

Sols traités aux liants hydrauliques : étude de formulation accélérée

N° 52
SEPTEMBRE
2024

1 Introduction

La présente note a pour objet d'informer de la mise au point d'une méthode d'essais accélérés par chauffage pour la caractérisation en laboratoire des sols traités aux liants hydrauliques en vue d'une application aux petits chantiers de couche de forme. Elle vise également à positionner cette méthode par rapport aux études de formulation existantes, présenter son contenu et préciser son domaine d'application.

Sommaire

- 1 | Introduction
- 2 | Contexte – Articulation avec les autres essais et méthodologies d'études de traitement de sol
- 3 | Domaine d'application
- 4 | Consistance de la méthode d'étude de faisabilité accélérée
- Annexe

2

Contexte – Articulation avec les autres essais et méthodologies d'études de traitement de sol

Les études de formulation des sols traités sont définies dans le GTS « *Guide technique Traitement des Sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application en remblais et couches de forme – SETRA / LCPC, 2000* » et dans la norme NF P 94-102-2 « *Sols : reconnaissance et essais – Sol traité au liant hydraulique, éventuellement associé à la chaux, pour utilisation en couche de forme – Partie 2 : méthodologie des études de formulation en laboratoire* ».

Elles sont classées en 4 niveaux :

- **Niveau 0** : cette étude de formulation comporte les essais d'identification des sols, l'essai d'aptitude au traitement conformément à la norme NF P 94-100, l'essai Proctor et l'essai de mesure du délai de maniabilité.
- **Niveau 1** : cette étude de formulation comporte :
 - essais prévus au Niveau 0,
 - performance mécanique à long terme,
 - résistance au gel,
 - résistance à l'immersion au jeune âge,
 - résistance mécanique autorisant la circulation de chantier.
- **Niveau 2** : cette étude de formulation comporte :
 - essais prévus au Niveau 1,
 - incidences des dispersions d'exécution (dosage du liant ; taux de compactage ; état hydrique) sur les performances mécaniques à long terme.
- **Niveau 3** : cette étude de formulation est envisagée dans le cadre d'un dimensionnement de l'ensemble 'couche de forme – chaussée', par une méthode de calcul de structures (Cf. NF P 98 114-3 : Assises de chaussées – Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 3 : sols traités aux liants hydrauliques, éventuellement associés à la chaux).

Pour le cas particulier des chantiers de faible importance, le GTS et le Manuel de dimensionnement des chaussées neuves à faible trafic (IDRRIM ; 2020) proposent des formulations types sans étude de formulation, caractérisées par des dosages sécuritaires et l'utilisation exclusive d'un ciment normalisé.

Le GTS précise que l'appréciation d'un chantier « *de faible importance* » appartient au projeteur, mais propose des conditions qui correspondent a priori à cette qualification : volume de couche de forme inférieur à 5000 m³, pas de surclassement (les épaisseurs préconisées sont celles données dans les tableaux de l'annexe 3 du fascicule 2 du GTR), ...

La nouvelle méthode accélérée par chauffage s'inscrit entre l'étude de niveau 0 et l'étude de niveau 1. Elle permet de fournir une étude de faisabilité avec des liants hydrauliques routiers LHR, des dosages plus optimisés que ceux de la méthode des chantiers à faible importance, des délais d'étude plus courts que ceux de l'étude de formulation de niveau 1, mais aussi un domaine d'application spécifique et plus restreint, détaillé dans le chapitre 3.

Toutes ces études de formulation sont récapitulées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Récapitulatif des études de formulation

	NIVEAU 0 : ESSAI D'APTITUDE	CAS CHANTIER DE FAIBLE IMPORTANCE GTS ET GUIDE FAIBLE TRAFIC	NOUVELLE MÉTHODOLOGIE : ÉTUDE DE FORMULATION ACCÉLÉRÉE	ÉTUDE DE FORMULATION DE NIVEAU 1	ÉTUDE DE FORMULATION DE NIVEAU 2
Liant utilisé	Tout liant	CPJ CEM II/A 32,5 ou CPJ CEM II/B 32,5	Tout liant	Tout liant	Tout liant
Durée de l'étude	7 jours après caractérisation du sol (GTR, Proctor traité)	Uniquement essais d'identification et Proctor	15 jours après caractérisation du sol (GTR, Proctor traité)	90 jours après caractérisation du sol (GTR, Proctor traité)	90 jours après caractérisation du sol (GTR, Proctor traité)
Limitations	Essai non dimensionnant	Limitations en taille du chantier, en performance des matériaux et en sollicitations (circulation et immersion au jeune âge, gel). Dosage du traitement non optimisé.	Limitations des performances des matériaux, en importance du réseau et en sollicitations	- Tout chantier - Essai dimensionnant	- Tout chantier - Essai dimensionnant

3 Domaine d'application

Cette procédure d'étude accélérée concerne les couches de forme des chantiers de faible importance, pour lesquels la durée d'étude n'est souvent pas compatible avec une étude de formulation classique.

