

Retour d'expérience sur le comportement de matériaux alternatifs en construction routière

Agnès JULLIEN *, Denis FRANÇOIS, Jean-Pierre KERZREHO, Michel LEGRET

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
BP 4129, 44341 Bouguenais cedex
+ 33 (0)2 40 84 59 38 / + 33 (0)2 40 84 59 92
agnes.jullien@lcpc.fr, jean-pierre.kerzreho@lcpc.fr, michel.legret@lcpc.fr

*Auteur correspondant: Agnes.jullien@lcpc.fr

Résumé

Les matériaux alternatifs placés dans différents contextes routiers sont soumis à des contraintes mécaniques, thermiques et hydriques, susceptibles de modifier leurs propriétés physiques et chimiques, donc leur comportement à long terme. Bien que fondamentale, l'analyse du retour d'expérience à partir d'ouvrages routiers réalisés avec des matériaux alternatifs n'a jusqu'à maintenant pas été véritablement réalisée. Peu de données étant disponibles aujourd'hui sur ces ouvrages, un panel de 17 cas d'études français, parmi lesquels des ouvrages classiques et des plots expérimentaux, a été recensé. L'analyse de ces cas comprend la description de la structure de l'ouvrage, des caractéristiques du matériau alternatif utilisé, des facteurs locaux susceptibles d'avoir une influence sur le comportement des matériaux, et des réponses mécaniques et environnementales du matériau et de la structure routière. Des recommandations pour une meilleure conduite de futures expériences sont proposées.

Abstract :

Alternative materials used in roads are submitted to mechanical, thermal and hydraulical stresses, that can change their physical and chemical properties and thus their long term behaviour. Field back analysis performed on roads made of alternative materials, although of importance has not yet be fully performed. Only few data are available today on these roads: 17 French cases including classical roads and experimental ones have been checked. These cases analysis includes the structure and the alternative material description, and details on local factors involved as well as mechanical and environmental answers of road within time. A proposal for a better experimental practice is done.

Mots-clefs : routes; environnement, retour d'expériences.

1 Introduction

Depuis les années 90, les questions posées par l'utilisation de résidus et de sous-produits variés en construction routière ont donné lieu à diverses études visant à préciser la faisabilité technique et environnementale de telles solutions. Les ouvrages routiers correspondent à des scénarios d'utilisation pour lesquels les matériaux sont soumis à des sollicitations extérieures, de type mécanique, thermique et chimique. Les matériaux alternatifs, réactifs à ces sollicitations, y répondent spécifiquement, en fonction des conditions locales et des caractéristiques propres de l'ouvrage. Le retour d'expérience doit donc être analysé en intégrant l'aspect sollicitations-réponses du système ouvrage routier.

Une enquête a été conduite à l'échelle nationale afin de répertorier les études ayant consisté en un suivi mécanique et/ou environnemental de structures routières (Figure 1) utilisant des matériaux alternatifs. Tout type d'ouvrage a été a priori considéré, du plot (ouvrage hors trafic) à différents ouvrages en service (sous trafic routier). L'analyse des études précisée ci-après visait à identifier des scénarios types d'emploi des matériaux alternatifs en tenant compte de leurs caractéristiques (réactivité) et des facteurs influents (conditions locales).

