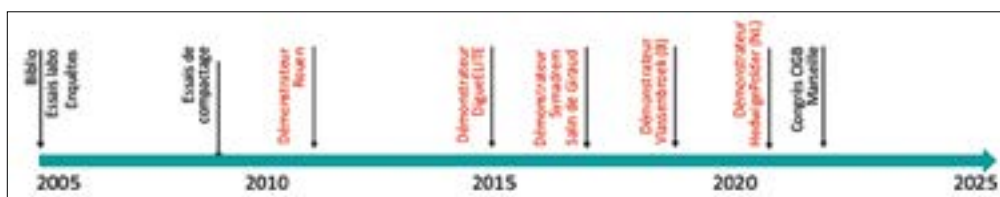
AUTEUR

Daniel Puiatti
Consultant
DPST Consulting



SOURCE : S. BONELLI

–Figure 1–
Représentation des fonctions du composant sol chaux dans un ouvrage hydraulique et des investigations relatives à la résistance à l'érosion.



–Figure 2–
Enchaînement des démonstrateurs en sol traité à la chaux.

Après la phase d'études en laboratoire, plusieurs démonstrateurs ont été construits, avec la participation active du groupe Lhoist, producteur de chaux, pour valider les résultats de laboratoire (propriétés mécaniques et hydrauliques) et observer le comportement des ouvrages dans le temps (figure 2).

Un consortium réunissant l'Inrae, ISL, EDF, Arcor Technologies et Lhoist s'est engagé en 2015 dans le programme de recherche DigueELITE consacré aux sols traités à la chaux. Ce programme a permis de réaliser des avancées significatives dans la compréhension du comportement des sols traités, notamment en ce qui concerne leur résistance à l'érosion de surface. Le tout a été consigné dans un document qui fait un état de l'art et de la pratique sur les sols traités à la chaux (2025).

De son côté, la Commission internationale des grands barrages (CIGB) a créé en 2012 le comité technique P : Barrages en matériau cimenté (matériau cimenté = tout matériau lié par un produit de traitement, que ce soit de la chaux ou un liant hydraulique) avec pour objectif de rédiger des bulletins sur l'usage des matériaux traités. Le Bulletin 195 : Barrages en sol cimenté, validé en 2022 lors du congrès de la CIGB à Marseille, présente une synthèse approfondie des connaissances sur les sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, accompagnée de recommandations tirées des observations réalisées et des pratiques actuelles. Enfin, à la lumière d'applications récentes, il est apparu nécessaire de compléter le Bulletin 195 par un document technique d'aide à destination des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre concernant la définition des études et la rédaction des prescriptions de travaux pour les ouvrages en matériaux traités. Le principe a été accepté par le Comité français des barrages et réservoirs (CFBR), qui a validé la version définitive du document en 2025.

Un webinaire réunissant plus de 120 personnes a été organisé le 7 octobre 2025 par l'association France Dignes pour présenter ces trois documents :

- le document DigueELITE ;
- le Bulletin 195 de la CIGB ;
- le document technique du CFBR.

DOCUMENT DIGUEELITE

L'intitulé du document est : *Le traitement des sols à la chaux pour la construction d'ouvrages hydrauliques de faible hauteur - État de l'art et de la pratique (document DigueELITE)*. Il s'agit d'un ouvrage collectif rédigé par l'ensemble des partenaires du projet DigueELITE (photo 1). Il couvre donc exclusivement le traitement à la chaux.



–Photo 1–
Document DigueELITE.

Il est structuré en 6 parties :

- A. Données générales sur le traitement à la chaux
- B. Propriétés des sols traités à la chaux
- C. Conception et études
- D. Exécution des travaux
- E. Contrôle des travaux
- F. Suivi des ouvrages

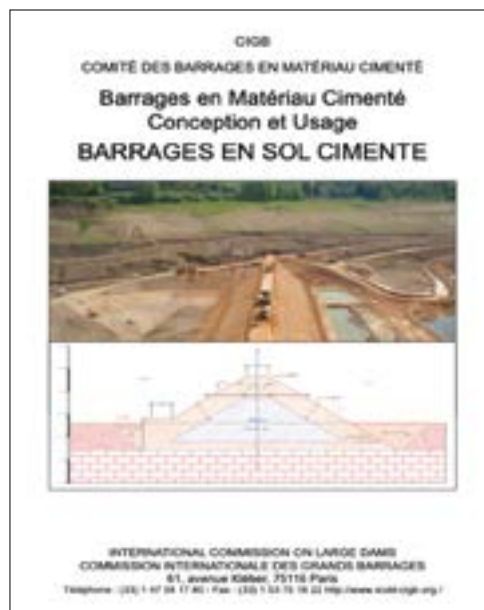
Son objectif principal est de diffuser les connaissances acquises dans le cadre de plusieurs démonstrateurs, et notamment celui de DigueELITE, sur les performances mécaniques et hydrauliques des sols traités à la chaux. Il fournit également des outils d'accompagnement pour la conduite des projets, depuis la conception des ouvrages jusqu'à leur suivi.

Le document est accessible gratuitement, en français, sur le site des partenaires DigueELITE. Une version anglaise est prévue.

BULLETIN 195 DE LA CIGB : BARRAGES EN SOL CIMENTÉ

Contrairement à ce qu'indique le titre, ce bulletin concerne à la fois les barrages et les digues (photo 2). Il couvre le traitement à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.

—Photo 2—
Bulletin 195 de la CIGB.



Ce document a été préparé par un comité d'experts internationaux de la CIGB. Il rassemble les retours d'expérience de différentes régions du globe (Amérique, Afrique, Asie, Europe, Moyen-Orient). Du fait de la grande expérience de la France, le pilotage et la rédaction ont été confiés à un groupe miroir français du CFBR.

Il reprend les apports du Bulletin 54 de la CIGB : « Sols ciment pour barrages en remblai » (1986), mais en élargit la portée en l'ouvrant aux sols fins plastiques grâce à l'introduction de la chaux

comme produit de traitement. La technique du traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques étant plus familière aux spécialistes routiers qu'aux experts barrages, le parti a été pris de consacrer une part importante du document à la description des produits de traitement, à leur action sur les sols et aux propriétés des matériaux traités.

Le document donne des exemples de conception d'ouvrages, à structure homogène ou zonée. Il propose une ébauche d'évaluation comparative de coûts entre solution traitée et solution non traitée prenant en considération l'ensemble de l'ouvrage et de ses aménagements. Il rapporte aussi les enseignements du suivi des démonstrateurs français, par exemple sur le comportement des animaux fouisseurs, source de préoccupations pour les gestionnaires d'ouvrages (photos 3).

—Photos 3—

Comparaison de l'action des animaux fouisseurs en fonction de la nature du matériau.



Enfin, conformément à la pratique de la CIGB de s'appuyer sur des retours détaillés d'expérience, une annexe importante est consacrée à la présentation de réalisations recensées dans le monde. Ce bulletin a déjà inspiré les investisseurs chinois qui l'exploitent pour la réalisation de digues de protection contre les crues en Chine. Il a également été utilisé comme référence sur un chantier récent de construction d'un batardeau en sable traité au ciment au Malawi (voir p. 84).

Le document se décline en 14 chapitres :

1. Introduction
2. Généralités
3. Produits et matériaux

4. Action des liants sur les sols
5. Propriétés des sols cimentés
6. Conception structurelle
7. Études
8. Construction
9. Contrôle qualité
10. Surveillance et suivi
11. Aspects économiques
12. Références
13. Annexes
14. Exemples d'applications

Il est accessible, en français et en anglais, sur le site de la CIGB.

DOCUMENT TECHNIQUE DU CFBR

L'intitulé du document est : *Sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application aux ouvrages hydrauliques - Définition des études et prescription des travaux*. Le statut du document (guide ou recommandation) n'était pas encore défini par le CFBR au moment de la rédaction du présent article (photo 4).

–Photo 4–
Document technique du CFBR.



La nécessité d'un tel document est apparue lors de la réalisation d'ouvrages en sol traité, en France et au Malawi, face au constat suivant :

- Bien que largement répandue en infrastructures de transport, la technique en est encore au stade du développement dans les ouvrages hydrauliques.
- Contrairement aux techniques conventionnelles (bétons, bétons compactés routiers – BCR...), où les matériaux peuvent être élaborés, les études de formulation des mélanges (de type de liant, dosage, teneur en eau) doivent s'adapter aux caractéristiques du sol.

- Contrairement aux techniques conventionnelles également, la méthodologie prédominante est le traitement en place et non le traitement en centrale.
- Le traitement doit être envisagé dès la phase amont des études, notamment en ce qui concerne la reconnaissance et la caractérisation des gisements de matériaux, pour éviter les impasses au moment des travaux.
- La réalisation doit se faire avec des intervenants expérimentés, selon une méthodologie d'exécution rigoureusement contrôlée, avec des matériels adaptés et performants.

L'esprit du document est de répondre de manière détaillée aux interrogations des maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre et bureaux d'ingénierie, et de les aider dans la définition des études et la prescription des travaux afin d'éviter les risques d'erreurs préjudiciables au développement de la technique. Il a été écrit par un groupe de rédacteurs français dont les domaines d'expertise étaient complémentaires (pratiques nationales et internationales, barrages, terrassements, études, travaux, chantiers expérimentaux, matériaux).

Le document constitue un complément au Bulletin 195 de la CIGB, auquel il se réfère.

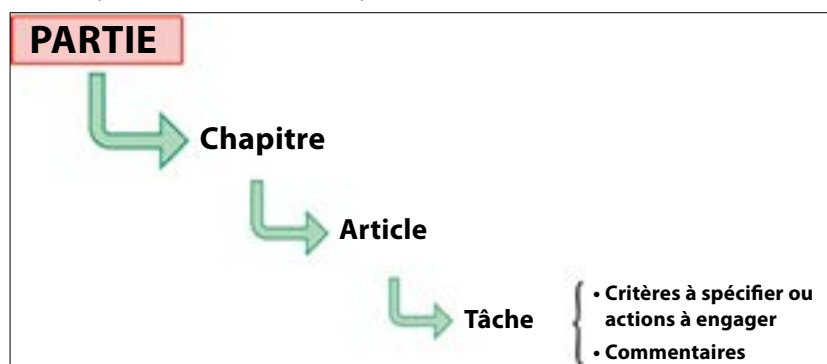
Il est structuré en quatre parties principales (figure 3).

Chaque partie est elle-même structurée comme indiqué sur la figure 4.

–Figure 3–
Structure générale du document technique du CFBR.



–Figure 4–
Structure particulière de chacune des parties du document CFBR.



Les spécifications doivent être rédigées tâche par tâche. Les rédacteurs ont pris le parti de ne pas proposer de spécifications types et d'attirer l'attention du lecteur sur la portée de chacune des tâches, les enjeux associés et les conséquences en termes de risques encourus si la tâche n'est pas spécifiée ou si elle l'est de manière inadéquate sans tenir compte des particularités du projet. Des commentaires sont fournis lorsque cela s'avère nécessaire pour éclairer le prescripteur.

Le document est accessible en français sur le site du CFBR. Une version anglaise est prévue à l'intention de la CIGB pour une transposition de portée internationale.

CONCLUSION

Cet ensemble de trois documents, élaboré par un panel d'experts nationaux et internationaux, constitue une synthèse s'inspirant des connaissances acquises sur le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques dans le domaine des infrastructures routières. Il intègre les dernières avancées relatives aux propriétés hydrauliques des matériaux traités.

Cette démarche illustre ce qu'il est possible — et souhaitable — de réaliser lors d'un transfert de technologie d'un domaine à un autre, dans le cas présent des infrastructures routières vers les ouvrages hydrauliques, en particulier lorsque la technologie est peu familière au destinataire.

Ces documents visent à faciliter la diffusion des connaissances relatives au traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques et à soutenir le développement technologique dans le domaine des barrages et des digues. ■

Remerciements

L'auteur remercie le groupe Lhoist pour son support constant tout au long de la démarche, et notamment Federica Bertola du département Recherche pour la qualité de ses apports et la pertinence de ses interventions. Il salue également les membres du groupe miroir du CFBR et les partenaires de DigueELITE pour leurs contributions aux avancées de la technique. Il remercie enfin Pierre Agresti (Artelia), Pierre Cochet et Michel Froumentin (consultants), ainsi que Maurice Bufalo (Spie batignolles valérien), dont l'implication a rendu possible l'élaboration du document technique du CFBR dans un climat à la fois passionné et chaleureux, en dépit des délais très courts que nous nous étions imposés.

À retenir

- Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques intéresse le monde des barrages et des digues.
- Des progrès dans la connaissance des performances mécaniques et hydrauliques des sols traités ont été réalisés grâce aux études et recherches conduites depuis une vingtaine d'années.
- La résistance à l'érosion de surface des sols traités à la chaux a été testée avec succès sur plusieurs démonstrateurs.
- Récemment, des documents faisant le point des connaissances acquises, accompagnés de recommandations, ont été publiés par les partenaires du programme de recherche DigueELITE, la Commission internationale des grands barrages et le Comité français des barrages et réservoirs.

AVANTAGES DE L'UTILISATION DES SOLS TRAITÉS À LA CHAUX POUR DES REMBLAIS D'OUVRAGES HYDRAULIQUES

Le traitement à la chaux est utilisé depuis de nombreuses années en terrassement pour l'amélioration et la stabilisation des sols limoneux et argileux. Cette technique est désormais disponible pour les digues fluviales. Des expérimentations et des retours d'expérience à travers le monde ont montré que ce traitement ne modifie pas la perméabilité et améliore significativement la résistance à l'érosion.

Le traitement des sols à la chaux est une technique éprouvée, dont l'usage s'est largement répandu au cours des six dernières décennies, notamment dans le domaine des infrastructures de transport. Son principal intérêt réside dans la possibilité de réemployer des sols humides ou de faible qualité – notamment les sols limono-argileux, certains schistes, marnes et craies – en leur conférant des propriétés nouvelles, selon des mécanismes adaptés à chaque type de sol :

- amélioration de la maniabilité : facilité d'extraction et de mise en œuvre grâce à une meilleure consistance du matériau ;
- réduction de la sensibilité à l'eau : comportement plus stable en cas d'intempéries ou d'immersion ;
- stabilité dimensionnelle : limitation du gonflement et du retrait de la fraction argileuse lors des cycles de séchage et d'imbibition ;
- renforcement des performances mécaniques : augmentation de la portance, de la cohésion et de la résistance globale du sol.

Ces résultats sont bien établis dans la pratique courante et s'appliquent aux ouvrages en terre dans le cadre des infrastructures routières (autoroutes, lignes à grande vitesse, aéroports...). Toutefois, l'usage du traitement des sols à la chaux pour les ouvrages hydrauliques (digue, barrages, canaux) implique une attention particulière aux exigences spécifiques liées à l'action de l'eau.

À cette fin, en complément des fonctions classiques reconnues dans les travaux des terrassements, il est nécessaire de considérer des fonctions supplémentaires propres aux ouvrages hydrauliques. Le **tableau 1**, extrait du Bulletin 195 de la Commission internationale des grands barrages (CIGB) intitulé *Barrages en sol cimenté*¹, présente les cinq fonctions principales pour lesquelles le matériau sol-chaux se révèle avantageux dans ce contexte. La sixième fonction, qui concerne l'évacuateur de crues, représente un cas particulier et n'est pas considérée ici. La prise en compte de l'action de l'eau fait apparaître une propriété peu considérée jusqu'alors : l'homogénéité.

MANIABILITÉ (M)

La maniabilité correspond à la facilité de mise en œuvre (ouvrabilité), notamment dans le cas de sols limono-argileux humides.

Le traitement à la chaux améliore la consistance et la manipulabilité du matériau. Cette fonction est l'une des principales raisons pour lesquelles le traitement à la chaux est traditionnellement utilisé dans la pratique courante pour la construction des infrastructures de transport. Elle est bien codifiée par des lignes directrices et des normes^{2,3}.

STABILITÉ (S)

La stabilité vise à garantir la stabilité mécanique de l'ouvrage sous son propre poids, ainsi que sous l'effet de charges ou sollicitations extérieures (par exemple, les sollicitations sismiques).

Le traitement à la chaux contribue à renforcer la cohésion et la résistance du sol. Cette fonction, comme la précédente, fait partie de la pratique courante. Elle est également bien codifiée dans des documents spécifiques^{2,4}.

ÉTANCHÉITÉ (P)

L'étanchéité permet au matériau de jouer un rôle de barrière hydraulique, assurant la rétention ou le stockage temporaire de l'eau dans l'ouvrage.

Des travaux de recherche en laboratoire suivis d'essais à grande échelle ont démontré que la perméabilité des sols fins traités à la chaux suit les mêmes principes que celle des sols non traités⁵. Les équipements standard de chantier des terrassements peuvent être utilisés, à condition de respecter rigoureusement les procédures de traitement et de mise en place des matériaux suivantes :

- Les matériaux mis en œuvre doivent être préparés du côté humide de w_{OPN} (entre 1,05 et 1,15 x w_{OPN}), en garantissant un IPI ≥ 8 pour assurer une bonne traficabilité des engins et une portance minimale.

AUTEURS

Federica Bertola
Ingénierie applications -
experte en génie civil
Lhoist R&D

Stéphane Bonelli
Directeur de recherche
Inrae - Recover Aix Marseille

Sylvie Nicaise
Ingénierie de recherche
Inrae - Recover Aix Marseille

–Tableau 1–

Fonctions à considérer lors de l'usage du traitement à la chaux pour un remblai d'ouvrage hydraulique.

Fonction recherchée	M Maniabilité	S Stabilité	P Étanchéité	EI Résistance à l'érosion interne	Es Résistance à l'érosion de surface
Propriétés du composant sol chaux	Facilité de mise en œuvre de sols humides et/ou argileux	Stabilité sous poids propre et éventuellement sous sollicitations sismiques	Étanchéité	Résistance à l'érosion interne	Résistance à l'érosion externe
Procédé de traitement recommandé	En place ou en centrale	En place ou en centrale	En place avec homogénéisation ou en centrale	En place avec homogénéisation ou en centrale	En place avec homogénéisation ou en centrale
Paramètres étudiés	Portance	Résistance au cisaillement (cohésion)	Homogénéité	Homogénéité	Homogénéité
	Compacité du matériau compacté	Résistance à la traction et/ou à la compression	Perméabilité	Résistance à l'érosion de conduit	Résistance à l'érosion de surface dans le cas d'un écoulement de surverse

–Tableau 2–

Valeurs du coefficient de perméabilité mesurées dans différents projets sur des sols non traités et des sols traités à la chaux à différents temps de maturation.

Méthode d'essai	Cas spécifique	Type de sol et traitement	Résultats obtenus sur sol naturel et sol traité à la chaux à différent temps de cure (x 10 ⁻⁹ m/s)			
			Sol naturel	Sol traité à la chaux (âge en jours ou ans)		
Essais de laboratoire : essais triaxiaux en conditions CD	Digue DOFEAS-Lhoist	Sol F2 traité à 2,5 % CaO	1,1	2,8 (28 j)	1 (180 j)	1 (380 j)
	Digue DigueELITE	Sol F1 traité à 2 % CaO	6,8	1,2 (28 j)	-	1 (6 a)
	Plots expérimentaux de Salin-de-Giraud	Sol F1 traité à 2 % CaO	-	-	-	1 à 0,1 (5 a)
Essais in situ : essais en forage dans tube crépiné	Digue DOFEAS-Lhoist	Sol F2 traité à 2,5 % CaO	1,5	0,77 (28 j)	4,5 (180 j)	8,5 (380 j)

• Le compactage doit s'accompagner d'une opération de pétrissage, par exemple à l'aide d'un compacteur vibrant à pieds dameurs (au laboratoire, le compactage doit également être réalisé par pétrissage).

Le **tableau 2** rassemble les valeurs du coefficient de perméabilité mesurées au cours de différents projets, comparant des sols traités à la chaux dans des applications hydrauliques à divers temps de cure avec les sols correspondants non traités. Il apparaît clairement que les valeurs obtenues pour les sols traités, grâce aux conditions de mise en œuvre mentionnées ci-dessus, sont très similaires à celles obtenues pour les sols non traités. Les résultats montrent que, lorsque les conditions de mise en œuvre sont respectées, les sols traités présentent des valeurs de perméabilité du même ordre de grandeur que celles des sols non traités. De plus, ces valeurs évoluent peu dans le temps, confirmant ainsi la pérennité de l'étanchéité obtenue.

Dans tous les cas, sauf indication contraire, le compactage a été effectué selon les conditions indiquées précédemment (compactage par pétrissage). Pour plus d'informations sur les différents projets, le lecteur pourra se reporter à l'article « Ouvrages

hydrauliques - Retours d'expérience sur la durabilité des sols traités à la chaux » (p. 72).

RÉSISTANCE À L'ÉROSION INTERNE (EI)

Parmi les mécanismes d'érosion interne, l'érosion de conduit représente le plus dangereux. Il survient lorsque l'eau s'écoule dans un conduit résultant de la présence de terriers d'animaux fouisseurs, de la décomposition de racines d'arbres ou de fissures de traction ou de dessiccation. Ce phénomène est étudié en laboratoire à l'aide du *Hole Erosion Test* (HET)⁶, qui permet de caractériser la sensibilité des matériaux à ce type d'érosion. À ce jour, le seuil d'érosion (la contrainte critique) mesurée par le HET constitue le paramètre le plus pertinent et opérationnel pour quantifier la résistance d'un matériau à l'érosion de conduit.

Le **tableau 3** présente quelques valeurs illustrant le gain de résistance sur le sol traité à la chaux par rapport au sol non traité. Dans les deux cas d'étude présentés, l'érosion du sol traité n'apparaît qu'à partir de sollicitations hydrauliques très grandes, et ce dès le plus jeune âge.

-Tableau 3-

Résistance à l'érosion de conduit mesurée sur des sols non traités et des sols traités à la chaux à différents temps de cure.

Cas spécifique	Type de sol et traitement	Contrainte critique obtenue sur sol naturel et sol traité à la chaux à différent temps de cure : $\tau_{c,HET}$ (Pa)			
		Sol naturel	Sol traité à la chaux (âge en jours ou ans)		
Digue DigueELITE	Sol F1 traité à 2 % CaO	95	2030 (2 j)	Contrainte critique > limite de l'essai (28 j)	Contrainte critique > limite de l'essai (6 a)
Plots expérimentaux de Salin-de-Giraud	Sol F1 traité à 2 % CaO	87	179 (7 j)	833 (90 j)	Contrainte critique > limite de l'essai (5 a)

Il arrive que l'érosion du sol traité ne soit pas mesurée au laboratoire, la résistance du matériau étant telle que le dispositif ne parvient pas à la provoquer (photos 1). Cette résistance accrue a été confirmée par des essais sur prélèvements intacts âgés de 5 et 6 ans sur les ouvrages expérimentaux, montrant que le bénéfice du traitement est conservé en conditions réelles.

-Photos 1-

Éprouvettes de sol de DigueELITE non traité (à gauche) et traité (à droite) après essai HET : aucune érosion n'a été obtenue sur le sol traité.



RÉSISTANCE À L'ÉROSION DE SURFACE (ES)

La résistance à l'érosion de surface concerne les conditions hydrauliques rares, comme le débordement par surverse, rencontré sur un barrage écrêteur de crue ou une digue fluviale.

Plusieurs approches expérimentales sont disponibles pour analyser la résistance des sols à l'érosion de surface, parmi lesquelles le *Jet Erosion Test* (JET)⁷ et l'essai de surverse⁸ (photo 2).

Les performances peuvent être établies selon plusieurs approches complémentaires :

- par des essais d'érosion de type JET au laboratoire, sur sol remanié ;
- par la réalisation d'un chantier expérimental, intégré à la phase d'étude, afin de tester les conditions réelles de mise en œuvre et de sollicitation avec des essais in situ de type JET et de surverse ;
- par la réalisation d'essais sur le remblai lui-même de type JET et de surverse.

Le tableau 4 rassemble des résultats d'essais de JET sur des sols traités et les compare aux résultats sur les mêmes sols non traités. La contrainte critique, qui correspond également pour l'essai JET à la

-Photo 2-

Essai de surverse sur l'ouvrage traité de DigueELITE.



-Tableau 4-

Résistance à l'érosion de surface mesurée par l'essai JET au laboratoire et in situ sur des sols non traités et des sols traités à la chaux à différents temps de cure.

Cas spécifique	Type de sol et traitement	Contrainte critique obtenue sur sol naturel et sol traité à la chaux à différent temps de cure : $\tau_{c,JET}$ (Pa)		
		Sol naturel	Sol traité à la chaux (âge en jours ou ans)	
Digue DigueELITE	Sol F1 traité à 2 % CaO	12	753 (7 jours)	627 (6 ans)
Plots expérimentaux de Salin-de-Giraud	Sol F1 traité à 2 % CaO	0	135 (7 jours)	118 (5 ans)

sollicitation provoquant l'érosion, est très grande sur le sol traité. Cette résistance est maintenue dans le temps, comme le montrent les valeurs obtenues sur les ouvrages en vraie grandeur cinq et six ans après la construction.

CONCLUSION

Après plusieurs décennies d'utilisation du traitement à la chaux en infrastructures routières, le domaine d'application de cette technique s'étend aux ouvrages hydrauliques. Cette évolution s'appuie sur les nombreux retours d'expérience collectés en France et à l'international.

Les propriétés requises des sols en remblai hydraulique (stabilité, étanchéité, résistance à l'érosion) ont été démontrées. La technique contribue à valoriser des sols de médiocre qualité et à optimiser les terrassements tout en profitant des performances

À retenir

- Les sols traités à la chaux en remblai hydraulique répondent aux exigences fonctionnelles de ces remblais : maniabilité, stabilité, étanchéité, résistance à l'érosion.
- La perméabilité des sols traités à la chaux est équivalente à celle des sols non traités, à condition de mettre en place les sols traités dans un état humide et par compactage par pétrissage.
- La résistance à l'érosion de conduit et de surface est significativement améliorée par le traitement à la chaux.
- Les recommandations techniques sont rassemblées dans le Bulletin *Barrages en sol cimenté* publié par la CIGB.

acquises par le traitement. Comme pour tout traitement de sol, cette mise en œuvre doit respecter des règles de qualité, détaillées dans le Bulletin *Barrages en sol cimenté* publié par la CIGB. ■

RÉFÉRENCES

1. D. Puiatti, M. Lino, P. Cochet, S. Bonelli, « Barrages en sol cimenté : présentation du nouveau Bulletin 195 de la CIGB », *Revue française de géotechnique*, vol. 178, n° 9, 2024.
2. LCPC/Sétra, *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS). Application à la réalisation des remblais et des couches de forme*, « Guide technique », LCPC, 2000.
3. NF EN 16907-4 : « Terrassement – Partie 4 : Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques », décembre 2018.
4. EN 1997-1 : Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales, 2014.
5. I. Charles, G. Herrier, C. Chevalier, E. Durand, D. Puiatti, J.-M. Fleureau, S. Taibi, S. Bonelli, J.-J. Fry, "A real scale experimental dike in lime-treated soil: evaluation of the methodology, mechanical and hydraulic performance", *Scour and Erosion* – Cheng, Draper & An (Eds), Taylor & Francis Group, London, 978-1-138-02732-9, 2015.
6. NF XP P94-065 : « Sols : reconnaissance et essais – Hole Erosion Test – Principe et méthode d'essai en laboratoire pour la détermination des caractéristiques de résistance à l'érosion de conduit », novembre 2023.
7. ASTM D5852, "Standard Test Method for Erodibility Determination of Soil in the Field or in the Laboratory by the Jet Index Method", 2017.
8. P. Pinettes, H. Haddad, C. Picault, S. Bonelli, J.-R. Courivaud, T. Mallet, "Two erosion tests to quantify resistance to erosion during overflow: the jet erosion test and the overflow test", 28th *International Congress on Large Dam*, Chengdu, May 2025.

OUVRAGES HYDRAULIQUES RETOURS D'EXPÉRIENCE SUR LA DURABILITÉ DES SOLS TRAITÉS À LA CHAUX

Le traitement des sols à la chaux s'est imposé comme une technique efficace dans la réalisation d'ouvrages hydrauliques. Outre la valorisation de matériaux locaux et la simplification des terrassements, les recherches ont montré qu'il améliore les propriétés mécaniques et hydrauliques des ouvrages, en particulier la résistance à l'érosion.

Digues DOFEAS-Lhoist après construction (digue traitée à gauche, digue non traitée à droite).



AUTEURS

Federica Bertola

Ingénieure applications -
experte en génie civil
Lhoist R&D

Sylvie Nicaise

Ingénieure de recherche
Inrae - Recover Aix Marseille

Lucile Saussaye

Chargée d'études
en mécanique des sols
Chercheuse associée
à l'équipe de recherche ENDSUM
Cerema

Kristof Verelst

Ingénieur de recherche
Flanders Hydraulics

Henk van Hemert

Conseiller spécialisé coordinateur
Rijkswaterstaat

Le traitement des sols à la chaux est une technique éprouvée, fiable et économique, qui valorise des sols de qualité médiocre dans la construction d'infrastructures de transport. En réduisant les volumes mis en décharge et les délais de construction, cette méthode offre des avantages significatifs sur les plans environnemental, technique et économique.

Bien que largement utilisée dans les travaux routiers, l'application du traitement à la chaux dans les ouvrages hydrauliques reste encore marginale. Ces ouvrages présentent des exigences spécifiques, en plus des critères classiques de maniabilité des sols et de stabilité des remblais. Les fonctionnalités les plus critiques incluent l'étanchéité, la résistance à l'érosion interne et la résistance à l'érosion externe. Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses études et projets à grande échelle ont mis en évidence les bénéfices multiples du traitement

à la chaux dans le domaine des ouvrages hydrauliques. Cette technique permet de simplifier la coupe transversale type de l'ouvrage en profitant des propriétés mécaniques et de résistance à l'érosion améliorées et de réduire les coûts, notamment ceux liés au transport des matériaux.

Cependant, des questions subsistent quant à la durabilité de ces ouvrages. La technique étant relativement récente dans ce domaine, les retours d'expérience documentés sur les performances à long terme et les effets d'une exposition prolongée aux conditions environnementales réelles (interactions sol-atmosphère) sont limités, en particulier en ce qui concerne les exigences fonctionnelles spécifiques aux ouvrages hydrauliques. Il est donc essentiel de vérifier que les ouvrages ou parties d'ouvrage traité(e)s conservent leurs propriétés améliorées dans le temps.

Cet article propose une synthèse d'expériences passées : il présente des digues réalisées en sols

traités à la chaux en France, en Belgique et aux Pays-Bas. Les détails de leur mise en œuvre, les propriétés mesurées après construction et les résultats des campagnes de surveillance menées pendant plusieurs années sont analysés, afin d'en tirer des enseignements précieux pour les projets futurs. Chaque projet a été conçu pour tester différentes performances de tout ou partie de l'ouvrage, selon la ou les fonctionnalités qu'il doit remplir, tout en s'adaptant aux pratiques locales de construction de digues. Ainsi, trois digues ont été réalisées en France dans le but de valider, dans un premier temps, la procédure de mise en œuvre : l'ensemble de la structure a été construit en sol traité à la chaux, avec un compactage horizontal effectué par couches successives, selon la méthode du remblai excédentaire.

En revanche, les digues belge et néerlandaise ont été réalisées en ne traitant que la carapace (couche de protection), selon des méthodes représentatives des pratiques locales. Pour la digue belge, le compactage a été effectué parallèlement au talus, tandis que pour la digue néerlandaise, un profil en escalier a été adopté avec un compactage en couches horizontales.

DIGUE DOFEAS-LHOIST

La première structure expérimentale a été réalisée en septembre 2011 au centre d'expérimentation et de recherche (CER) du Cerema de Rouen (Seine-Maritime) dans le cadre du projet DOFEAS-Lhoist (Digues et ouvrages fluviaux : érosion, affouillements et séismes)¹. Elle comprenait deux digues expérimentales sèches, construites à l'échelle réelle :

- l'une avec un sol limoneux traité à 2,5 % de chaux ;
- l'autre avec le même sol non traité, servant de référence (**tableau 1**).

Seules certaines sections ont été recouvertes de terre végétale, le reste de la structure est resté exposé directement à l'environnement.

Les principaux objectifs de ce projet étaient de démontrer que les conditions de mise en œuvre adaptées (teneur en eau du côté humide de la courbe Proctor normal et compactage par pétrissage) contribuent à atteindre les performances requises en termes de propriétés mécaniques, de perméabilité et de résistance à l'érosion.

Des campagnes de suivi^{2,3} de l'ouvrage en limon traité à 2,5 % CaO ont été menées au cours du temps, jusqu'en 2025, révélant les bénéfices du traitement à la chaux suivants par rapport au sol non traité :

- Amélioration des performances mécaniques : un mois après la construction, la capacité portante était multipliée par 5 à 30, la cohésion était 7 à 12 fois supérieure. Après 7 ans, la résistance à la compression uniaxiale atteignait 3 MPa.

-Tableau 1-

Détails de construction des digues DOFEAS-Lhoist.

Type de sol	Limon F1 (Ip 11)
Dimensions	Digue en limon traité - L : 30 m, h : 1,80 m, 6 couches de 30 cm Asymétrique 3H/2V et 2H/1V Digue en limon non traité - L : 15 m, h : 0,90 m, 3 couches de 30 cm Asymétrique 3H/2V et 2H/1V
% CaO	2,5 % CaO, traitement en centrale Non traité (digue de référence)
Compactage	Cylindre vibrant à pieds dameurs (VP5) Obj. : q4 ; w = 1,1 w _{OPN} ρ _d = 96,7% ρ _{d,OPN}

- Maintien d'une faible perméabilité, comparable à celle du sol non traité : des valeurs de l'ordre de 10⁻⁹ m.s⁻¹ ont été mesurées à l'aide d'essais Nasberg réalisés in situ et d'essais triaxiaux effectués sur des carottes prélevées dans la digue un mois, six mois et un an après la construction.

- Renforcement de la résistance à l'érosion : dès le premier mois, les essais HET (*Hole Erosion Test*) ont montré une amélioration de la résistance à l'érosion de conduit de 7 ordres de grandeur. Cette tendance a également été confirmée par les essais MoJet (*Mobile Jets Erosion Test*) réalisés in situ sur les talus de la digue, qui vérifient la résistance du sol traité vis-à-vis de l'érosion externe.

Sept ans après la construction, les produits issus de la réaction pouzzolanique se sont révélés stables et le pH du remblai est resté élevé, supérieur à 11. Une légère baisse du pH a été observée dans une couche superficielle limitée à 12 cm de profondeur⁴, ce qui témoigne de la poursuite de l'action de la chaux et d'un vieillissement modéré de la structure.

Afin de prolonger le suivi des performances à long terme, une nouvelle campagne expérimentale est en cours, 14 ans après la mise en œuvre. Il est d'ores et déjà possible d'indiquer que celle-ci confirme, sur une nouvelle période d'exposition de 7 ans, une altération superficielle de la digue, non revêtue et en interaction directe avec son environnement, de l'ordre de la dizaine de centimètres.

DIGUE DU PROJET DIGUEELITE

Une digue expérimentale a été construite en juillet 2015 dans le cadre du programme français de R&D FUI DigueELITE (**photo 1**). Située sur la commune d'Aimargues (Gard), le long de la rivière Vidourle, cette digue démonstrateur comprend deux sections :

- une section non traitée, utilisée comme référence ;
- une section traitée à la chaux (**tableau 2**).

Ce projet s'inscrit dans le cadre des travaux de réhabilitation du réseau de digues bordant le Vidourle⁵. Le sol utilisé pour la construction était un limon local, disponible sur site. Les talus de la digue n'ont pas été recouverts de terre végétale, les exposant directement aux conditions environnementales et à de fortes variations de température. La digue n'était pas en contact direct avec la rivière.

-Photo 1-

Digue du projet DigueELITE pendant les essais de surverse en 2016.



-Tableau 2-

Détails de construction de la digue DigueELITE.

Type de sol	Limon F1 (Ip 5)
Dimensions	L : 50 m, h : 3,5 m, 18 couches 3H/2V
% CaO	2 % CaO, traitement en centrale Non traité (section de digue de référence)
Compactage	Cylindre vibrant à pieds dameurs (VP5) Obj. : q_4 ; $w = 1,1 w_{OPN}$ $\rho_d = 95 \% \rho_{d,OPN}$

Les principaux objectifs de ce projet étaient la validation de la méthodologie de construction, l'atteinte de performances mécaniques satisfaisantes, la vérification de la perméabilité et de la résistance à l'érosion interne et externe.

Ce projet visait également à développer un nouveau concept de digues fluviales, avec une coupe type simplifiée du fait de la résistance à l'érosion des matériaux traités. Dans ce but, des avancées significatives ont été réalisées, notamment le développement d'un simulateur à grande échelle pour mesurer la résistance à l'érosion par surverse.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées des différentes campagnes de suivi de l'ouvrage menées au fil des années⁶⁻⁷ :

- L'amélioration et le maintien des performances mécaniques ont été démontrés : six ans après la construction, la résistance à la compression uniaxiale se situait entre 0,8 et 2,4 MPa, contre 0,2 MPa pour le sol non traité. La cohésion obtenue grâce au traitement à la chaux était 12 à 20 fois supérieure à celle du sol naturel.

-Photo 2-

Plots expérimentaux de Salin-de-Giraud pendant les essais de surverse en 2018.



- La perméabilité mesurée est restée systématiquement faible, avec des valeurs comprises entre 10^{-8} et 10^{-10} m.s⁻¹, déterminées sur des échantillons carottés dans la digue, à charge constante en cellule triaxiale.

- Une résistance accrue à l'érosion interne a été observée via des essais HET, tandis que la résistance à l'érosion externe a été évaluée à l'aide d'essais JET in situ et d'essais de surverse sur le talus de la digue. Les résultats montrent que, plusieurs années après la mise en œuvre, le sol traité à la chaux présente une résistance multipliée par 2 à 100, selon l'exposition à l'environnement de la zone de remblai considérée.