Pour les chantiers d'importance, l'étude de formulation de niveau 1 ou 2 doit rester la méthode de référence pour définir la solution technique à retenir dans le souci d'une part de l'optimisation des ressources et d'autre part de la garantie d'une solution pérenne optimale.

La décision de caractériser un chantier comme « *de faible importance* » appartient au projeteur. Par défaut, on peut considérer que cette étude de formulation accélérée peut se substituer à une étude de formulation de niveau 1 dans les cas suivants :

- réseau routier non structurant,
- pas de sollicitations exceptionnelles (trafic de chantier important, charges d'exploitations supérieures aux charges routières classiques, ...),
- prise en compte d'une classe mécanique 5 dans le dimensionnement, sans surclassement possible,
- plateforme support de classe de portance PF3 maximum,
- formation homogène sur l'ensemble du projet pour la formulation étudiée.

Pour des matériaux atypiques et/ou pour lesquels il y a peu de retour d'expérience de traitement en couche de forme, il reste nécessaire de réaliser des études de formulation de niveau 1 ou 2.

Cette méthode peut également être intéressante pour tester plusieurs configurations de traitement (plusieurs types de liants ; plusieurs dosages de liants), dans des phases de conception en amont du projet, ou dans le cas d'un délai réduit entre le début de la période de préparation du chantier et le début des opérations de traitement.

Dans tous les cas, il est fortement recommandé d'étudier dans la même série d'essais différents dosages, y compris traitement mixte avec ajout de chaux, pour un liant et un sol donnés afin de garantir l'obtention de performances mécaniques satisfaisantes à tous les critères définis. Dans le cas contraire, l'obtention d'un résultat ne satisfaisant pas les critères de zone définis conduira soit à abandonner la configuration testée soit à refaire l'essai après modification du dosage.

4

Consistance de la méthode d'étude de faisabilité accélérée

L'essai doit être conduit avec le sol étudié et le/les liants envisagés. Ses résultats ne sont utilisables que pour la configuration et le dosage testés. À ce titre, il est recommandé d'étudier plusieurs formulations, y compris des traitements mixte chaux et liant hydraulique, dans l'hypothèse où une ou plusieurs des formulations ne satisferaient pas les performances minimales visées.

Homogénéité du gisement

Le gisement retenu pour le traitement d'une couche de forme doit satisfaire aux critères d'homogénéité définis par le GTS. Il doit être caractérisé suivant les normes NF EN 16907-2 et NF P 11-300 par un minimum d'essais d'identification géotechnique, en fonction du volume de matériau nécessaire et du niveau de connaissance préalable de la formation considérée.

À défaut d'autres indications, on pourra évaluer ce minimum à partir des éléments du tableau suivant, tels que définis dans le GTS :

Tableau 2 : Nombre minimal d'essais nécessaires pour caractériser un gisement

VOLUME (V) DE COUCHE DE FORME À RÉALISER (m ³)	ESSAIS D'IDENTIFICATION	FORMATION CONNUE ET SUPPOSÉE HOMOGENE***	FORMATION CONNUE ET SUPPOSÉE MOYENNEMENT HOMOGENE***	FORMATION INCONNUE
V < 10 ⁴	Nature* État hydrique**	1 2	3 4	9 16
10 ⁴ < V < 10 ⁵	Nature* État hydrique**	V / 10 ⁴ 2V / 10 ⁴	3V / 10 ⁴ 4V / 10 ⁴	9V / 10 ⁴ 16V / 10 ⁴
V > 10 ⁵	Nature* État hydrique**	10 20	30 40	90 160

(*) Les essais concernés ici sont ceux permettant de classer le sol suivant sa nature selon la classification des normes NF EN 16907-2 et NF P 11-300.

(**) Principalement évalué à partir de mesures de teneur en eau naturelle ou d'*I_p* supposées représentatives de la saison des travaux. Si la période de travaux n'est pas connue et que ce facteur est influent (dans le cas d'un gisement à faible profondeur ou influencé par les fluctuations annuelles d'une nappe, par exemple), une réflexion appuyée autant que possible sur des mesures ou des constatations est nécessaire pour estimer, sur un cycle annuel, les états hydriques extrêmes.