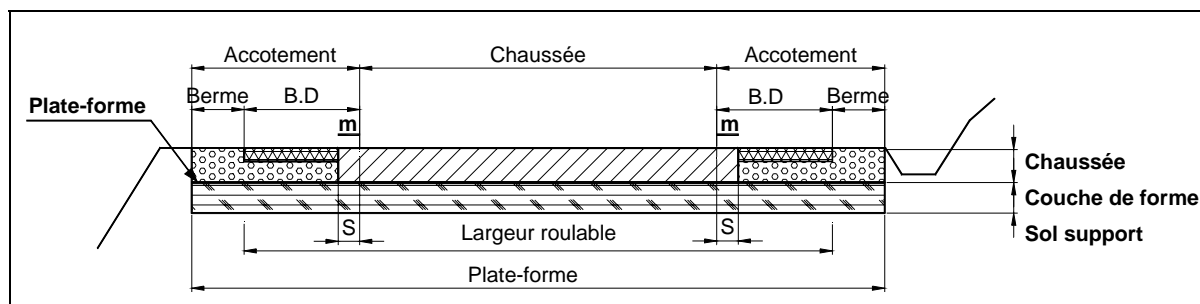


FIG. 1 . Profil en travers d'une route nationale (hormis voies du réseau structurant) avec BD : Bande dérasée ; S : Sur-largeur structurale de chaussée supportant le marquage de rive (m) ; m : marquage de rive, MELT (1994)

2. Présentation des cas d'étude

L'enquête a abouti au recensement de 17 cas d'études, bien répartis sur le territoire national et couvrant ainsi une large gamme de contextes climatiques. Des fiches ont été conçues spécialement afin de synthétiser l'information et de l'analyser à partir des divers types de documents disponibles (articles, thèses, rapports publics ou internes). Ces fiches décrivent i) la structure de l'ouvrage; ii) les caractéristiques du matériau alternatif; iii) les sollicitations extérieures; iv) les comportements mécaniques et environnementaux constatés, du matériau et de la structure. Des principales caractéristiques des cas (Tableau 1) il ressort que les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) ont donné lieu aux plus nombreuses expériences (12 cas, essentiellement sur des MIOM non traités). Les autres cas traitent de: charrées de chrome, laitiers sidérurgiques, mâchefers d'incinération de déchets industriels spéciaux (MIDIS), cendres volantes de centrale thermique, scories de première fusion de plomb et de zinc, cendres volantes d'incinération d'ordures ménagères (CVIOM) traitées. Les différents types d'ouvrages routiers sont représentés. Dans la plupart des cas, la structure routière est soumise à un trafic automobile (8 ouvrages en service sont instrumentés), seuls 3 cas consistent en un suivi de plots (par définition hors service).

Parmi les 12 études de suivi (notés S), le plus long suivi d'ouvrage a duré 17 ans, le plus bref 2 mois ; la durée la plus courante variant de 1 à 2 ans (8 cas). Dans certains cas, la durée d'observation s'est limitée aux quelques semaines de la phase de chantier routier (3 cas notés CR). Seules deux études ponctuelles (notées EP) réalisées sur des ouvrages après une période de service relativement longue (environ 20 ans) ont été identifiées. Dans 9 cas, les couches d'emploi des matériaux alternatifs dans les structures routières étudiées sont simples : remblai (1 cas), couche de forme (4 cas), couche de fondation (2 cas) et couche de base (2 cas). Dans les 8 autres cas, les couches réalisées avec le matériau alternatif correspondent à des combinaisons de couches routières : remblai-forme (3 cas), forme-fondation (2 cas), base-fondation (2 cas) et base-forme (1 cas). Ces derniers cas, moins représentatifs des pratiques de construction routière, présentent moins d'intérêt. Aucune couche de liaison ou de roulement n'est représentée dans cet inventaire.

L'épaisseur des couches utilisant des matériaux alternatifs varie de 20 cm (2 cas) à 8 mètres (2 cas). Toutefois, en relation avec le type de couche routière réalisée, dans la majeure partie des cas (11 cas), l'épaisseur mise en œuvre est inférieure à 50 cm. Les volumes de matériau mis en œuvre dans les différents cas sont aussi très variables : de quelques dizaines à quelques centaines de milliers de mètres cubes. Dans 7 cas ce volume est inférieur à 100 m³, dans 6 cas il est compris entre 100 et 1000 m³ et dans 4 cas il est supérieur (jusqu'à 400.000 m³).