Lors de la dernière campagne de suivi (neuf ans après la construction), l'impact de l'exposition environnementale est limité aux 20 premiers centimètres. En dessous de cette profondeur, le taux de carbonatation de la chaux diminue, tandis que les mesures de pH et de chaux disponible confirment la présence de quantités de chaux suffisantes pour la poursuite des réactions pouzzolaniques.

— PLOTS EXPÉRIMENTAUX DE SALIN-DE-GIRAUD —

En novembre 2017, le Symadrem (Syndicat mixte interrégional pour la gestion des digues du delta du Rhône et de la mer) a lancé la construction de plots expérimentaux sur la commune de Salin-de-Giraud (Bouches-du-Rhône), dans le but de tester des solutions de digues résistantes à la surverse (photo 2). Deux digues ont été réalisées à partir de sols disponibles localement :

- l'une constituée de sol non traité, utilisée comme référence ;
- l'autre de sol traité sur site avec 2 % de chaux (tableau 3).

La pente étudiée de la digue traitée à la chaux est orientée vers le sud, tandis que celle du remblai non traité est orientée vers le nord et de ce fait moins aux variations de température. Une couche de 30 cm de terre végétale a été appliquée sur les talus qui ont été testés à l'érosion, l'autre face des plots restant directement exposée à l'environnement.

–Tableau 3–

Détails de construction des plots expérimentaux de Salin-de-Giraud.

Type de sol	Limon F1 (Ip 9)
Dimensions	L : 2x15 m, h : 2 m, 9 couches 2,5H/1V
% CaO	2 % chaux, traitement en place sur plate-forme dédiée Non traité (digue de référence)
Compactage	Cylindre vibrant à pieds dameurs (VP5) Obj. : q_4 ; $w = 1,1 w_{OPN}$ $\rho_d = 95\% \rho_{d,OPN}$

Les deux remblais ne sont pas en contact direct avec le Rhône, mais la nappe phréatique légèrement salée est très proche et influence la plate-forme, notamment en période humide.

Les études menées immédiatement après la construction et cinq ans plus tard ont permis les observations suivantes concernant les performances de la digue traitée à la chaux⁶⁻⁷ :

- Les résistances à la compression uniaxiale et au cisaillement se sont révélées nettement supérieures à celles du sol non traité, avec une tendance à l'amélioration en profondeur.
- Une perméabilité très faible a été mesurée, comprise entre 10^{-9} et 10^{-10} m.s⁻¹, sur des échantillons carottés dans la digue, à charge constante, en cellule triaxiale.
- Une résistance élevée à l'érosion interne a été confirmée par des essais HET, tandis que la résistance à l'érosion externe a été évaluée à l'aide d'essais JET in situ et d'essais de surverse. Ces expérimentations ont démontré une érosion faible à nulle pour le sol traité, en contraste marqué avec la dégradation observée sur le sol non traité.

DIGUE DE VLASSENBROEK

Dans le cadre du plan Sigma, visant à mieux protéger la Flandre contre les inondations de l'Escaut Maritime et ses affluents, une zone d'inondation contrôlée a été aménagée à Vlassenbroek en

Belgique (photo 3). Sur la digue d'encerclement de cette zone, une section expérimentale a été dédiée à la recherche⁸.

La digue a été construite selon les pratiques flamandes, avec un noyau sableux assurant la stabilité surmonté d'une couverture argileuse (indice de plasticité > 15) garantissant l'étanchéité. En 2019, la couche de protection a été réalisée à partir d'un sol limoneux traité avec 2 % de CaO sur une partie de cette section expérimentale. La couverture en sol traité à la chaux a été compactée en quatre couches successives, selon la pente de talus, pour une épaisseur totale de 1,10 m. Les détails de la construction sont présentés dans le tableau 4.

Type de sol	Limon F1 (Ip 8-10)
Dimensions	Épaisseur carapace : 1,1 m perpendiculaire au talus, 4 couches 3H/1V
% CaO	2 % CaO, traitement en place sur plateforme dédiée
Compactage	Cylindre vibrant à pieds dameurs (VP5) Sur pente 3H/1V Obj. : q_4 ; $w = 1,1 w_{OPN}$ $\rho_d = 95\% \rho_{d,OPN}$

L'objectif principal de ce projet était de valider les méthodes de conception et de compactage adaptées aux pratiques locales de digues en carapace, tout en étudiant l'impact du traitement à la chaux sur la végétalisation. Pour ce dernier volet, différents mélanges de semences ont été semés. La section traitée a été subdivisée en sous-sections, avec des mélanges de végétation semés sur le sol traité, avec ou sans application de terre végétale.

Les principales conclusions obtenues jusqu'à présent peuvent être résumées comme suit :

- La résistance mécanique du sol traité, mesurée à l'aide d'un pénétromètre dynamique, s'est révélée supérieure à la capacité de mesure de l'appareil dès la première année suivant la construction.
- Une analyse approfondie de la perméabilité et de son évolution dans le temps est en cours pour compléter l'évaluation.
- Une très forte résistance à l'érosion externe a été confirmée par des essais JET réalisés après 1 an et 3 ans.

–Tableau 4–

Détails de construction des plots expérimentaux de Salin-de-Giraud.

–Photo 3–

Digue de Vlassenbroek pendant la construction de la couche de protection en sol traité.



- Une amélioration progressive de la végétation a été observée. Après l'application de terre végétale, la couverture végétale et le développement racinaire sont comparables à ceux de la section non traitée. Sans terre végétale, la densité racinaire est très élevée dans les 7,5 cm supérieurs, mais diminue ensuite presque jusqu'à zéro dans les couches plus profondes.

DIGUE D'HEDWIGEPOLDER

La dépollérisation du Hedwige-Prosperpolder, situé à proximité de l'Escaut, à la frontière entre les Pays-Bas et la Belgique, a démontré le potentiel d'utilisation des argiles néerlandaises traitées à la chaux pour le renforcement des digues.

En novembre 2021, trois sections expérimentales ont été construites côté aval de la digue existante, dans le Living Lab Hedwige-Prosperpolder. La recherche était financée par le programme néerlandais de protection contre les inondations. Trois mois après leur mise en œuvre, des essais de franchissement ont été réalisés (photo 4).

Chaque section a été construite à partir de sols argileux améliorés par l'ajout de chaux :

- une section avec une argile de bonne qualité (indice de plasticité 47) importée d'une autre région ;
- deux sections avec des argiles de moindre qualité (indice de plasticité 22-24) extraites localement, dont l'une d'origine marine (avec une teneur en Na^+ attendue courante pour les digues côtières dans les Pays Bas).

Dans cette application visant à renforcer les digues, la conception repose sur une carapace de protection avec un profil en escalier, conformément à la pratique standard néerlandaise pour ce type d'ouvrage. Ce profil est conçu pour améliorer la résistance de la couche de couverture face au glissement sur le versant.

Les détails de construction de cette digue sont présentés dans le tableau 5.

–Tableau 5–

Détails de construction sur la digue d'Hedwigepolder.

Type de sol	Argiles F3 et F4 (Ip 20-45)
Dimensions	Épaisseur carapace : 1,1 m perpendiculaire au talus, 17 redans, 2 couches superposées en crête 3H/1V
% CaO	4-5 % CaO, traitement en place sur plateforme dédiée
Compaction	Cylindre vibrant à pieds dameurs (VP5) Obj. : q_3 ; $w = 1,1 w_{OPN}$ $\rho_d = 96,4-102,4 \% \rho_{d,OPN}$

Les principaux objectifs de cette expérimentation étaient de valider l'efficacité du traitement à la chaux pour valoriser les argiles locales en améliorant leur résistance à l'érosion, de tester la résistance à l'érosion dans les zones sensibles et de démontrer la possibilité d'utiliser des argiles traitées à la chaux dans les zones de transition où il est généralement difficile de maintenir une bonne couverture végétale⁹.

Dans ce dernier cas, aucune étude de suivi n'a été menée en raison de la durée limitée du projet. Toutefois, il s'agit du seul exemple parmi les cas cités où des essais de franchissement ont été réalisés. Ces essais ont été effectués trois mois seulement après la construction de la digue, dans des conditions hivernales peu favorables au développement des réactions pouzzolaniques. Des obstacles ont été placés sur le talus afin de simuler la présence de bâtiments ou d'autres constructions (points durs). Ces zones constituent des points sensibles en matière d'érosion en raison de la concentration des écoulements autour des obstacles.

Dans chaque section d'essai, cinq scénarios de tempête ont été reproduits : les quatre premiers basés sur des conditions typiques pour des digues fluviales, le cinquième correspondant à des conditions représentatives de digues maritimes. Les mesures d'érosion ont été réalisées par photogrammétrie. Les conclusions suivantes peuvent être tirées des observations issues des essais de franchissement :

–Photo 4–

Digue d'Hedwigepolder pendant une phase des essais de franchissement.



- La couche d'argile traitée à la chaux n'a jamais cédé, mais le profil en marches d'escalier du talus a été mis en évidence dans les zones où le compactage était insuffisant (*headcut*).

- Des points faibles présentant une érosion plus marquée ont été identifiés :

- Sur une zone spécifique de la crête affectée par des pluies intenses durant la construction.
- Autour du premier obstacle, en raison d'un défaut de compactage après sa mise en place. L'expérience de cette mise en place a contribué à améliorer le compactage autour des deux obstacles suivants, qui n'ont pas présenté d'érosion particulière.
- Au bas de la pente, où la remontée d'eau souterraine a perturbé le compactage.

Ce projet a démontré que le traitement à la chaux améliore les propriétés des argiles, quelle que soit leur qualité initiale : une mise en œuvre soignée confère une bonne résistance à l'érosion externe, y compris autour des obstacles, même après une courte période de durcissement dans des conditions défavorables.

CONCLUSION

Les cinq expériences présentées démontrent que, lorsqu'il est correctement conçu et mis en œuvre, le traitement à la chaux permet :

- d'atteindre des performances remarquables dans le domaine des ouvrages hydrauliques ;
- de valoriser des sols présents localement, même s'ils sont humides ou semblent peu adaptés à une mise en œuvre en remblai, en produisant des matériaux cohésifs, peu perméables et résistants à l'érosion.

À retenir

- Le compactage de sols fins traités à la chaux à une teneur en eau située du côté humide de la courbe Proctor normal et par pétrissage, par exemple à l'aide d'un compacteur vibrant à pieds dameurs, est efficace pour atteindre une perméabilité faible et durable, répondant aux exigences des ouvrages hydrauliques.
- Le traitement à la chaux de sols fins, selon des dosages adaptés à leur nature, contribue à leur valorisation en tant que matériaux de construction pour les ouvrages hydrauliques.
- Les sols traités présentent des caractéristiques mécaniques nettement supérieures à celles des sols non traités.
- Le traitement à la chaux améliore significativement la résistance à l'érosion.
- L'exposition prolongée aux conditions météorologiques entraîne une dégradation limitée à quelques centimètres en surface. En profondeur, les propriétés mécaniques et hydrauliques du matériau traité restent stables, même plusieurs années après la mise en œuvre.
- L'application d'une couche de terre végétale de 20 à 30 cm favorise une bonne reprise de la végétation, contribuant ainsi à l'intégration paysagère et environnementale de l'ouvrage.

Les résultats présentés confirment le maintien des fonctions clés des ouvrages hydrauliques dans le temps, même en conditions climatiques défavorables, et soulignent l'importance de poursuivre la collecte de données au cours du temps sur des ouvrages exposés à leur environnement, afin de valider pleinement la durabilité de ces solutions. ■

RÉFÉRENCES

1. I. Charles, G. Herrier, C. Chevalier, E. Durand, "An experimental full-scale hydraulic earthen structure in lime treated soil", *Proceedings of the Sixth International Conference on Scour and Erosion*, Paris, pp. 181–188, 2012.
2. L. Makki-Szymkiewicz, A. Hibouche, S. Taibi, G. Herrier, D. Lesueur, J.-M. Fleureau, "Evolution of the properties of lime-treated silty soil in a small experimental embankment", *Engineering Geology*, 191, pp. 8–22, 2015.
3. G. Das, A. Razakamanantsoa, G. Herrier, L. Saussaye, D. Lesueur, D. Deneele, "Evaluation of the long-term effect of lime treatment on a silty seven years of atmospheric exposure: Mechanical, physicochemical, and microstructural studies", *Engineering Geology*, 281(6), 2021.
4. G. Das, A. Razakamanantsoa, L. Saussaye, F. Losma, D. Deneele, "Carbonation investigation on atmospherically exposed lime-treated silty soil", *Case Studies in Construction Materials*, 17, p. 7, 2022.
5. N. Nerinx, S. Bonelli, S. Nicaise, G. Herrier, D. Lesueurs, P. Tachker, D. Puiatti, F. Cornacchioli, "The DigueELITE project: lessons learned and impact on the design of levees with lime treated soils", *Hydropower and Dams*, vol. 25, issue 6, 2018.
6. S. Nicaise, F. Klotz, F. Bertola, F. Byron, N. Chaouch, Y. Grémeaux, J. Aubriet, T. Ozturk, A. Doghmane, S. Bonelli, "Evolution des performances de digues traitées à la chaux en climat méditerranéen", *Digue 2024*, Aix-en-Provence, 2024.
7. F. Bertola, F. Klotz, S. Nicaise, B. François, P. Gerard, « Digues en limons traités à la chaux : évolution des matériaux 6 ans après la mise en œuvre », *Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur*, Poitiers, 2024.
8. G. Herrier, S. Bonelli, N. Nerinx, P. Tachker, P. Peeters, D. Puiatti, "Improving dams and dikes strength and resistance to erosion by means of lime treatment", *Proceedings of the Fourth International Dam World Conference*, Portugal, Lisbon, LNEC, September 21–25, 2020, pp. 1–19, 2020.
9. M. Konstadinou, G. Herrier, T. Stoutjesdijk, F. Losma, C. Zwanenburg, R. Dobbe, "Lime treatment: Evaluation for use in dike applications in the Netherlands", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(3): 04022465, 2023.

AMÉLIORATION DE LA RÉSISTANCE À L'ÉROSION DES SOLS

EFFET DE L'APPORT DE LIANTS HYDRAULIQUES

La résilience des infrastructures routières et hydrauliques au changement climatique devient un enjeu majeur. Une étude menée par le Cerema et l'université Gustave Eiffel révèle comment l'ajout de liants hydrauliques routiers (LHR) à faible dosage peut renforcer significativement la résistance à l'érosion des sols limoneux et sablo-limoneux et améliorer ainsi la tenue des talus et des digues face aux ruissellements et inondations.



Chantier d'aménagement de la RN141.

© GUNTOLI

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET RÉSILIENCE DES INFRASTRUCTURES

Le changement climatique se traduit entre autres par une modification des précipitations (intensité, saisonnalité...), qui induit une modification des ruissellements, des crues, des inondations, etc. Dans le cadre des réflexions engagées pour améliorer la résilience climatique des infrastructures, il est constaté que les matériaux naturels qui constituent les remblais en zone inondable ou les digues, sollicités par l'eau et sa vitesse d'écoulement, le seront plus fortement encore à l'avenir.

Le GIEC a défini la résilience comme « la capacité des systèmes sociaux, économiques et environnementaux à faire face à un événement dangereux ou à une tendance ou perturbation, en réagissant ou en se réorganisant de manière à maintenir leur fonction essentielle, leur identité et leur structure, tout en conservant la capacité d'adaptation, d'apprentissage et de transformation »¹.

Pour les infrastructures linéaires (routes, systèmes d'endiguement...), la résilience climatique vise à réduire leur vulnérabilité aux conséquences environnementales du changement climatique.

OUVRAGES EN TERRE

Si les digues de protection contre les inondations ou les submersions sont les ouvrages en terre les plus susceptibles d'être affectés par la modification des sollicitations hydrauliques liées au changement climatique, notamment vis-à-vis des crues, la réflexion sur les fonctions des digues de protection contre les inondations ou les submersions et leur évolution sous l'effet de ce type de sollicitations s'applique aussi aux remblais d'infrastructures routières, lorsque les sollicitations sont de type ruissellement ou inondation.

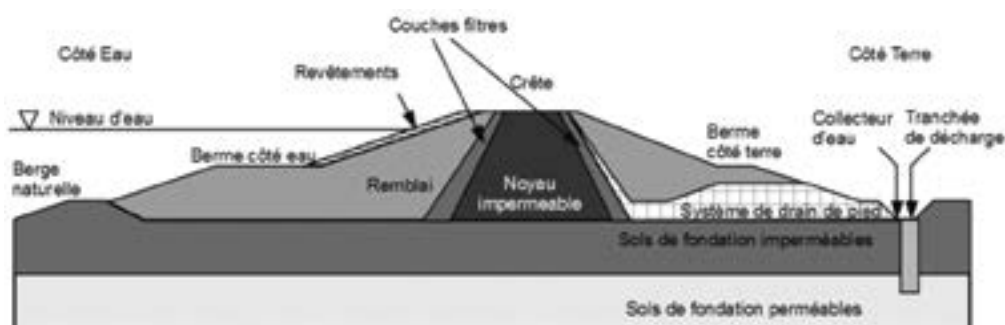
L'exemple des digues permet de localiser des parties d'ouvrages ou composants remplissant des fonctions, comme la stabilité de l'ouvrage ou sa résistance à l'érosion externe et interne (figure 1). Les parties d'ouvrage les plus vulnérables à l'érosion externe (arrachement de matériaux sur une surface extérieure à la digue) (figure 2) sont les talus, côté eau et côté terre, et la crête de digue (de la même manière que pour un remblai). Le corps de digue est vulnérable à l'érosion interne (entraînement de particules sous l'effet d'un écoulement d'eau dans l'ouvrage), dont l'un des mécanismes est l'érosion de conduit (figure 3).

Tous les matériaux ne sont pas susceptibles de développer ces mécanismes de dégradation.

AUTEURS

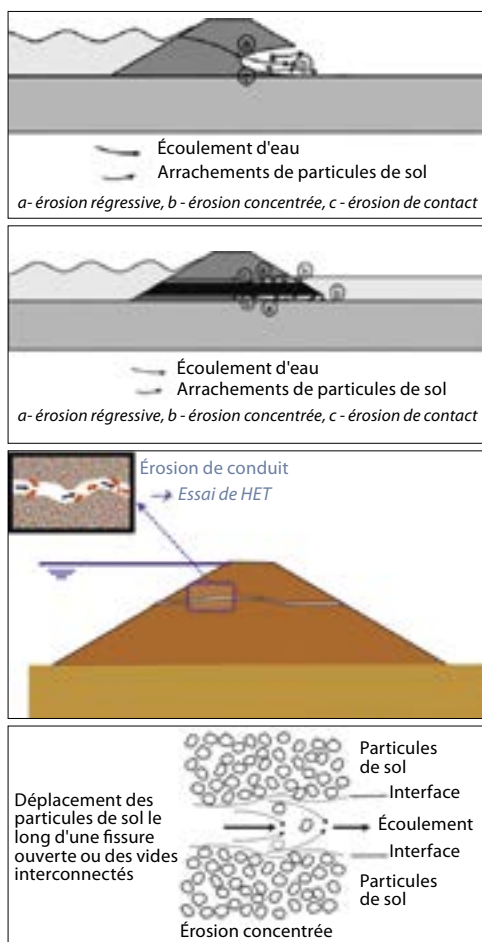
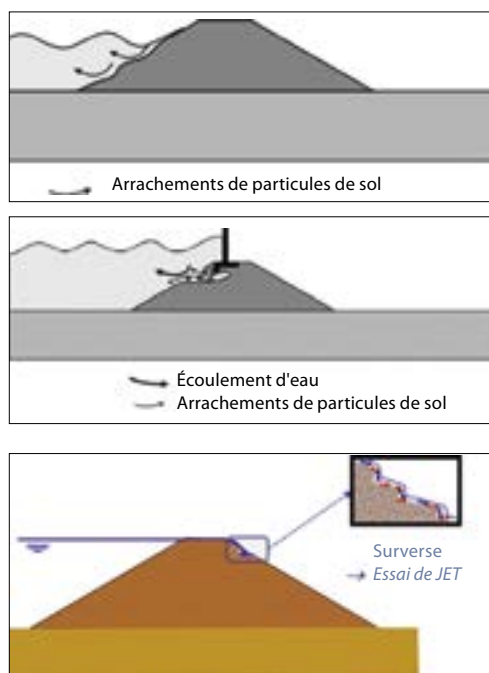
Lucile Saussaye
Chargée d'études
en mécanique des sols
Chercheuse associée
à l'équipe de recherche
ENDSUM
Cerema

Yasmina Boussafir
Ingénieure chercheuse
Université Gustave Eiffel



–Figure 1–
Schéma type d'une digue de protection contre les inondations et de ses différents composants^{2,3}.

–Figure 2–
Schémas des mécanismes d'érosion externe.^{2,4}



–Figure 3–
Schémas des mécanismes d'érosion de conduit.^{2,4}

L'arrangement des grains, leur taille, la présence d'argile... sont autant de facteurs qui contribuent à ces variabilités de comportement. Le traitement des sols aux liants hydrauliques est une technique qui contribue à stabiliser les matériaux naturels en liant les particules entre elles grâce au développement d'hydrates cimentaires. Cette stabilisation est donc très intéressante pour améliorer les performances des matériaux naturels, notamment vis-à-vis de ces mécanismes de défaillance des digues. Pour s'en assurer, le pôle Routes et Terrassements de Cimbéton - France Ciment a engagé une étude pour évaluer le bénéfice apporté par un traitement aux liants hydrauliques routiers (LHR) de matériaux naturels rencontrés dans des ouvrages hydrauliques et tester les performances des matériaux vis-à-vis des mécanismes de défaillance identifiés.

ÉVALUATION DE L'ÉRODABILITÉ DES MATÉRIAUX

Les essais de laboratoire de type *Hole Erosion Test*⁵, *Mobile Jets Erosion Test* et essai d'émiettage (*Crumb Test*) ont été développés pour évaluer la vulnérabilité du matériau à ces mécanismes et qualifier

l'érodabilité à l'eau des matériaux qui constituent les ouvrages. Il convient de garder à l'esprit que les sollicitations hydrauliques appliquées lors de ces essais sont souvent extrêmes en termes d'intensité par rapport aux sollicitations hydrauliques réelles. En revanche, elles restent de courte durée. Les matériaux sableux ou limoneux sont particulièrement érodables car ils ont une très faible cohésion. Plusieurs démonstrateurs ont d'ores et déjà montré une amélioration de la résistance d'un limon traité à la chaux⁶ (voir article « Ouvrages hydrauliques - Retours d'expérience sur la durabilité des sols traités à la chaux », p. 72) vis-à-vis de sollicitations hydrauliques.

Le présent article s'intéresse spécifiquement à l'apport de liants hydrauliques pour le traitement de sol.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

SOLS NATURELS

Deux sols ont été prélevés à Cizancourt (80), sur la trace du canal Seine-Nord Europe, et à Sandillon (45), au cours de travaux sur le système d'endiguement du val d'Orléans (photos 1).

Ces sols ont fait l'objet d'essais de caractérisation physique pour pouvoir les classer au sens du GTR⁷⁻⁸ (tableaux 1 et 2).

LIANTS HYDRAULIQUES

Les liants hydrauliques testés sont des LHR de classes N4 et E4 (tableau 3) :

—Photos 1—

Prélèvements de sols à Cizancourt (a) et à Sandillon (b).



—Tableau 1—

Caractéristiques physiques des sols.

Sol	Limon de Cizancourt	Sable limoneux de Sandillon
wn (%)	16,4	5,7
Dmax (mm)	0,063	1
0/63 µm (%)	97	15
VBS (g/100 g de sol sec)	1,92	0,47
Classe GTR	A1/F1	B5/I1

—Tableau 2—

Caractéristiques de compactage et de portance des sols.

Sol	Limon de Cizancourt	Sable limoneux de Sandillon
IPI à wn (-)	17	Non mesuré
w _{OPN} (%)	15,9	9,3
ρ _{dOPN} (t/m ³)	1,75	1,79
wn/w _{OPN} (-)	1,0	0,6
IPI à w _{OPN} (-)	21	40
État hydrique	m	s

—Tableau 3—

Formulations étudiées.

Sol	LHR	Dosage en LHR (%)	Notation
Limon de Cizancourt (C)	N4	2	C2N4
		4	C4N4
	E4	2	C2E4
		4	C4E4
Sable limoneux de Sandillon (S)	N4	2	S2N4
		4	S4N4
	E4	2	S2E4
		4	S4E4

• Le LHR N4, à durcissement normal (selon la norme NF EN 13282-2⁹), est composé majoritairement de laitier activé au clinker.

• Le LHR E4, à durcissement rapide (selon la norme NF EN 13282-1¹⁰), est composé majoritairement de clinker et de filler calcaire.

Le type de liant, du fait de sa composition, aura généralement une importance non négligeable sur les actions et la réactivité avec les sols.

Il est également intéressant de prendre en compte leur composition (présence de chaux, teneur en clinker, type de constituants alternatifs au clinker...) du point de vue de son impact environnemental. En effet, les LHR peuvent présenter l'avantage d'une empreinte carbone plus ou moins réduite, qui s'étend de 169 à 826 kg CO₂eq/tonne de liant en 2025, pour les liants produits par les adhérents de France Ciment.

Si l'apport de liant hydraulique est reconnu pour améliorer la résistance à l'érosion de sols fins¹¹⁻¹², le traitement de sol au liant hydraulique est perçu comme pouvant induire un changement de comportement du matériau, qui se traduirait par une augmentation de sa fragilité et un risque accru de fissuration.

Dans le cas de la réalisation de digues de protection contre les inondations ou les submersions ou de remblais, les objectifs de performances ne nécessitent pas d'obtenir des résistances mécaniques du niveau de celles attendues pour les couches de forme ou d'assise. Ainsi, les dosages choisis ont été volontairement fixés à des dosages faibles par rapport à celui qui serait utilisé pour le réemploi de sol en couche de forme (2 %) et à un dosage plus courant (4 %), afin de tester l'amélioration du comportement vis-à-vis de l'érosion sans pour autant augmenter la raideur, qui pourrait être préjudiciable dans une digue.

ÉTUDE DE TRAITEMENT POUR LE RÉEMPLOI DU SOL EN REMBLAI

Les caractéristiques de compactage et de portance des sols traités au liant hydraulique ont été déterminées (selon les normes NF EN 13286-2¹³ et NF EN 13286-47¹⁴) afin d'évaluer la faisabilité d'un réemploi et d'une mise en œuvre des sols en remblai (tableau 4).

Les caractéristiques de portance immédiate et après immersion permettent d'envisager la mise en œuvre des deux sols en remblai, y compris à faible dosage en LHR. D'autres sujets de mise en œuvre tels que le délai de maniabilité ou le collage des couches devront être regardés.

ÉVALUATION DE L'ÉRODABILITÉ DES SOLS NATURELS ET TRAITÉS AUX LIANTS HYDRAULIQUES

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes confectionnées avec les caractéristiques de compactage suivantes :

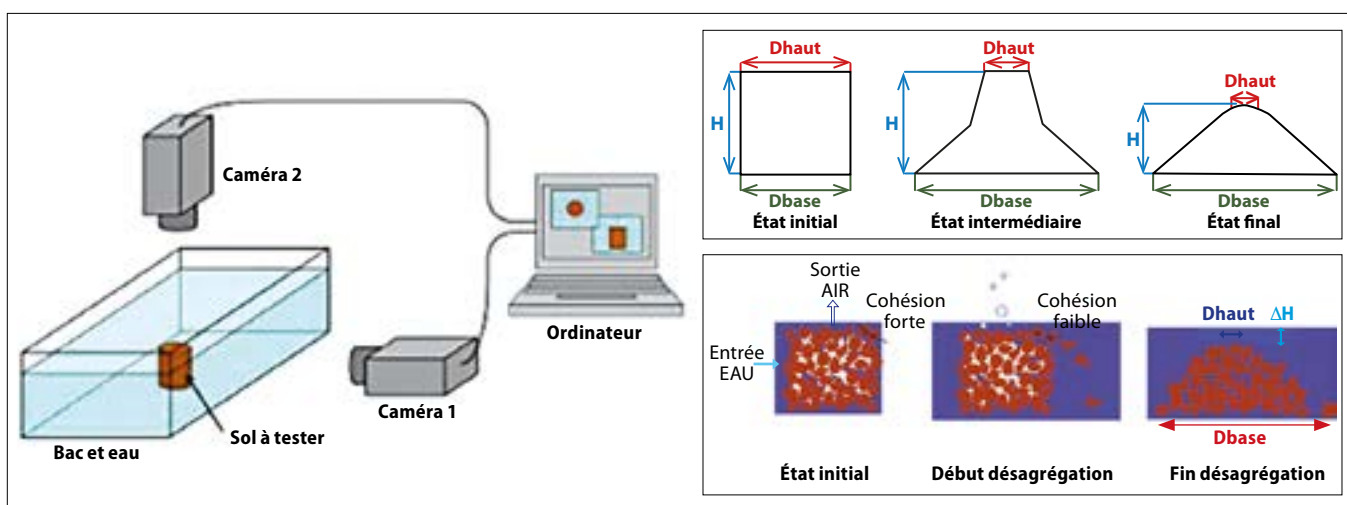
- 98,5% ρ_{dOPN}
- w_{OPN} + 1%

Sol	Limon de Cizancourt (C)			Sable limoneux de Sandillon (S)		
Liant hydraulique	N4					
Dosage en liant hydraulique	2	3	4	2	3	4
w _{OPN} (%)	-	15,5	-	-	12,3	-
ρ _{dOPN} (t/m³)	-	1,74	-	-	1,82	-
IPI à w _{OPN} (-)	-	26	-	-	40	-
CBRi (-)	44	-	85	77	-	173
Liant hydraulique	E4					
Dosage en liant hydraulique	2	3	4	2	3	4
w _{OPN} (%)	-	15,6	-	-	12,6	-
ρ _{dOPN} (t/m³)	-	1,74	-	-	1,82	-
IPI à wOPN (-)	-	30	-	-	41	-
CBRi (-)	48	-	103	105	-	158

-Tableau 4-
Caractéristiques de compactage
et de portance des sols traités
au liant hydraulique.

Figure 4-

Principe de l'essai d'émiettement.



Essai d'émiettement

Cet essai est utilisé pour déterminer le comportement à l'immersion d'un matériau, son potentiel de dispersion (figure 4). Il est réalisé sur une éprouvette cylindrique de 3 cm de diamètre et de 4 cm de hauteur, compactée en 3 couches, avec 10 coups appliqués par couche pour le compactage (ce qui s'apparente à un compactage à l'énergie Proctor normal).

L'éprouvette est immergée dans l'eau après 7 jours de conservation en cure normale (à 20 ± 2 °C, en évitant tout contact de l'éprouvette avec l'air ambiant, pour limiter l'évaporation de l'eau et favoriser les réactions cimentaires entre le liant hydraulique et le sol).

La forme de l'éprouvette est suivie par imagerie pendant une durée de 1h, avec une prise d'image toutes les secondes (soit 3 600 images enregistrées au cours de l'essai).

La résistance à l'immersion du limon de Cizancourt et du sable limoneux de Sandillon est présentée respectivement sur les figures 5 et 6, via des images prises à différents temps au cours de l'immersion. Les deux sols naturels, non traités au LHR, se dispersent très rapidement après moins d'une minute d'immersion dans l'eau (1^{re} ligne des figures).

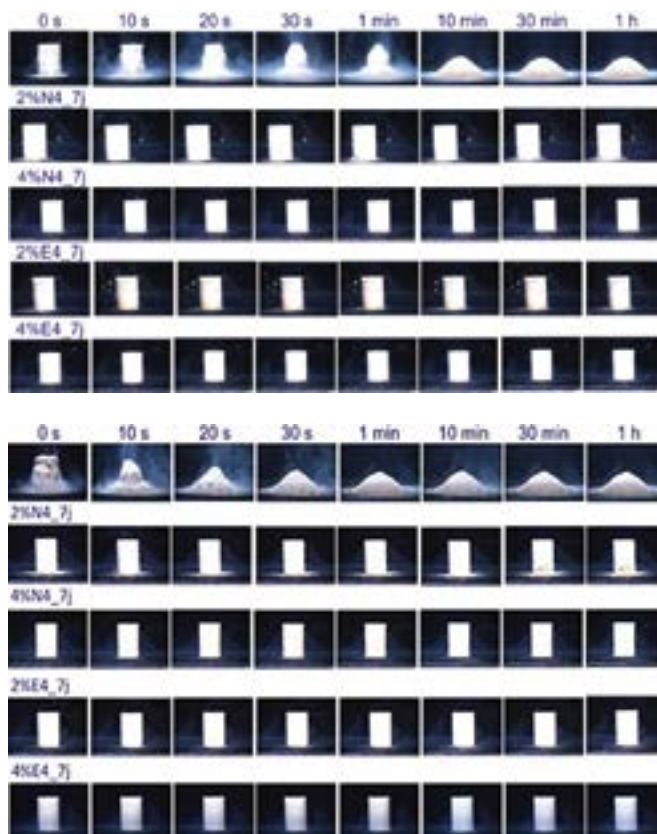
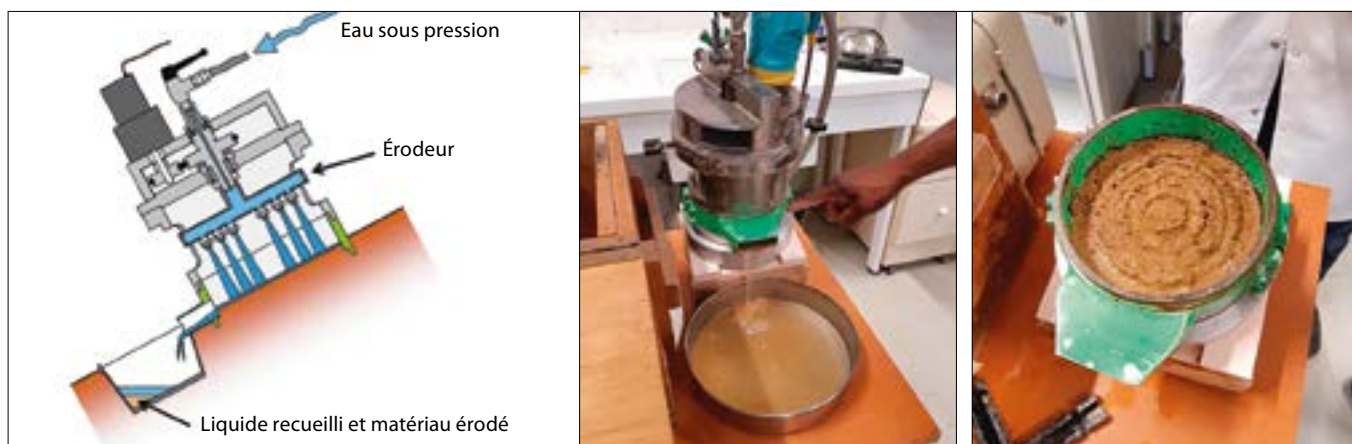


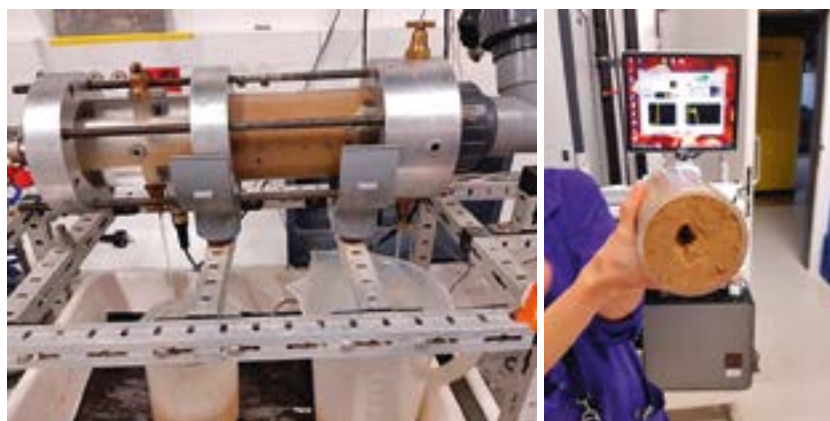
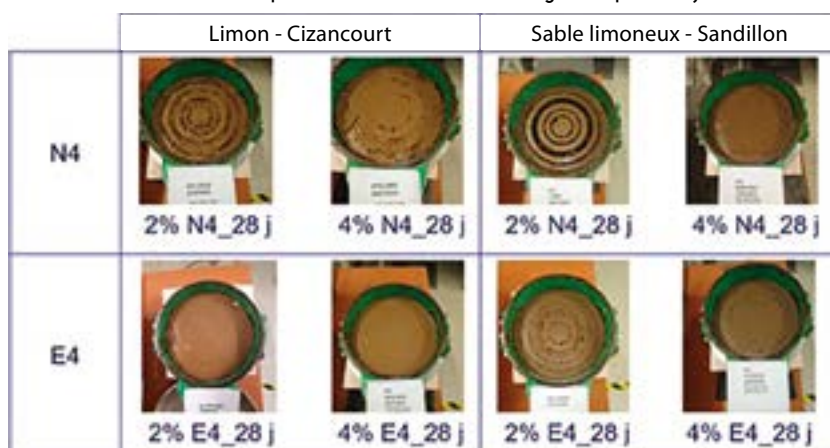
Figure 5-
Résistance
à l'immersion
du limon
de Cizancourt
naturel
(1^{re} ligne)
ou traité
au liant
hydraulique
à 7 jours.

Figure 6-
Résistance
à l'immersion
du sable
limoneux
de Sandillon
naturel
(1^{re} ligne)
ou traité
au liant
hydraulique
à 7 jours.

–Figure 7–
Principe de l'essai MoJET.



–Photos 2–
Résistance à l'érosion de surface des sols traités au liant hydraulique à 28 jours.



–Photos 3–
Principe de l'essai HET.

La résistance à l'immersion est nettement améliorée avec l'ajout de 2 % de LHR, à durcissement normal (N4) ou rapide (E4) (2^e et 4^e lignes des figures), les sols traités à 4 % de LHR ne montrant pas de dispersion après 1 h d'immersion (3^e et 5^e lignes des figures).