(***) Cette appréciation suppose être donnée par un géotechnicien ayant une bonne connaissance des formations locales.

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. Pour ce faire, on établit la courbe Proctor normal du sol après traitement. Celle-ci est déterminée sur la fraction 0/6,3 mm du sol.

Âge autorisant la circulation de chantier

Cet aspect se vérifie à partir d'essais en compression simple réalisés sur éprouvettes conservées à 20 °C sans perte d'humidité (fréquemment 4, 7 ou 14 jours) et confectionnées à 98,5 % de $\rho_{d,OPN}$ et une teneur en eau massique comprise entre w_{OPN} et $w_{OPN} + 2\%$.

Critère à vérifier : $R_c \geq 1$ MPa

Résistance à l'immersion « au jeune âge »

Cet aspect se vérifie à partir de valeurs d' I_{IPi} 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 (avec la même teneur en eau au départ que pour l' I_{IPi}).

Critères à vérifier : $I_{IPi} \geq 20$ et $I_{CBRi} \geq I_{IPi}$

Absence de gonflement

Une vérification de l'aptitude au traitement conforme à la norme NF P 94-100 doit être conduite en amont ou en parallèle de la procédure accélérée, pour vérifier l'absence de risque de gonflement et/ou de défaut de prise liée à des perturbateurs, suivant le critère « *gonflement* » de l'annexe A de cette norme.

Critère à vérifier : $G_v \leq 5\%$

Performances mécaniques à long terme

Le couple (R_t , E) est déterminé sur des éprouvettes testées après une cure de 24 h à 20 °C et au moins 90 % d'humidité relative puis de 14 jours à 40 °C et au moins 90 % d'humidité relative. Les détails relatifs à la fabrication, à la conservation et à l'écrasement des éprouvettes sont présentés en annexe. Les essais étant réalisés à partir d'essais en traction indirecte, R_t est évalué par la relation : $R_t = 0,8 R_{it}$.

Des coefficients de sécurité sont ensuite à appliquer aux résultats :

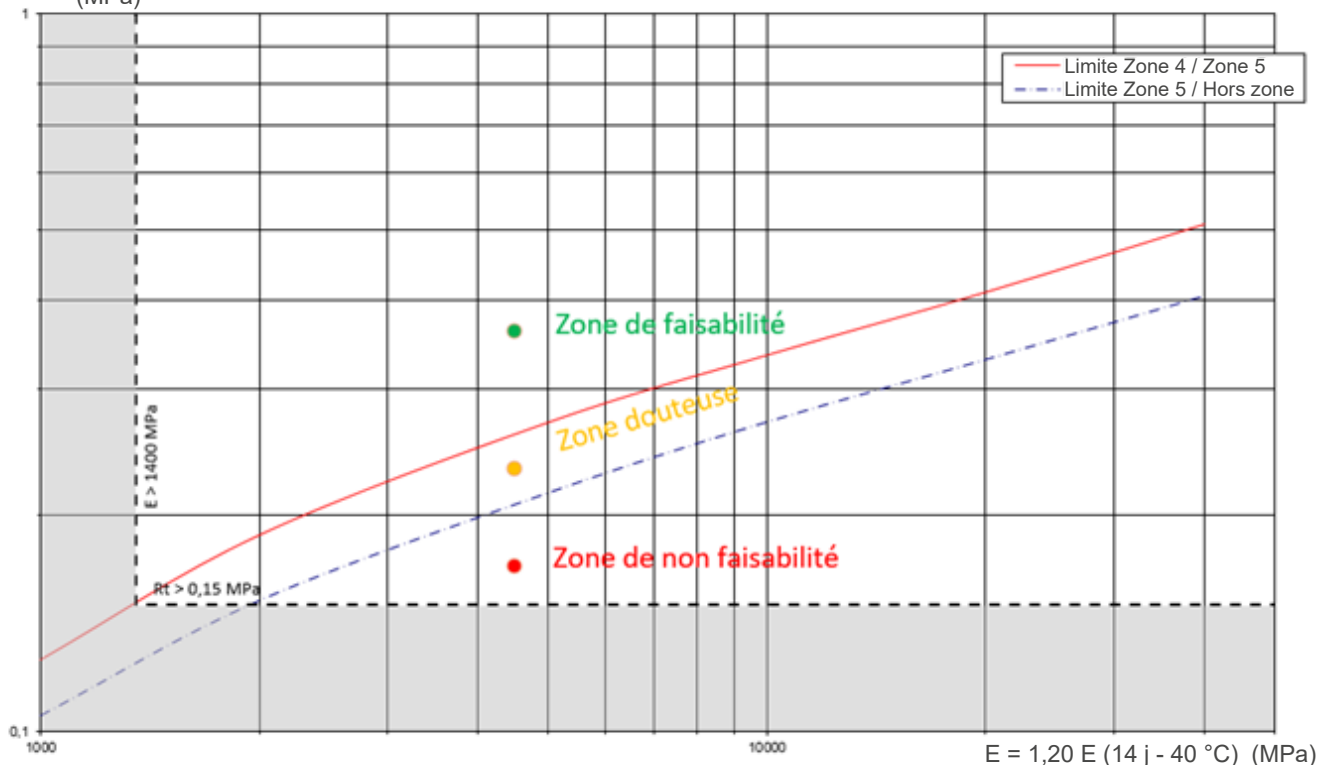
- 0,9 sur les valeurs de résistance (réduction de 10 %) ;
- 1,2 sur les mesures de module (majoration de 20 %).