Afin de remettre en perspective la représentativité des cas d'étude et l'aptitude des ouvrages à supporter un trafic routier, la structure de chacun d'eux a servi à estimer le trafic qu'elle aurait pu recevoir sur une durée de 20 ans (tableau 1). Pour 5 cas (de MIOM), cette capacité est de 50 à 100 PL/j, et pour 4 cas (de matériaux variés), elle est de 100 à 150 PL/j. Les autres gammes de capacité ne concernent que 1 à 2 cas d'étude. La majorité des cas correspond donc à des trafics faibles (11 cas d'étude inférieurs à 150 PL/j, c'est à dire ne dépassant pas la classe de trafic T3).

Tableau 1 : Principales caractéristiques des cas d'étude (A, Autoroutes; RN, routes nationales ; CD, chemins départementaux, R, rues ; VP voies privées ; S étude avec suivi).

Cas	Matériaux	Trafic	Ouvrage	Suivi	Etude	Couche routière	Epaisseur (m)	Volume de matériau (m ³)	Capacité estimée sur 20 ans (PL/j)	Essais mécaniques pratiqués et classements des matériaux
1	MIOM	X	A	-	CR	remblai-forme	0,6 à 1,5	Milliers	1.500-2.000	Proctor Normal - <i>Granulats E</i> - Dynaplaque
2	Charrées de chrome	X	A	X	S-17 ans	remblai-forme	6 à 8	400.000	1.500-2.000	Proctor Normal et <i>Modifié</i>
3	MIOM	X	RN	-	CR	remblai	4 à 8	175.000	400-800	Proctor Normal - <i>Granulats D</i>
4	MIOM	X	RN	-	CR	remblai - forme	0,4 à 1,5	10.000	200-300	Proctor Normal et <i>Modifié</i> - <i>Granulats E</i> - Plaque
5	MIOM	X	CD	X	S-2 ans	forme	0,25	100	< 50	Proctor Normal – <i>Granulats F</i> – Sol D22 – Déflexion
6	MIOM	X	CD	X	S-1 an	forme	0,4	300	1.000-2.000	Proctor Normal – <i>Granulats D</i> – Sol D21 – Dynaplaque
7	Laitiers sidérurgiques	X	CD	-	S-2 mois	Forme-fondation	0,7	600	150-250	Proctor Normal – Sol D3
8	MIOM	X	R	-	EP (20 ans)	forme	0,25	1.000	50-100	Proctor <i>Modifié</i> – Déflexion
9	MIOM	X	R	X	S-2 ans	forme	0,35	200	50-100	-
10	MIOM traités	X	R	X	S-2 ans	Base-fondation	0,3	30	50-100	Proctor <i>Modifié</i>
11	MIOM	X	VP	X	S-1,5 an	Forme-fondation	0,3	600	50-100	Proctor Normal et <i>Modifié</i> – <i>Granulats E</i> – Sol D2
12	MIOM & MIDIS	X	VP	X	S-7 mois	fondation	0,25	60	50-100	Proctor Normal et <i>Modifié</i> – <i>Granulats E</i> et <i>F</i> – Sols D21 et B3
13	MIOM	-	VP	-	EP (22 ans)	Base-fondation	0,2 et 0,5	500	< 50	Proctor <i>Modifié</i> – Déflexion
14	MIOM et MIOM traités	-	Plot	X	S-3 ans	fondation	0,25	20	100-150	Proctor <i>Modifié</i>
15	Cendres volantes de centrale thermique	-	Plot	X	S-1,5 an	Base-forme	0,5	20	100-150	Proctor <i>Normal</i>
16	Scories de plomb et de zinc	-	Plot	X	S-1 an	Base	0,25 et 0,4	50	100-150	Proctor <i>Modifié</i>
17	CVIOM traitées	X	VP	X	S-1 an	Base	0,2	40	100-150	Proctor <i>Normal</i> et <i>Modifié</i> – Classement GHC – Déflexion – Essais de laboratoire