Mobile Jets Erosion Test (MoJET)

L'essai MoJET consiste à appliquer, à la surface d'un échantillon de matériau, la pression et l'impact de 6 jets en rotation, avec un débit contrôlé (figure 7).

L'essai est réalisé sur une éprouvette cylindrique de 15 cm de diamètre et de 5 cm de hauteur, compactée en 3 couches, avec 56 coups appliqués par couche (ce qui s'apparente à un compactage à l'énergie Proctor normal), conservée 28 jours en cure normale.

Les essais sont d'abord réalisés avec un débit de 600 ml/min, suffisant pour éroder un sol naturel. Il s'est avéré que ce débit était insuffisant pour éroder les sols traités au liant hydraulique. Le débit a alors été augmenté à 1 200 ml/min (soit $2.10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$) pour déterminer la résistance à l'érosion de surface de ces sols traités.

La sollicitation est maintenue pendant 12 min, temps au cours duquel le sol érodé est recueilli à la sortie de l'érodimètre afin de déterminer la masse de sol érodée en fonction du temps au cours de l'essai et, par calcul, le taux d'érosion du matériau. Par simplification, grâce aux sillons induits par l'impact des jets mobiles, visibles à la surface de l'échantillon en fin d'essai, il est possible d'évaluer si le sol traité au liant hydraulique est plus ou moins résistant à l'érosion de surface, par comparaison visuelle entre les échantillons (photos 2).

Les sillons sont marqués pour les deux sols traités avec 2 % N4. Ils le sont moins sur le sable limoneux traité à 2 % E4 et ne sont quasiment pas visibles sur le limon traité à 2 % E4. Ils ne sont que peu voire pas présents sur les sols traités avec 4 % LHR. Ces résultats concordent avec les résultats des essais d'émiettement (résistance à l'immersion).

Cette augmentation de la résistance à l'érosion externe permet d'envisager un réemploi de ce type de sols traités au LHR en protection externe en talus.

Hole Erosion Test (HET)

L'essai HET consiste à appliquer, à travers un conduit (trou) réalisé au niveau de l'axe longitudinal d'une éprouvette, un écoulement à débit contrôlé, afin d'initier une érosion de conduit, qui se développera au cours de l'essai (photos 3).

La mesure de la turbidité de l'écoulement sortant de l'éprouvette contribue à évaluer la masse de sol érodée. La forme du conduit à la fin de l'essai est moulée avec de la cire avant d'ouvrir l'éprouvette pour observer le développement de l'érosion de conduit au sein du matériau.

L'essai est réalisé sur une éprouvette cylindrique de 7 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur, compactée en 8 couches, avec 10 coups appliqués par couche (ce qui s'apparente à un compactage à l'énergie Proctor normal), conservée 28 jours en cure normale.

Contrairement aux deux essais précédents, l'essai HET est normalisé⁵.

Par simplification, en considérant la forme du conduit au centre de l'éprouvette en fin d'essai, il est possible d'évaluer si le sol traité au liant hydraulique est plus ou moins résistant à l'érosion de conduit, par comparaison visuelle entre les échantillons (photos 4) :

- Les conduits des deux sols traités avec 2 % N4 sont larges et non rectilignes.
- Le conduit du sable limoneux traité à 2 % E4 est élargi par rapport à sa dimension initiale et rectiligne.
- Le conduit du limon traité à 2 % E4 est plus étroit.
- Les conduits des sols traités avec 4 % LHR sont proches de leur forme initiale.

Ces résultats sont cohérents avec ceux des essais précédents, démontrant l'amélioration des caractéristiques d'érodabilité des sols limoneux et sablo-limoneux traités au LHR.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'évaluation de l'érodabilité de deux sols traités avec deux liants hydrauliques a fait l'objet d'un programme d'essais complet, réalisé à l'université Gustave Eiffel (GERS/SRO, Champs-sur-Marne).

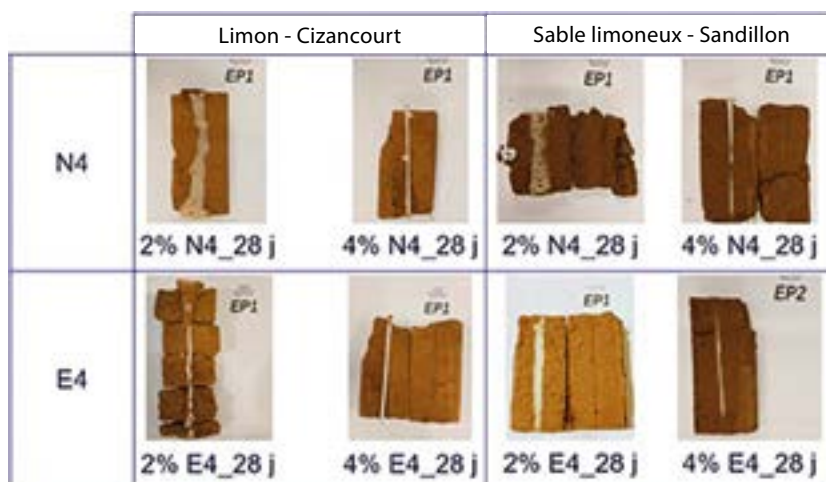
Les sols limoneux et sablo-limoneux sont particulièrement érodables en raison de leur cohésion faible.

L'apport de LHR, même à faible dosage, favorise l'obtention des portances requises pour une mise en œuvre des sols en remblai (IPI) et la garantie de leur insensibilité à l'eau (CBRI).

La résistance à l'immersion des sols est nettement renforcée avec un traitement à 2 % LHR à court terme (7 jours). Les caractéristiques d'érodabilité des deux sols sont améliorées avec 2 % LHR, mais les sollicitations appliquées lors des essais MoJET et HET, sévères, affectent tout de même les matériaux après 28 jours de cure. Si de bons résultats sont constatés, à ce faible dosage, des protections de type couvert végétal herbacé des talus pourront être envisagées en fonction des sollicitations spécifiques à l'ouvrage.

—Photos 4—

Résistance à l'érosion de conduit des sols traités au liant hydraulique à 28 jours.



Les sols traités à 4 % LHR ne sont que peu (N4) voire pas (E4) affectés après 7 et 28 jours de cure. Il est donc possible d'envisager favorablement l'utilisation de matériaux traités aux liants hydrauliques dans des parties d'ouvrages sensibles aux mécanismes d'érosion.

Par ailleurs, l'étude globale s'intéresse au comportement des sols traités aux liants hydrauliques en termes de déformabilité, de ductilité (et de risque de fissuration), de résistance mécanique et de perméabilité, entre 7 et 90 jours, soumis ou non à un vieillissement accéléré. Les résultats complets de l'étude globale seront communiqués ultérieurement, afin d'envisager l'utilisation des matériaux traités aux liants hydrauliques dans la conception des ouvrages en terre selon leur fonction. ■

À retenir

- L'apport de 2 à 4 % de liant hydraulique routier améliore la résistance à l'immersion, la résistance à l'érosion de surface et la résistance à l'érosion de conduit de sols limoneux et sablo-limoneux.
- La variabilité des performances dépend :
 - du LHR utilisé : sa composition exercera une importante influence sur les performances du mélange ;
 - de la nature du sol : les performances du limon sont supérieures à celles du sable limoneux ;
 - du délai de cure.
- L'augmentation de la résistance à l'érosion externe est à valoriser en protection externe de talus d'ouvrages en terre.

RÉFÉRENCES

1. GIEC, « Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse », Contribution des groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer (dir.), 2014.
2. Cerema, *Guide international sur les digues*, 2019.
3. CIRIA, *International Levee Handbook*, 2013.
4. R. Béguin, M. Boucher, « Les essais d'érosion », geophyConsult, Web'Tech des partenaires : « Essais d'érosion et leurs applications », France Dignes, 19 mai 2022.
5. XP P94-065 : « Sols : reconnaissance et essais - Hole Erosion Test - Principe et méthode d'essai en laboratoire pour la détermination des caractéristiques de résistance à l'érosion de conduit », novembre 2023.
6. F. Bertola, S. Nicaise, L. Saussaye, K. Verelst, H. Van Hemert, "Lime treatment for hydraulic structures benefits, challenges, and long-term performance", 5th International Dam World Conference, 13-17 avril 2025, Lisbonne, Portugal.
7. LCPC/Sétra, *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS). Application à la réalisation des remblais et des couches de forme*, « Guide technique », LCPC, 2000.
8. Idirim, *Guide des terrassements des remblais et des couches de forme (GTR)*, Cerema, 2024.
9. NF EN 13282-2 : « Liants hydrauliques routiers - Partie 2 : liants hydrauliques routiers à durcissement normal - Composition, spécifications et critères de conformité », septembre 2015.
10. NF EN 13282-1 : « Liants hydrauliques routiers - Partie 1 : liants hydrauliques routiers à durcissement rapide - Composition, spécifications et critères de conformité », mai 2014.
11. L. Saussaye, G. Potié, V. Berche, D. Mercadier, R. Benot, A. Mehenni, C. Alléon, « Réalisation de dispositif d'étanchéité complet par traitement in situ de limon et de craie : suivi à long terme des propriétés du dispositif », JNGG, 25-28 juin 2024, Poitiers.
12. L. Saussaye, G. Potié, V. Berche, D. Mercadier, R. Benot, A. Mehenni, C. Alléon, « Étude de la réalisation de dispositif d'étanchéité complet par traitement in situ des matériaux : performances et retour d'expérience », Colloque Dignes, 27-29 mars 2024, Aix-en-Provence.
13. NF EN 13286-2 : « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 2 : méthodes d'essai de détermination en laboratoire de la masse volumique de référence et de la teneur en eau - Compactage Proctor », décembre 2010.
14. NF EN 13286-47 : « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 47 : méthodes d'essai pour la détermination de l'indice portant californien (CBR), de l'indice portant immédiat (IPI) et du gonflement linéaire », novembre 2021.

TRAITEMENT DES SOLS AUX LIANTS HYDRAULIQUES

APPLICATION À LA CONSTRUCTION D'UN BATARDEAU AU MALAWI

Pour reconstruire rapidement le barrage hydroélectrique de Kapichira au Malawi, gravement endommagé par le cyclone Ana en 2022, une solution innovante a été mise en œuvre : la construction d'un batardeau en sable ciment. Ce projet, mené dans des conditions climatiques et logistiques difficiles, illustre le potentiel du traitement des sols aux liants hydrauliques, une technique habituellement réservée aux infrastructures routières.

Vue aérienne du batardeau
en cours de finition.



Le barrage hydroélectrique de Kapichira est situé au Malawi sur la rivière Shire. Il est exploité par la société Egenco, principal producteur d'énergie du pays. De fortes pluies, lors du passage du cyclone Ana en janvier 2022, ont entraîné la rupture de la partie droite du barrage ainsi que celle d'une prise d'eau d'irrigation en cours de construction (photos 1). Cette prise d'eau est un élément clé du programme d'aménagement pour l'augmentation de la production agricole lancé par les autorités du Malawi sous le nom de Shire Valley Transformation Program (SVTP).

Cet article présente l'enchaînement des opérations de conception et de construction d'un batardeau en sable ciment pour assurer le rétablissement de la production d'électricité, la protection de la section endommagée du barrage et la reconstruction des parties détruites. Il constitue un exemple concret du potentiel de transfert des techniques et savoir-faire du secteur routier vers le secteur des ouvrages hydrauliques.

CONTEXTE

Au cours des soixante dernières années, l'utilisation des sols traités s'est largement répandue dans le domaine des infrastructures de transport. En revanche, leur emploi dans les ouvrages hydrauliques demeure limité. Cette situation peut s'expliquer par la spécificité des enjeux propres à ces ouvrages et surtout par le manque de données disponibles sur les performances hydrauliques des sols traités.

Les travaux menés depuis une vingtaine d'années ont en partie comblé ce déficit. Ces avancées ont conduit la Commission internationale des grands barrages (CIGB) à publier, en 2022, le Bulletin 195 intitulé *Barrages en sol cimenté*¹ (sol cimenté = sol traité avec un matériau ayant des propriétés liantes, comme la chaux et les liants hydrauliques), qui fait le point sur l'état actuel des connaissances et propose des recommandations pour l'utilisation de ces matériaux dans la

AUTEURS

Daniel Puiatti
Consultant
DPST Consulting

Michel Lino
Expert barrages
et hydroélectricité
Président honoraire
de la Commission internationale
des grands barrages

-Photos 1-

Aperçu du barrage de Kapichira avant (a) et après (b) le passage du cyclone Ana.



construction de barrages et de digues. Ce document s'appuie notamment sur le Bulletin 54 publié en 1986 par la même commission².

En février 2022, Michel Lino a mené, à la demande de la Banque mondiale, une mission d'expertise sur le site de Kapichira pour évaluer les dommages du cyclone et proposer des solutions. L'objectif était double : élever rapidement le niveau d'eau de la retenue afin de rétablir la production d'électricité et protéger la section endommagée du barrage en vue de sa reconstruction ainsi que de celle de la prise d'eau d'irrigation. Toutes les parties ont reconnu la nécessité de construire un batardeau. Une étude comparative a été réalisée, tenant compte à la fois des difficultés d'acheminement de matériels en relation avec l'enclavement du pays ainsi que de la présence sur le site d'importants dépôts de sédiments sableux et d'arènes granitiques. Cette analyse a conduit à recommander l'exploitation des ressources locales en construisant un batardeau en sable traité au ciment, en s'inspirant des recommandations du Bulletin 195 et en s'appuyant sur les conseils d'un expert en barrages et d'un expert en matériaux traités. Les candidatures de David Cameron-Ellis (Afrique du Sud) pour les barrages et de Daniel Puiatti (France) pour les matériaux traités ont été retenues. Leurs interventions se sont échelonnées sur plusieurs missions, à la fois sur place et à distance, entre août 2022 et juillet 2023.

CONCEPTION DU BATARDEAU

La conception du batardeau a été confiée au bureau d'ingénierie sud-coréen KRCC, déjà présent sur place pour la conception et la maîtrise d'œuvre du projet d'irrigation (photo 2).

Initialement, il s'agissait de réaliser un batardeau résistant à la surverse, de structure zonée avec un noyau en sable non traité encapsulé dans une carapace en sable ciment, le ciment s'étant immédiatement imposé face à la chaux du fait de la quasi-inexistence de fines argileuses dans le sable. Ce modèle a déjà été éprouvé avec succès en France lors de la réalisation d'un batardeau sur le site du barrage de Pannecière. L'imminence de la

saison des pluies a conduit à choisir une structure homogène, entièrement en sable ciment, capable de résister sans dommages conséquents à une surverse susceptible de se produire en cours de construction (figure 1).

Caractéristiques principales du batardeau de Kapichira :

- Longueur : 362 m
- Hauteur maximale : 14 m
- Largeur en crête : 6 m
- Pentés de talus : H = 3 ; V = 2

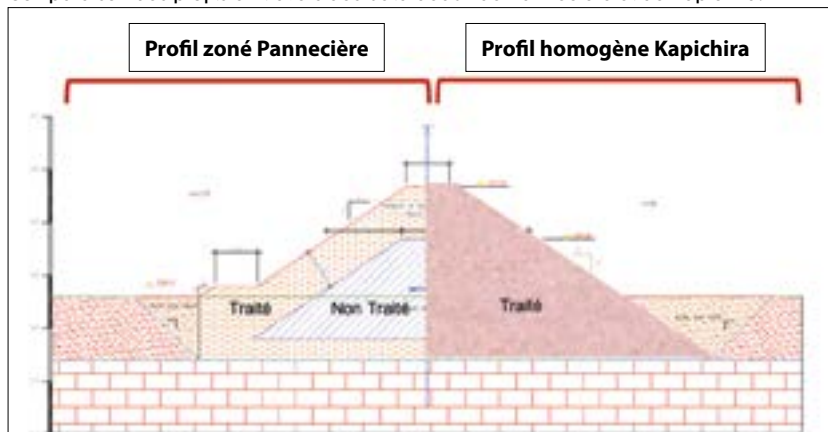
-Photo 2-

Vue aérienne de l'emplacement du batardeau de Kapichira.
1 : Barrage. 2 : Rivière Shire.
3 : Batardeau. 4 : Prise d'eau à reconstruire. 5 : Canal d'irrigation. 6 : Partie du barrage à reconstruire



-Figure 1-

Comparaison des profils en travers des batardeaux de Pannecière et de Kapichira.



CHOIX DES MATÉRIAUX

La campagne de sondages réalisée dans les dépôts du bassin à l'amont du barrage a confirmé la présence de sédiments sableux, mais avec intercalation de couches de sols fins plastiques, riches en matière organique.

Le sable était un sable roulé 0/2 mm, quasi homogène, avec un très faible pourcentage de fines (passant à $75\ \mu\text{m}$ < 4 %). En revanche, il contenait une forte proportion de micas et de matière organique agglomérée sous forme de boulettes après extraction. Les premiers essais de traitement au ciment s'étant révélés décevants, il a été décidé de se tourner vers un gisement voisin composé d'arène granitique issue d'une altération en place (photo 3).

La figure 2 présente les courbes granulométriques des deux gisements : celle de l'arène granitique est plus étalée (sable 0/10 mm) que celle du sable alluvionnaire, avec une proportion de fines légèrement plus élevée (5,5 % < passant à $75\ \mu\text{m}$ < 7,5 %), une teneur en micas visuellement plus faible et une matière organique absente.

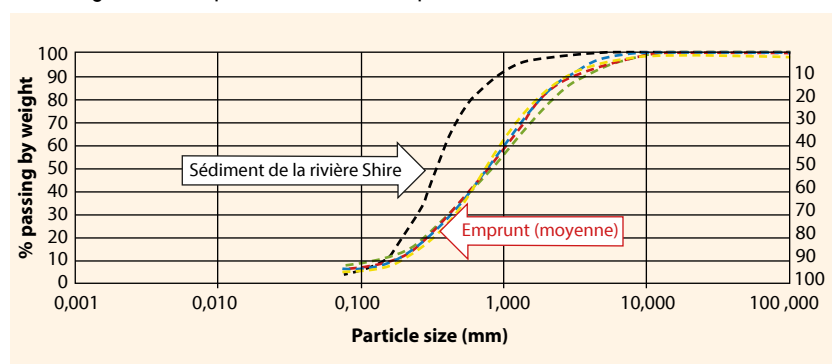
—Photo 2—

Arène granitique d'altération en place retenue pour le traitement.



—Figure 2—

Courbes granulométriques des matériaux disponibles sur le site.



FOURNITURE DU CIMENT

Le principal fournisseur de ciment au sud du Malawi est Huaxin, filiale du groupe Lafarge-Holcim, dont les installations sont à Blantyre, à 70 km du chantier. Huaxin fournissant déjà un ciment de type CEM II 32,5 N pour le béton du projet d'irrigation, ce même ciment a été retenu pour éviter les erreurs de livraison. Selon la fiche technique du producteur, sa composition est la suivante : 70 % de clinker, 25 % de pouzzolane, 5 % de gypse.

D'un point de vue logistique, le producteur annonçait une cadence de livraison en vrac de 300 t/j pour les besoins exclusifs de l'atelier de traitement. Cette cadence n'a pas toujours été respectée, ce qui a provoqué des arrêts de chantier malgré une capacité de stockage en silos sur site de 240 t.

ÉTUDES DE TRAITEMENT

Les travaux de construction du batardeau ont été attribués à l'entreprise portugaise Conduril Engenharia, par ailleurs adjudicataire du chantier du programme d'irrigation et donc déjà présente sur le site. Le laboratoire de l'entreprise, bien que majoritairement dédié aux applications béton, disposait d'un équipement adapté aux études de sols. Il pouvait également conserver les éprouvettes à l'air ou en immersion dans l'eau, à température contrôlée. Il a donc été décidé d'exploiter au maximum les capacités de ce laboratoire, principalement pour les essais d'identification et de compactage, ainsi que pour les mesures de résistance à la compression d'éprouvettes de sol traité confectionnées dans des moules CBR.

La résistance à la compression simple (R_c) des matériaux traités, bien que non directement corrélée à la résistance à l'érosion, constitue un indicateur utile. Toutefois, dans le cas spécifique du projet, compte tenu des enjeux, de la nature des matériaux disponibles et des délais de réalisation, elle ne permettait pas, à elle seule, de choisir une formulation avec un niveau de confiance suffisant. C'est pourquoi deux études performanciennes ont été réalisées :

- l'une sur chantier, portant sur la résistance en compression simple (R_c) ;
- l'autre en France, portant sur la résistance à l'érosion.

Afin de compenser l'absence de correcteurs granulométriques de qualité à proximité du chantier, les études de résistance en compression simple ont été effectuées en appliquant des dosages en ciment élevés (6, 8 et 10 %), avec pour définition du dosage :
 Dosage en ciment (%) = Masse de ciment / Masse de sol sec

Les références de compactage pour les études de traitement ont été établies sur le matériau traité avec 8 % de ciment, compacté à l'énergie Proctor normal dans des moules CBR.

Par souci de simplification, les valeurs obtenues ont été adoptées quel que soit le dosage en ciment (**figure 3**) :

- $\rho_{d\text{OPN}} = 2,025 \text{ t/m}^3$
- $w_{\text{OPN}} = 9,3 \%$

Du fait de l'imminence de la saison des pluies, les études ont été accélérées en chauffant de manière contrôlée les éprouvettes traitées à une température de 40 °C. Les lois régissant les réactions sont complexes, mais des essais comparatifs réalisés sur site ont permis d'établir une correspondance approximative entre les performances à 4 jours dans l'air à 40 °C et 14 jours dans l'air à 20 °C. L'augmentation des performances constatée au-delà de 4 jours de cure à 40 °C, y compris après immersion dans l'eau, a conduit à considérer cette approche comme un moyen de s'assurer de la poursuite des réactions à long terme, aboutissant à des résistances finales supérieures à celles mesurées à 14 jours (**figure 4**). Il convient de noter que l'élanement (hauteur/diamètre) de l'éprouvette CBR est de 0,76, ce qui conduit à des résistances surévaluées par rapport à celles mesurées sur cylindres normalisés d'élanement 2,0. Des mesures comparatives effectuées en France ont contribué à établir la correspondance suivante :

$R_c (\text{élanement } 2) = \frac{1}{2} R_c (\text{élanement CBR})$

En se fiant à cette règle approximative, il a été considéré que $R_c (\text{élanement } 2)$ se situait entre 2 et 3 MPa, selon le dosage en ciment, après 14 jours de cure à l'air à 20 °C. Ces valeurs ont été jugées acceptables par l'expert barrages.

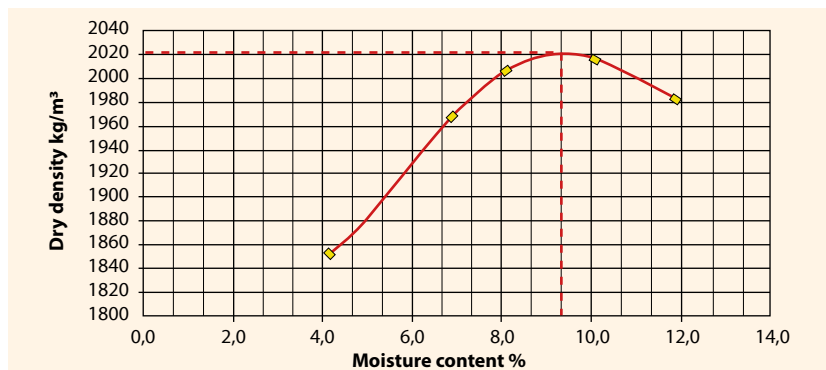
Les essais d'érosion ont été réalisés en France sur des matériaux du site (arènes granitiques et ciment) expédiés au Cerema d'Angers qui a confectionné les éprouvettes. Celles-ci ont été testées chez Géophysconsult, qui dispose d'un laboratoire spécialisé dans la réalisation des essais JET (*Jet Erosion Test*) pour mesurer la résistance à l'érosion de surface et des essais HET (*Hole Erosion Test*) pour mesurer la résistance à l'érosion interne. La gamme des dosages en ciment a été étendue (0, 4, 5, 6, 8, 10 %). Comme il fallait s'y attendre, le sable non traité s'est avéré non résistant à l'érosion de surface. En revanche, malgré une pression d'eau élevée (environ 1 000 Pa), aucune érosion n'a été observée sur les éprouvettes traitées, quel que soit le dosage en ciment. Cependant, les éprouvettes traitées à 4 et 5 % de ciment se sont révélées friables lors des manipulations, contrairement à celles contenant 6 % ou plus de ciment. Le même constat a été fait lors des essais d'érosion interne :

- Le sable non traité s'érode en quelques secondes.
 - Le sable traité n'est pas érodable, quel que soit le dosage en ciment (**photos 4**). Mais là aussi, les éprouvettes traitées avec 4 et 5 % de ciment se sont révélées friables lors des manipulations.
- Les mesures de perméabilité ont donné les résultats suivants :

- non traité : $k = 1,18 \times 10^{-6} \text{ m/s}$
- traité : $k < 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$

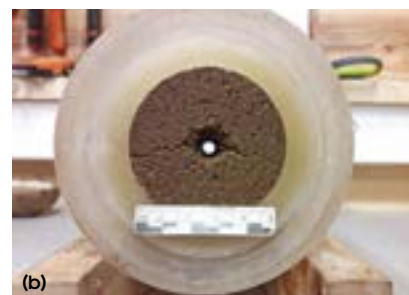
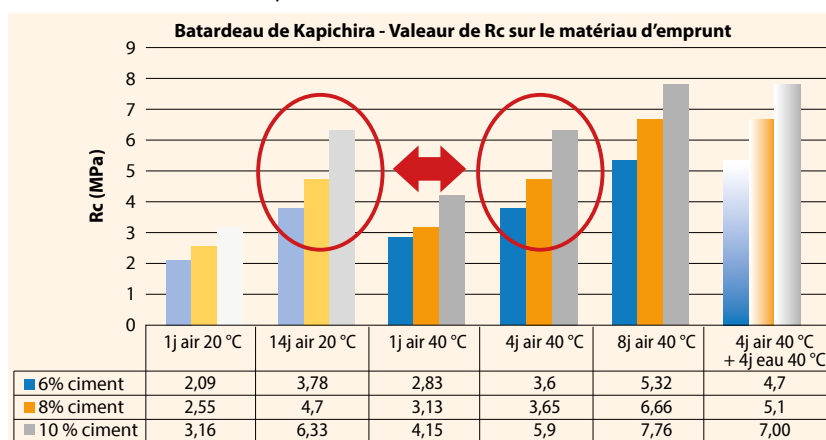
—Figure 3—

Courbe Proctor normal du sable traité à 8 % de ciment.



—Figure 4—

Valeurs de R_c mesurées sur éprouvettes CBR.



—Photos 4—

Éprouvettes après l'essai HET :
(a) non traité ; (b) traité à 8 % de ciment.

En conclusion des études accélérées, les décisions suivantes ont été prises concernant les dosages en ciment à appliquer :

- corps du batardeau : 7 % de ciment (6 % + 1 % pour compenser la dispersion à la mise en œuvre) ;
- base du batardeau (sur 1 m d'épaisseur) et contre les appuis : 10 % de ciment (7 % + 3 % pour compenser les difficultés de compactage sur la fondation rocheuse irrégulière).

MÉTHODOLOGIE D'EXÉCUTION

La méthodologie d'exécution a été définie en collaboration avec l'entreprise, qui avait déjà réalisé des chantiers d'élargissement de chaussée par traitement en place dans les pays voisins et qui disposait du matériel suivant :

- un épandeur de liant tracté Streumaster SW16 TC, équipé d'une cuve de 16 m³, de type épandage volumétrique asservi à la vitesse d'avancement avec contrôle pondéral ;
- un malaxeur à arbre horizontal Wirtgen WR2000S, de 200 cm de largeur de malaxage et 50 cm de profondeur maximale. Ce malaxeur était équipé d'injecteurs à eau dans la chambre de malaxage avec contrôle de débit assurant le mélange du sol, du ciment et de l'eau d'ajustement en une seule opération.

L'étalonnage et le réglage de l'atelier de traitement ont été faits à l'emprunt situé à 500 m environ du batardeau. Après épandage du liant en surface, le malaxage, avec arrosage dans la cloche de malaxage, n'a nécessité qu'un seul passage pour obtenir la mouture et la qualité requises. Le malaxage a été volontairement réglé sur une profondeur de 30 cm pour assurer une bonne adéquation entre les cadences de production et celles de mise en œuvre.

Le contraste de couleur entre la couche traitée et le matériau in situ non traité s'est avéré très utile lors du chargement à la pelle hydraulique ou au chargeur des matériaux traités dans les engins de transport (tombereaux articulés et camions 6 roues). En cas de doute, un essai comparatif à la phénolphtaléine permettait de déterminer instantanément la limite entre les matériaux (photo 5).

Un remblai d'essai de 1,20 m de haut en sable traité à 7 % de ciment, monté par couches de 30 cm après compactage, a été réalisé, hors emprise du batardeau, pour définir la méthodologie de mise en œuvre. Idéalement, un petit bulldozer à tuiles plates pour le régalaage aurait été préférable, mais il n'a pas été possible d'en obtenir un et, sur suggestion de l'entreprise, il a été fait appel à une niveleuse qui a ensuite été utilisée pendant toute la durée des travaux. Le remblai a aussi été utilisé pour la mise au point de la technique de préparation de la surface des couches avant recouvrement, à savoir : balayage, pulvérisation d'eau, épandage de ciment en poudre à raison de 500 g/m².

—Photo 5—

Effets de la phénolphtaléine sur les parois de la tranchée.
Rouge : matériau traité. Pas de coloration : matériau non traité.



Les essais de compactage ont été réalisés à l'emprunt à l'aide d'un compacteur à cylindre lisse vibrant CAT CS 683E (poids total : 18,8 t, dont 13,3 t sur le cylindre vibrant, de largeur 2,134 m) et d'un compacteur à pneus CAT PS 360C lesté à l'eau (1,93 t/roue). L'objectif à atteindre était $pd \geq 95 \% pd_{OPN}$. Des fissures transversales étant apparues après le passage du cylindre vibrant, celui-ci n'a été utilisé que pour aplanir la surface de la couche foisonnée, en limitant le nombre de passes à deux sans vibration, avant d'effectuer 14 passes avec le compacteur à pneus.

À l'issue de ces opérations, les consignes principales suivantes ont été proposées aux responsables du projet (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprise), qui les ont validées :

- Traitement en place à l'emprunt par couches de 30 cm.
- Traitement au remblai interdit pour écarter le risque d'inter-couches non traitées.
- Travail de nuit interdit.
- Dosage en ciment : 10 % pour la base, 7 % pour le corps du remblai.
- Teneur en eau à la fabrication : entre 11 et 13 %.
- Teneur en eau à la mise en œuvre : entre 10 et 12 %.
- Épaisseur maximale des couches foisonnées avant compactage : 34 cm.
- Compactage : 2 passes de cylindre lisse non vibrant + 14 passes de rouleau à pneus.
- Épaisseur des couches compactées : entre 27 et 30 cm.
- Délai maximum entre le début du malaxage et la fin du compactage : 2 heures.
- Pententes transversales de la plateforme en toit : 1 % vers l'amont et 1 % vers l'aval de part et d'autre de l'axe longitudinal.
- Surlargeur de compactage : 50 cm de part et d'autre de la plateforme.
- Retaillage des talus inutile.
- Humidification permanente de la plateforme compactée.
- Préparation de surface avant recouvrement : nettoyage par soufflage, pulvérisation d'eau, saupoudrage de 500 g/m² de ciment pour favoriser le collage entre couches.
- Reprise après interruption : découpe verticale du bord des couches et saupoudrage de ciment sur la face coupée avant la reprise.

— CONTRÔLES QUALITÉ —

Les consignes relatives à l'organisation des contrôles de la qualité des matériaux traités ont été définies en accord avec le maître d'œuvre et l'entreprise. Elles ont été accompagnées d'actions de formation à destination des encadrants du personnel d'exécution et des surveillants de travaux avec remise de consignes écrites en anglais et en portugais.

La distance entre l'atelier de production des matériaux traités à l'emprunt et l'atelier de mise en œuvre sur le batardeau étant d'environ 500 m, l'entreprise a structuré son contrôle interne en trois équipes distinctes :

- Production : contrôle du dosage en ciment par pesées de bacs de 0,25 m² (en plus des informations transmises en cabine), de la teneur en eau avant et après malaxage (par séchage à la poêle), de la profondeur de malaxage (par tranchées dans le matériau foisonné) ; surveillance visuelle de la qualité du malaxage et de la bonne exécution du chargement dans les engins de transport.
- Mise en œuvre : surveillance visuelle du compactage et de la bonne application des consignes ; contrôle de la densité et de la teneur en eau à l'aide d'un nucléodensimètre, de l'épaisseur des couches à l'aide de piquets repères ; prélèvements quotidiens de sable traité.
- Laboratoire : mesures de teneur en eau à l'étuve des prélèvements et confection d'éprouvettes compactées à l'énergie Proctor normal dans des moules CBR pour mesures de Rc après 1, 7, 14 et 28 jours de cure à l'air à 20 °C.

RÉALISATION DES TRAVAUX

La préparation de la fondation a pris du retard en raison de conditions d'exécution difficiles sur un support rocheux irrégulier. Ces difficultés ont eu pour conséquence un décalage du calendrier de construction du remblai en sable traité, qui s'est déroulée de décembre 2022 à juillet 2023. Une partie des travaux a donc été réalisée en pleine saison des pluies. Celle-ci s'étant montrée plus clémente qu'en 2022, il n'y a pas eu de surverse au-dessus du batardeau en cours de construction.

Plus de 100 000 m³ de sable traité ont été produits et mis en œuvre, avec une cadence journalière maximale comprise entre 800 et 1 000 m³. Les interruptions observées étaient principalement dues à des contraintes de maintenance des matériels, aux conditions météorologiques et aux ruptures d'approvisionnement en ciment et en carburant.

Les **photos 6** illustrent les séquences de construction du batardeau.

Les principales difficultés rencontrées pendant les travaux se sont manifestées à la mise en œuvre.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

—Photos 6—

Séquençage des travaux :

- (a) Épandage du ciment.
- (b) Humidification et malaxage.
- (c) Matériau après malaxage.
- (d) Chargement.
- (e) Nettoyage de la surface.
- (f) Approvisionnement.
- (g) Régalaage.
- (h) Compactage.

Elles étaient dues à la fois à la nature du matériau, à des dérives dans l'application des consignes, à l'usage inapproprié de certains matériels et au manque d'expérience du personnel. Celui-ci, bien que faisant preuve de bonne volonté, se trouvait parfois démuné face à une technique nouvelle pour lui. Le délai imposé de 2 heures entre le début du malaxage et la fin du compactage a pu être respecté grâce à la sensibilisation des responsables à la nécessité d'adapter correctement les cadences de production aux rythmes plus lents de mise en œuvre.

Malgré un dosage en ciment élevé (7 % dans le corps du remblai), le matériau était friable en surface sous l'effet des manœuvres des tombereaux articulés et surtout des camions 6 roues sur la plateforme compactée. Il a fallu sensibiliser le personnel et multiplier les rampes d'accès pour limiter au maximum les manœuvres, voire, lorsque c'était possible, interdire les demi-tours en imposant des marche arrière (photo 7). Le nettoyage par air comprimé de la surface avant recouvrement s'est avéré une obligation pour évacuer les poussières.

Il est très vite apparu qu'une conduite inadaptée de la niveleuse provoquait par endroits un laminage en fines couches dont la mauvaise tenue sous le passage des compacteurs était préjudiciable à la qualité de l'ouvrage. Des instructions ont été données au conducteur de la niveleuse en lui demandant de concentrer son attention sur le respect de l'épaisseur des couches plutôt que sur la précision du réglage. D'après les contrôles qualité de l'entreprise, toutes les densités dépassaient l'objectif de 95 % de la densité maximale Proctor normal, tandis que les teneurs en eau variaient entre 7,5 et 12,5 % par rapport à un objectif entre 10 et 12 %. Les valeurs de résistance à la compression après 28 jours de cure à l'air à 20 °C mesurées sur des prélèvements compactés en laboratoire étaient en moyenne égales à 2 MPa après conversion en équivalent d'éprouvettes d'élancement 2. Les valeurs faibles correspondaient majoritairement à de faibles valeurs de teneur en eau de certains prélèvements.

—Photo 7—

Aperçu de la mise en œuvre du sable traité et de l'emplacement des quatre rampes d'accès.



À chaque passage des experts, des rappels ont été faits en insistant principalement sur la préparation de la surface et la qualité des reprises après interruption. Des points sensibles ont été identifiés, tels que le compactage aux appuis, en courbe et en bordure de talus malgré la sur largeur de sécurité systématique d'au moins 50 cm de chaque côté.

Il est intéressant de noter que, sur ce chantier réalisé sur 8 mois, d'abord exposé à la saison des pluies puis à une période de sécheresse avec des variations de température journalières moyennes de 10 °C et soumise à des vents desséchants, aucune fissure de retrait n'a été observée à la surface des couches.

CONCLUSION

Les recommandations du Bulletin 195 de la CIGB ont été particulièrement utiles pour la conception et la réalisation du remblai en sable traité au ciment du batardeau de Kapichira. Sa mise en œuvre a été suivie par la mise en place de pieux sécants pour assurer l'étanchéité aux appuis, au niveau du contact avec le terrain naturel sableux en rive droite ainsi qu'au niveau du contact avec le barrage lui-même côté gauche.