Pour encadrer les performances acceptables pour une solution de couche de forme traitée, on retient les valeurs limites suivantes : $R_t > 0,15$ MPa et $E > 1400$ MPa.

Avec ces conditions, le critère à vérifier est l'obtention de performances en zone 4 minimum après application des coefficients de sécurité, tel que représenté sur le diagramme suivant :

$$R_t = 0,9 R_{t_i} (14 \text{ j} - 40 \text{ °C})$$

(MPa)



Dans le cas de performances situées en zone 5 (zone « douteuse » sur le diagramme ci-avant), la prise hydraulique est avérée mais a priori insuffisante pour garantir l'obtention de performances en zone mécanique 4 à 90 jours à 20 °C. La conduite d'essais avec un dosage plus élevé doit être réalisée pour vérifier l'atteinte des performances escomptées.

Résistance au gel

Critère à vérifier : $R_{it} \geq 0,25 \text{ MPa}$ sur des éprouvettes testées après une cure de 24 h à 20 °C et au moins 90 % d'humidité puis 14 jours à 40 °C et au moins 90 % d'humidité. Les détails relatifs à la fabrication, à la conservation et à l'écrasement des éprouvettes sont présentés en annexe.

La résistance au gel est jugée satisfaisante avec ce critère avec un délai de 3 mois entre les opérations de traitement et la date probable d'apparition du gel dans la couche traitée. Pour des délais plus courts, il est nécessaire de réaliser des essais avec une cure à 20 °C comme dans les études de formulation de niveau 1.

Ce critère s'applique aux sols fins et intermédiaires. Il n'est notamment pas applicable pour les craies, les marnes ou les matériaux alternatifs.

Dispositions complémentaires pour la mise en œuvre

Afin de prendre en compte les éventuelles dispersions relatives au matériau d'une part et aux conditions de mise en œuvre d'autre part, il peut s'avérer utile de prévoir un surdosage de liant (par exemple de 0,5 %) suivant les conditions du chantier.

Il convient sur chantier d'avoir une bonne maîtrise des états hydriques et les matériaux avant traitement ne doivent pas se trouver dans des états hydriques extrêmes (« *ts* » ou « *th* »).

Le tableau 3 ci-après synthétise les différentes approches des caractéristiques à considérer pour la conception d'une couche de forme traitée, suivant les niveaux d'études de formulation.

Tableau 3 : Caractéristiques de traitement au liant hydraulique étudiées suivant le niveau d'étude de formulation des couches de forme