3-Comportement mécanique et environnemental des matériaux et des ouvrages

Dans la pratique de caractérisation des matériaux alternatifs pour la réalisation des remblais et des couches de forme, en suivant le protocole de classification du GTR (MELT, 2000), compte tenu des caractéristiques prises en compte pour le classement (passant à 80 microns, VBS, passant à 2mm, LA et MDE), les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères ressortent comme assimilables à des sols naturels de classe D2 (Graves alluvionnaires propres, sables...) ou B3 (Graves silteuses...). Ils sont considérés en tant que tel pour leur mise en œuvre, ce qui peut aboutir à des écarts entre les comportements prévus d'après cette classification et le comportement observé en place [<http://lcpc.ofrir.fr>].

Dans le référentiel de classification des sols pour la réalisation des remblais et des couches de forme (MELT, 2000), les sols sont définis comme des « matériaux naturels, constitués de grains pouvant se séparer aisément par simple attrition. Les paramètres retenus pour la classification des sols se rangent en: i) paramètres de nature (D_{max} ; tamisat à 80 microns ; tamisat à 2 mm ; ii) indice de plasticité ou valeur de bleu de méthylène) ; iii) paramètres de comportement mécanique (coefficients Los-Angeles, Micro-Deval, de friabilité des sables) ; iv) paramètres d'état, fonction de l'environnement dans lequel il se trouvent, soit teneur en eau naturelle (W_n) par rapport à l'optimum Proctor normal ; valeur de W_n par rapport aux limites d'Atterberg ; indice portant immédiat (IPI). La classification des sols dans les classes B (Sols sableux et graveleux avec fines) et D (Sols insensibles à l'eau), se fait à partir d'un faible nombre de paramètres : D_{max} (≤ 50 mm) ; tamisat à 80 microns ; tamisat à 2 mm ; valeur de bleu de méthylène.

Par ailleurs, selon la norme NF P 18-540, la qualité des granulats est classée par ordre décroissant de A à F sur la base des paramètres de comportement mécanique utilisés par ailleurs dans le GTR : coefficients Los-Angeles (LA), Micro-Deval (MD), de friabilité des sables (FS). Selon ces critères de classification les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères ressortent généralement de qualité E ou F. Le Tableau 2 illustre cette classification pour les matériaux rencontrés dans deux cas.

Tableau 2 : Classement NF P 18-540 des échantillons de MIOM des cas d'étude 4 et 5.

	MIOM Cas 4	MIOM Cas 5
Fraction testée	10/14 mm	10/14 mm
LA (NF P 18-573)	40 à 43	43
MDE (NF P 18-572)	22,6 à 27	58
FS (XP P 18-576)	62 à 69	27
Classement NF P 18-540	E	F

La sensibilité à l'eau d'un sol est définie par le GTR (Setra-LCPC, 2000) comme « la plus ou moins grande variation de la portance d'un sol sous l'effet d'une variation donnée de sa teneur en eau ». La Figure 2, extraite du cas d'étude 13, illustre la sensibilité à l'eau des MIOM à partir des essais de portance en laboratoire (IPI). Elle montre aussi que les propriétés de portance de ce matériau lorsqu'il est à la bonne teneur en eau (dans le cas d'étude : 10-12%), peuvent être très bonnes (IPI > 140).