La mise en œuvre de cet ouvrage a démontré la polyvalence de la technique du traitement des sols, utilisable tant pour les infrastructures de transport que pour les ouvrages hydrauliques, à condition de respecter certaines précautions ou d'apporter les adaptations nécessaires :

- Contrairement aux techniques faisant appel à des procédés d'élaboration des matériaux (concasage, criblage, recomposition...), c'est le matériau qui impose ses caractéristiques à l'ingénieur. Ce dernier doit donc faire preuve d'adaptation. Pour cela, il a besoin de temps pour faire les études nécessaires (reconnaissance et sélection du ou des gisements, identification des matériaux, études de formulation en laboratoire...), qui peuvent s'étaler sur 4 à 5 mois compte tenu des délais de cure usuels pour les éprouvettes de sol traité. Ces délais ne pouvaient pas être respectés en raison de l'urgence de la situation à Kapichira. Il a fallu déroger à la règle en adoptant une procédure accélérée par chauffage des éprouvettes. Bien qu'elle ait donné des résultats satisfaisants, cette pratique demande une bonne connaissance des réactions sol-liant et de leur cinétique, ce qui n'est pas acquis par tous. Il est donc préférable de respecter la méthodologie classique et les délais d'études habituels.

- Une autre particularité vient de ce que le traitement de sol se fait majoritairement in situ : épandage du liant en surface, malaxage avec un malaxeur rotatif mobile... Cette pratique n'est pas courante dans le domaine des ouvrages hydrauliques. Grâce aux améliorations récentes en

matière de technologie et d'aide à la conduite, des niveaux de qualité remarquables peuvent être atteints à condition de disposer du bon matériel, réglé correctement et piloté par des opérateurs expérimentés. À Kapichira, l'entreprise réunissait l'ensemble des conditions et il n'y a eu aucune difficulté notable à faire respecter les consignes au niveau de l'atelier de fabrication.

- Les principales difficultés se sont concentrées à la mise en œuvre : respect de l'épaisseur des couches, compactage, qualité de la préparation de la surface avant recouvrement et des reprises après interruption... En phase de développement, une formation de tous les acteurs (maître d'œuvre et entreprise) est indispensable, accompagnée de la remise de consignes écrites et d'un suivi de leur application. C'est certainement le point le plus délicat de la technique qui justifie, entre autres, l'obligation du traitement à l'emprunt ou sur une plateforme dédiée, et donc l'interdiction de traiter directement sur l'ouvrage.

Le chantier de Kapichira, réalisé dans un contexte particulier en termes de matériaux, de délais, de conditions météorologiques, de difficultés d'approvisionnement des produits et de manque d'expérience des intervenants, a été riche d'enseignements. Certains, comme le besoin d'explications et de formation, ont été traités directement sur le site avec des retombées positives immédiatement perceptibles. D'autres demandaient un temps d'exploitation et de réflexion. En particulier, il est apparu qu'au niveau de l'organisation des études (conception, reconnaissance, formulation...) et des préconisations de travaux, maître d'œuvre et entreprise étaient parfois démunis, le Bulletin 195 ne permettant pas de combler certaines de ces lacunes. Cela démontre que le développement d'une nouvelle technique requiert un accompagnement méticuleux pour éviter des erreurs critiques.

Ce constat a été soumis et débattu au sein du Comité français des barrages et réservoirs (CFBR), auquel il a été suggéré d'élaborer un guide technique destiné aux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre portant sur la définition des études et la prescription des travaux pour des ouvrages en sols traités. On peut espérer que ce document, désormais disponible sur le site du CFBR, devienne un compagnon de route incontournable, représentant le minimum attendu pour une technique routière souhaitant élargir son champ d'application³. ■

À retenir

- À la suite de la rupture partielle d'un barrage hydroélectrique au Malawi en 2022, il a été décidé de construire un batardeau en sable ciment en s'inspirant des recommandations du Bulletin 195 *Barrages en sol cimenté* de la Commission internationale des grands barrages (CIGB), afin de reconstruire les parties détruites.
- La conception a été confiée au bureau d'ingénierie sud-coréen KRCC et la construction à l'entreprise portugaise, Conduril Engenharia, tous deux déjà présents sur place.
- Les matériaux disponibles étaient une arène granitique et un ciment CEM II 32,5 N produit sur place.
- Compte tenu des délais très serrés, les études de résistance en compression ont été réalisées au laboratoire de l'entreprise selon une procédure accélérée en soumettant les éprouvettes à des cures à 40 °C. Les études de résistance à l'érosion ont été effectuées en France au laboratoire de Géophyconsult. Elles ont conduit à préconiser un dosage de 7 % de ciment pour le corps de remblai.
- Le traitement a été fait in situ, à l'emprunt, avec un atelier performant composé d'un épancheur Streumaster et d'un malaxeur Wirtgen. La mise en œuvre a fait l'objet d'une vigilance particulière ponctuée par des actions de formation du personnel d'exécution.
- Cette expérience a mis en évidence la nécessité d'accompagner, aussi étroitement que possible, le développement d'une technique inhabituelle dans un domaine d'application donné. Elle a conduit à la publication récente d'un document technique sur la définition des études et la prescription des travaux, disponible sur le site de la Commission française des barrages et réservoirs (CFBR).

RÉFÉRENCES

1. CIGB, *Barrages en sol cimenté*, Bulletin 195, 2022.
2. CIGB, *Soil-cement for embankment dams*, Bulletin 54, 1986.
3. CFBR, *Sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application aux ouvrages hydrauliques - Définition des études et prescription des travaux*, 2025.

MESURER ET RÉDUIRE L'EMPREINTE CARBONE DES TERRASSEMENTS

La réduction de l'empreinte carbone des projets d'infrastructures devient une priorité, notamment pour la phase des terrassements, responsables d'une part significative des émissions des grands chantiers. Le projet TERCO2, mené par Egis et ses partenaires, a établi des facteurs d'émissions pour chaque activité de terrassement et comparé l'impact carbone des solutions techniques courantes. Ses conclusions révèlent des leviers concrets pour limiter les émissions, comme l'optimisation des transports ou la réduction des traitements à la chaux.

Chantier de terrassement de l'autoroute Chichaoua-Argana au Maroc.



© EGIS / JOCELYN BOUCHUT

Dans un contexte de réchauffement climatique, la nécessité de réaliser des infrastructures moins émettrices en gaz à effet de serre (GES) s'impose. Ceci est notamment valable pour les terrassements, qui constituent un poste important d'émissions carbone lors de la construction de grands projets d'infrastructures. Or, pour réduire les émissions carbone des terrassements, il faut d'abord savoir évaluer et comparer l'empreinte carbone des différentes solutions techniques usuelles.

Le projet TERCO2 (Empreinte carbone des stratégies de terrassement) est un projet de recherche appliquée mené par Egis en 2022, en partenariat avec les entreprises Valérian (groupe Spie Batignolles) et Forézienne (groupe Eiffage), avec le co-financement de la fondation Ferec. Ses objectifs étaient d'établir les facteurs d'émissions de chaque activité de terrassement, puis de comparer l'empreinte carbone

de solutions techniques classiques de terrassement et de traitement des sols.

CALCUL DE L'EMPREINTE CARBONE D'UN PROJET

Pour rappel, le calcul de l'empreinte carbone d'un projet se fait à partir de la formule présentée en **figure 1**.

Cette formule est similaire à celle de l'établissement du coût d'un projet, les prix unitaires étant remplacés par les facteurs d'émissions. Quant aux données d'activités, elles sont établies par le projet à partir des plans et des notes de calculs, et sont donc classiquement bien connues et maîtrisées par les ingénieurs.

On peut utiliser cette formule aux différentes phases d'un projet, notamment en conception : phases APS

—Figure 1—

Formule de calcul de l'empreinte carbone d'un projet.

$$\sum \text{Données d'activité (tonne, m3, m2, m, \text{€}, \text{litre}, \dots)} \times \text{Facteur d'émissions (tCO2eq/unité)} = \text{Émissions de Gaz à Effet de Serre en tCO2eq}$$

AUTEUR

Jocelyn Bouchut
Ingénieur géotechnicien
et empreinte carbone
Egis

(avant-projet sommaire), AVP (avant-projet) et PRO (projet). Tout l'enjeu est de disposer de facteurs d'émissions fiables pour les activités de terrassement.

ÉTABLISSEMENT DE FACTEURS D'ÉMISSION ADAPTÉS AUX PROJETS DE TERRASSEMENT

La majeure partie des données de facteurs d'émissions initialement disponibles concernaient la fabrication de matériaux, le transport et la consommation d'énergie. Or, les unités de mesure usuelles pour les projets de terrassement sont des volumes de matériaux excavés, transportés, traités et mis en œuvre. Il était donc nécessaire d'établir des facteurs d'émissions ramenés à ces unités pour être en mesure d'évaluer l'empreinte carbone de projets de terrassement et de comparer ensuite différentes solutions techniques, dès les phases de conception des projets.

Dans un premier temps, une liste de sous-activités d'un projet de terrassement et de traitement des sols a été établie, afin d'individualiser les tâches unitaires usuelles :

- déblais : excavation en terrains meubles ou rocheux ;
- transport de matériaux : sur le chantier par tombereaux (dumper) et sur route par semi-remorques ;
- mise en œuvre des matériaux : en remblai, dépôt, couche de forme (régilage, compactage, réglage) ;
- traitement des sols : fourniture du liant, épannage, malaxage... ;
- fourniture extérieure de matériaux.

Dans un second temps, un travail d'établissement des facteurs d'émissions de chaque sous-activité a été réalisé, en s'appuyant sur :

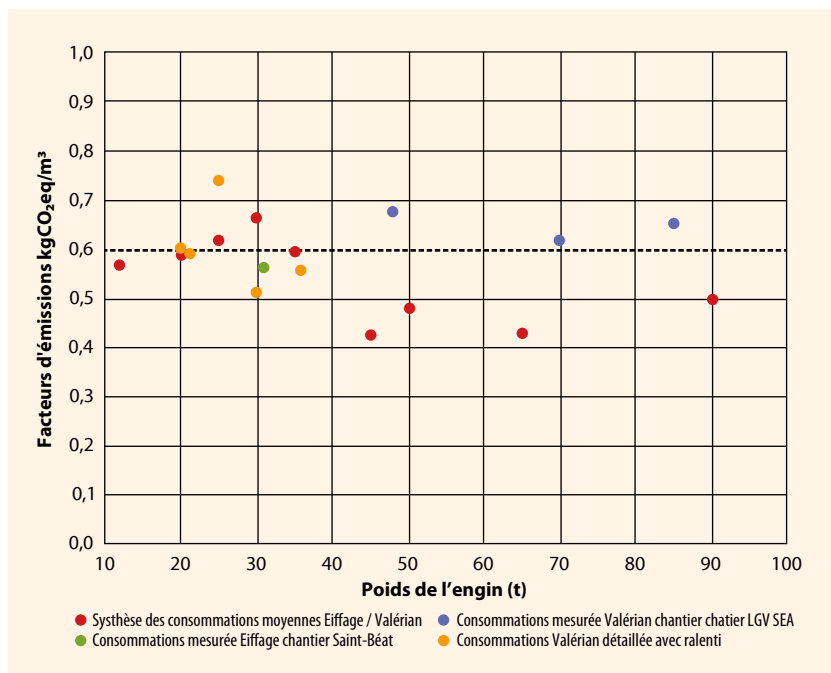
- la bibliographie (facteurs d'émissions issus de calculateurs carbone, de guides ou de fiches de déclaration environnementale et sanitaire – FDES) ;
- des retours d'expérience de chantiers : grâce à la contribution des entreprises de travaux Valérian et Forézienne, des données de consommation d'engins et de productivité des ateliers ont pu être analysées afin d'aboutir à des synthèses de consommations de carburant ramenées à des volumes de matériaux unitaires excavés, transportés, traités et mis en œuvre.

À titre d'exemple, pour l'excavation de matériaux en terrains meubles, les données de plusieurs chantiers ont été analysées et comparées à des données bibliographiques (figure 2). L'analyse a été faite pour différents types de pelles mécaniques, en fonction du poids des engins.

Le travail a montré que le poids de la pelle n'avait pas d'influence évidente sur le facteur d'émission du mètre cube excavé. En effet, la consommation plus importante d'une pelle de plus forte capacité est compensée, en termes d'émissions carbone

–Figure 2–

Synthèse des données de facteurs d'émissions d'excavation de matériaux meubles en fonction du poids de la pelle.



–Tableau 1–

Extrait des facteurs d'émissions unitaires établis dans le cadre du projet TERCO2.

Activité	Facteur d'émission (en kg CO ₂ eq/m ³)
Excavation déblai (terrains meubles)	0,6
Transport de matériaux sur route (semi-remorque)	0,18
Transport de matériaux sur chantier (tombereau)	0,9
Régilage au bull	0,4
Régilage à la niveleuse	0,3
Compactage remblai	0,2
Compactage couche de forme	0,25
Mise en œuvre de remblai	0,6
Mise en dépôt	0,4
Mise en œuvre de couche de forme	0,95
Supplément pour traitement de remblai aux liants (hors fourniture liant)	0,6
Supplément pour traitement de couche de forme aux liants (hors fourniture liant)	1,2

ramenées au mètre cube excavé, par son rendement plus élevé. Une valeur moyenne de facteur d'émissions a pu être établie à 0,6 kg CO₂ eq/m³ de terrain meuble excavé, avec globalement une plage de variation de 0,45 à 0,75 kg CO₂ eq/m³, due à la variabilité des conditions de chantiers, de nature des matériaux et d'efficacité des engins.

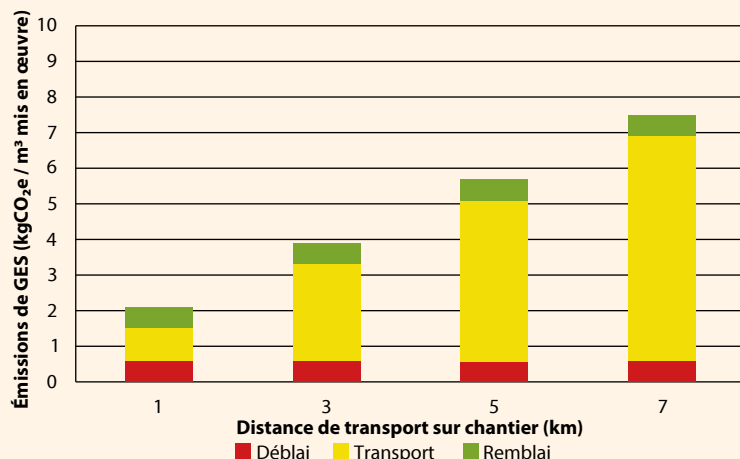
Des analyses similaires ont été réalisées pour établir des facteurs d'émissions des différentes sous-activités des chantiers de terrassement et de traitement des sols (tableau 1). À partir de cette « boîte à outils », on peut évaluer l'empreinte carbone de projets de terrassement et comparer des solutions techniques en termes de carbone.

ÉVALUATION DE L'EMPREINTE CARBONE DE CHANTIERS DE TERRASSEMENT

Le projet TERCO2 a ensuite comparé l'empreinte carbone de solutions techniques couramment mises en œuvre dans des chantiers de terrassement et de traitement des sols.

—Figure 3—

Émissions de GES pour la réalisation d'un remblai à partir de matériaux de déblai sans traitement pour différentes distances de transport sur chantier.



CHANTIER TYPE DÉBLAI - TRANSPORT - MISE EN REMBLAI

Le scénario le plus classique pour un chantier de terrassement a été étudié, avec les opérations de déblai en terrains meubles, transport de matériaux par tombereau sur chantier, puis mise en remblai, sans traitement. La **figure 3** présente les résultats obtenus en termes d'empreinte carbone, pour différentes distances de transport entre les lieux de déblai et de remblai.

Comme attendu, plus la distance de transport est grande, plus les émissions sont élevées, d'où la nécessité d'optimiser les distances de transport sur un chantier. On peut garder comme référence qu'au-delà d'une distance de 1,3 km entre déblai et remblai, le transport par tombereau sur chantier représente plus de 50 % de l'empreinte carbone de l'ensemble. Un des leviers de réduction des émissions GES de terrassement consiste donc à réduire les émissions des tombereaux, par exemple en réduisant les consommations ou en utilisant des énergies alternatives au gasoil non routier (GNR).

IMPACT DU TRAITEMENT À LA CHAUX SUR L'EMPREINTE CARBONE

Le traitement à la chaux des matériaux avant mise en remblai est fréquemment utilisé en terrassement, soit pour réduire la teneur en eau des sols, soit lorsque les matériaux sont argileux (**photo 1**). Pourtant, le traitement à la chaux a un impact majeur sur l'empreinte carbone d'un chantier de terrassement.

L'empreinte carbone de plusieurs scénarios de réalisation de remblais a été étudiée, avec les opérations successives de déblai, transport des matériaux par tombereau sur chantier avec des distances variables, fourniture de chaux, traitement des matériaux avec des dosages variables, puis mise en remblai.

—Photo 1—

Chantier de traitement de sol.



La **figure 4** illustre le fort impact du traitement à la chaux sur les émissions carbone. Ainsi, pour des distances de transport de 1 km, les émissions de GES sont multipliées par 10 entre un remblai non traité et un remblai traité avec 1 % de chaux, et par 18 si le dosage du traitement est de 2 %.

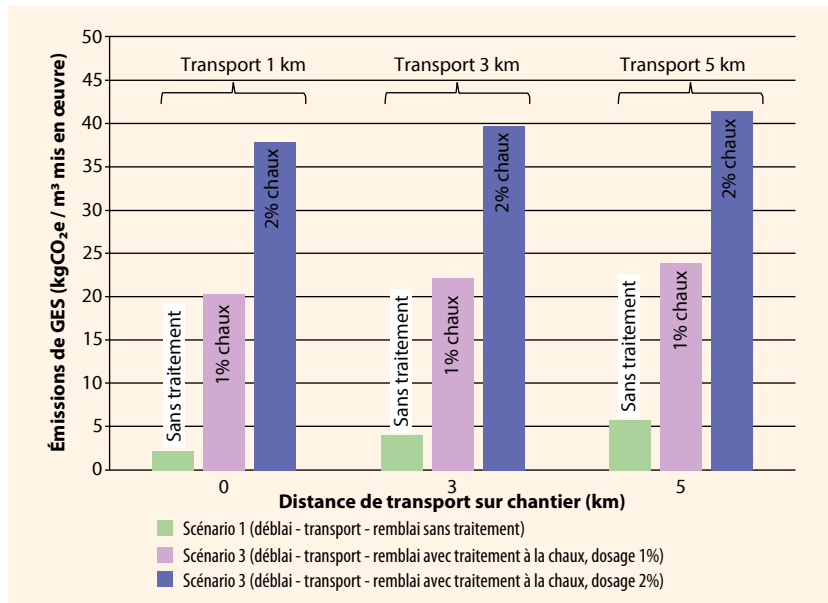
COMPARAISON DE SCÉNARIOS REMBLAI TRAITÉ À LA CHAUX – REMBLAI GRANULAIRE

Lorsque les matériaux de déblais ne sont pas réutilisables à l'état naturel, mais uniquement après traitement à la chaux, l'une des alternatives à la solution de traitement est la fourniture et la mise en œuvre de matériaux issus de carrières, tandis que les matériaux extraits sont mis en dépôt définitif.

Le projet TERCO2 a cherché à comparer ces scénarios « remblai traité à la chaux » et « remblai granulaire » en termes d'émissions carbone, en faisant varier les principaux paramètres (dosage de chaux dans le scénario traitement et distance de transport dans le scénario granulaire). Les résultats obtenus sont présentés sur la **figure 5**.

Ainsi, il apparaît que l'empreinte carbone d'un remblai traité à 1 % de chaux est équivalente à celle d'un remblai réalisé en matériaux granulaires issus de carrière, avec une distance de transport sur route de 75 km.

Ces résultats illustrent le fait que le traitement à la chaux, solution couramment utilisée en terrassement, génère des émissions carbone élevées. Cet impact négatif sur l'empreinte carbone doit être



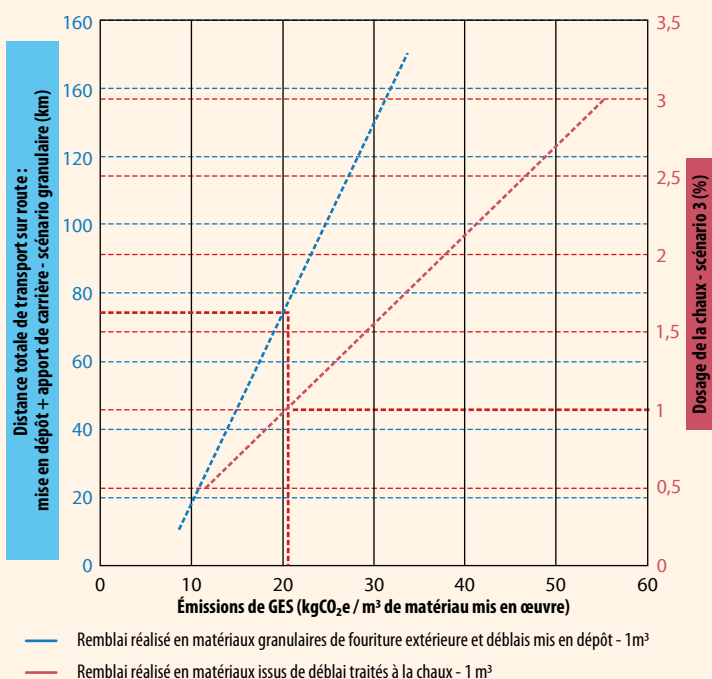
mise en regard des nombreux avantages du traitement à la chaux :

- augmentation de la réutilisation des matériaux issus des déblais, en particulier dans des conditions météorologiques défavorables (économie circulaire) ;
- réduction du recours à des carrières (et donc impact favorable sur les paysages, la biodiversité, les nuisances liées au transport, l'épuisement des ressources naturelles) ;
- gain potentiel en termes de planning et de coût.

Figure 4 – Émissions de GES pour la réalisation d'un remblai à partir de matériaux de déblais non traités ou traités à la chaux à 1 ou 2 % et différentes distances de transport.

Figure 5

Émissions de GES pour des solutions de remblai granulaire et de remblai traité à la chaux.



Ainsi, l'analyse avantages/inconvénients d'une solution de traitement à la chaux est complexe, en fonction des critères décisionnels qui sont retenus (carbone, économie circulaire, biodiversité, coût, planning). Mais il est absolument nécessaire de bien évaluer les différents impacts pour décider en connaissance de cause et réduire autant que possible les impacts négatifs.

AUTRES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE TERCO2

Le projet TERCO2 présente d'autres résultats sur le traitement en arase ou en couche de forme, avec différents liants (chaux, ciment, liants hydrauliques routiers – LHR). Les résultats, et plus généralement l'évaluation de l'empreinte carbone de solutions techniques en terrassement, permettent de visualiser les postes d'émissions les plus contributeurs et les leviers de réduction de l'empreinte carbone d'un projet de terrassement.

CONCLUSION

Tous les acteurs de la profession doivent s'investir dans la réduction de l'empreinte carbone des projets d'infrastructures, aux différentes étapes de la conception et de l'exécution.

Dans le domaine des terrassements, des choix stratégiques en phase amont peuvent avoir de forts impacts sur l'empreinte carbone du chantier. Plusieurs recommandations peuvent ainsi être formulées :

- prévoir des emprises sur le projet pour les dépôts et réduire ainsi les distances de transport ;
- accepter un allongement de planning, afin de concentrer les terrassements en périodes météorologiques favorables et limiter ainsi le traitement à la chaux ;
- étudier, dès les premières phases de conception, les possibilités de réutilisation des matériaux, avec ou sans traitement, analyser et optimiser la balance des terrassements, le mouvement des terres et les dosages de chaux et liants hydrauliques ;

- promouvoir des LHR « bas carbone » lorsque cela est techniquement pertinent ;
- favoriser les techniques les moins émissives en travaux (carburant et consommation des engins, aération des matériaux trop humides...).

Afin de mettre en œuvre ces différentes recommandations, les maîtres d'œuvre et les ingénieries géotechniques doivent intégrer l'évaluation de l'empreinte carbone et l'éco-conception dans toutes les phases de conception du projet, de façon à identifier les postes les plus émissifs et les leviers de réduction. En parallèle, il est du ressort des maîtres d'ouvrage de considérer les critères carbone et éco-conception comme essentiels dans leurs choix décisionnels, au même titre que les critères coût, technique et planning. ■

À retenir

- Le projet TERCO2, mené par Egis et ses partenaires, a établi des facteurs d'émissions pour chaque activité de terrassement (excavation, transport, traitement des sols...), afin d'évaluer et comparer l'empreinte carbone des solutions techniques dès la phase de conception.
- Les transports de matériaux sur chantier (notamment par tombereau) représentent un poste majeur d'émissions. Limiter ces distances et réduire la consommation des engins sont des leviers clés pour diminuer les émissions.
- Le traitement d'un remblai à la chaux, couramment utilisé pour stabiliser les sols et essentiel pour améliorer le réemploi des matériaux, a un très fort impact sur les émissions carbone. Son usage doit donc être soigneusement pesé et les dosages optimisés.
- Il convient d'intégrer l'éco-conception dès les premières phases de projet : bien gérer le réemploi des matériaux et le mouvement des terres, limiter l'usage de liants, réduire les distances de transport et les consommations des engins, favoriser les énergies alternatives au gasoil.

CHAUX ET LIANTS HYDRAULIQUES

DEUX FILIÈRES INDUSTRIELLES EN MARCHÉ VERS LA NEUTRALITÉ CARBONE

À l'heure où la transition écologique s'impose comme un impératif industriel et sociétal, les secteurs de la chaux et du ciment démontrent qu'innovation et responsabilité environnementale riment avec performance. Portées par des feuilles de route ambitieuses et des engagements concrets, ces deux filières accélèrent leur décarbonation. Entre optimisation des procédés, valorisation des déchets, captage du CO₂ et économie circulaire, elles tracent une voie vers la neutralité carbone à l'horizon 2050.

Vue globale d'un site de production de chaux.



© GROUPE SAINT HILAIRE

Cimenterie de Montalieu (Isère).



© VICAT

La lutte contre le changement climatique impose à chaque secteur industriel de repenser ses modes de production, ses usages et ses partenariats. Pour les filières de la chaux et du ciment, dont les procédés de fabrication engendrent des émissions de CO₂ inévitables, l'enjeu est double : réduire drastiquement leur empreinte carbone tout en garantissant la compétitivité et la durabilité des matériaux qu'elles produisent. Deux ans après la publication de leurs feuilles de route respectives, ces industries livrent un premier bilan encourageant, marqué par des innovations technologiques, une mobilisation collective et des résultats tangibles.

CHAUX ET CLIMAT : LA DÉCARBONATION CONTINUE

Deux ans après la publication de sa première feuille de route, la filière française de la chaux aérienne franchit de nouvelles étapes concrètes dans sa transition vers la neutralité carbone : optimisations énergétiques, substitution de combustibles, projets pilotes de captage, sobriété des usages et valorisation du potentiel de recarbonatation. Cette accélération intervient dans un contexte où les signaux convergent. En effet, bien que les

émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'industrie des minéraux non métalliques et de la construction aient diminué de plus de 45 % entre 1990 et 2023¹, le rythme de cette baisse tend à ralentir. Selon le haut-conseil pour le Climat (rapport 2025), le niveau actuel de réduction des émissions industrielles reste insuffisant pour suivre la trajectoire fixée par la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) et appelle à une mobilisation renforcée de l'ensemble des secteurs à forte intensité carbone².

Préface de Jacques Chanteclair

Président de l'Union des producteurs de chaux (UP'Chaux)

Au moment où l'urgence climatique impose d'accélérer la transition industrielle, notre filière démontre qu'innovation et responsabilité vont de pair. Les producteurs de chaux aérienne s'engagent concrètement dans la décarbonation : optimisation énergétique, substitution de combustibles, captage et valorisation du CO₂, sobriété d'usage et recarbonatation.

Cette mobilisation collective, soutenue par UP'Chaux, illustre la force d'un secteur capable d'unir ses efforts pour construire une industrie compétitive, sobre et durable. Ensemble, nous faisons de la chaux un acteur clé de la neutralité carbone à l'horizon 2050.

AUTEURS

Amandine Gambin
Secrétaire générale
UP'Chaux

Cédric Le Guil
Directeur Routes
et Terrassements
France Ciment

—Photo 1—
Fours à chaux.



© PIGEON CHAUX

La valeur de l'action pour le climat (VAC), récemment réévaluée par le haut-commissariat à la Stratégie et au Plan, à 256 €/tCO₂ en 2025 et 563 €/tCO₂ en 2050, confirme cette exigence³ : il devient désormais rationnel pour l'économie de l'État d'investir dans les technologies de CCUS (captage, stockage et/ou valorisation du CO₂).

Pour la filière chaux, dont les émissions de procédé sont intrinsèquement liées à la décarbonation du calcaire, la décarbonation constitue à la fois un défi et une opportunité : transformer une industrie aux émissions incompressibles en un acteur clé de la neutralité carbone par la combinaison d'innovations technologiques, la circularité des matériaux et la valorisation du cycle naturel de la chaux.

FEUILLE DE ROUTE DE LA PROFESSION

La filière française de la chaux aérienne s'inscrit dans une trajectoire de décarbonation engagée depuis plusieurs années. Comme le rappelait la feuille de route sectorielle publiée dans un précédent article de la RGRA⁴, cette transition repose sur une approche structurée autour de trois piliers : éviter, réduire, capter.

Pour mémoire, la production de chaux engendre des émissions de CO₂ de deux origines :

- CO₂ de combustion : émissions liées aux combustibles utilisés dans les unités de calcination. Elles représentent entre un quart et un tiers des émissions totales liées à la fabrication de la chaux.
- CO₂ de procédé : émissions issues de la décomposition du calcaire. Inévitables et irréductibles, elles représentent la majeure partie des émissions totales.

La nature de ces émissions implique des stratégies de réduction différentes :

- Éviter, en premier lieu, consiste à limiter les émissions en amont de la fabrication de la chaux : valorisation du foncier industriel pour la production d'énergie renouvelable, électrification, intégration d'une logique de sobriété dans la chaîne d'approvisionnement.
- Réduire, ensuite, vise à abaisser les émissions par l'optimisation continue des outils de production : modernisation des fours (photo 1), amélioration du rendement thermique, réduction des consommations d'énergie auxiliaire (air comprimé, broyage...) et recours accru à la biomasse déchet et/ou combustibles alternatifs issus de filières locales certifiées conformes à la directive européenne (RED II/III) et compatibles avec les exigences de qualité du produit fini.
- Capter et séquestrer, en dernier recours, constitue le troisième pilier de cette stratégie pour réduire les émissions de procédés intrinsèques à la décarbonation du calcaire. Ainsi, la filière s'est engagée dans plusieurs projets de captage, stockage et valorisation du CO₂.

Ces initiatives, fondées sur des technologies complémentaires (cryogénie, oxycombustion, absorption chimique, valorisation du CO₂ en e-méthanol...) témoignent d'une dynamique d'innovation soutenue et d'une couverture territoriale large.

La démarche engagée par la profession rejoint les attentes des maîtres d'ouvrage et des collectivités : évaluer l'impact environnemental des matériaux, intégrer des critères de performance carbone dans les appels d'offres et privilégier des procédés de traitement des sols ou de formulation d'enrobés contribuant à la durabilité des infrastructures.

PROJETS CONCRETS DE DÉCARBONATION ET RÉFLEXION SUR LA SOBRIÉTÉ D'USAGE

Projets de décarbonation

Les projets recensés dans la première feuille de route de décarbonation de la filière chaux^{4,5} poursuivent leur développement et s'enrichissent de nouvelles initiatives. Ces travaux, listés dans le tableau 1, traduisent la diversité technologique des approches testées par les adhérents d'UP'Chaux.

Dynamique technologique et territoriale

Les projets de la filière témoignent d'une diversité de leviers de décarbonation : amélioration de l'efficacité énergétique, substitution progressive des combustibles fossiles par la biomasse déchet, électrification des procédés et développement de technologies de captage et de valorisation du CO₂⁴⁻¹¹.

Ces projets démontrent la capacité de la filière à agir simultanément sur les émissions directes, la sobriété énergétique et la modernisation des équipements.

Projet	Site	Partenaires	Technologie	Avancement
Essais pilote Revcoo ⁶	Avesnes-sur-Helpe (59)	Revcoo	Captage cryogénique du CO ₂	Installation pilote en service
CalCC ⁴⁻⁵	Réty (62)	Air Liquide	Captage par cryogénie	Évaluation en cours
Étude Trept ⁷	Trept (38)	EDF R&D	Captage par absorption chimique et valorisation du CO ₂ sous forme de e-méthanol	Pré-étude
Grand Ouest GO CO ₂ ⁸	Neau (53)	Elengy, Natran, RTE, Lafarge, Heidelberg Materials	En cours de définition	Concertation publique CNDP – Évaluation en cours
Callisto	La Mède, Ensues (13)	Air Liquide, Elengy, SPSE, Vicat, Petroineos, Lafarge...	En cours de définition	Évaluation en cours
Butterfly ⁹	Seilles (Belgique)	Partenariat collaboratif	Concentration par oxyfuel	Installation pilote en service
Faco B3 ¹⁰	Vaiges (53)	Groupe Pigeon, Ademe	Optimisation énergétique et électrification du procédé carrière (broyage, séchage...)	En service

Cette pluralité d'approches souligne la complémentarité des solutions mises en œuvre et la volonté collective du secteur d'accélérer la décarbonation tout en garantissant la continuité industrielle.

Produits au service du choix raisonné

La transition climatique ne repose pas uniquement sur la décarbonation des procédés : elle suppose également une sobriété d'usage et une responsabilité partagée entre producteurs et utilisateurs.

La norme EN 459-1¹² est alignée sur cette dynamique et définit les classes de chaux aériennes (CL 70, 80 et 90) pour le traitement des sols. Ainsi, elle permet d'adapter le réactif à la performance recherchée en fonction du type de sol tout en maîtrisant son intensité carbone.

Par ailleurs, la formulation de nouveaux réactifs par les acteurs de la filière contribue, par l'utilisation éventuelle de coproduits, à réduire leur empreinte carbone tout en maintenant leur performance.

Ainsi des approches d'éco-conception sont favorisées : les prescripteurs peuvent ajuster les dosages, réduire les surconsommations et choisir les produits les plus adaptés au contexte et aux exigences environnementales.

Sobriété, performance et responsabilité d'usage

Au-delà de la performance technique et environnementale des produits, la décarbonation passe aussi par une évolution des pratiques et des usages. La filière de la chaux aérienne s'engage ainsi dans une logique de sobriété et de responsabilité et intègre les principes d'économie circulaire et de valorisation raisonnée des ressources telles que définies par le guide technique du Sedre (Syndicat des entreprises de déconstruction, dépollution et recyclage)¹³, qui promeut une consommation sobre et responsable des ressources naturelles, la réutilisation et la valorisation des matériaux, l'optimisation des flux de matières et la réduction des déchets.

Le traitement à la chaux aérienne s'inscrit dans le respect de ces principes, car il autorise la valorisation de matériaux excavés ou inertes en ressources

géo-techniquement performantes, ce qui réduit les transports, les mises en décharge, améliore la durabilité des ouvrages et préserve les besoins en ressources naturelles. Ainsi, la chaux agit comme un levier de circularité et contribue à des ouvrages plus sobres et durables.

UN CADRE CLARIFIÉ

L'année 2025 marque une étape décisive pour le développement du captage et du stockage du carbone en France : avec l'adoption de la loi autorisant la ratification de l'amendement à l'article 6 du protocole de Londres¹⁴, la France rejoint officiellement les pays autorisant l'exportation transfrontalière de CO₂ destiné au stockage géologique offshore. Cette évolution lève un verrou juridique majeur et ouvre la voie à des coopérations européennes, notamment avec la Norvège, où des capacités de séquestration sont déjà opérationnelles¹⁵.

En parallèle, la France poursuit l'évaluation de son potentiel national de stockage géologique onshore. L'étude EvastoCO₂ pilotée par l'Ademe¹⁶ identifie plusieurs bassins sédimentaires favorables et estime le potentiel théorique de stockage à plusieurs centaines de millions de tonnes de CO₂, selon les méthodes retenues.

Ces travaux confirment la faisabilité technique de la séquestration sur le territoire métropolitain, mais soulignent aussi la nécessité de caractérisations géologiques complémentaires, d'un cadre réglementaire stable et d'une coordination intersectorielle pour mutualiser les infrastructures.

Les analyses¹⁷ mettent en évidence la complémentarité des options onshore et offshore :

- Le stockage offshore, rendu possible par la ratification du protocole de Londres, permettra une mise en œuvre rapide pour les premiers projets industriels.
 - Le développement de capacités onshore contribuera à moyen terme à une stratégie nationale souveraine et résiliente de gestion du CO₂ capté.
- Ainsi, la filière chaux – comme l'ensemble des industries à émissions de procédé – dispose désormais d'un cadre clarifié et cohérent.

-Tableau 1-
Principaux projets de décarbonation de la filière chaux.

LA RECARBONATATION : UN ALLIÉ SOUS-ESTIMÉ

La chaux aérienne possède une propriété fondamentale trop peu reconnue : sa capacité à se recarbonater, c'est-à-dire à absorber le CO_2 présent dans l'air pour former du carbonate de calcium (CaCO_3). Des études¹⁸⁻¹⁹ démontrent que cette réaction peut capter en moyenne 33 % du CO_2 de procédé émis lors de la production de chaux et jusqu'à 100 % dans certaines applications (eau potable, carbonates précipités).

Dans le cadre spécifique du traitement des sols à la chaux, certains travaux ont démontré que ce phénomène pouvait être significatif²⁰. D'autres études sont menées pour confirmer et affiner ces premiers résultats.

En outre, la minéralisation du carbone par carbonatation accélérée additionnelle de la chaux²¹ constitue une des voies durables d'élimination du CO_2 . La profession a également analysé les méthodologies de comptabilisation du CO_2 ²² afin de définir un cadre reconnu par les standards internationaux pour la prise en compte du CO_2 capté par la chaux, qu'il résulte de la carbonatation spontanée ou de la carbonatation accélérée.

Carbonatation spontanée et carbonatation accélérée apparaissent ainsi comme des compléments essentiels des technologies CCUS, transformant la chaux en véritable acteur de la neutralité carbone.