ASPECTS DU TRAITEMENT CONSIDÉRÉS	NIVEAU 0 : ESSAI D'APTITUDE	CAS CHANTIER DE FAIBLE IMPORTANCE GTS ET GUIDE FAIBLE TRAFIC	NOUVELLE MÉTHODOLOGIE : ÉTUDE DE FORMULATION ACCÉLÉRÉE	ÉTUDE DE FORMULATION DE NIVEAU 1	ÉTUDE DE FORMULATION DE NIVEAU 2
Liant utilisé	Tout liant	CPJ CEM II/A 32,5 ou CPJ CEM II/B 32,5**	Tout liant	Tout liant	Tout liant
Durée de l'étude	7 jours après caractérisation du sol (GTR, Proctor traité)	Uniquement essais d'identification et Proctor	15 jours après caractérisation du sol (GTR, Proctor traité)	90 jours après caractérisation du sol (GTR, Proctor traité)	90 jours après caractérisation du sol (GTR, Proctor traité)
Limitation – taille du chantier	Essai non dimensionnant	< 5000 m ³ de couche de forme	Réseau non structurant, pas de sollicitation exceptionnelle	Tout chantier	Tout chantier
Performances à long terme		Non étudié – utilisation d'une formulation type	Conservation à 40 °C et couple R _t /E à 14 j	Couple R _t /E à 90 j	idem
Âge autorisant la circulation		Non étudié	R _c ≥ 1 MPa	R _c ≥ 1 MPa	
Résistance à l'immersion au jeune âge		Non étudié – limitation aux chantiers qui ne présentent pas ce risque	I _{CBRI} /I _{IPI} ≥ 1 et I _{CBRI} ≥ 20 + absence de gonflement (NF P 94-100)	R _{ci} /R _{c60} ≥ 0,8 ou 0,6 suivant type de sol	
Résistance au gel		Non étudié – limitation aux chantiers qui ne présentent pas ce risque	Conservation à 14 j et R _{it} ≥ 0,25 MPa à 14 j pour un traitement 3 mois avant la date probable d'apparition du gel*	R _{it} ≥ 0,25 MPa à l'âge probable d'apparition du gel*	
Sensibilité vis-à-vis des dispersions de dosage, de compacité et d'état hydrique		Non étudié	Non étudié	Non étudié	R _{it} à 90 j avec 90 % du dosage, 94 % de ρ _{d OPN} et 0,9 et 1,1 w _{OPN}
Dimensionnement du couple classe mécanique/épaisseur		Non – matériau de classe mécanique 5	Non - matériau de classe mécanique 5 Limitation à PF3	Possible	Oui

(*) Critère défini pour les sols fins et intermédiaires. Ne s'applique notamment pas aux craies.

(**) Depuis de nombreuses années, les CPJ CEM II/A 32,5 ou CPJ CEM II/B 32,5 sont rarement utilisés en traitement des sols.

ANNEXE : procédure d'essai accéléré par chauffage à 40 °C pour la détermination du couple E/R_t

1 – Fabrication des éprouvettes

Les sols sont testés sur leur fraction 0/6,3 mm obtenue par tamisage après élimination des éléments supérieurs à 6,3 mm.

Les paramètres de fabrication des éprouvettes sont choisis par référence à l'essai Proctor (normal) réalisé sur la fraction 0/6,3 mm du sol traité :

- masse volumique sèche égale à 96 % de $\rho_{d,OPN}$;
- teneur en eau massique comprise entre w_{OPN} et $w_{OPN} + 2$ %.

Les conditions de préparation du mélange dépendent de la formulation de traitement étudiée :

Cas d'un traitement mixte Chaux + LHR : 120 minutes de maturation après malaxage de la chaux puis confection immédiate après malaxage au liant hydraulique. Le compactage devra être réalisé immédiatement après le mélange avec le liant hydraulique sans excéder 60 min. (ref : NF EN 16907-4 et NF P94-093).

Cas d'un traitement LHR seul : confection immédiate après malaxage du liant hydraulique. Le compactage devra être réalisé immédiatement après le mélange avec le liant hydraulique sans excéder 60 min. (ref : NF EN 16907-4 et NF P94-093).

Le malaxage doit être conduit jusqu'à obtenir une mouture la plus fine et homogène possible et n'évoluant plus si le malaxage est poursuivi.

Trois éprouvettes de diamètre $D = 50$ mm et de hauteur $h = 50$ mm sont confectionnées conformément à NF EN 13286-53 suivant les paramètres de fabrication définis ci-avant.

Des éprouvettes de dimensions supérieures (par exemple 100 x 100 mm) peuvent également être testées par cette méthode, suivant le D_{max} du sol testé. Le cas échéant, la granulométrie des matériaux doit être choisie conformément aux spécifications de la norme NF P 94-102-2.

2 – Conservation des éprouvettes

Après leur fabrication, les éprouvettes sont soumises à un délai de cure de (24 h ± 60 min) à (20 °C ± 2 °C) et à plus de 90 % de degré hygrométrique.

Après ce délai de cure à 20 °C, les éprouvettes sont conservées à (40 °C ± 2 °C) et à plus de 90 % de degré hygrométrique, pendant (14 j ± 4 h).