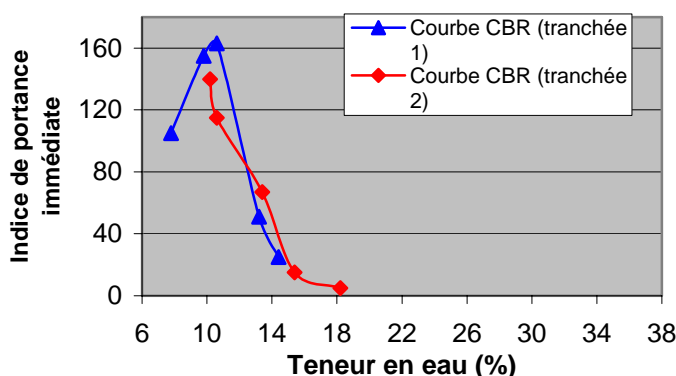


FIG. 2 - Courbes de portance des deux échantillons de MIOM du cas 13

La sensibilité à l'eau des MIOM apparaît aussi au travers des mesures de déflexion sur ouvrage. Le Tableau 3, extrait du cas d'étude 5 illustre la bonne rigidité de l'ouvrage construit avec des MIOM en couche de forme. La rigidité de l'ouvrage s'améliore au cours du temps (progression de plus de 40% en 2 ans de suivi), grâce à la progressive carbonatation du matériau en place. La comparaison entre la zone drainée de l'ouvrage et la zone non drainée illustre la sensibilité à l'eau des MIOM : sous

conditions météorologiques identiques, la déflexion de la zone drainée est toujours inférieure à celle de la zone non drainée. L'écart est de 54 centièmes de mm au moment de la première mesure mais on constate qu'il diminue au cours du temps, en relation avec l'effet de la carbonatation sur la rigidification des couches de MIOM ; il n'est plus que de 19 centièmes de mm à la fin du suivi. La comparaison avec une zone sans MIOM montre qu'à terme, dans la zone drainée, ce matériau permet d'atteindre des performances de déflexion supérieures à celles d'une structure uniquement en matériaux naturels.

Tableau 3 : Suivi de la déflexion (1/100 mm) de l'ouvrage (MIOM en couche de forme) dans le cas d'étude 5

Date	27/07/00	03/05/01	07/06/02	24/10/02	Variation Début/fin
Zone drainée avec MIOM	129	107	92	76	- 41 %
Zone non drainée avec MIOM	174	132	118	95	- 45 %
Zone sans MIOM	/	104	117	98	- 6 %

Echelle des matériaux : de l'analyse de l'ensemble des cas d'étude, il ressort que la description des caractéristiques géotechniques des matériaux est bien intégrée dans la grande majorité des études, que leur objectif soit mécanique ou environnemental. Parmi l'ensemble des cas, les dates de production, de préparation et de mise en œuvre des matériaux sont rarement intégralement fournies, or les matériaux alternatifs évoluent dans le temps et la traçabilité, indispensable pour tout suivi à long terme, fait défaut. La composition chimique des matériaux n'est décrite que dans les cas ayant une finalité environnementale; certaines de ces études se reposant uniquement sur l'évaluation du potentiel lixiviable. L'étude minéralogique est rarement réalisée, de même que l'identification des composés organiques. Bien que les matériaux considérés soient de nature essentiellement minérale, les interactions possibles entre la fraction organique (qui peut être d'une grande diversité) et les éléments minéraux apparaissent ainsi sous-estimées. De fait, l'utilisation d'essais de lixiviation (X31-210) apparaît comme une pratique généralisée.

La description de la sensibilité au gel du matériau est rarement fournie, même dans des contextes climatiques où des périodes de gel sont courantes. Une minorité d'études (paradoxalement sur plots réalisés spécialement pour étude) omet de décrire la granulométrie des matériaux, utilisée différemment selon les objectifs, mécaniques ou environnementaux, des études. Tous les matériaux sont bien décrits par rapport au référentiel existant pour la construction routière. Par contre, dans les études strictement orientées vers l'évaluation environnementale, les caractéristiques de portance du matériau sont généralement omises, bien que cette propriété soit primordiale pour juger de la pertinence de l'utilisation du matériau.