UNE DYNAMIQUE COLLECTIVE VERS LA NEUTRALITÉ 2050

L'atteinte de la neutralité carbone en 2050 repose sur la mobilisation conjointe de l'ensemble des acteurs industriels, publics et territoriaux. La filière de la chaux aérienne s'inscrit pleinement dans cette dynamique collective, en cohérence avec les objectifs

fixés par la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) et les feuilles de route sectorielles.

Les producteurs de chaux aérienne français réunis au sein d'UP'Chaux mutualisent leurs efforts autour d'un même cap : partager les retours d'expérience, diffuser les innovations technologiques et structurer les projets d'investissement et de recherche, notamment dans les domaines du CCUS, de la valorisation du carbone et de la sobriété énergétique. Cette approche collective contribue à accélérer les apprentissages, renforcer la cohérence territoriale et optimiser l'efficacité des actions engagées.

Au-delà du secteur de la chaux, plusieurs projets recensés dans le tableau 1 témoignent de coopérations inter-filières particulièrement fructueuses, notamment avec le secteur du ciment. Ces collaborations illustrent la capacité des industries à agir ensemble pour amplifier l'impact de leurs efforts de décarbonation.

Mais cette transition exige des moyens à la hauteur des ambitions. Comme le souligne la VAC, réévaluée en 2025 par le haut-commissariat au Plan à 256 €/t CO_2 en 2025 et 563 €/t CO_2 en 2050, chaque tonne de CO_2 évitée ou captée représente un bénéfice économique et climatique considérable. Il est donc essentiel que les politiques publiques, les dispositifs de financement et les appels à projets reflètent cette valeur dans leurs critères d'aide et d'arbitrage, afin d'assurer la compétitivité et la pérennité des investissements de décarbonation.

CONCLUSION

Face à l'urgence climatique, la filière française de la chaux aérienne se mobilise et prouve qu'il est possible de concilier réduction des émissions, innovation technologique et circularité des matériaux.

—Photo 2—
Mise en œuvre de chaux
en génie civil.



Forte d'un savoir-faire séculaire et d'un ancrage territorial solide, elle incarne la capacité d'une industrie aux émissions incompressibles à devenir un levier concret de la neutralité carbone, en alliant optimisation énergétique, captage et valorisation du CO₂, sobriété d'usage et recarbonatation.

Les prochaines années seront déterminantes pour transformer les démonstrateurs en solutions industrielles, mutualiser les infrastructures de captage et de transport du CO₂ et faire reconnaître pleinement la contribution climatique de la chaux aérienne dans les politiques publiques européennes et nationales, tout en veillant à l'adhésion de la société à ces transformations.

Cette dynamique collective, dans laquelle UP'Chaux est pleinement engagée avec l'ensemble de ses partenaires, traduit une ambition commune : faire émerger une industrie à la fois compétitive, sobre et durable – pleinement actrice de la neutralité carbone à l'horizon 2050.

Présente au cœur de nombreuses chaînes de valeur, de la métallurgie au génie civil en passant par l'environnement, la chimie ou l'agriculture, la réduction des émissions du secteur de la chaux permet la décarbonation de ses filières clientes.

La chaux aérienne s'impose ainsi comme un maillon essentiel de la transition climatique de l'industrie.

L'INDUSTRIE CIMENTIÈRE TIENT SES OBJECTIFS DE DÉCARBONATION

Deux ans après la publication de sa feuille de route de décarbonation²³, France Ciment dresse un premier bilan encourageant : l'industrie cimentière française est bien alignée avec les objectifs fixés et poursuit son ambitieuse trajectoire de décarbonation.

En dépit d'un contexte de marché particulièrement tendu, le secteur livre des résultats tangibles sur la réduction des émissions de ses process industriels et du poids carbone des ciments et liants hydrauliques routiers (LHR) français.

Efficacité énergétique, baisse des combustibles fossiles, diminution du taux de clinker dans les liants hydrauliques : les investissements effectués sur les sites ont permis de diminuer de 11 % le taux de CO₂ par tonne de liant par rapport à 2019.

CIMENTS ET LHR INTÈGENT LES OBJECTIFS DE DÉCARBONATION ET D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Filière clé de l'économie française, l'industrie cimentière produit un matériau indispensable au secteur de la construction et de l'aménagement : les liants hydrauliques. Employés en tant que ciments dans les bétons ou que LHR dans le traitement des sols ou le retraitement des chaussées en place, ils sont utilisés quotidiennement dans la réalisation

d'ouvrages performants et durables avec un bilan technique et économique qui répond au besoin.

Leur point faible : une empreinte carbone significative liée à leur fabrication. On estime à environ à 1/3 le CO₂ émis lié au procédé (utilisation de combustibles pour alimenter le four de la cimenterie) et 2/3 le CO₂ émis par la réaction chimique de décarbonatation du calcaire (figure 1).

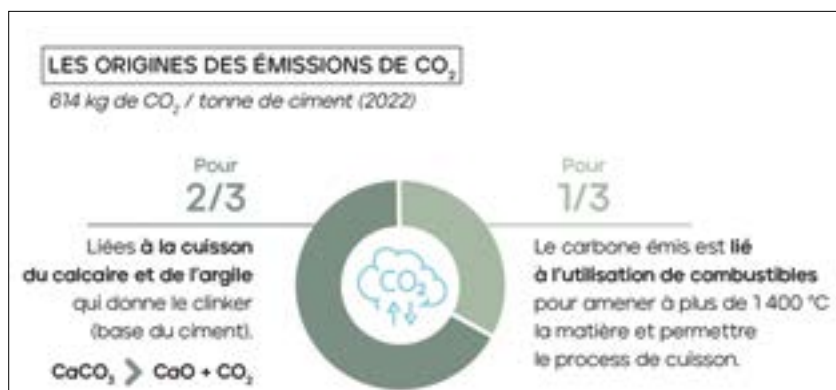
Les émissions du secteur ont été fortement réduites depuis 1990 (figure 2), avec notamment une baisse de la consommation et une rationalisation dans l'utilisation du matériau, mais également des actions sur l'optimisation des procédés.

Par ailleurs, l'industrie cimentière française est un acteur clé de l'économie circulaire²⁴, au service des territoires. En valorisant plus de 3 millions de tonnes de déchets ou co-produits, elle préserve les ressources naturelles tout en offrant une solution au traitement des déchets et à la valorisation de matériaux alternatifs (figure 3).

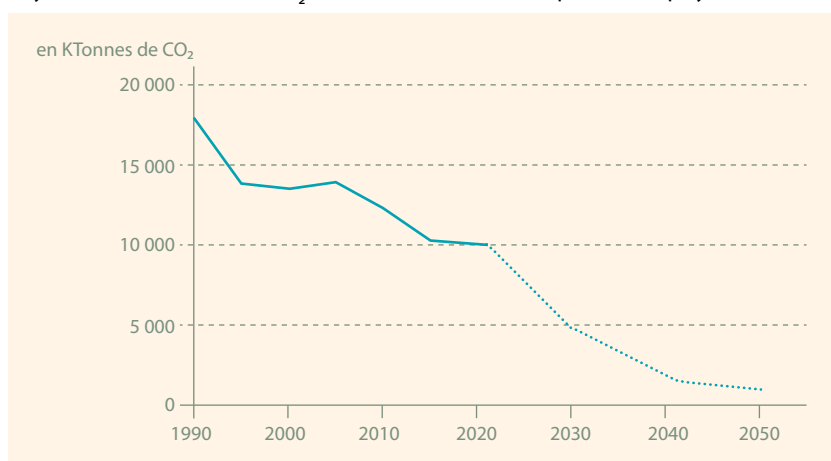
Les déchets et co-produits, sélectionnés pour leur compatibilité avec le procédé cimentier, sont intégrés à différentes étapes de fabrication :

- Au cru, une première étape de valorisation matière qui concerne plus de 650 000 tonnes de déchets. Ces derniers sont utilisés comme apport chimique (boues industrielles, sables de fonderie, terres polluées, cendres volantes...) dans la composition du cru. Cette valorisation préserve les ressources naturelles.

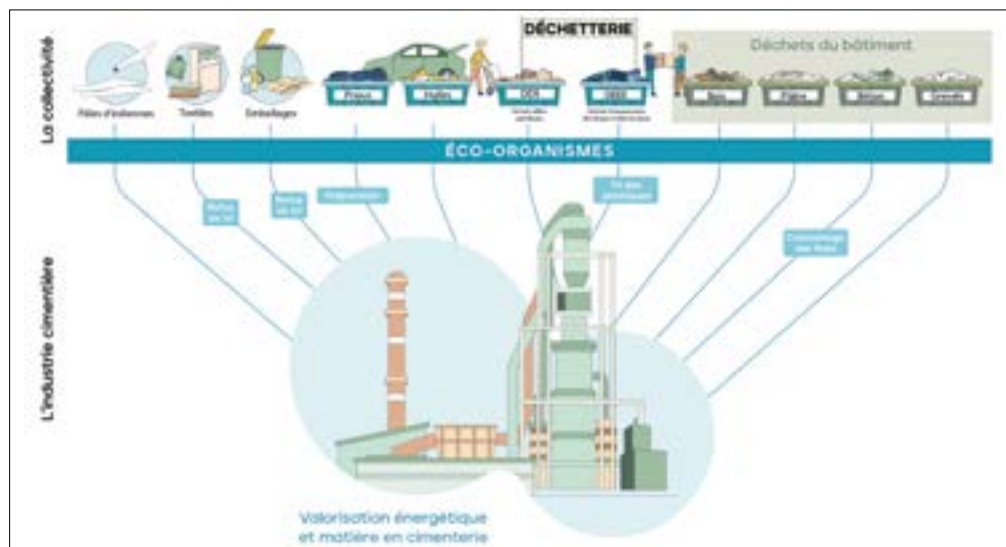
—Figure 1—
Liants hydrauliques : origines principales des émissions de CO₂.



—Figure 2—
Trajectoire des émissions de CO₂ de l'industrie cimentière depuis 1990 et projection à 2050.



—Figure 3—
L'industrie cimentière, acteur clé
de l'économie circulaire.



• À la cuisson, une double valorisation énergétique et matière :

- Une partie des combustibles fossiles est remplacée par plus d'un million de tonnes de déchets énergétiques (photo 3), comme les CSR (combustibles solides de récupération), les farines animales, les solvants usagés, les pneus non recyclables...
- Environ 140 000 tonnes de cendres issues de leur combustion sont intégrées dans la composition du clinker.
- En 2024, les combustibles de substitution ont représenté 55 % des besoins en énergie thermique. Ce taux de substitution des combustibles fossiles devrait atteindre 80 % en 2030.

• Lors du broyage, une troisième étape de valorisation matière. Environ 1,5 million de tonnes de résidus ou sous-produits d'autres industries (fumées de silice, laitiers de hauts-fourneaux, cendres volantes...) sont ajoutés au clinker broyé pour produire des ciments composés.

DÉCARBONATION : DES RÉSULTATS EN PHASE AVEC LES OBJECTIFS

Un premier bilan intermédiaire révèle que le taux de CO₂ par tonne de ciment diminue de 11 % en 2023

par rapport à 2019. Ce taux diminue de 2,7 % par an, soit un rythme plus soutenu que prévu initialement dans la feuille de route (1,9 % par an d'ici 2030). Cette baisse du taux de CO₂ par tonne de ciment permet déjà d'éviter sur une année l'émission de plus d'un million de tonnes de CO₂. Cela revient à retirer de la circulation plus de 500 000 véhicules pendant un an²⁵.

Pour Bruno Pillon, président de France Ciment : « L'industrie du ciment a publié il y a deux ans sa feuille de route de décarbonation avec une ambition claire : diviser par deux ses émissions dès 2030 par rapport à 2015. Ce premier bilan prouve que l'industrie cimentière est déjà dans la bonne trajectoire pour atteindre ses objectifs. Il atteste de la mobilisation des acteurs et de la pertinence des investissements engagés pour réduire les émissions de carbone des procédés industriels et pour mettre sur le marché des ciments de moins en moins carbonés. »

Cette dynamique de décarbonation repose sur deux piliers : réduire la part de clinker dans le ciment et améliorer les process industriels pour produire un clinker moins carboné.

Réduction du taux de clinker dans le ciment

Le clinker, composant actif des ciments, est obtenu par cuisson à très haute température (environ 1 450 °C) d'un mélange de calcaire et d'argile. C'est lui qui concentre l'essentiel des émissions du secteur.

Pour réduire la teneur en clinker, des programmes de recherches ont permis de développer et de mettre sur le marché de nouveaux ciments normalisés à impact carbone réduit. Basés sur de nouvelles compositions et de nouveaux composants tels que les fines de béton recyclés ou les argiles calcinées, ils contribuent à élargir la gamme des ciments. Ils répondent aussi à une demande croissante pour les produits décarbonés, qu'ils soient d'origine naturelle et disponibles en grande quantité ou bien s'inscrivant dans une stratégie d'économie circulaire pour préserver les ressources.

—Photo 3—
Combustibles alternatifs
utilisés en cimenterie.



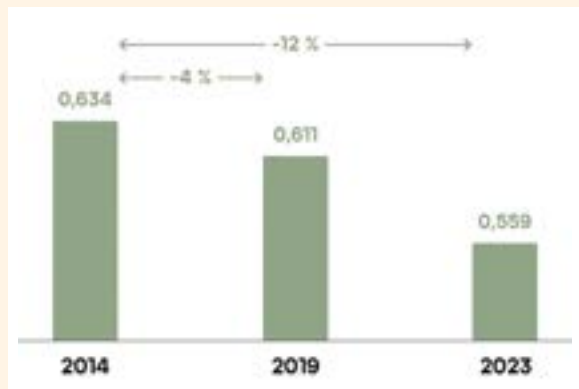
© SHUTTERSTOCK

Des progrès qui se traduisent dans les valeurs des DEP

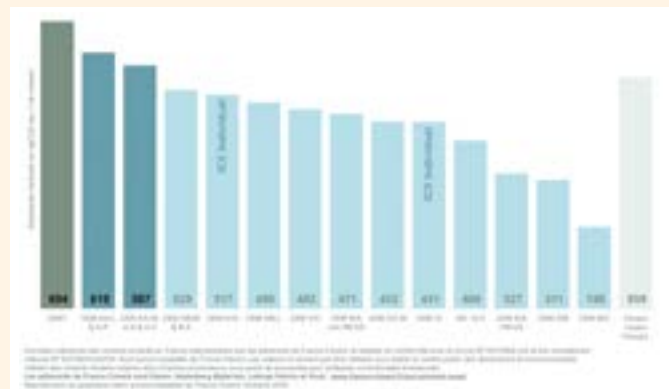
Les déclarations environnementales de produit (DEP) permettent de quantifier les impacts environnementaux associés au cycle de vie d'un produit (matières premières, énergie pour être fabriqué, emballé, transporté, utilisé). Ces données sont collectées sur une année, pour chaque cimenterie en France, sur l'ensemble des produits, en intégrant le scope 1 (émissions) et le scope 2 (énergie et autres intrants).

Sur la base des données récoltées en 2023, l'empreinte carbone du ciment moyen, exprimée en tonne de CO₂ par tonne de ciment, baisse de 12 % par rapport à 2014, avec une accélération depuis 2019 (-8,5 %), passant ainsi de 0,63 à 0,56 tonne de CO₂ par tonne de ciment. Ces données traduisent les évolutions concrètes du secteur.

Évolution de l'empreinte carbone du ciment moyen.



Empreinte carbone des ciments normalisés.



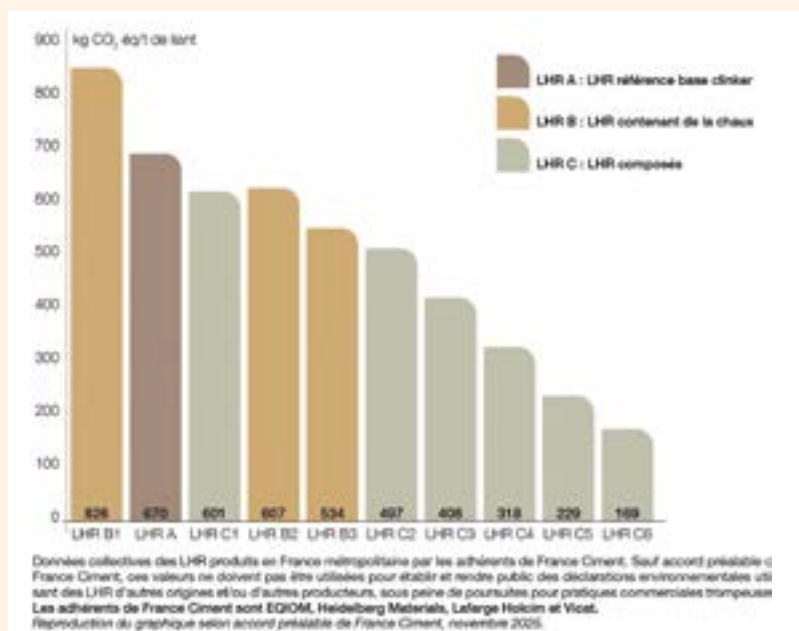
On retiendra également que :

- Le clinker moyen français produit par les adhérents de France Ciment est à 729 kg CO₂/tonne.
- Le CEM I des adhérents de France Ciment est passé sous la barre des 700 kg avec une empreinte à 694 kg CO₂/tonne.
- Le ciment moyen français (pondéré par les volumes) des adhérents de France Ciment est passé sous la barre des 600 kg avec une empreinte à 559 kg CO₂/tonne.

France Ciment vient également de publier une mise à jour des DEP des familles de LHR qui traduit une diminution des émissions de l'ordre de 12 % par rapport à la précédente édition de 2024.

Pour les ciments, les DEP sont établies et vérifiées selon la norme EN 15804+A2 et son complément national français et font l'objet d'une vérification par tierce partie.

Empreinte carbone des LHR.



Composition des LHR pour empreinte carbone.

Désignation LHR		Composition LHR							
		K	L, LL	S	P, Q	V, W	T	CL-Q	CL-S
-	LHR A	90-100	0-10						0-10
LHR avec chaux	LHR B1	45-70						30-50	0-10
	LHR B2	5-25	0-15	30-50				30-50	0-10
	LHR B3	25-45		30-50				10-30	0-10
LHR composé	LHR C1	70-89	6-30						0-10
	LHR C2	55-69	21-45						0-10
	LHR C3	40-54	36-60						0-10
	LHR C4	25-39	51-75						0-10
	LHR C5	10-24	66-90						0-10
	LHR C6	5-9	81-95						0-10

En 2023, pour fabriquer une tonne de ciment français, il faut en moyenne 718 kg de clinker, soit une baisse de plus de 8 % en quatre ans, conformément au jalon fixé dans la feuille de route.

Amélioration des procédés industriels et valorisation de déchets

En parallèle, afin d'atteindre les objectifs de neutralité carbone du secteur de la construction à horizon 2050, et avec une première étape en 2030 de baisse de 50 % des émissions du secteur industriel cimentier, les industriels français adhérents de France Ciment se sont engagés dans un programme d'investissements sur un grand nombre de sites en France pour des installations plus performantes, moins consommatrices et moins émettrices.

Plusieurs centaines de millions d'euros par an sont ainsi investis pour moderniser les installations : utilisation de combustibles alternatifs, mise en place d'équipements de production d'additions, de nouveaux fours plus performants énergétiquement, d'installation de précalcinateurs et de préchauffeurs, de systèmes de récupération de chaleur...

Les cimenteries françaises renforcent également la valorisation énergétique des déchets : le secteur cimentier valorise chaque année 1,5 million de tonnes de déchets, qui seraient incinérés ou enfouis

s'ils n'étaient pas intégrés dans le process industriel du ciment.

En 2023, 52 % des besoins thermiques des cimenteries adhérentes de France Ciment ont été couverts par des combustibles alternatifs issus de la valorisation de déchets non recyclables (figures 4 et 5). Cette performance, qui réduit d'autant le recours aux énergies fossiles, doit encore s'amplifier pour atteindre 80 % de substitution d'ici 2030. Les efforts engagés portent également sur la modernisation des fours, la récupération de chaleur et l'amélioration des performances énergétiques.

CAP SUR 2030 : LES TECHNOLOGIES DE CAPTAGE ET VALORISATION DU CO₂

L'industrie cimentière va poursuivre le déploiement des leviers de décarbonation évoqués plus haut (procédés industriels et taux de clinker) pour viser une baisse de 22 % de ses émissions sur la période 2015-2030.

En parallèle, elle ambitionne de doubler la réduction de ses émissions avec le développement de technologies de captage, stockage et valorisation du CO₂ (CCUS), un levier incontournable pour traiter les émissions « non évitables » liées à la décarbonation du calcaire dans le four cimentier (environ 2/3 des émissions)²⁶⁻²⁷.

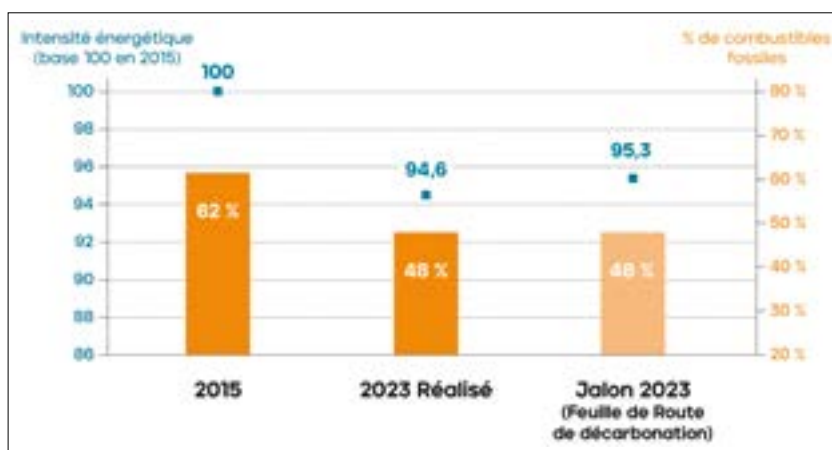
Pour atteindre cet objectif, les industriels auront besoin d'un accompagnement des pouvoirs publics :

- Soutien de l'État aux investissements - Si les acteurs de l'industrie porteront la majorité de l'investissement, le soutien de l'État est essentiel et doit se matérialiser par une aide financière au déploiement et à la mise en place d'instruments de réduction des risques pour les industriels pionniers dans la mise en œuvre de technologies de captage (« contrats carbone pour différence »). Pour cela, les revenus du marché carbone européen (EU Emissions Trading Systems - ETS), dont les montants sont supérieurs aux coûts de la décarbonation, doivent être fléchés en priorité vers la décarbonation des secteurs contributeurs.

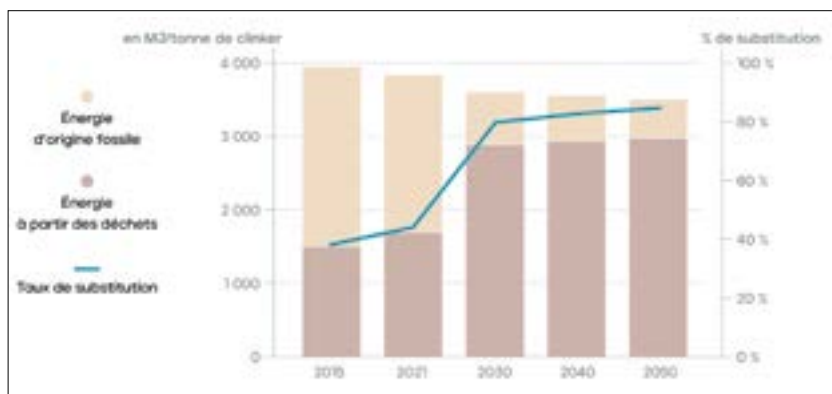
- Sécurisation du déploiement des infrastructures nécessaires au CCUS - La décision d'investir ne peut se faire sans l'assurance d'une stabilité réglementaire et d'un déploiement synchrone des différents maillons de la chaîne de valeur, afin de réduire le risque porté par les industriels.

- Mise en œuvre de règles concurrentielles équitables d'un point de vue environnemental entre producteurs européens et producteurs de pays tiers - La mise en œuvre d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF) dès janvier 2026 est la seule solution pour lutter contre les importations de ciment et de clinker, souvent plus carbonées : entre 2015 et 2023, soit en 8 années, les importations de clinker ont été multipliées par plus de 8 pour passer de 230 KT à 1,9 MT et représentent 18 % de la production française.

—Figure 4—
Efficacité énergétique et substitution des combustibles fossiles.



—Figure 5—
Valorisation énergétique des déchets.



Pour résumer, Bruno Pillon, président de France Ciment, indique : « *En 2023, nous avons chiffré les investissements nécessaires pour concrétiser cette feuille de route à hauteur de 5 Md€ jusqu'en 2050. Des investissements très importants ont d'ores et déjà été réalisés par les acteurs. Mais la transition doit aussi se faire avec le soutien promis par les pouvoirs publics sur le financement de la décarbonation et la mise en œuvre d'un MACF efficace dès janvier 2026. Ce soutien est indispensable pour donner de la visibilité aux industriels et réduire le risque lié à l'adoption de nouvelles technologies. Investir dans la décarbonation donnera accès à l'État à des recettes budgétaires conséquentes (aujourd'hui et à l'avenir), renforcera la souveraineté industrielle et permettra le développement de compétences dans des technologies de décarbonation stratégiques.* »

CONCLUSION

Portée par des ambitions fortes, l'industrie cimentière française est pleinement engagée dans la réduction de son empreinte carbone. Elle progresse aujourd'hui au rythme prévu pour atteindre ses objectifs : -50 % d'émissions en 2030 et -90 % en 2050 par rapport à 2015.

Cependant, la baisse des émissions de GES ne saurait constituer l'unique horizon. La préservation des

ressources naturelles, la gestion durable de l'eau et, plus largement, l'ensemble des impacts environnementaux liés aux activités humaines doivent être intégrés dans une vision globale. À cela s'ajoutent les responsabilités sociale et économique des choix qui sont faits : aucune stratégie environnementale ne peut en être dissociée.

Les solutions à base de ciment ou de liants hydrauliques demeurent des références pour leurs performances techniques, leur compétitivité et la durabilité qu'elles assurent aux ouvrages. Dans un contexte où les aléas climatiques mettent les infrastructures à rude épreuve et où les budgets publics sont de plus en plus contraints, cette durabilité doit être davantage valorisée.

Enfin, même si l'ensemble des acteurs de la construction s'attache à réduire son impact carbone, il ne faut pas perdre de vue que l'empreinte liée à la construction et à l'entretien – environ 3,5 % pour les activités de travaux publics en France –, reste bien moindre que celle générée par l'usage des infrastructures. Les véritables leviers de décarbonation résident dans l'évolution des mobilités : diversification énergétique, développement des transports collectifs, essor des mobilités actives... C'est sur ces transformations d'usage que reposera l'impact le plus déterminant. ■

À retenir

- Les industries de la chaux et du ciment s'engagent activement dans la transition écologique liée au changement climatique, avec des feuilles de route ambitieuses visant la neutralité carbone d'ici 2050. Elles combinent innovation technologique, économie circulaire et valorisation des déchets pour réduire leur empreinte carbone, tout en maintenant leur compétitivité.
- Les deux filières collaborent et mutualisent leurs innovations, notamment sur le captage, le stockage et la valorisation du CO₂ (CCUS).
- Elles soulignent la nécessité d'un soutien public renforcé pour accélérer la transition et sécuriser les investissements.
- La décarbonation passe aussi par une sobriété d'usage : adaptation des produits aux besoins réels, valorisation des matériaux excavés et intégration des principes d'économie circulaire pour réduire les déchets et préserver les ressources naturelles.
- Ces avancées s'inscrivent dans une dynamique collective, alignée sur les objectifs nationaux et européens, pour faire de ces industries des acteurs clés de la neutralité carbone.

RÉFÉRENCES

1. Secten, « Le rapport de référence sur les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques en France », Citepa, juin 2025.
2. Haut-conseil pour le Climat (HCC), « Rapport annuel 2025 – Relancer l'action climatique face à l'aggravation des impacts et à l'affaiblissement du pilotage », juin 2025.
3. Haut-commissariat à la Stratégie et au Plan (HCSP), Note Flash n° 3 : « Comment décarboner au moindre coût ? La valeur de l'action pour le climat », juin 2025.
4. A. Gambin, « Décarbonation de l'industrie de la chaux au service du génie civil », RGRA n° 1008, janvier-février 2025.
5. UP'Chaux, « Feuille de route de décarbonation 2030-2050 », 2023.
6. « Une usine de chaux teste la capture cryogénique du CO₂ pour réduire ses émissions », Techniques de l'ingénieur, rubrique Développement durable et procédés industriels, 2023.
7. A. Jacquet, C. Londero, « De l'amélioration de l'efficacité énergétique à la transformation du CO₂ », *Recyclage & Valorisation*, n° 83, mars 2024.
8. GO CO₂, Concertation préalable du projet GO CO₂ (décarbonation des productions du ciment et de la chaux dans le Grand Ouest), 2025.
9. M. Paquay, « Carmeuse pourra décarboner tous ses sites industriels d'ici fin 2028 », *L'Écho*, 15 septembre 2025.
10. J. Le Brigand, « France Relance : Pigeon pose ses conditions pour la carrière de Vaiges », *Ouest-France*, édition Mayenne, 8 janvier 2025.
11. S. Ténas, « Vers une réduction progressive de l'empreinte carbone – Transition vers la biomasse », *Recyclage & Valorisation*, n° 84, mars 2024.
12. NF EN 459-1 : « Chaux de construction – Partie 1 : Définitions, spécifications et critères de conformité », août 2015.
13. Seddre, *Utilisation des matériaux alternatifs et gestion durable des ressources naturelles*, Guide technique national, 2018.
14. Loi n° 2025-566 du 23 juin 2025 autorisant la ratification de l'amendement à l'article 6 du protocole de Londres.
15. « Accord franco-norvégien : vers un exil géologique du CO₂ industriel français », Techniques de l'ingénieur, 2024.
16. Ademe, « Évaluation du potentiel de stockage géologique du CO₂ en France : étude EvastoCO₂ », Rapport technique, février 2025.
17. « Quel potentiel de stockage géologique du CO₂ en France ? », Techniques de l'ingénieur, 2023.
18. M. Grosso, L. Biganzoli, F.P. Campo, S. Pantini, C. Tua, « Literature review on the assessment of the carbonation potential of lime in different markets and beyond », Report n° 845.0202.70.02, Politecnico di Milano – Department of Civil and Environmental Engineering, Aware Research Group, pour EuLA, 2020.
19. EuLA, « Lime as a Natural Carbon Sink – Examples of Mineral Carbonation in Lime Applications », 2020.
20. J. Kleib, D. Lesueur, W. Maherzi, M. Benzerzour, « Carbonation of a lime-treated soil subjected to different curing conditions », *Transportation Geotechnics*, vol. 44, 2024.
21. Association française pour les émissions négatives (AFEN), « L'élimination du carbone », Fiche d'information, 2023.
22. South Pole & EuLA, « Carbon accounting of recarbonation in lime products », Rapport technique, 2023.
23. L. Helard, C. Le Gouil, « Feuille de route de l'industrie cimentière : diviser par deux ses émissions d'ici 2030 », RGRA n° 1005, août-octobre 2024.
24. France Ciment, « L'industrie cimentière, acteur clé de l'économie circulaire » : <https://www.france-ciment.fr/enjeux/economie-circulaire/>.
25. Ministère de l'Aménagement durable et de la Transition écologique, « Bilan annuel des transports », 2023.
26. C. Le Gouil, « Innovations de l'industrie cimentière pour atteindre la neutralité carbone », RGRA n° 1006, novembre 2024.
27. C. Le Gouil, « Aménagements routiers : ciment, béton et décarbonation », RGRA n° 997, mars-avril 2023.

PF3-PF4 : OPTIMISATION ET VALORISATION EN PLACE DES MATÉRIAUX AUX LHR

POUR DES PLATEFORMES DE HAUTE QUALITÉ

Dans un contexte de raréfaction des ressources naturelles et d'urgence climatique, la valorisation des matériaux en place par traitement aux liants hydrauliques (LHR) devrait se développer. Cette technique, qui transforme les sols existants en plateformes performantes (PF3/PF4), réduit jusqu'à 75 % les déchets, optimise les coûts et renforce la durabilité des infrastructures.

RN102 à Brioude (Haute-Loire) : traitement mixte couche de forme-PF3.



© SPIE BATIGNOLLES VALÉRIAN/M. BUFALO

La valorisation des matériaux en place par traitement aux liants hydrauliques (liants hydrauliques routiers – LHR – ou ciments) s'impose comme une technique clé pour concevoir des infrastructures durables : routes, autoroutes, plateformes aéroportuaires, ferroviaires, portuaires ou industrielles.

La qualité de ces ouvrages dépend en grande partie de la performance de la plateforme support, composée du sol de la partie supérieure des terrassements (PST) et d'une couche de forme. Cette plateforme doit assurer plusieurs fonctions essentielles : garantir la portance nécessaire au compactage des couches de chaussée, limiter la sensibilité aux intempéries, maintenir une rigidité durable et contribuer à la performance globale de la structure. Le niveau de portance (P_{Fi}, de PF1 à PF4) conditionne le dimensionnement des couches d'assise : plus la portance est élevée, plus la chaussée peut être optimisée en épaisseur, coût et impact environnemental.

Le traitement des sols en place au liant hydraulique, associé éventuellement à un prétraitement à la chaux pour les matériaux argileux, améliore consi-

dérablement la portance, jusqu'à atteindre des niveaux PF3 ou PF4. Cette approche permet non seulement d'optimiser la structure, mais aussi de préserver les ressources naturelles, de réduire les transports et, plus globalement, de limiter les impacts environnementaux des travaux de construction et d'entretien.

La consommation française de ressources granulaires d'origine naturelle pour le BTP, et plus particulièrement pour la construction ou l'entretien des routes, est considérable : on estime à environ 200 millions de tonnes par an la quantité de granulats « neufs » utilisés dans les infrastructures routières. Dans le même temps, la production de déchets de chantiers inertes atteint elle aussi des volumes importants : plus de 200 millions de tonnes, dont environ les deux tiers de terres excavées.

La raréfaction des ressources naturelles et la volonté de limiter les déchets produits incitent de plus en plus de maîtres d'ouvrage et d'entreprises à valoriser les matériaux en place et ainsi à s'inscrire dans une démarche d'économie circulaire exemplaire : on consomme moins et on pollue moins.

AUTEURS

Joseph Abdo

JA-Consulting

Cédric Le Gouil

Directeur Routes & terrassements
France Ciment

LA PLATEFORME SUPPORT, UN ÉLÉMENT CLÉ DE LA PERFORMANCE DES CHAUSSÉES

RÔLE ET CLASSIFICATION

La plateforme support constitue la base de la chaussée. Elle doit répondre à des exigences à court terme (portance, traficabilité, protection contre les intempéries) et à long terme (homogénéité, drainage, résistance au gel).

Cinq classes de portance (PF1 à PF4) sont définies selon le module de déformation (EV2)¹ (**tableau 1**). Une plateforme de classe PF1 est déconseillée pour les chaussées à assises liées, tandis que les classes PF3 et PF4 garantissent une durabilité supérieure et une meilleure qualité d'exécution grâce à l'effet d'enclume favorisant le compactage de la couche de fondation (**figure 1**).

INFLUENCE SUR LA STRUCTURE

L'augmentation de la portance de la plateforme entraîne une réduction de l'épaisseur des couches de chaussée. Elle améliore la compacité des matériaux d'assise, leurs performances mécaniques et par conséquent leur résistance aux agressions climatiques, tout en prolongeant la durée de vie de l'ouvrage. Les structures traitées aux LHR visent donc un objectif minimal de PF3, idéalement PF4.

À titre d'exemple, et afin de mettre en évidence les gains en épaisseur entre structure granulaire PF2 et structure optimisée par traitement PF3, deux structures de chaussées routières dimensionnées selon la norme NF P98-086² ont été comparées : l'une reposant sur une PF2, l'autre sur une PF3 (**figures 2**).

Hypothèses prise en compte dans le dimensionnement :

- route ou plateforme industrielle avec un trafic T3 moyen de 200 PL/j/sens ;
- durée de vie de 20 ans, CAM 1, risque 10 %, taux d'accroissement 2 % ;
- indice de gel de référence : 55 °C de jour.

STRATÉGIE DE CONCEPTION DES PLATEFORMES SUPPORT

AMÉLIORATION DU NIVEAU DE PORTANCE DE L'ARASE

L'amélioration ou la stabilisation de l'arase des terrassements peut être obtenue principalement par deux techniques :

- Le traitement à la chaux vive, efficace sur les sols argileux humides, améliore temporairement la portance et réduit la sensibilité à l'eau et au gel.
- Le traitement aux LHR confère une portance élevée (AR2 à AR3) de manière durable, avec un faible dosage (2 à 3 %).

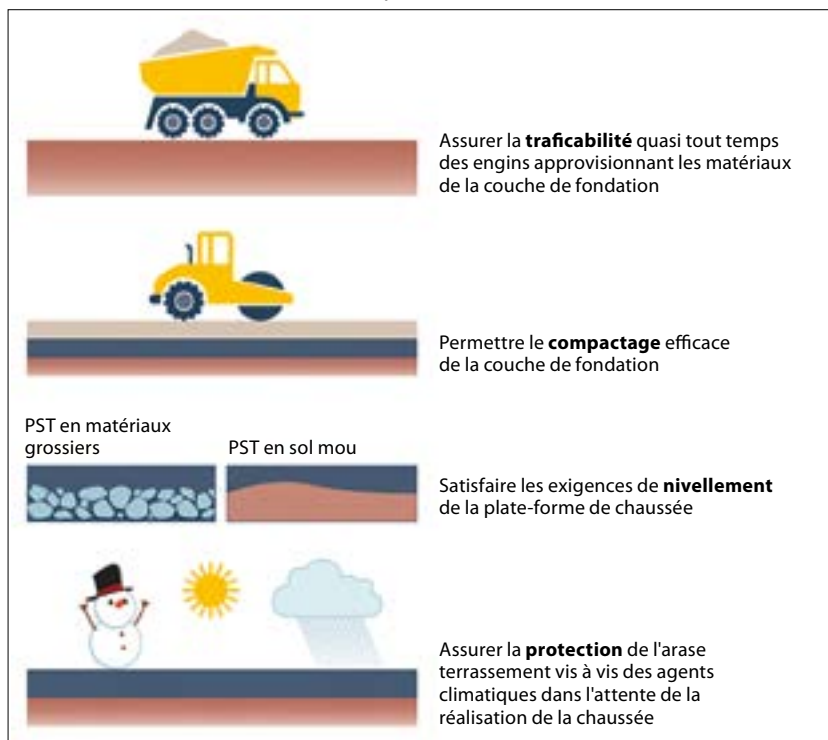
–Tableau 1–

Classement des plateformes.