Elles doivent être protégées contre l'évaporation, susceptible de conduire à une perte significative de la masse, et des déformations pendant toute la phase de conservation. Cette protection peut se faire :

- en enceinte climatique à hygrométrie contrôlée,
- ou en bain thermorégulé, auquel cas les éprouvettes doivent être enfermées dans un dispositif étanche qui doit être totalement immergé pendant toute la durée de leur conservation et doivent être protégées des déformations (par exemple dans des étuis plastiques fermés),
- ou en étuve où les éprouvettes doivent être enfermées dans un caisson étanche avec une réserve d'eau qui permet de garantir le degré d'hygrométrie de plus de 90 %.

La conservation de l'état hydrique doit être contrôlée à la fin de la cure, par une pesée vérifiant une perte de masse inférieure à 2 %.

3 – Mesures des caractéristiques E/R_{it}

La mesure du module élastique et de la résistance en traction indirecte doit être réalisée suivant les normes en vigueur :

Mesure des résistances à la traction indirecte R_{it} selon NF EN 13286-42 :

- Les caractéristiques suivantes des éprouvettes sont à vérifier avant l'essai :
 - Masse des éprouvettes
 - Dimensions des éprouvettes
 - Noter toute remarque sur l'aspect visuel des éprouvettes
- La vitesse initiale de montée en charge de la presse sera ajustée après interprétation des premiers résultats sur des éprouvettes tests de matériaux.

Mesure des modules en traction indirecte selon NF EN 13286-43 :

- Utilisation d'un étrier support de 4 extensomètres, à deux plans (0° et inclinaison 60°).
- Tracer les courbes efforts/déformation et procéder à une correction du pied de courbe.

Bibliographie

- Guide Technique Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application en remblais et couches de forme – SETRA / LCPC, 2000
- Norme NF P 94-102-2 « *Sols : reconnaissance et essais – Sol traité au liant hydraulique, éventuellement associé à la chaux, pour utilisation en couche de forme – Partie 2 : méthodologie des études de formulation en laboratoire* »
- Rapport d'étude « *Sols traités aux liants hydrauliques - Etude d'une procédure d'essais accélérés – Synthèse des essais 2016-2022* » - Sébastien. HERVE, Thibaut LAMBERT, Mathieu PRETESEILLE, Michel COLLOBERT (Cerema Août 2022) – Plateforme documentaire CeremaDoc <https://doc.cerema.fr> - Sols traités aux liants hydrauliques – Etude d'une procédure d'essais accélérés en laboratoire

Rédacteurs

- Joseph ABDO (CIMBéton)
- Sébastien HERVE (Cerema)
- Thibaut LAMBERT (Cerema)

Avec l'aide du groupe de travail " Sols Chauffés " :

- Joseph ABDO (Cimbéton)
- Laurent BESANÇON (Colas)
- Pierre-Antoine BONIN (Vicat)
- Bruno CLASSEN (Calcia)
- Michel COLLOBERT (Cerema)
- Donatien DE THÉ (Vicat)
- Didier DESMOULIN (Colas)
- Stéphane DUPRIET (Eiffage)
- Daniel GANDILLE (NGE)
- Olivier GEFFROTIN (Cerema)
- Sébastien HERVÉ (Cerema)
- Marc JABIRI (Cerema)
- Martial JUERY (Vicat)
- Mustapha KAOUA (Eiffage)
- Didier KURTZ (Eurovia)
- Arnaud LACHAL (Vicat)
- Thibaut LAMBERT (Cerema)
- Emmanuel LAVALLÉE (Bouygues)
- Cedric LE GOUIL (Cimbéton)
- Ludovic MIARD (Cerema)
- Jérôme PINCEMAIL (Eqiom)
- Mathieu PRETESEILLE (Cerema)
- Christian RAYNAUD (Colas)
- Dominique SAINT-EVE (Cerema)

La présente note d'information a été rédigée par un groupe de travail spécifique rattaché au comité opérationnel Gestion de Patrimoine d'Infrastructures de l'IDRRIM.

Avertissement : la présente note est destinée à une information rapide. La contrepartie de cette rapidité est le risque d'erreur et de non exhaustivité. Ce document ne peut en aucun cas engager la responsabilité ni des auteurs, ni de l'Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité.



9, rue de Berri - 75008 Paris - Tél : +33 1 44 13 32 99

www.idrrim.com - idrrim@idrrim.com

 [@IDRRIM](https://twitter.com/IDRRIM)

Association loi 1901