Echelle des ouvrages : de l'analyse de l'ensemble des cas d'étude, il ressort que la structure verticale de l'ouvrage est toujours bien décrite, bien que les dimensions de la couche concernée par l'étude soient omises près d'une fois sur deux ce qui rend difficile l'estimation de la masse de matériau en jeu (calculable si sa densité en place est connue). Les pentes longitudinale et transversale de l'ouvrage ne sont généralement pas précisées, vraisemblablement en raison d'une sous-estimation de l'importance du problème hydrique (ruissellement, infiltration). Seules les études sur plots et celles sur ouvrages à vocation strictement environnementale, n'intègrent pas d'appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage.

Les caractéristiques de portance, forcément vérifiées lors de la construction des ouvrages, tant réels qu'expérimentaux, sont peu décrites. Les mesures de déflexion apparaissent aussi peu souvent précisées que celles de portance ; elles sont réalisées dans des études qui intègrent la dimension fonctionnelle de l'usage des matériaux alternatifs dans la construction routière. Les études n'abordant la question de la réutilisation de matériaux alternatifs que sous l'angle structurel (simple substitution à des matériaux classiques) omettent cette mesure.

Les volumes de percolats recueillis sont indiqués dans moins de la moitié des cas. Certaines études à finalité environnementale omettent de préciser ces volumes, ce qui constitue un inconvénient majeur, d'une part pour l'estimation des quantités totales relarguées par l'ouvrage, et d'autre part pour la comparaison avec des résultats d'essais de solubilisation dans la perspective du développement de

méthodes d'essai prédictives du comportement en place. En outre, il est rarement fait mention des dispositions prises pour s'assurer que les eaux recueillies représentent bien l'intégralité des eaux de percolation, ni plus (entrée d'eaux parasites), ni moins (fuites). Malgré son importance sur le plan mécanique et environnemental, la perméabilité en place reste peu explorée. Le taux d'infiltration dans l'ouvrage n'est que rarement précisé. Les études ne mesurent généralement que l'une ou l'autre des deux grandeurs nécessaires au calcul de ce taux : précipitations ou volumes percolés. La méconnaissance de cette réponse de l'ouvrage sur la période de suivi représente un handicap pour la prévision du comportement à long terme, en particulier vis-à-vis de la percolation ; le suivi de la qualité des eaux de percolation constituant l'objectif premier de la majorité des études. La qualité des dispositifs de stockage et de conservation des percolats avant analyse est très variable. Le risque d'évolution des paramètres physico-chimiques susceptibles de jouer sur la solubilité des espèces présentes est rarement considéré.

5. Conclusion

Une analyse du retour d'expérience a été entreprise à l'échelle nationale dans le but d'accroître la connaissance sur l'utilisation des matériaux alternatifs en construction routière. Malgré la diversité des ouvrages recensés, l'essentiel des études concernent les MIOM, en relation avec les fortes préoccupations sur ce matériau depuis les années 90. Une grande hétérogénéité dans le traitement de l'information d'une étude à une autre a été notée ainsi que des lacunes dans la collecte de données au regard du nombre de paramètres à connaître pour en tirer des conclusions générales. La description des matériaux et des ouvrages apparaît mieux traitée que celle des facteurs extérieurs agissant et des réponses des ouvrages dans le temps. Ce bilan général ouvre ainsi des perspectives en matière d'amélioration de la conduite de futures études d'évaluation des matériaux alternatifs en construction routière, afin de renforcer leur bénéfice scientifique et leur réalisme.

Remerciements

Cette étude a été réalisée à la demande de l'Ademe (Etude CAREX). Elle a été menée en lien avec la division Polden d'Insavalor.

Références

<http://ofrir.lcpc.fr>

Ministère de l'Équipement du Logement et des Transport (MELT) 2000 Guide technique Réalisation des remblais et des couches de forme, Fascicules I et II, SETRA & LCPC, Paris.

Ministère de l'Équipement et du Logement et des Transport (MELT), 1994 Guide technique Conception et dimensionnement des structures de chaussée, SETRA & LCPC, Paris.