Module (MPa)	20 à 50 MPa	50 à 80 MPa	80 à 120 MPa	120 à 200 MPa	Au-delà de 200 MPa
Classe de plateforme	PF1	PF2	PF2eqs	PF3	PF4

–Figure 1–

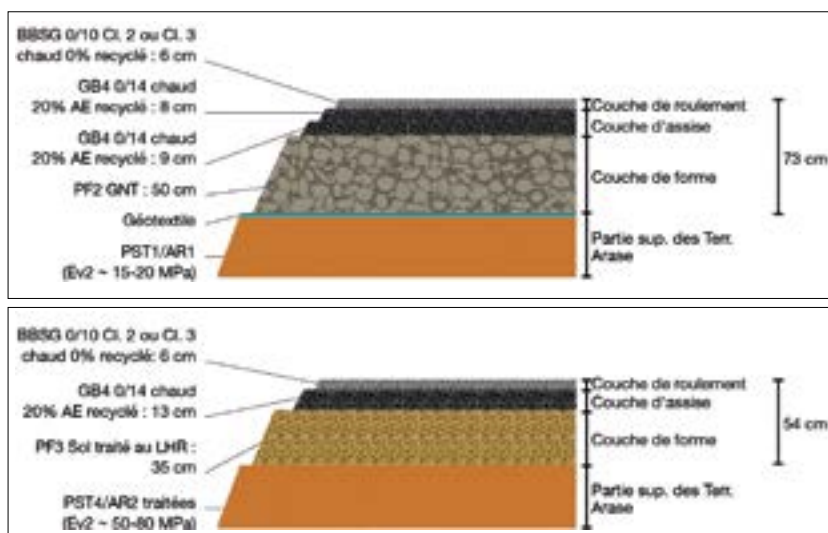
Fonctions à court terme de la couche de forme¹.



–Figures 2–

Comparaison de deux structures de dimensionnement équivalent :

(a) sur couche de forme en grave non traitée (GNT) ; (b) sur arase/couche de forme traitées.



OPTIMISATION DE LA COUCHE DE FORME

Trois techniques sont couramment employées :

- La couche de forme granulaire, efficace mais consommatrice de ressources et productrice d'excédents de terre, est limitée à PF2qs.
- La couche de forme traitée à la chaux, adaptée aux sols argileux, peut atteindre PF3 sous conditions.

- La couche de forme traitée aux liants hydrauliques, la plus performante, peut couramment atteindre PF3 et potentiellement PF4 avec une grande rapidité d'obtention de la portance (**photo 1**).

DIMENSIONNEMENT DES COUCHES DE FORME

Le *Guide des terrassements routiers (GTR)*¹ définit empiriquement les épaisseurs nécessaires selon la classe d'arase et la nature du matériau :

- Les couches de forme traitées aux LHR nécessitent des épaisseurs plus faibles (généralement 35 cm) pour atteindre la classe PF3, contre 65 à 100 cm pour des couches granulaires équivalentes, limitées à PF2qs.
- Les retours d'expérience des bureaux d'études, maîtrises d'œuvre et entreprises de terrassement confirment que les plateformes PF3 sont couramment réalisées sur les réseaux structurants par traitement de la couche de forme.
- Pour les niveaux de portance PF4, les exigences deviennent parfois difficiles à atteindre par simple traitement de la couche de forme, qui requiert un contrôle qualité plus rigoureux et des conditions de gisement présentant une grande homogénéité. Le traitement aux LHR combiné de l'arase et de la couche de forme semble être une solution très intéressante à considérer, puisqu'il permet d'obtenir des performances relativement élevées sur le complexe {PST + couche de forme} tout en limitant le niveau d'exigence quant à la réalisation des travaux et l'homogénéité du gisement. Autrement dit, il est plus facile d'avoir une PF4 en traitant l'arase et la couche de forme de façon « traditionnelle » que de chercher à l'obtenir en traitant uniquement la couche de forme de façon « exceptionnelle ».

TENDANCES ET ÉVOLUTIONS TECHNIQUES

La conception routière évolue vers une approche globale intégrant terrassement, plateforme et chaussée (**photo 2**). Le bilan doit également être global et intégrer les aspects techniques, économiques, énergétiques et environnementaux.

L'objectif est de maximiser la portance de la plateforme (PF3/PF4) afin de réduire l'épaisseur et donc le coût des couches d'assise, tout en limitant les impacts environnementaux. L'utilisation des liants, bien que génératrice d'émissions de gaz à effet de serre (GES) à la fabrication, est compensée par leur faible dosage et les gains structurels associés. Le traitement des sols aux LHR devient en effet très intéressant car il contribue à diminuer la consommation de matériaux nobles, la production de déchets, la consommation énergétique, voire, en fonction du contexte du chantier (distances de transport, nature et dosage du liant utilisé...), les émissions de GES.

En effet, comparativement aux solutions granulaires, le seul impact négatif que l'on peut attribuer aux solutions de traitement est l'émission de GES, le fameux CO₂eq, lié à l'utilisation de chaux ou de liants hydrauliques. Mais les industriels français des liants hydrauliques, adhérents de France Ciment, n'ont cessé de réduire l'empreinte carbone de leurs produits³. En conséquence, les émissions de CO₂eq des solutions de traitement se réduisent progressivement et on peut dorénavant constater que, sous certaines conditions locales (principalement les distances entre le chantier et la carrière ou l'exutoire des déblais) et en fonction du type et du dosage en liant retenus, le bilan GES du traitement des sols peut également devenir positif.

—Photo 1—

Réalisation d'une plateforme support haute qualité PF4 pour la déviation et mise à 2x2 voies de la RN141 (Charente).





© ARTOIS DRONES - COLAS

-Photo 2-

Travaux de terrassement pour réalisation d'une plateforme support haute qualité PF3 pour un parc logistique dans le Nord.

DURABILITÉ ET RÉSILIENCE DES STRUCTURES

La durabilité d'une structure dépend étroitement de la qualité de sa plateforme.

Le traitement des sols aux LHR agit à deux niveaux :

- À court terme, il améliore la compacité, protège contre le gel et stabilise la PST.

- À long terme, il renforce la résistance à l'eau, à l'érosion et aux phénomènes de retrait-gonflement. Les retours d'expérience montrent qu'une plateforme PF3 offre une meilleure qualité d'exécution et une meilleure résilience climatique. Il est notamment reconnu que l'ajout de liants hydrauliques améliore nettement la résistance à l'érosion des sols, et ce, même à faible dosage (dès 2 %), et la résistance des ouvrages, face à l'intensification des crues par exemple⁴.

Les retours d'expérience confirment qu'après près de 50 ans d'usage, les plateformes traitées aux LHR ne présentent pas de désordres spécifiques et offrent un excellent comportement dans le temps.

SIMULATION ENVIRONNEMENTALE ET ÉCONOMIQUE

Une simulation menée à l'aide des éco-comparateurs Perceval, SEVE-TP et Talnia-Voirie a permis de comparer deux structures, représentées dans la figure 2 :

- une structure traditionnelle PF2 (couche granulaire GNT de 50 cm) ;
- une structure optimisée PF3 (couche traitée aux LHR de 35 cm sur arase traitée).

Cette simulation s'appuie sur des hypothèses que l'on peut considérer comme représentatives de cas courants rencontrés en France métropolitaine. De nombreux facteurs, comme les distances de transport (entre les différents sites de production des matières premières, de fabrication des mélanges et le lieu du chantier, les exutoires) et la nature des

matériaux employés (types de liants, dosages, pourcentage d'agréats d'enrobés (AE)...), influent sur les résultats.

PRINCIPALES HYPOTHÈSES RETENUES DANS LES SIMULATIONS

Distances de transport :

- GNT - chantier : 20-30 km suivant l'éco-comparateur
- LHR - chantier : 150 km
- Enrobés - chantier : 20-30 km suivant l'éco-comparateur
- Installation de stockage de déchets inertes (ISDI) - chantier : 20-30 km suivant l'éco-comparateur

Empreintes carbone :

- GNT : 2,6 kg CO₂/t
- LHR courant : 550 kg CO₂/t
- LHR « bas carbone » : 300 kg CO₂/t
- Bitume : 530 kg CO₂/t
- Matériaux bitumineux :
 - GB4 contenant 0-20 % recyclés (AE) : 40-50 kg CO₂/t
 - BBSG sans AE : 50-55 kg CO₂/t

Coûts des matériaux :

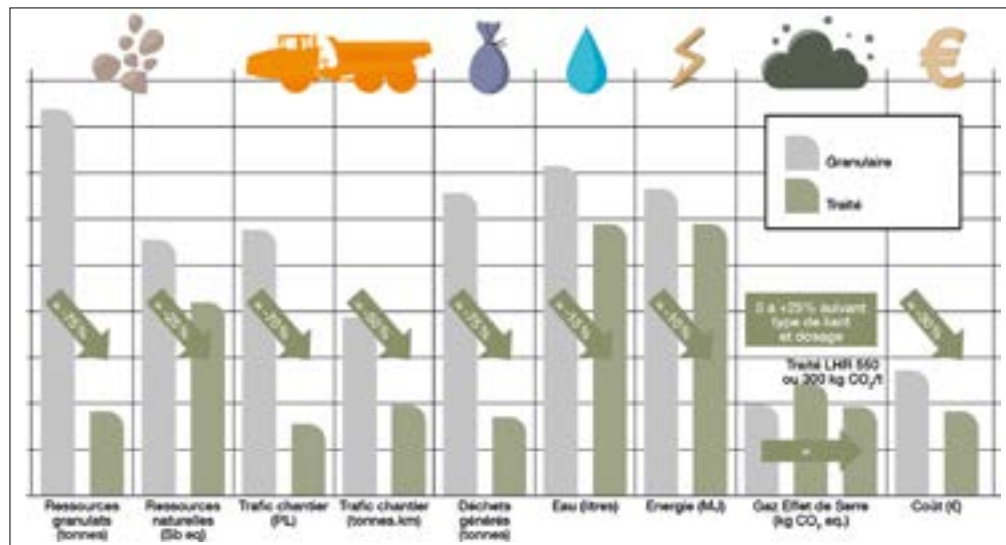
- GNT : 10-14 €/t
- LHR : 130-170 €/t
- Transport et stockage des sols excédentaires : 0,1-0,3 €/m³.km
- GB4 : 45-65 €/t
- BBSG : 50-70 €/t

Remarque

Cet article s'inspire d'un dossier publié en décembre 2025 par Cimbéton (Routes Info n° 43) qui comporte un développement technique approfondi soulignant les avantages apportés par la technique de traitement des sols aux liants hydrauliques et qui s'appuie sur de nombreux témoignages d'experts techniques représentant toute la filière routes et terrassements : Idrrim, Cerema, DIR, université Gustave Eiffel, collectivités territoriales, Syndicat professionnel des terrassiers de France, bureau d'ingénierie routière...

-Figure 3-

Impact du choix entre structure PF2 granulaire et structure PF3 traitée sur les indicateurs environnementaux et économiques. Valeurs individuelles ou moyennes des deux ou trois résultats obtenus sur les trois écomparateurs.



RÉSULTATS

Les résultats sont sans équivoque (figure 3) :

- Économie de ressources : ≈ -25 à ≈ -75 % suivant l'indicateur
- Réduction des déchets : ≈ -75 %
- Baisse du trafic chantier : ≈ -50 à ≈ -70 % suivant l'indicateur
- Consommation d'énergie : ≈ -10 %
- Consommation d'eau : ≈ -15 %

Les émissions de CO₂ dépendent en grande partie du type de liant utilisé. En effet, elles sont légèrement supérieures ($\approx +25$ %) pour des liants à forte teneur en clinker, mais deviennent équivalentes lorsqu'un LHR à faible empreinte carbone est utilisé. Sur le plan économique, la solution PF3 traitée se révèle systématiquement moins coûteuse à la construction, tout en améliorant la performance et la durabilité.

CONCLUSION

Le traitement des sols aux liants hydrauliques routiers s'affirme comme une solution incontournable pour concilier les performances technique, économique et environnementale, toutes étant favorisées par un gain de durabilité des ouvrages comparativement aux solutions non traitées.

Cette approche globale, intégrant la portance de la plateforme dans le dimensionnement de la chaussée, permet :

- de réduire la consommation de ressources non renouvelables ;
- de limiter les transports et les nuisances associées ;
- d'améliorer la qualité et la longévité des infrastructures ;
- de renforcer leur résilience face aux changements climatiques.

Cette technique transforme les sols du site en véritables matériaux de construction, supprime les déchets et optimise le coût global.

Pour des représentants de la maîtrise d'ouvrage, elle constitue la base des politiques de maintenance et d'adaptation du réseau structurant. Long-temps perçue comme une solution de substitution, la valorisation des sols en place aux LHR devient aujourd'hui un standard de la construction responsable, à étudier systématiquement dans tout projet d'infrastructure. ■

À retenir

- Le traitement aux liants hydrauliques routiers (LHR) permet de valoriser les sols existants en les transformant en plateformes performantes (PF3/PF4), de réduire les déchets jusqu'à 75 % et d'optimiser les coûts des chantiers tout en renforçant la durabilité des infrastructures routières, aéroportuaires ou industrielles.
- Cette technique améliore la portance des sols, ce qui contribue à limiter la sensibilité aux intempéries et à réduire l'épaisseur des couches de chaussée et donc l'usage de granulats neufs et des distances de transport.
- Les plateformes traitées aux LHR offrent une meilleure résilience climatique, une résistance accrue à l'érosion et une durée de vie prolongée, avec des retours d'expérience montrant une absence de désordres après près de 50 ans d'usage.
- Même si les simulations comparatives devront être réalisées en tenant compte des contextes propres à chaque chantier, la solution de traitement du sol avec optimisation globale sera généralement toujours avantageuse comparée à la solution granulaire traditionnelle.

RÉFÉRENCES

1. Idrim, *Guide des terrassements des remblais et des couches de forme (GTR)*, Cerema, 2024
2. NF P98-086 : « Dimensionnement structurel des chaussées routières - Application aux chaussées neuves », mai 2019.
3. L. Helard, C. Le Gouil, « Feuille de route de l'industrie cimentière - Diviser par deux ses émissions d'ici 2030 », RGRA n° 1005, août-octobre 2024.
4. Y. Boussafir, L. Saussaye, C. Le Gouil, « Résilience climatique des infrastructures et intérêt des liants hydrauliques. L'exemple particulier de l'érosion des sols », Journées techniques Route 2025.



Atelier d'épandage/malaxage dans un traitement de plateforme industrielle au liant hydraulique.

© CHARIER

TRAITEMENT DES SOLS DANS LES OUVRAGES EN TERRE

LA DURABILITÉ DES SOLS TRAITÉS NE SE SUBIT PAS, ELLE SE DÉCIDE

La durabilité du traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques a constitué un enjeu croissant au fil du développement de ces techniques et de leurs champs d'application dans les dernières décennies. Cet article présente une synthèse d'une large revue bibliographique et de retours d'expérience menée pour alimenter le travail de révision en cours du guide technique Traitement des sols (GTS)¹.

L'économie d'un projet de terrassements est très fortement conditionnée par la capacité à réemployer les matériaux naturels excavés, dans des quantités généralement très importantes pouvant atteindre plusieurs millions de mètres cube. Cette caractéristique singulière a conduit les « terrassiers » à chercher toutes les solutions en mesure d'améliorer les taux de réemploi des matériaux naturels (sols et roches) dans le périmètre du chantier.

Lors de la période de reconstruction et de fort développement économique de l'après-guerre, cette quête du réemploi a fait émerger les techniques de traitement des sols à la chaux et au ciment, puis aux liants hydrauliques. Depuis, ces techniques se sont fortement développées et ont contribué notablement à la réduction des coûts et

des impacts environnementaux de la construction au cours du dernier demi-siècle.

La consommation annuelle de chaux dédiée aux opérations de terrassement est estimée à environ 40 millions de tonnes dans le monde, dont environ 400 000 tonnes en France, et celle de liants hydrauliques à plus de 200 millions de tonnes dans le monde, dont près d'un million de tonnes en France². Il est donc question de plusieurs milliards de mètres cube d'ouvrages en terre réalisés avec les techniques de traitement des sols dans le monde chaque année, dont trente à quarante millions de mètres cube en France, ce qui représente, selon les années, environ 30 à 40 % du volume des terrassements.

Les techniques de traitement des sols ont trouvé leur place dans des applications très variées, allant

AUTEURS

Valéry Ferber
Dirigeant
Société Talnia

Yasmina Boussafir
Ingénieure-chercheuse
Université Gustave Eiffel

Lucile Saussaye
Chargée d'études
en mécanique des sols
Chercheuse associée à l'équipe
de recherche ENDSUM
Cerema

Sébastien Hervé
Responsable du groupe
Sols - Ressources -
Déchets - Pollution
Cerema Ouest

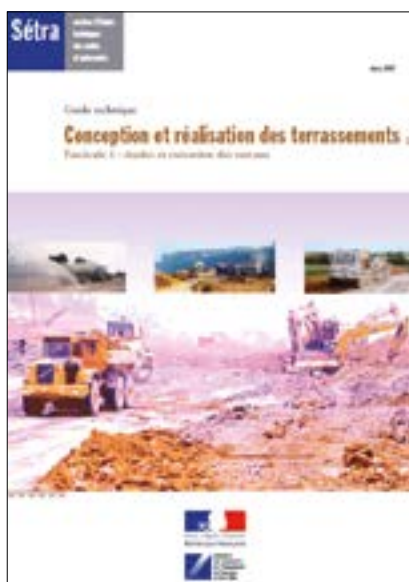
Simon Bonne
Président de la commission
technique
Syndicat des professionnels
du terrassement de France (SPTF)

de la construction des remblais et plateformes routières ou ferroviaires aux plateformes industrielles, portuaires et aéroportuaires, en passant par les ouvrages hydrauliques. En France, cette expérience a progressivement été capitalisée dans de nombreux guides techniques qui en ont favorisé le développement.

La capacité de ces techniques à assurer un comportement durable des ouvrages est telle que la question de la durabilité des ouvrages en sols traités ne se pose généralement que dans des cas très spécifiques de très fortes sollicitations, comme les remblais en zone inondable, les remblais de grande hauteur... La volonté d'utiliser plus largement les techniques de traitement des sols dans les ouvrages hydrauliques en France (digues, réservoirs, barrages...) depuis les années 2000 ou dans des parties d'ouvrages avec des fonctions spécifiques a mis en évidence la nécessité d'évaluer de manière plus rigoureuse encore la durabilité des ouvrages.

—Photos 1—

Couvertures de quelques guides de référence dans le traitement des sols en France.



Le présent article présente une synthèse des retours d'expérience et une revue bibliographique (référentiels techniques et littérature scientifique), réalisée à l'initiative du Syndicat des professionnels du terrassement de France (SPTF) sur cette question de la durabilité des ouvrages en sols traités.

— CE QUE DISENT LES NORMES ET GUIDES TECHNIQUES

Le métier des terrassements est particulièrement délicat à standardiser du fait de la très forte hétérogénéité des matériaux, de la diversité de leurs modalités de réemploi, de la variété des parties d'ouvrages concernées et du caractère original de chaque projet. Pourtant, l'expérience française en matière de terrassement en général, et de traitement des sols en particulier, a été soigneusement capitalisée depuis les années 1970 dans des documents nationaux, rédigés collaborativement entre le réseau technique et scientifique de l'administration, l'ingénierie privée et les entreprises de travaux.

Pour ce qui concerne le traitement des sols, les normes se limitaient généralement au périmètre de la réalisation des essais jusqu'à ce que la normalisation européenne des terrassements en ouvre l'application aux méthodologies d'étude, de réalisation et de contrôle de la qualité (NF EN 16907-4)³. Certains points de la conception sont abordés ponctuellement dans le *Guide des terrassements des remblais et des couches de forme*⁴, dans le guide *Traitement des sols* (GTS)¹ en cours de révision, dans le guide *Conception et réalisation des terrassements*⁵, dans le guide d'application à la réalisation des assises de chaussée⁶ et dans la norme de dimensionnement des chaussées⁷.

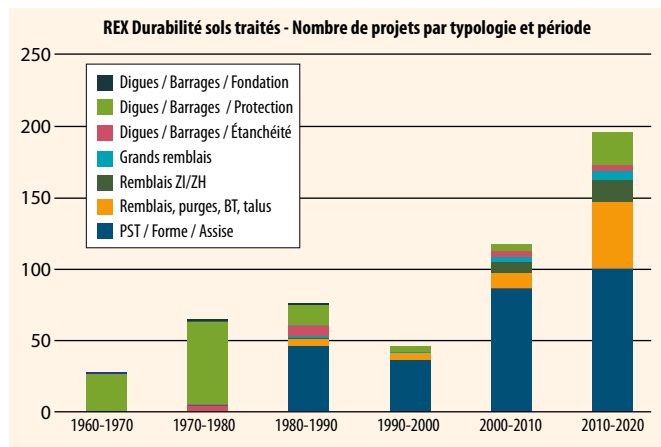
On observe que les documents techniques ont été essentiellement consacrés aux ouvrages routiers. Toutefois, un bulletin récent du Comité international des grands barrages décrit et propose des méthodologies d'application adaptées aux exigences spécifiques des ouvrages hydrauliques⁸. Dans ce référentiel technique (normes et guides), l'objectif de durabilité de l'ouvrage est pris en compte de manière essentiellement implicite.

— 60 ANS DE RETOURS D'EXPÉRIENCE

Les nombreux retours d'expérience documentés de traitement de sols dans les ouvrages en terre existant dans la littérature ont permis d'identifier plus de 500 projets et/ou ouvrages s'étendant des années 1960 à 2020, dans des champs d'application variés intégrant aussi bien le domaine routier, ferroviaire ou des plateformes que celui des

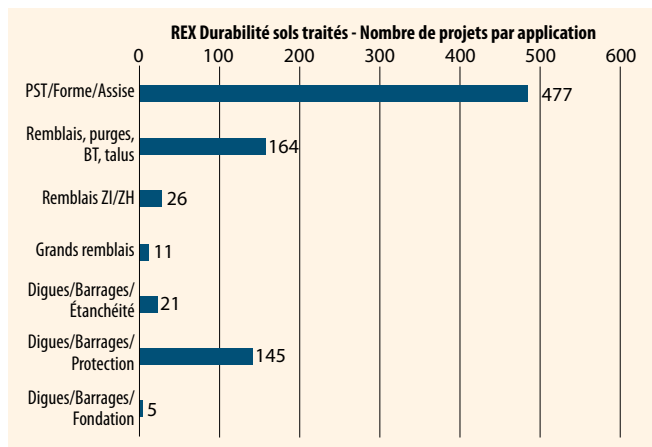
-Figure 1-

Répartition dans le temps des retours d'expérience identifiés.



-Figure 2-

Répartition des retours d'expérience identifiés par domaine d'application.



ouvrages hydrauliques (figures 1 et 2). Cet inventaire n'a pas vocation à être exhaustif et il faut noter que les grands projets (autoroutes, lignes à grande vitesse...) sont comptabilisés pour « un projet » alors qu'ils sont tous concernés par de nombreux ouvrages (ZI/ZH, remblais de grande hauteur...). Les cas d'ouvrages routiers ont pu être recensés en grand nombre du fait de la mémoire « récente » des acteurs interviewés. Cependant, de nombreux retours d'expérience dans le domaine des ouvrages hydrauliques ont été identifiés, notamment dans les années 1960-70. Cette forte proportion s'explique en particulier par le travail de recensement mené par le Comité international des grands barrages⁹, consolidé par les travaux bibliographiques des projets de recherche menés au cours des vingt dernières années, notamment le projet DigueELITE¹⁰. Si le nombre de retours d'expérience est très important, le niveau de précision des informations disponibles est en revanche assez hétérogène, allant d'une brève description du projet et des conditions de traitement jusqu'à des documents techniques très détaillés sur le projet, les formules de traitement, voire les conditions de réalisation et d'exploitation. Ces éléments détaillés sont en cours d'exploitation pour produire une synthèse plus approfondie qui sera mise à disposition du groupe de révision du GTS. Grâce aux éléments disponibles certains enseignements peuvent d'ores et déjà être tirés sur l'évolution des pratiques et la durabilité des ouvrages concernés :

- L'application classique aux remblais courants, parties supérieures des terrassements (PST) et couches de forme et d'assise routières fait apparaître un large consensus sur la capacité du traitement des sols à garantir la durée de vie des ouvrages. Néanmoins, les quelques retours d'expérience infructueux font ressortir l'importance de la maîtrise de la qualité dans la réalisation du traitement (homogénéité des sols traités, maîtrise des dosages, qualité du malaxage) et de la conception globale de l'ouvrage (qualité du drainage par exemple).

- Les applications routières ou ferroviaires spécifiques telles que les remblais en zone inondable/ zone humide ou les remblais techniques (remblais contigus aux ouvrages d'art) ont été largement exploitées et ont donné satisfaction quant à la capacité du traitement des sols à répondre durablement à ces sollicitations exigeantes du point de vue mécanique et/ou hydraulique.

- Les États-Unis ont très largement utilisé le traitement à la chaux ou au ciment à partir des années 1960 dans de nombreux ouvrages hydrauliques (barrages, réservoirs, digues) (photo 2). De l'analyse même du CIGB, les coûts de maintenance des éventuels désordres mineurs observés se sont avérés très limités au regard des économies apportées par le traitement des matériaux in situ. Il est à noter qu'au début de cette pratique, les matériels et les méthodes de réalisation étaient très rustiques et que les dosages en liant étaient beaucoup plus élevés que dans la pratique actuelle (dosages en ciment dépassant souvent 10%). La question de la fissuration hydraulique était d'ailleurs prise en compte dans la conception des ouvrages, ce qui montre que ce phénomène ne constitue pas nécessairement un obstacle au traitement des sols dans les ouvrages hydrauliques.

-Photo 2-

Vue récente de la digue du canal Friant-Kern en Californie, renforcé dans les années 1970 par de l'argile plastique traitée à la chaux.



© U-HOIST

• Depuis les années 2000, de nombreux ouvrages hydrauliques expérimentaux en vraie grandeur réalisés en sols fins traités à la chaux¹¹⁻¹³ ont été soumis à des sollicitations agressives du point de vue de l'érosion externe (surverses par exemple). Cela a aussi été le cas sur un ouvrage réel¹⁴ (photo 3). Les sollicitations appliquées à court terme ont confirmé les observations des recherches en laboratoire quant à la capacité des sols traités à résister à ces sollicitations, mais il serait intéressant de les reproduire à plus long terme pour compléter cette démonstration. Ceci est prévu dans le cadre de certains projets, comme à Vlassenbroeck en Belgique (projet Interreg North-West Europe BONSAI, <https://bonsai.nweurope.eu>).

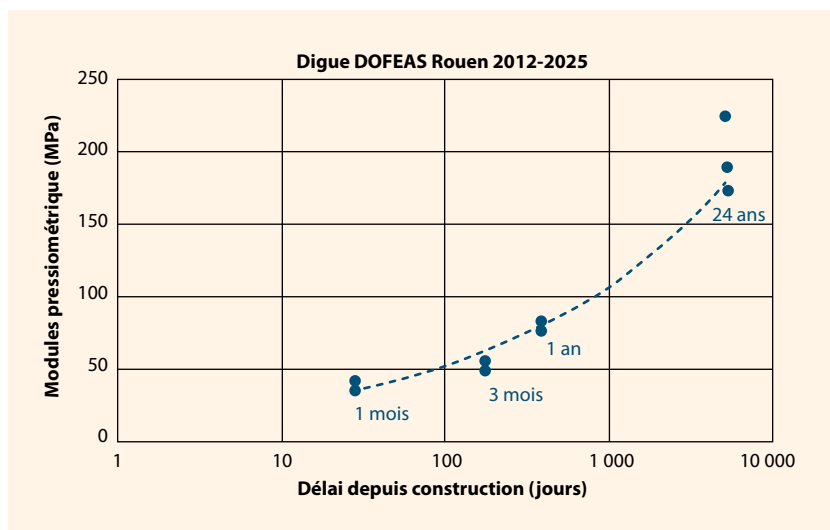
—Photo 3—

Surverse sur le batardeau de Pannecière en France en arène granitique traitée au liant hydraulique.



—Figure 3—

Évolution du module pressiométrique du limon traité à 2,5 % de chaux au cœur de la digue expérimentale DOFEAS-Lhoist.



du traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Elle repose sur une centaine de publications s'étalant des années 1960 à 2025, portant aussi bien sur des résultats de recherches menées en laboratoire sur les mécanismes de dégradation que sur des retours d'expérience d'ouvrages réels ou expérimentaux en vraie grandeur dans les domaines routiers et des ouvrages hydrauliques. D'une manière générale, il a été considéré dans la revue bibliographique que les publications traitaient de la durabilité si elles portaient sur l'évolution des caractéristiques physico-chimiques et géotechniques à long terme du sol traité et/ou de l'ouvrage, sous sollicitations thermiques, hygrométriques et/ou mécaniques.

Le regard sur la durabilité des sols traités et des ouvrages en terre a particulièrement progressé avec le projet ANR TerDOUEST, dont les résultats ont été communiqués dans un rapport complet paru en 2011 et un séminaire international en 2013. L'ampleur des recherches menées au cours de ce projet, de la physico-chimie des sols traités à leur comportement mécanique et des mécanismes à l'échelle microscopique au comportement en vraie grandeur, n'ont pas d'équivalent connu dans la littérature.

Les principaux résultats de la synthèse bibliographique commandée par le SPTF sont résumés ci-après et le rapport de synthèse sera remis au groupe de révision du GTS.

PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES À COURT ET LONG TERME DES SOLS TRAITÉS À LA CHAUX ET/OU AU LIANT HYDRAULIQUE

Quelle que soit la nature des sols considérés, l'amélioration des propriétés géotechniques des sols par le traitement est connue et décrite depuis les toutes premières publications des années 1960, et très largement reconnue par les praticiens qui l'observent dans la réalisation des travaux.

La baisse de la plasticité, l'augmentation des performances mécaniques (module et résistance, en compression, en traction, au cisaillement, caractéristiques pressiométriques), la réduction de la sensibilité au retrait-gonflement et l'amélioration de la résistance au phénomène de cryosuction et aux cycles gel-dégel, la résistance à l'érosion (interne et externe) font l'objet d'un consensus de l'ensemble des publications.

Bien au-delà des effets à court terme, il est aussi reconnu par l'ensemble des publications que les performances des sols traités augmentent de manière régulière avec le temps sous l'effet conjugué de la prise pouzzolanique (dans les sols traités à la chaux, exemple en figure 3¹⁵) et de l'hydratation progressive des composés cimentaires des liants hydrauliques (à titre d'exemple, le suivi sur 20 ans de la couche de forme traitée d'une ligne ferroviaire à grande vitesse, figure 4¹⁶).

Deux niveaux d'amélioration des performances sont ainsi définis pour distinguer :

- une amélioration de court terme uniquement (dite « amélioration »), qui vise essentiellement à optimiser les conditions de réalisation des travaux, dont il n'est pas nécessairement attendu de durabilité ;
- une amélioration de moyen et long terme (dite « stabilisation »), qui est recherchée pour répondre à des spécifications de conception des ouvrages, dont il est attendu une durabilité maîtrisée.

EFFETS DES SOLlicitATIONS DE LONG TERME SUR LES SOLS TRAITÉS À LA CHAUX ET/OU AU LIANT HYDRAULIQUE

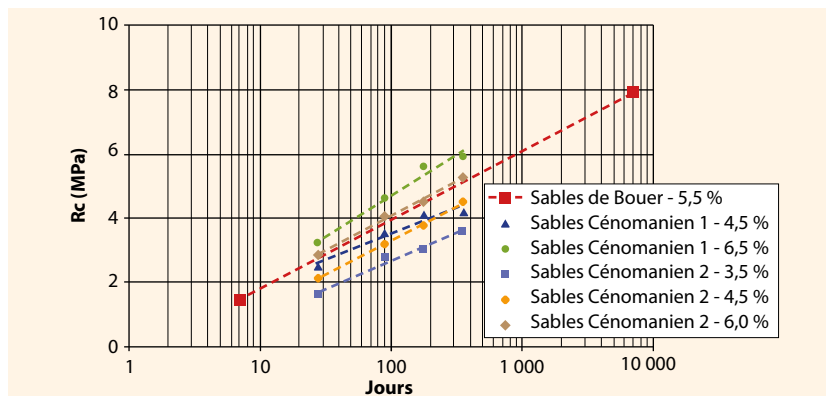
L'effet des sollicitations de long terme sur le comportement des sols traités a fait l'objet de nombreuses discussions dans les publications scientifiques, en particulier depuis le début des années 2000. En effet, des recherches en laboratoire se sont attachées à soumettre les sols traités à des « agressions » visant à refléter les sollicitations auxquelles sont soumis les ouvrages : saturation complète, cycles séchage-humidification, cycles gel-dégel, flux hydraulique constant.

Plusieurs études ont aussi été réalisées sur des ouvrages en vraie grandeur, soit en effectuant des essais in situ, soit en menant des essais en laboratoire sur des échantillons prélevés dans l'ouvrage. Les résultats de ces recherches ont contribué à identifier de manière précise les mécanismes à l'œuvre dans les processus de dégradation des performances des sols traités par rapport aux performances obtenues en laboratoire ou à court terme. Il résulte ainsi de ces recherches que :

- La tranche superficielle des ouvrages en terre est affectée par les agents météoriques sur une épaisseur de quelques centimètres à un mètre (figure 5) sous climat tempéré¹⁷⁻²⁰, la profondeur dépendant de la formulation du traitement et des sollicitations.
- Dans la partie la plus superficielle des ouvrages en sols traités à la chaux, un phénomène de carbonatation est observé. Il progresse à une vitesse annuelle décroissante avec le temps et peut dégrader partiellement la résistance mécanique du matériau²¹ sur une épaisseur décimétrique à long terme.
- La résistance aux cycles séchage-humidification dépend très rigoureusement du choix de la formulation (liant(s) et dosage(s)). Les mêmes auteurs ont démontré un maintien des performances pour des dosages en liant(s) élevés (figure 6)²² et des dégradations lorsque les formulations étaient insuffisantes²³.
- Il en est exactement de même de la résistance aux cycles gel-dégel : une formulation visant des performances élevées assure une bonne tenue aux cycles climatiques (figure 7)²⁴, alors qu'une formulation inadaptée conduit à des pertes de résistance avec les cycles de gel-dégel²⁵⁻²⁶.

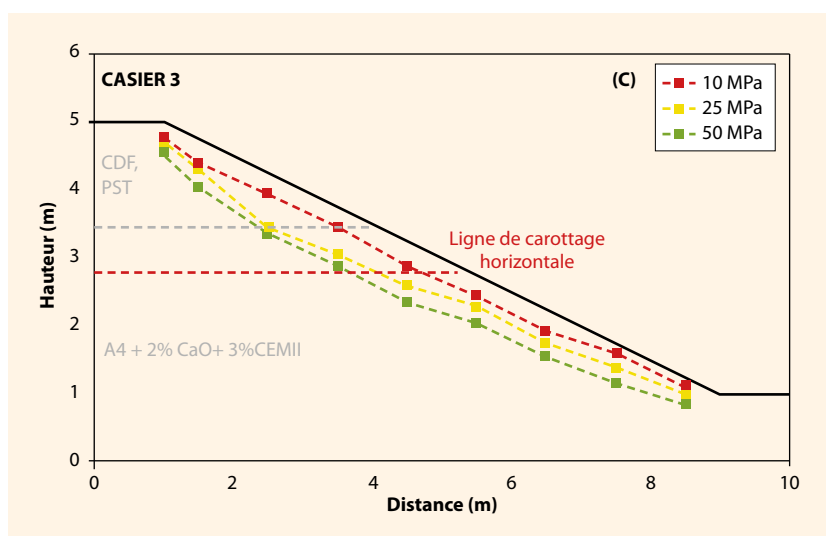
-Figure 4-

Évolution de la résistance à la compression de matériaux de couche de forme traitée de la LGV Atlantique en fonction du temps (en jours).



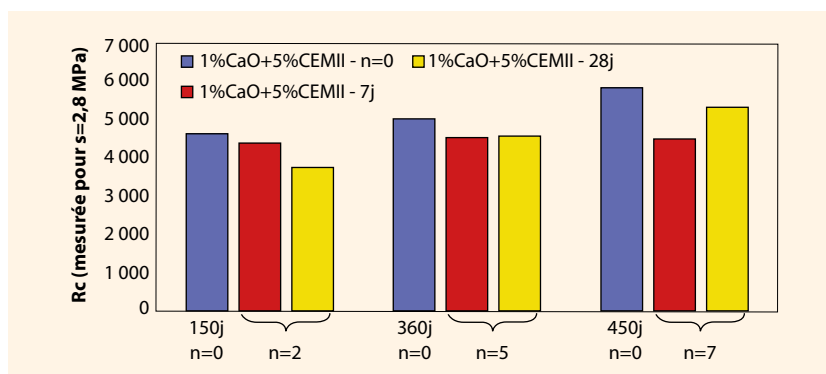
-Figure 5-

Courbes d'iso-valeurs de résistance au pénétromètre dynamique dans le casier 3 du remblai de Héricourt.



-Figure 6-

Évolution de la résistance en compression après 2 à 7 cycles de séchage-humidification d'un limon traité à la chaux et au ciment.



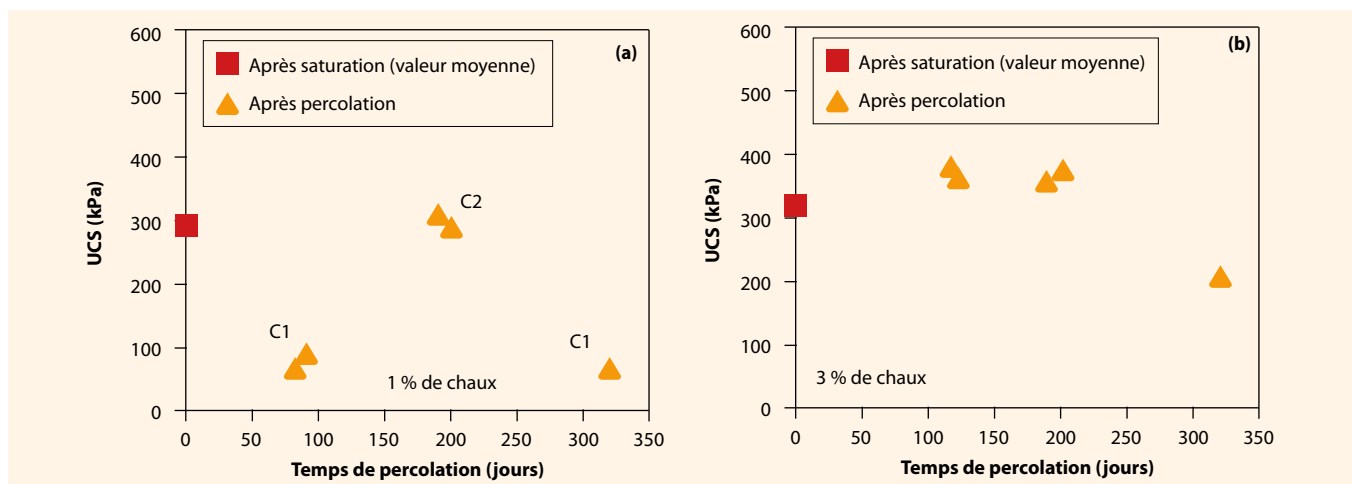
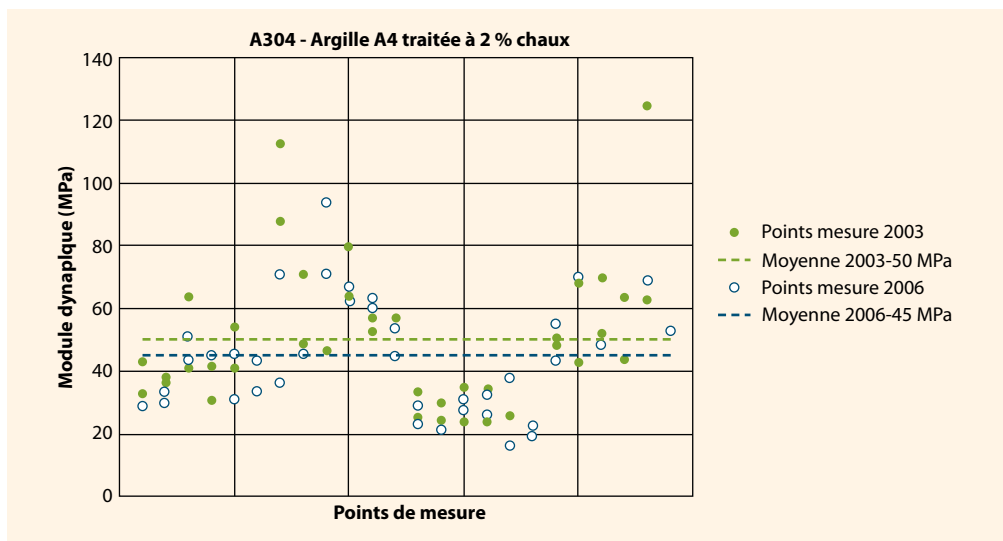
- Des sols traités à la chaux soumis à un flux hydraulique permanent sont susceptibles de perdre une part de leur résistance à long terme dans un cas de faible dosage et de perméabilité élevée (figure 8a)²⁷. À l'inverse, un dosage en chaux élevé et des conditions de compactage assurant une faible perméabilité permettent de maintenir une résistance élevée (figure 8b).

-Figure 7-

Évolution des portances mesurées à la Dynaplaque sur une argile A4 traitée à 2 % de chaux et soumise aux agents atmosphériques dans les Ardennes pendant 3 ans sans protection.

-Figures 8-

Exemple de l'évolution de la résistance à la compression simple du limon de Jossigny traité à la chaux en fonction du temps de percolation : (a) Traitement avec 1 % de chaux (C1 éprouvettes dont la perméabilité est supérieure à celle de C2). (b) Traitement à 3 % de chaux.



Les résultats des recherches dans ce domaine conduisent ainsi à des conclusions qui peuvent paraître parfois contradictoires, tantôt favorables, tantôt défavorables. Ces apparentes contradictions posent systématiquement la question de la pertinence de la formulation adoptée. La finalité de la formulation est justement de définir les bons choix de liant, de dosages et de mise en œuvre selon la place du matériau traité dans l'ouvrage et les sollicitations auxquelles il sera exposé. À la décharge des auteurs concernés, on constate aussi que les objectifs de performance visant à répondre à certaines sollicitations très spécifiques ne sont pas encore explicitement définis par les référentiels techniques (exposition directe aux cycles de gel-dégel par exemple).

RÉSISTANCE À L'ÉROSION DES SOLS TRAITÉS À LA CHAUX ET/OU AU LIANT HYDRAULIQUE

Dans les ouvrages hydrauliques (digues, réservoirs, barrages...), la conception des différentes parties d'ouvrage est une question centrale et ancienne dont l'ouverture à l'innovation est très prudente, ce qui résulte probablement du niveau d'exigence très élevé du fait des enjeux de sécurité associés. Le

traitement des sols y est apparu comme étant une solution pertinente, comme le montre le grand nombre de projets recensés en 1986 par le CIGB. Pour ces applications, il est souvent nécessaire de prendre en compte la question supplémentaire de la résistance à l'érosion, en particulier pour les parties d'ouvrage soumises au battillage et/ou à un écoulement d'eau (structures d'étanchéité, parements...). C'est ce qui a motivé de nombreuses recherches sur le comportement des sols traités soumis aux phénomènes d'érosion interne et externe par des essais en laboratoire ou sur des ouvrages expérimentaux. Leurs résultats reflètent l'effet spectaculaire du traitement à la chaux et/ou au liant hydraulique sur la résistance à l'érosion des sols traités (photos 4 et figure 9)²⁸⁻²⁹.

Cette capacité des sols traités à résister à la force érosive de l'eau a été constatée aussi bien sur des ouvrages expérimentaux que sur des ouvrages réels sur le très long terme. Des applications fructueuses ont été relevées¹⁴, mais elles sont peu documentées et ne mentionnent pas d'objectifs de formulation. Or, la formulation du traitement, c'est-à-dire le(s) type(s) de liant(s), leur pourcentage et éventuellement le taux de compactage, constitue

là encore une étape fondamentale pour maîtriser la durabilité d'un traitement et atteindre notamment une résistance à l'érosion suffisante.

SYNTHÈSE

La capacité du traitement des sols à garantir la durabilité des ouvrages en terre est empiriquement appuyée par deux faits majeurs :

- des techniques utilisées massivement depuis plus d'un demi-siècle dans des milliards de mètres cube d'ouvrages en terre qui répondent aux niveaux de service attendus dans leur immense majorité ;
- des retours d'expériences très nombreux qui contribuent à préciser des règles de formulation et de conception pour des ouvrages durables.
- De cette large revue sur la durabilité des sols traités dans les ouvrages en terre, il peut être retenu trois grandes idées :
- L'effet du traitement des sols sur l'amélioration de leurs caractéristiques techniques est indiscutable, tout comme le fait qu'elles progressent favorablement au cours du temps.
- Il n'y a pas « un » traitement des sols, mais un éventail infini d'associations de liants et de dosages que l'on peut ajuster pour répondre à un objectif de performance adapté à la fonction remplie par le matériau traité dans l'ouvrage.
- Les rares pathologies observées sur des ouvrages en sols traités et les conclusions défavorables de certaines études en laboratoire sous des cycles de sollicitations s'expliquent systématiquement par l'application de sollicitations non réalistes, une défaillance dans l'approche de la formulation et de ses objectifs, une conception inappropriée de l'ouvrage et/ou des défauts de qualité de réalisation. Il est donc indispensable de définir des cycles de sollicitations représentatifs des conditions réelles d'exploitation de l'ouvrage, en intégrant les niveaux maximaux de contraintes qu'il pourra rencontrer – notamment dans le contexte du changement climatique – sans chercher à imposer des sollicitations extrêmes dépourvues de pertinence physique.

Les techniques de traitement des sols sont donc en mesure de s'adapter aux matériaux disponibles et aux sollicitations qui affectent les ouvrages. Comme pour tout matériau de construction (bétons, enrobés bitumineux...), la question qui est posée est de savoir quelle formulation de traitement, quelle conception et quelle maintenance sont en mesure de garantir la durabilité de l'ouvrage. Autrement dit, pour le traitement des sols comme pour tous les matériaux de construction, la durabilité ne se subit pas, elle se décide.

En repartant d'une définition de la durabilité proposée à l'issue du projet TerDOUEST, les travaux en cours de révision du GTS proposent la définition suivante du concept de durabilité appliqué au

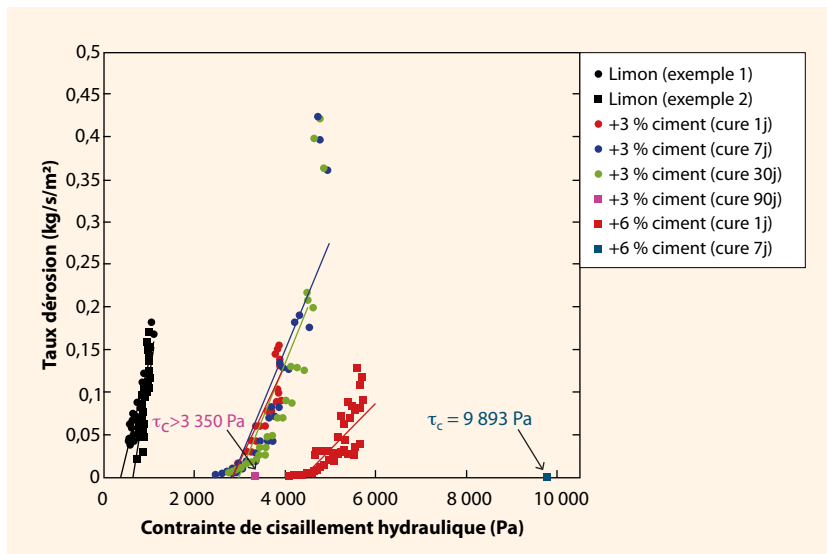
–Photos 4–

Essais d'érosion externe de type *Mobile Jets Erosion Test* (MoJET) réalisés sur les digues DOFEAS, en limon de Marche-les-Dames non traité (à gauche) et traité à 2,5 % de chaux (à droite) 30 jours après la construction.



–Figure 9–

Impact du dosage et du temps de cure sur la loi d'érosion du limon traité au ciment.



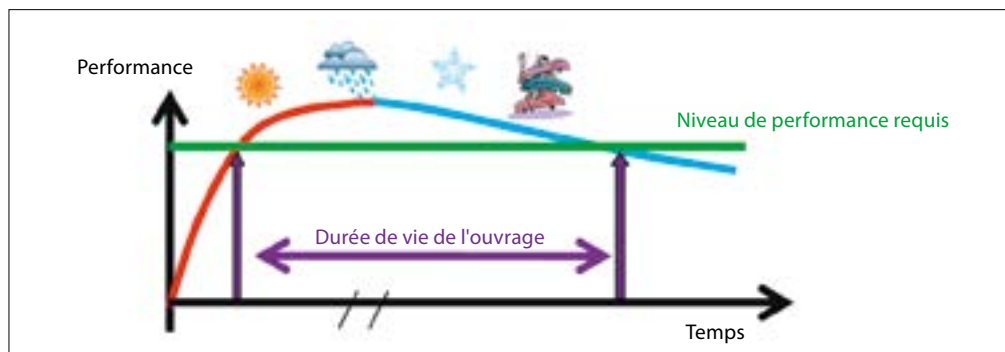
traitement des sols, dans laquelle s'inscrit pleinement la révision du guide :

« La durabilité doit être envisagée par rapport à l'usage prévu d'un ouvrage, de la durée de vie recherchée et des contraintes auxquelles il sera soumis tout au long de son existence. Dans le cas d'un ouvrage en matériaux traités, celle-ci résulte à la fois des choix de conception retenus et du maintien pendant la durée de vie des performances requises pour les différents matériaux qui le composent. »

La figure 10 illustre clairement trois notions :

- La performance attendue d'une partie d'ouvrage/d'un ouvrage pour assurer sa fonction, qui dépend elle-même de :
 - la qualité des études préalables et de la formulation ;
 - la qualité de la réalisation des travaux et de son contrôle.
- La durée de vie de la partie d'ouvrage/d'un ouvrage au-delà de laquelle des opérations de réfection sont attendues, ce qui suppose une maintenance et un entretien régulier (scénario d'entretien) et des visites d'inspection ou de diagnostic. Ces notions dépendent de la stratégie de gestion et de maintenance fixée par le maître d'ouvrage.
- Les conditions d'environnement de l'ouvrage.

—Figure 10—
Illustration du concept
de durabilité.



—Figure 11—
Principe de la matrice Usages/
Performances.



Ainsi, la durabilité d'un matériau traité se traduit par son aptitude à conserver les performances requises, dans les conditions d'usage et d'environnement de l'ouvrage et pour une durée déterminée.

Pour cela, il appartient au concepteur :

- d'identifier les usages recherchés dans l'ouvrage en terre ;
- de déterminer les caractéristiques des matériaux susceptibles de satisfaire ces usages avec des formulations de traitement adaptées ;
- d'associer, en fonction des usages et des matériaux retenus, les essais qui permettront de contrôler les performances à obtenir pour satisfaire les exigences attendues ;
- de réaliser le dimensionnement des différentes parties de l'ouvrage en terre pour sa durée de vie, en proposant les liants et les dosages nécessaires, en intégrant : des coefficients de sécurité, d'éventuelles épaisseurs sacrificielles, des protections pour certaines couches de matériaux traités exposées à des sollicitations autres que la fonction principale recherchée (exemple : pour un usage de stabilité de talus, protéger le talus de l'érosion de surface...) ;
- de déterminer la stratégie de maintenance adaptée à l'usage et à la durée de vie attendue.

Par rapport à une conception d'ouvrage ainsi définie, le GTS a pour finalité de définir :

- les méthodes permettant de réaliser les études de faisabilité et de formulation ;
- les prescriptions à suivre en phase de réalisation (qualité, contrôle) pour atteindre les performances visées en études.

Le guide propose également des méthodes de dimensionnement des plateformes routières (PST et CDF). Le GTS révisé répondra donc à de plus larges domaines d'emploi, notamment les ouvrages hydrauliques. Pour cela, une matrice Usages/Performances a été proposée par les entreprises de terrassement pour tendre vers une approche performantielle de la formulation du traitement des sols (figure 11). Grâce à cette matrice, le concepteur pourra associer à l'usage recherché les performances à obtenir pour satisfaire les exigences attendues et les contrôles à opérer pour garantir la durabilité. Des travaux de recherche et de documentation de retours d'expérience seront encore à mener pour continuer à optimiser et faciliter la maîtrise de la durabilité dans l'ensemble des champs d'application du traitement des sols.

CONCLUSION

L'emploi massif du traitement des sols dans les ouvrages en terre dans le monde depuis plusieurs décennies permet de disposer d'une masse de retours d'expérience et de résultats de recherche extrêmement riche pour traiter de la question de la durabilité. Les enseignements à en tirer portent aussi bien sur les ouvrages routiers, ferroviaires qu'à vocation hydraulique. Ils convergent pour montrer que la garantie de durabilité d'un ouvrage en sols traités, comme pour tous les domaines de la construction, repose sur l'application rigoureuse d'un référentiel de formulation, de conception, de qualité de réalisation et de maintenance.

La révision du guide *Traitement des sols* (GTS) contribuera notamment à répondre au besoin de préciser les exigences de performance des différentes applications. ■

À retenir

- Une revue de bibliographie scientifique et des retours d'expérience a été menée sur la durabilité des ouvrages en sols traités à l'initiative du Syndicat des professionnels du terrassement de France (SPTF).
- L'expérience et les recherches menées depuis plusieurs décennies sur le traitement des sols dans les ouvrages en terre convergent pour démontrer la capacité du traitement des sols à atteindre des performances mécaniques compatibles avec des usages variés et exigeants.
- Les retours d'expérience sur plusieurs centaines d'ouvrages dans des applications routières ou hydrauliques montrent que, comme pour tous les

autres matériaux de construction, la durabilité des sols traités est maîtrisée à condition de respecter les règles d'étude, de formulation, de conception et de réalisation des travaux.

- Il apparaît que des précisions sur les exigences de performances doivent être explicitées dans les référentiels techniques pour éviter certains écueils observés quant à la formulation du traitement, aussi bien dans les recherches que dans la pratique.
- La durabilité des ouvrages en sols traités sera abordée de manière explicite par le guide *Traitement des sols* (GTS) en cours de révision, où une matrice usages/performances sera proposée.

RÉFÉRENCES

1. LCPC/Sétra, *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS). Application à la réalisation des remblais et des couches de forme*, « Guide technique », LCPC, 2000.
2. USGS, 2025, Mineral Commodities Survey, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-lime.pdf> & <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf>
3. NF EN 16907-4 : « Terrassement - Partie 4 : traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques », décembre 2018.
4. Idrim, *Guide des terrassements, des remblais et des couches de forme (GTR)*, Cerema, 2023.
5. Sétra, *Conception et réalisation des terrassements*, « Guide technique », 2007.
6. Sétra, *Traitement des sols à la chaux et /ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des assises de chaussées*, « Guide technique », 2007.
7. NF P98-086 : « Dimensionnement structurel des chaussées routières – Application aux chaussées neuves », 2019.
8. CIGB, *Barrages en sol cimenté*, Bulletin 195, 2022.
9. CIGB, *Sol-ciment pour les barrages en remblai*, Bulletin 54, 1986.
10. DigueELITE, « Rapport technique final », 2017.
11. N. Nerinx et al., « Tronçons de digue résistant à la surverse : quantification de la résistance à l'érosion interne et à l'érosion de surface dans le cadre du projet DigueELITE », Chambéry, Colloque SHF/CFBR « Hydraulique des barrages et des digues », 2017.
12. F. Bertola et al., « Digues en limons traités à la chaux : état des matériaux 6 ans après la mise en œuvre », Poitiers, Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, 2024.
13. F. Bertola, et al, "Lime treatment for hydraulic structures: benefits, challenges, and long term performance", 5th International Dam World Conference, Lisbon, Portugal, 2025.
14. V. Mouy, B. Becker, J. Persec, E. Boidy, « Batardeau de Pannecière : exemple d'un barrage et d'un déversoir en sol traité au liant hydraulique », séminaire TerDOUEST, Marne-la-Vallée, 2013.
15. Cerema, « Opération AAR103 (DOFEAS) - Digue sèche en limon traité à la chaux (2,4 %) ». Campagne de sondages et d'essais géotechniques in situ. Compte-rendu des essais à 380 jours », 2013.
16. S. Hervé, P. Fraquet, J.-C. Auriol, « Retour d'expérience d'une couche de forme traitée sur la LGV Atlantique après 20 ans d'exploitation », conférence Georail, Paris, 2011.
17. K. Bicalho et al., "Field monitoring of an embankment constructed with two soils treated with lime and/or cement", séminaire TerDOUEST, Marne-la-Vallée, 2013.
18. J.-C. Dong, Y.-J. Cui, A.-M. Tang, "Effects of curing time and climate on the stiffness of lime and cement treated soils in the embankment of Héricourt", séminaire TerDOUEST, Marne-la-Vallée, 2013.
19. Y. Boussafir, D. Mercadier, Y.-J. Cui, « Suivi du vieillissement d'un remblai traité à Héricourt (70) : quels enseignements sur la durabilité ? », Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG), Nancy, 2016.
20. N. Chabrat, « Impact des conditions environnementales sur le comportement à long terme de sols traités », thèse Université de Lorraine, 2024.
21. Deneele et al., « Évolution mécanique et physico-chimique à long terme d'un sol limoneux traité à la chaux », séminaire TerDOUEST, Marne-la-Vallée, 2013.
22. O. Cuisinier, F. Masrouji, G. Stoltz, « Évaluation de la durabilité des effets du traitement des sols. Influence de sollicitations externes sur le comportement d'un sol traité. Cas des bordures de remblais », rapport TerDouest (Module B), 2012.
23. O. Cuisinier, F. Masrouji, "Impact of wetting/drying cycles on the hydromechanical behaviour of a treated soil", E3S Web of conferences 195 E-UNSAT, 2020.
24. V. Berche, N. Robert, Y. Boussafir, V. Ferber, « Réutilisation d'argiles très plastiques (A4) en remblai : suivi du comportement après trois ans de réalisation », séminaire TerDOUEST, Marne-la-Vallée, 2013.
25. Aldaood, et al., "Freezing-thawing effects on the geotechnical properties of lime-stabilized gypseous soil", séminaire TerDOUEST, Marne-la-Vallée, 2013.
26. A. Wassermann, A. Abdallah, O. Cuisinier, "Impact of wetting and drying cycles on the mechanical behaviour of a cement-treated soil", *Transportation Geotechnics*, Issue 36, 2022.
27. B. Le Runigo, V. Ferber, Y.-J. Cui, O. Cuisinier, D. Deneele, "Performance of lime-treated silty soil under long-term hydraulic conditions", *Engineering Geology*, 118, 2011.
28. I. Charles, G. Herrier, C. Chevalier, E. Durand, "An experimental full-scale hydraulic earthen structure in lime treated soil", Paris, International Conference on Scour and Erosion ISCE6, 2012.
29. A. Mehenni, « Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités », thèse de doctorat de l'Université de Lorraine, 2015.

EVALUATION DU VIEILLISSEMENT LONG-TERME DES LIANTS BITUMINEUX

LIMITES ET PERSPECTIVES

Dans le secteur de la construction routière, le recyclage des matériaux s'impose comme un levier clé pour atteindre les objectifs de neutralité carbone. Pourtant, les méthodes actuelles d'évaluation du vieillissement des liants bitumineux peinent à reproduire les conditions réelles d'oxydation et de dégradation en service. Une étude récente menée par Vinci Construction révèle les limites de ces protocoles et propose une approche innovante : intégrer l'irradiation solaire pour simuler plus fidèlement le vieillissement long-terme. Les résultats mettent en évidence l'intérêt d'apporter cette dimension dans les processus de simulation de vieillissement accéléré.

Opération de rabotage dans le cadre d'un chantier à fort taux de recyclage réalisée par les équipes d'Eurovia.



© EUROVIA

Pour répondre aux enjeux environnementaux liés au réchauffement climatique, l'Union européenne s'est engagée à réduire de 55 % ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 (par rapport à 1990), avec pour objectif la neutralité carbone à l'horizon 2050. Le secteur de la construction et de la maintenance des infrastructures de transport s'inscrit dans cette dynamique à travers l'élaboration de feuilles de route de décarbonation. Les feuilles de route française (Routes de France) et européenne (EAPA) identifient le recyclage comme un levier majeur pour atteindre ces objectifs et faire face à la raréfaction des ressources¹. Toutefois, elles ne précisent pas les exigences de durabilité des matériaux et les indicateurs de recyclabilité à long terme.

Parallèlement, Eurobitume a récemment révisé à la hausse la valeur de référence de l'empreinte carbone du bitume, passant de 247 à 530 kg CO₂ éq/t dans son nouveau rapport d'analyse du cycle de vie publié en mars 2025². Cette évolution, combinée aux ambitions de décarbonation, invite à reconsidérer le bitume non seulement comme un

matériau technique performant mais aussi comme une ressource durable, apte à être recyclée à des taux importants sur plusieurs générations de chaussées.

Au-delà de l'augmentation des taux de recyclage, le marché évolue également vers l'utilisation de liants dits « non conventionnels », issus de procédés spéciaux pouvant intégrer des composés aux propriétés physico-chimiques différentes de celles du bitume traditionnel. Il devient alors essentiel d'évaluer leur durabilité afin de garantir des ressources de bonne qualité à recycler sur le long terme.

Dans cette perspective, l'analyse environnementale des matériaux routiers ne peut se limiter au périmètre A1-A5 (de l'extraction des matières premières à la mise en œuvre). En intégrant les phases B et B2-B5 (vie en œuvre et entretien) ainsi que la phase C (fin de vie et recyclage), de nouveaux défis apparaissent, notamment celui de mieux caractériser le vieillissement des liants bitumineux pour définir des indicateurs de circularité et de recyclabilité en fonction de leur capacité en fin de cycle à participer au cycle suivant.

AUTEURS

Arthur Delaboissière
Chargé de recherche liants bitumineux
Vinci Construction

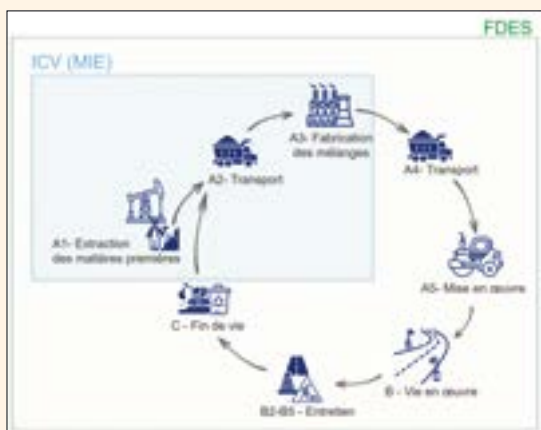
Thomas Lebarbé
Responsable section Liants,
Procédés à l'émulsion et Marquage
Vinci Construction

À noter

En France, les déclarations environnementales des produits de la construction (DEP) sont établies conformément à la norme NF EN 15804+A2.

Suivant la nature du produit et le périmètre de l'analyse du cycle de vie (ACV), la DEP pourra se présenter sous la forme d'un simple inventaire de cycle de vie (ICV ou MIE pour module d'informations environnementales) ou d'une fiche de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) plus complète.

L'application de l'ACV au secteur routier présente encore certains défis, notamment le choix de la durée de vie des enrobés et le niveau de service retenu lors de la réalisation des FDES. Pour harmoniser les pratiques, des règles spécifiques aux enrobés bitumineux (PCR : Product Category Rules) sont en cours de développement au niveau européen³.



-Figure 1-
Étapes, mécanismes et processus de vieillissement du bitume (adapté depuis R. Polo-Mendoza et al.)⁵.

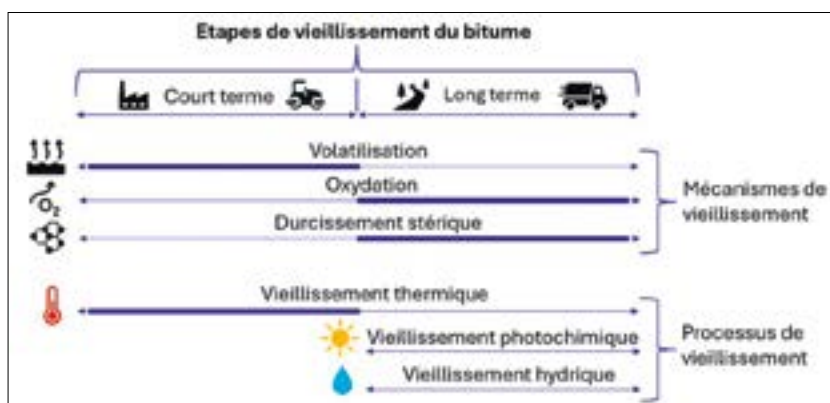
LE VIEILLISSEMENT DES LIANTS BITUMINEUX, UN PARAMÈTRE CENTRAL DANS LA DÉMARCHE DE RECYCLAGE

Pour atteindre les objectifs de décarbonation de l'industrie routière, la valorisation et l'augmentation du taux de recyclage des agrégats d'enrobés (AE) est un point clé. Le bitume des futures générations de routes proviendra en grande partie de celui déjà présent dans les chaussées existantes : le gisement, c'est la route.

Or, les matériaux recyclés présentent parfois un état de dégradation et d'oxydation avancé, rendant leur réutilisation plus complexe. Vinci Construction s'inscrit depuis plusieurs années dans une démarche d'innovation visant à repousser les limites du recyclage⁴. Cette ambition nécessite une compréhension approfondie des phénomènes de vieillissement, et en particulier de la corrélation entre vieillissement simulé en laboratoire et vieillissement naturel in situ. Le vieillissement des liants bitumineux résulte de l'interaction de plusieurs mécanismes et processus tout au long de la vie de la chaussée (figure 1). Deux grandes phases sont généralement distinguées :

- le vieillissement à court terme, lié à la fabrication et à la mise en œuvre ;
- le vieillissement à long terme, qui intervient durant la vie en service de la chaussée.

Ces phénomènes sont gouvernés par des mécanismes tels que la volatilisation (perte des fractions légères), l'oxydation (réaction avec l'oxygène de l'air) et le durcissement stérique (réorganisation moléculaire). Trois grands processus activent ces mécanismes : le vieillissement thermique, la photodégradation induite par le rayonnement solaire et l'exposition aux conditions hydriques (humidité, ruissellement, cycles gel/dégel). Cette diversité de facteurs souligne la complexité du vieillissement selon les propriétés physico-chimiques des liants (stabilité thermique et photochimique, polarité, caractère hydrophobe/hydrophile...).



Une précédente étude menée au centre de recherche Vinci Construction portait sur l'impact du vieillissement hydrique⁶. La présente étude se concentre sur le vieillissement thermo-oxydatif et photo-oxydatif. Menée au centre de recherche Vinci Construction (Mérignac – 33), elle compare le vieillissement naturel in situ aux essais de vieillissement accéléré les plus couramment utilisés en laboratoire (PAV⁷ – Pressure Ageing Vessel et RILEM⁸⁻⁹ – Réunion internationale des laboratoires et experts des matériaux, systèmes de construction et ouvrages). Les limites de ces méthodes conventionnelles vis-à-vis des conditions réelles ont conduit l'entreprise à développer une nouvelle approche intégrant la photodégradation induite par le rayonnement solaire.

PRODUITS ET MÉTHODES UTILISÉS

Dans le cadre de cette étude sur le vieillissement long-terme des liants bitumineux, deux bitumes purs 35/50 représentatifs du marché européen ont été sélectionnés pour leur structure colloïdale différente (tableau 1). L'objectif est d'évaluer leur comportement après vieillissement simulé en laboratoire à l'aide des méthodes les plus couramment utilisées dans le domaine.

-Tableau 1-

Caractéristiques des bitumes A et B à l'état initial.

Essai	Méthode	Unité	Bitume A	Bitume B
Pénétrabilité	NF EN 1426	1/10 mm	38	48
TBA NF	EN 1427	°C	52,8	53,2
G* 15 °C, 10 Hz	NF EN 14770	MPa	38,0	21,1
δ 15 °C, 10 Hz	NF EN 14770	°	36,4	42,1
Teneur en asphaltènes	Méthode interne n-heptane	% m	14,1	22,1
Indice carbonyle ICO	Méthode interne par IRTF	-	1,2	1,5

-Tableau 2-

Conditions expérimentales de vieillissement accéléré en laboratoire.

Méthode	Matériau exposé	Température	Pression	Temps de séjour	Épaisseur du film de bitume
PAV	Bitume	100 °C	2,1 MPa	25, 45 et 75 heures	3 200 µm
RILEM	Enrobé bitumineux foisonné	4 h à 135 °C puis 85 °C	P _{atm}	De 1 à 21 jours	3 à 10 µm

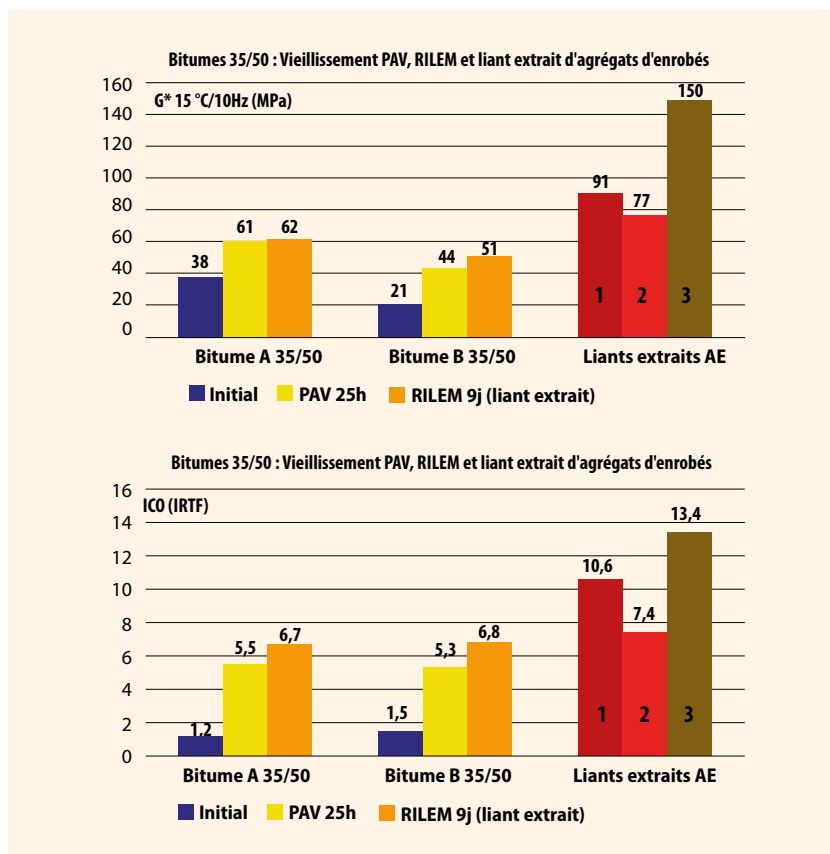
-Tableau 3-

Description des prélèvements d'enrobés vieillis sur chaussées anciennes.

Code	Type de prélèvement in situ	% vides	Lieu
AE 1	Liant d'AE moyen zone France (fraisât)	-	-
AE 2	5 cm d'un BBSG bitume 35/50 après 16 ans de service sur autoroute française	7 %	Nord-Est
AE 3	5 cm d'un BBSG bitume 35/50 après 15 ans de service sur RD française	10 %	Sud-Est

-Figures 2-

Module complexe G* (15 °C-10 Hz) et ICO des bitumes 35/50 (A et B) et des bitumes extraits d'AE (AE1, AE2, AE3) : état initial, vieillissement PAV 25 h, vieillissement RILEM 9 jours et vieillissement naturel in situ.



Ces méthodes sont le PAV (NF EN 14769), qui simule l'oxydation du bitume en conditions de service, et le RILEM (XP CEN/TS 12697-52), appliqué aux enrobés bitumineux foisonnés. Les conditions expérimentales sont présentées dans le **tableau 2**. Les durées de vieillissement retenues pour le PAV (25, 45 et 75 heures) correspondent respectivement à 1 cycle, 2 cycles et 3,5 cycles de vieillissement, en prenant comme référence une procédure combinée RTFOT¹⁰ (NF EN 12607-1 ; 163 °C – 75 min) suivie d'un PAV de 20, 40 et 70 heures¹¹.

Pour caractériser l'évolution des propriétés des bitumes avant et après vieillissement, les méthodes suivantes ont été utilisées :

- Rhéologie par DSR (NF EN 14770) : détermination du module complexe G* et de l'angle de phase δ¹². Ce module G*, exprimé en Pa, kPa ou MPa, rend compte de la rigidité du bitume et l'angle de phase δ, compris entre 0 et 90°, caractérise le comportement viscoélastique du liant bitumineux (0° = solide élastique ; 90° = liquide visqueux).
- Indice carbonyle (ICO) par spectroscopie IRTF (infrarouge à transformée de Fourier), inspiré de la méthode d'essai LCPC n° 69¹³. Cette analyse permet de quantifier les fonctions oxygénées (liaisons C=O) générées par l'oxydation du bitume, fournissant ainsi un indicateur physico-chimique du niveau de vieillissement.

LIMITES DES ESSAIS CONVENTIONNELS PAR RAPPORT AU VIEILLISSEMENT NATUREL IN SITU

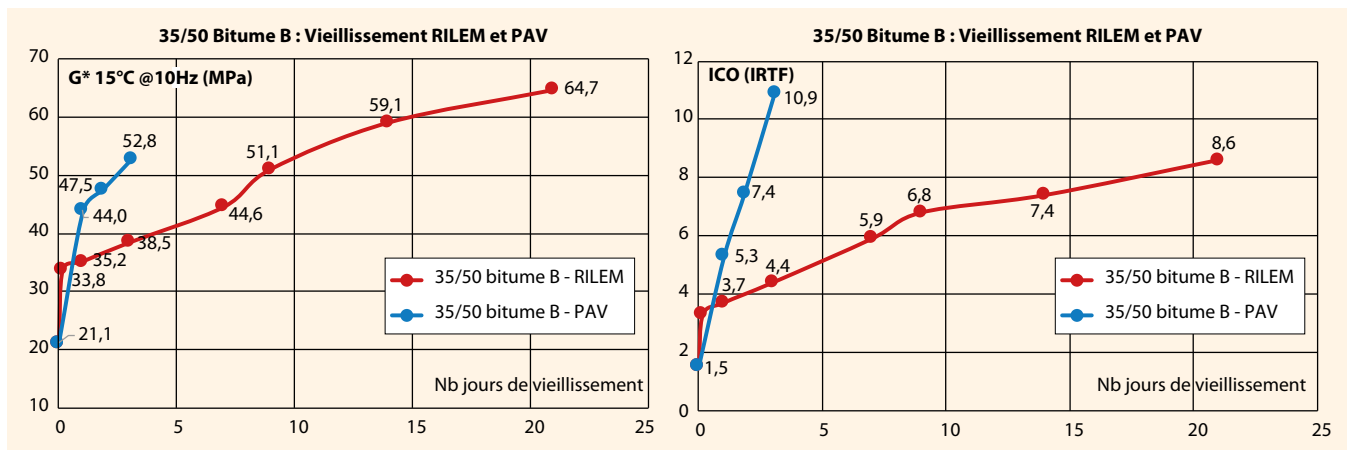
Les méthodes de vieillissement accéléré en laboratoire, telles que le PAV et le protocole RILEM, sont largement utilisées pour simuler le vieillissement long-terme des liants bitumineux. Toutefois, ces essais présentent plusieurs limites lorsqu'il s'agit de reproduire fidèlement les conditions réelles d'une chaussée en service.

D'une part, ces protocoles ne tiennent pas compte des caractéristiques des enrobés bitumineux qui possèdent une influence significative sur le vieillissement comme le positionnement de la couche dans la structure (roulement, liaison, assise), le type d'enrobé et sa formulation (% liant, % vides...). En effet, le bitume d'une couche de roulement est bien plus exposé à l'oxydation que celui d'un enrobé d'assise. Il en est de même pour un enrobé ouvert contenant de nombreux vides communicants par rapport à une formule fermée contenant peu de vides.

D'autre part, ces protocoles se concentrent exclusivement sur les effets combinés de la température et de l'oxygène, négligeant d'autres facteurs environnementaux importants en conditions réelles comme l'ensoleillement, l'irradiation UV, les variations de température et la présence d'eau (humidité, pluie).

-Figures 3-

Évolution du module complexe G^* (15 °C-10 Hz) et de l'ICO du bitume B en fonction du nombre de jours de vieillissement PAV et RILEM.



Une comparaison entre les propriétés de bitumes 35/50 vieillis en laboratoire selon une procédure standard (PAV 25 h et RILEM 9 jours) et celles de bitumes vieillis naturellement in situ (**tableau 3**) révèle des écarts significatifs.

Comme illustré sur les **figures 2**, le vieillissement naturel conduit à des niveaux d'oxydation et de rigidité bien plus élevés, avec des modules complexes G^* atteignant jusqu'à 150 MPa (15 °C/10 Hz). Ces niveaux ne sont pas atteints, même en sévérant les protocoles de vieillissement laboratoire jusqu'à 75 h de PAV (3,5 cycles) ou 21 jours de RILEM (**figures 3**).

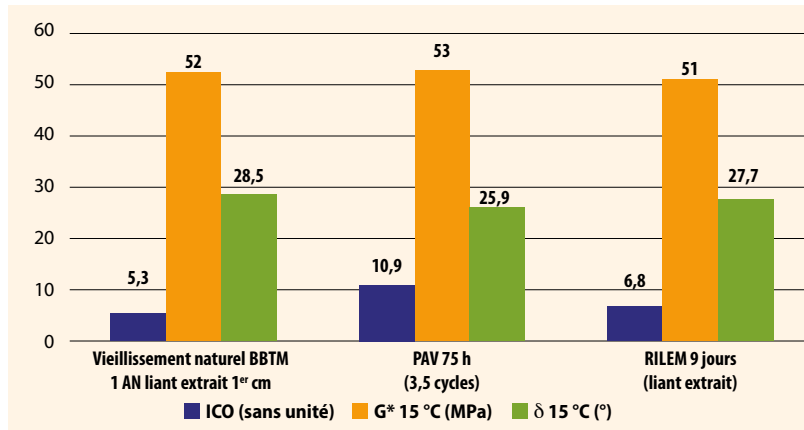
Par ailleurs, l'ICO augmente fortement avec la durée du PAV en raison de la forte pression d'air appliquée (2,1 MPa). Cette oxydation ne s'accompagne pas d'une rigidification proportionnelle du liant, contrairement à ce qui est observé sur le terrain. Cela souligne un manque de représentativité du PAV vis-à-vis des conditions réelles.

Pour approfondir cette analyse, des plaques d'enrobé ouvert de type BBTM (18 % de vides) ont été exposées en extérieur pendant un an pour évaluer le vieillissement naturel sur le même bitume que l'étude laboratoire PAV et RILEM (bitume B, exposition à Mérignac – 33). Les résultats montrent une bonne correspondance entre le module complexe G^* (15 °C-10 Hz) du bitume extrait du premier centimètre de la plaque et ceux obtenus avec les protocoles PAV 75 h et RILEM 9 jours (**figure 4**).

Cela met en évidence que ces deux protocoles laboratoire, normalement consacrés au vieillissement long-terme, peuvent uniquement simuler un an de vieillissement pour le premier centimètre de ce type d'enrobé à forte teneur en vides. Bien que les modules G^* soient équivalents, on remarque également un décalage pour le PAV sur les autres paramètres (angle de phase ou ICO) par rapport au vieillissement naturel. En conséquence, les procédures PAV et RILEM ne peuvent pas être considérées comme des essais de simulation du vieillissement long-terme par rapport à la réalité sur le terrain.

-Figure 4-

ICO, G^* et δ (15 °C-10 Hz) du bitume B en fonction de la méthode de vieillissement considérée (naturel 1 an, PAV 75 h et RILEM 9 j).



Enfin, le vieillissement naturel ne se manifeste pas de manière homogène dans l'épaisseur de la couche. Un gradient d'oxydation a été mis en évidence en sciant des carottes d'enrobé en tranches d'environ 1 cm (**photos 1 et figures 5**). Les premiers centimètres sont nettement plus oxydés et rigides que le fond de couche. De plus, un prélèvement réalisé dans le sud-est, possédant une teneur en vides plus élevée dans une zone à ensoleillement plus intense (irradiation solaire 50 % plus importante que dans les deux autres zones prélevées), présente un vieillissement nettement plus marqué. Bien que les bitumes utilisés ne soient pas strictement identiques, ces observations confirment l'influence déterminante de la teneur en vides et de l'irradiation solaire sur le vieillissement naturel. Les constats issus de cette étude comparative mettent en évidence les limites des méthodes conventionnelles de vieillissement accéléré en laboratoire, tant sur le plan de la représentativité des conditions réelles que sur la capacité à reproduire fidèlement les gradients d'oxydation observés in situ. Ces écarts soulignent la nécessité de faire évoluer les protocoles actuels pour mieux intégrer les multiples facteurs et mécanismes de vieillissement en conditions réelles.

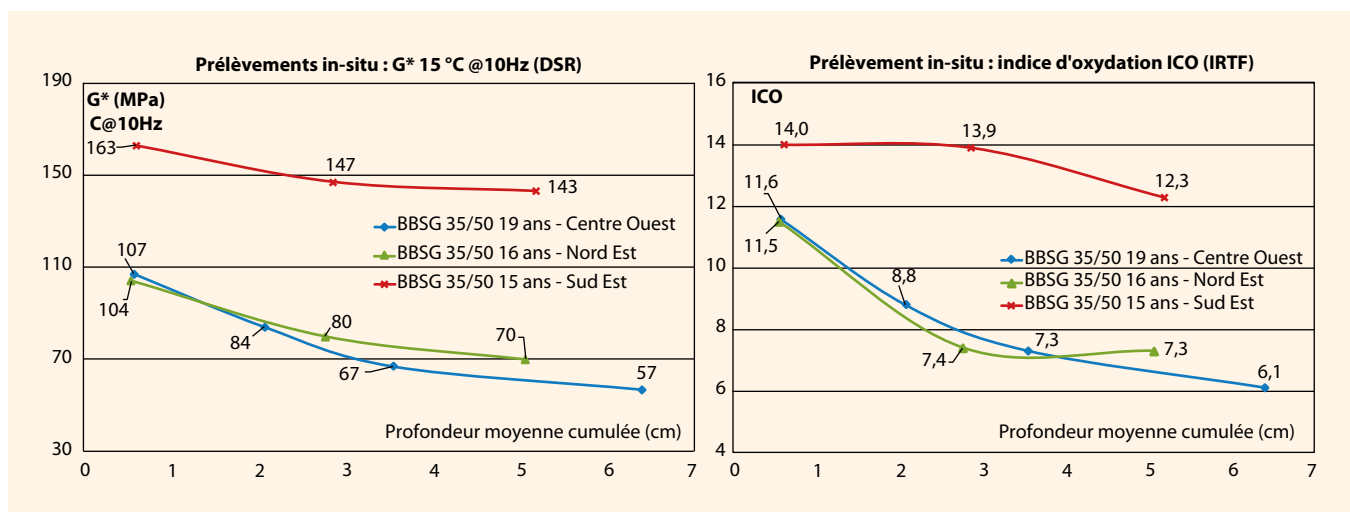
-Photos 1-

Prélèvements par carottage puis sciage par tranches d'un centimètre pour évaluer le gradient d'oxydation du bitume en fonction de la profondeur.



-Figures 5-

G^* (15 °C-10 Hz) et ICO des bitumes 35/50 extraits après prélèvements in situ en France sur chaussées anciennes.



C'est dans cette optique qu'une nouvelle méthode de simulation du vieillissement long-terme a été développée, avec pour objectif de mieux reproduire les conditions naturelles et d'améliorer la prédictivité des essais en laboratoire. La suite de cet article présente les principes, les conditions expérimentales et les premiers résultats de cette approche innovante.

DÉVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE MÉTHODE DE SIMULATION DU VIEILLESSEMENT LONG-TERME

Les enseignements tirés des essais conventionnels ont conduit au développement d'une nouvelle méthode de vieillissement accéléré en laboratoire, visant à mieux reproduire les conditions réelles observées sur le terrain. Cette méthode a été conçue pour s'appliquer aussi bien au bitume qu'aux enrobés bitumineux (compactés et non foisonnés), afin d'intégrer les effets de formulation et le gradient d'oxydation entre la surface et le fond de couche.

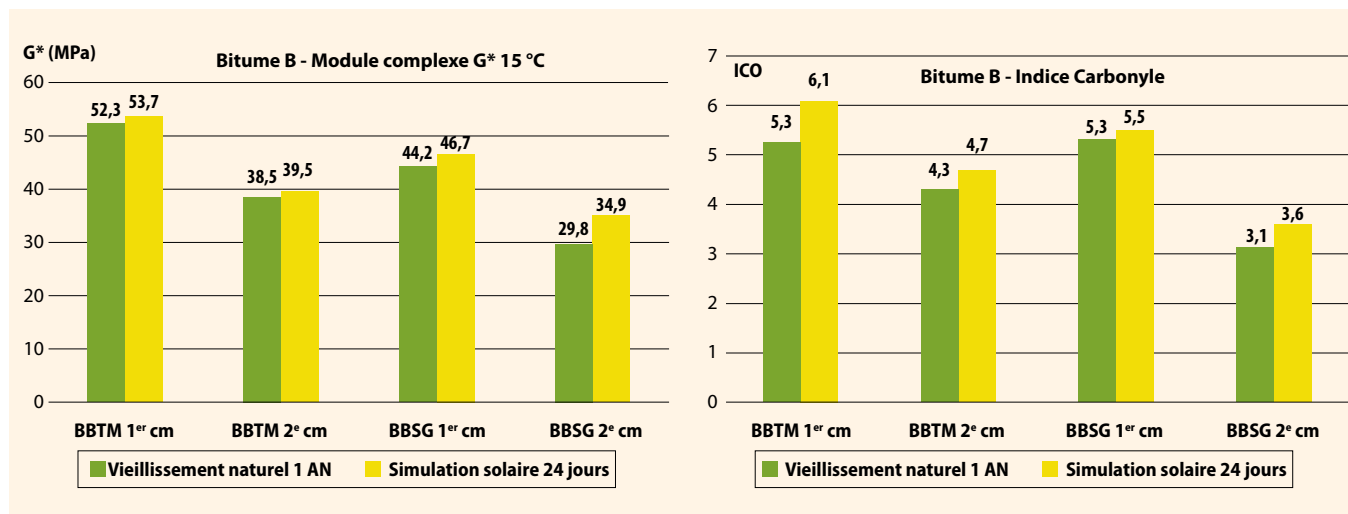
Pour améliorer sa représentativité, cette méthode intègre l'irradiation solaire, notamment l'irradiation UV, en complément de la température et de l'oxygène de l'air. Le principe de la simulation solaire retenu consiste à utiliser un appareil capable de fournir un rayonnement se rapprochant de celui du soleil.

Il n'existe pas de méthode normalisée et il n'y a pas de consensus dans la littérature autour de ce type de vieillissement long-terme du bitume en dehors du fait qu'il s'agit d'un phénomène plus intense à la surface du revêtement routier⁵. Les paramètres ayant une influence sur le vieillissement sont la température, la durée, l'épaisseur du film de bitume, l'intensité du rayonnement et sa(ses) longueur(s) d'onde.

Une enceinte de vieillissement munie d'une lampe de simulation solaire a été utilisée pour cette étude. Cette lampe fournit un rayonnement lumineux uniforme et stable qui reproduit fidèlement celui du soleil (correspondance spectrale UV+Visible+IR). La puissance de ce rayonnement (irradiance) est environ 5 fois plus importante que celle qui frappe la

–Figures 6–

Comparaison des caractéristiques (G^* 15 °C-10 Hz et ICO) du bitume B extrait des enrobés BBTM et BBSG, après vieillissement naturel d'un an et simulation solaire SOL de 24 jours.



surface des revêtements routiers en période estivale (relevé à Bordeaux en août 2022). Cette irradiation induit un échauffement du matériau, atteignant 60 à 70 °C en surface, comparable à ce qu'un revêtement routier peut subir lors d'une canicule.

Deux enrobés au bitume B, de type BBTM (18 % vides) et BBSG (5 % vides), ont été vieillis naturellement pendant un an en extérieur près de Bordeaux. Ce vieillissement naturel a été comparé à un vieillissement simulé au laboratoire de ces mêmes enrobés dans l'enceinte de simulation solaire pendant 24 jours. L'analyse des bitumes extraits des deux premiers centimètres a révélé une très bonne correspondance entre les deux types de vieillissement (figures 6), tant sur l'ICO que sur le module complexe G^* , mettant bien en évidence le gradient d'oxydation entre le premier et le deuxième centimètre ainsi que l'influence de la teneur en vides entre le BBTM ouvert et le BBSG plus fermé.

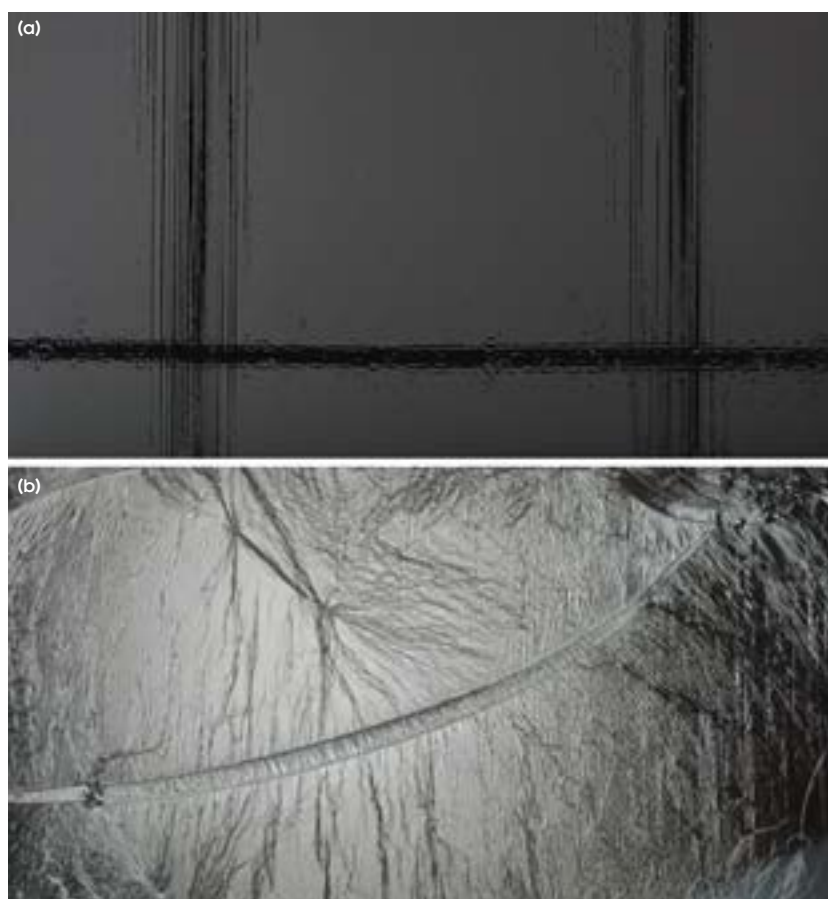
Cette méthode a permis de bien reproduire en laboratoire le vieillissement naturel d'un enrobé bitumineux pour répondre aux limites des essais conventionnels. Cependant, le temps nécessaire pour simuler un vieillissement long-terme de plusieurs années est de plusieurs mois, ce qui constitue un frein au développement de la méthode. Des travaux complémentaires utilisant une enceinte de vieillissement spécifique sont en cours pour accélérer ce vieillissement solaire à l'échelle des enrobés. Leurs résultats feront l'objet de publications ultérieures.

Pour réduire la durée des essais, une seconde approche a été développée directement sur le bitume, en alternative à l'essai PAV de référence : l'épaisseur du film de bitume étant un paramètre déterminant pour évaluer ce phénomène de surface, cette nouvelle méthode s'est orientée vers un film suffisamment mince pour mieux simuler le film de bitume autour du granulat tout en conservant

une quantité de matière acceptable pour réaliser des essais de caractérisation après vieillissement. L'utilisation d'un matériel de laboratoire spécifique a contribué à confectionner des films de bitume d'épaisseur homogène et répétable de 150 μ m sur des panneaux en aluminium (photos 2). Cette épaisseur reste élevée par rapport à celle d'un film de bitume dans un enrobé bitumineux (3 à 10 μ m environ), mais elle est 20 fois plus faible que le film de bitume de l'essai PAV (3 200 μ m).

–Photos 2–

Films minces de bitume de 150 μ m soumis à l'irradiation solaire avant (a) et après (b) vieillissement.



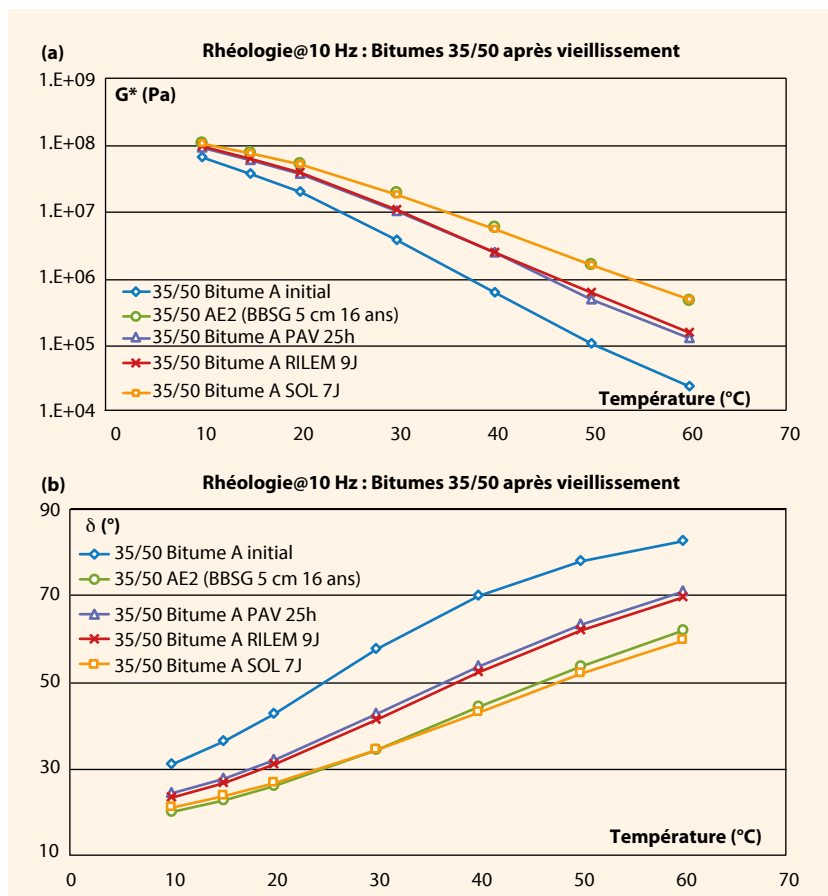
Cette plus faible épaisseur du film de bitume est un paramètre clé pour éviter le fort impact de dilution lors de la récupération du liant entre la surface très irradiée et le reste de l'épaisseur, beaucoup moins soumis au rayonnement.

Des films de bitume A ont été irradiés par le rayonnement solaire dans l'enceinte de vieillissement pendant 7 jours avec une irradiance en UV-A de 110 W/m² et 10 W/m² en UV-B. Le bitume vieilli a ensuite été récupéré pour réaliser les analyses rhéologiques et infrarouge. Cette procédure (nommée SOL 7J) a fidèlement reproduit les propriétés rhéologiques d'un bitume 35/50 issu d'un BBSG raboté sur 5 cm après 16 ans de service sur autoroute, contrairement aux essais PAV (25 h) et RILEM (9 j), jugés trop peu sévères avec une rigidité plus faible et un angle de phase plus élevé que le prélèvement terrain (figures 7).

Les résultats encourageants obtenus avec cette nouvelle méthode de vieillissement accéléré ouvrent la voie à son application dans les cas spécifiques de l'étude de formulation de liants et d'enrobés de surface en application mince, dans les formulations de bitumes modifiés aux polymères et plus généralement dans l'évaluation plus complète des additifs pouvant entrer dans la composition des liants bitumineux routiers.

Figures 7-

Caractéristiques rhéologiques (G^* (a) et δ (b) à 10 Hz) du bitume A en fonction de la température (état initial, vieillissement solaire SOL 7 jours, PAV 25 heures et RILEM 9 jours) : comparaison avec un bitume 35/50 extrait après 16 ans de service (AE2).



APPLICATION AUX LIANTS NON CONVENTIONNELS

Comme précisé dans l'introduction de cet article, l'industrie routière voit l'apparition sur le marché de liants non conventionnels. Ces liants bitumineux alternatifs sont issus de procédés spéciaux ou intégrant dans leur composition des agents visant à ajuster la consistance du bitume (ramollissants ou durcisseurs).

Ces liants alternatifs ont été développés en s'appuyant sur les méthodes de vieillissement conventionnelles, notamment l'essai PAV, afin d'évaluer leur niveau de durabilité par rapport aux bitumes purs traditionnels. Toutefois, le PAV ayant montré un décalage important avec la réalité du vieillissement naturel, la nouvelle méthode de vieillissement par simulation solaire a été appliquée à ces liants afin d'évaluer l'impact de leur composition différente face aux effets du rayonnement solaire. Quatre liants bitumineux de grade 70/100 ont été étudiés :

- bitume C : bitume pur 70/100 (référence) ;
- bitume D : liant non conventionnel intégrant un agent modifiant n° 1 ;
- bitume E : liant non conventionnel intégrant un agent modifiant n° 2 ;
- bitume F : liant non conventionnel intégrant un agent modifiant n° 3.

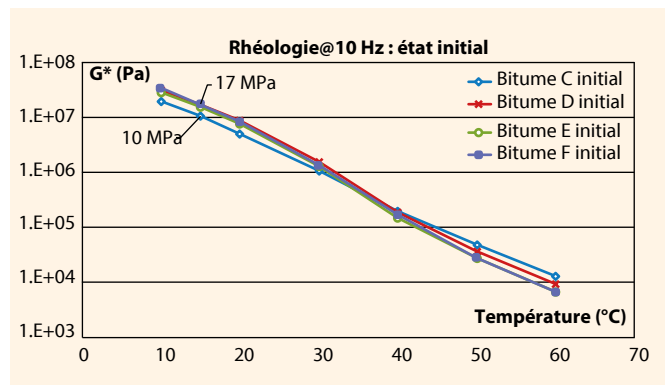
Les quatre liants ont été caractérisés à l'état initial, après vieillissement PAV 45 h (2 cycles) et après vieillissement par simulation solaire 7 jours sur film mince de bitume (150 μ m). Les résultats obtenus montrent que les propriétés rhéologiques des liants sont similaires à l'état initial (figure 8), ce qui autorise la comparaison dans le cadre de cette étude. Le vieillissement PAV entraîne une rigidification, mais les propriétés rhéologiques des liants restent similaires, ce qui pourrait laisser penser que leur sensibilité au vieillissement est identique (figure 9).

Le bitume C de référence présente un module complexe G^* après PAV 45 h plus élevé à partir de 40 °C, ce qui peut s'expliquer par sa teneur importante en asphaltènes qui n'a pas été diluée par l'ajout d'agent modifiant. Au contraire, le bitume F présente un G^* plus faible qui peut s'expliquer par une forte dilution des asphaltènes due à son dosage en agents modifiants. Aux températures plus basses qui sont plus critiques lors du vieillissement, les quatre liants bitumineux présentent un niveau de rigidité similaire.

En revanche, l'application de la méthode de simulation solaire révèle une tout autre réalité : les liants E et F présentent une dégradation nettement plus marquée de leurs propriétés rhéologiques (G^* plus élevé et angle de phase plus faible), traduisant une rigidification plus importante que pour le bitume pur C et le liant D (figure 10).

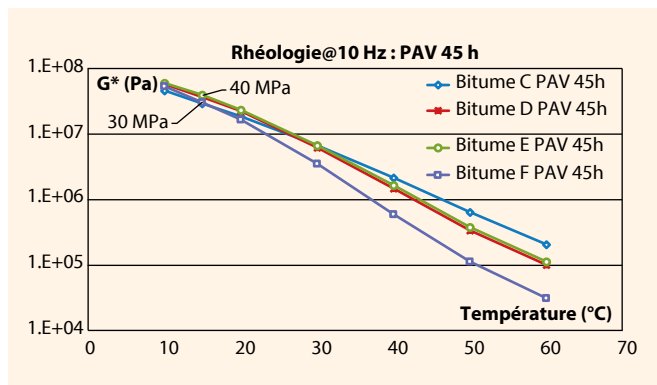
-Figure 8-

Module complexe G^* à 10 Hz en fonction de la température pour les 4 liants bitumineux à l'état initial.



-Figure 9-

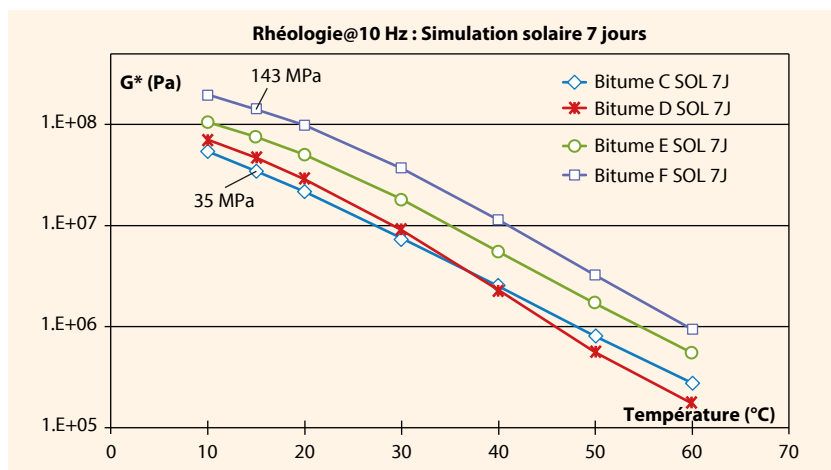
Module complexe G^* à 10 Hz en fonction de la température pour les 4 liants bitumineux après vieillissement PAV 45 heures.



Le **tableau 4** résume les résultats et l'évolution des propriétés rhéologiques des liants bitumineux étudiés après vieillissement par rapport à leur état initial. Cette évolution des propriétés après vieillissement solaire est beaucoup plus importante pour les liants E ($G^* +389\%$) et F ($G^* +728\%$) que pour le bitume D ($G^* +176\%$) et le bitume C de référence ($G^* +236\%$). Les indices carbonyle montrent également une plus forte sensibilité à l'oxydation photochimique, notamment pour le bitume F, avec une augmentation de l'ICO de +16,3 comparée à +5,0 pour le bitume C de référence. La méthode d'exploitation de la bande C=O autour de 1700 cm^{-1} a été modifiée pour s'adapter à la présence éventuelle de bandes C=O liées aux agents modifiants. Cette adaptation a été appliquée à tous les liants étudiés pour que les résultats soient comparables. Cette méthode de vieillissement par simulation solaire met ainsi en évidence une plus forte sensibilité à l'oxydation de certains liants non conventionnels évalués dans cette étude, probablement liée à leur réactivité photochimique. Ce comportement différencié ne peut être détecté par les méthodes conventionnelles comme le PAV, qui apparaissent ici incomplètes pour étudier le vieillissement long-terme de ce type de nouveaux liants. Ce critère

-Figure 10-

Module complexe G^* à 10 Hz en fonction de la température pour les 4 liants bitumineux après vieillissement solaire SOL 7 jours.



photochimique semble incontournable pour mieux qualifier les additifs, par exemple les polymères ou les co-liants d'origine fossile ou biosourcés. Ces résultats, obtenus sur des liants bitumineux non conventionnels représentatifs de l'offre actuellement disponible sur le marché français, révèlent un comportement au vieillissement long-terme différent de celui des bitumes purs traditionnels.

-Tableau 4-

Résumé des caractéristiques des liants étudiés pour chaque état de vieillissement.

Caractéristique mesurée	État du bitume	Bitume C		Bitume D		Bitume E		Bitume F	
		Résultat	Évolution / initial	Résultat	Évolution / initial	Résultat	Évolution / initial	Résultat	Évolution / initial
$G^* 15^\circ\text{C}-10\text{ Hz}$ (MPa)	Initial	10,4	-	16,9	-	15,3	-	17,2	-
	PAV 45h	30,1	+189 %	37,3	+121 %	39,7	+159 %	31,0	+80 %
	SOL 7J	34,9	+236 %	46,6	+176 %	74,8	+389 %	142,5	+728 %
$\delta 15^\circ\text{C}-10\text{ Hz}$	Initial	48,1	-	42,6	-	43,1	-	48,5	-
	PAV 45h	28,9	-40 %	30,3	-29 %	29,5	-32 %	39,1	-19 %
	SOL 7J	29,3	-39 %	28,6	-33 %	23,7	-45 %	20,5	-58 %
ICO	Initial	1,4	-	1,3	-	7,7	-	5,4	-
	PAV 45h	8,0	+6,6	7,8	+6,5	14,4	+6,7	11,1	+5,7
	SOL 7J	6,4	+5,0	7,3	+6,0	13,7	+6,0	21,7	+16,3

Ils doivent encore être complétés par des prélèvements faits sur chantier pour vérifier le bien-fondé de la corrélation entre les résultats obtenus en laboratoire et le vieillissement in situ.

CONCLUSION

Alors que les enjeux environnementaux orientent aujourd'hui l'industrie routière vers des compléments aux bitumes autres que pétroliers, la durabilité des liants bitumineux et des enrobés associés est au cœur des attentes pour garantir la performance des infrastructures sur le long terme.

Pourtant, les méthodes de vieillissement actuellement utilisées en laboratoire, telles que le PAV et le RILEM, présentent d'importantes limites en termes de représentativité vis-à-vis du vieillissement naturel observé sur le terrain.

Dans ce contexte, une nouvelle approche a été développée au centre de recherche Vinci Construction en intégrant aux méthodes de vieillissement accéléré d'autres facteurs environnementaux comme l'exposition à l'eau et au rayonnement solaire. Appliquée à l'échelle de l'enrobé, la simulation solaire contribue à mieux prendre en compte le gradient d'oxydation en profondeur et l'influence de l'irradiation solaire, notamment vis-à-vis des rayons ultraviolets. Toutefois, leur durée d'application reste encore trop longue pour un usage systématique en laboratoire, ce qui appelle à des évolutions méthodologiques.

L'article a présenté une méthode innovante de vieillissement par simulation solaire à l'échelle du liant, permettant d'obtenir un état vieilli plus représentatif des conditions réelles d'exposition. Ce nouvel essai met en évidence une sensibilité différentielle des nouveaux additifs en fonction de leur origine.

L'importance de cet indicateur de sensibilité à l'oxydation photochimique doit être, en perspective, calée avec des mesures de terrain.

Avec cet apport méthodologique pour la qualification des nouveaux liants destinés à des applications routières, les critères développés par Vinci Construction dans le cadre de la R&D sont plus complets et plus sûrs. ■

À retenir

- Le recyclage des matériaux routiers est identifié comme un levier majeur pour réduire les émissions de CO₂ dans le secteur de la construction, mais les méthodes actuelles d'évaluation de leur durabilité et recyclabilité à long terme restent insuffisantes.
- Les méthodes de vieillissement accéléré en laboratoire (comme le PAV et le RILEM), largement utilisées pour simuler le vieillissement des liants bitumineux, ne reproduisent pas fidèlement les conditions réelles. Elles négligent des facteurs environnementaux clés comme l'ensoleillement, l'irradiation UV et l'exposition à l'eau, ce qui conduit à sous-estimer l'oxydation et la rigidification des matériaux sur le terrain.
- Une nouvelle méthode de simulation, intégrant l'irradiation solaire, a été développée pour mieux reproduire le vieillissement naturel des liants bitumineux. Les tests montrent que cette approche permet de simuler plus fidèlement les gradients d'oxydation observés in situ, notamment en surface des revêtements, et révèle une sensibilité accrue de certains liants non conventionnels à l'oxydation photochimique.
- Une partie des liants évalués dans cette étude présentent une dégradation plus marquée sous l'effet du rayonnement solaire que les bitumes traditionnels, ce qui soulève des questions sur leur durabilité et leur recyclabilité à long terme et met en lumière la nécessité d'adapter les méthodes d'évaluation pour garantir leur performance sur plusieurs générations de chaussées.

RÉFÉRENCES

1. Route de France, « Feuille de route décarbonation », juin 2024.
2. Eurobitume, « The Eurobitume Life Cycle Assessment 4.0 for bitumen », mars 2025.
3. J. Souza, M. Masdan, A. Ezaoui, « Évaluation environnementale des enrobés à chaud et à température abaissée - Nouvel outil développé par Vinci Construction », RGRA n° 1005, août-octobre 2024.
4. Y. Marquet, O. Petry, J.-A. Decamps, N. Pâquet « La route 100% recyclée / TRX 100% de Marini-Ermont — Le recyclage n'a plus de limite », RGRA n° 963, mai 2019.
J.-A. Decamps, « Recyclage à chaud des enrobés bitumineux : homogénéité du liant, une nécessité ? », RGRA n° 969, janvier 2020.
A. de Bortoli, J.-A. Decamps, Y. Marquet, N. Pâquet, O. Petry, « La route 100% recyclée, un an après », RGRA n° 978, janvier 2021.
J.-A. Decamps, C. Seigneurie, W. Louge, M. Liffraud, « Recyclage à fort taux d'AE fortement vieillis : chantier expérimental à Gagnac », RGRA n° 996, janvier 2023.
5. R. Polo-Mendoza, G. Martinez-Arguelles, L. F. Walubita, F. Moreno-Navarro, F. Giustozzi, L. Fuentes, T. Navarro-Donado, « Ultraviolet ageing of bituminous materials: A comprehensive literature review from 2011 to 2022 », *Construction and Building Materials* 350 (2022) 128889.
6. F. Lahjiri, J.-A. Decamps, T. Lebarbé, F. Delfosse, « Impact de la polarité des liants et additions sur les propriétés des enrobés à chaud », RGRA n° 985, octobre 2021.
7. NF EN 14769 : « Bitumes et liants bitumineux — Vieillessement long-terme accéléré réalisé dans un récipient de vieillissement sous pression (PAV) », juillet 2023.
8. XP CEN/TS 12697-52 : « Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 52 : conditionnement pour l'obtention d'un vieillissement par oxydation », octobre 2017.
9. Loizos, Partl, Scarpas & Al-Qadi (eds), « Development of a laboratory bituminous mixtures ageing protocol, Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials », Taylor & Francis Group, 2009.
10. NF EN 12607-1 : « Bitumes et liants bitumineux - Détermination de la résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air - Partie 1 : méthode RTFOT », novembre 2024.
11. F. Migliori, J.-F. Corté, « Comparative Study of RTFOT and PAV Aging Simulation Laboratory Tests », Transportation research record, 1998.
12. NF EN 14770 : « Bitumes et liants bitumineux - Détermination du module complexe en cisaillement et de l'angle de phase à l'aide d'un rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) », juillet 2023.
13. Méthode d'essai LCPC n° 69, « Identification et dosage des fonctions oxygénées présentes dans les liants bitumineux — Analyses par spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier », juillet 2010.



Cimbéton



@Maurice Burab - Spie batignolles valérian

Traitements des sols au liant hydraulique routier (LHR), la solution pour obtenir des plateformes de haute qualité, synonyme d'optimisation globale et de durabilité.

- **Économie de ressources**, valorisation jusqu'à 100 % des matériaux du site, possibilité de recycler des matériaux alternatifs.
- **Performances élevées** (classes **PF3 - PF4**).
- **Optimisation** des **structures** et des **épaisseurs** de matériaux d'assises de chaussées.
- **Réduction/annulation de la sensibilité au gel**.
- **Durabilité accrue**, meilleure résilience climatique (tenue à l'eau / limitation des impacts liés à la sécheresse).
- Solution constructive responsable : utilisation de **liants à empreinte carbone réduite**.

**Bilans
environnemental
et économique
positifs**

En valorisant les matériaux en place, on génère en moyenne -70 % de consommation de ressources naturelles granulaires, -70 % de transport poids-lourds associés, -70% de déchets générés et une économie de 20 à 50 % sur la construction de l'ouvrage.

Nos adhérents



**Ensemble, accélérons
la construction durable.**

infociments.fr