

Retour d'expérience sur le comportement de matériaux alternatifs en construction routière. Cadre d'analyse, inventaire et pratiques d'étude

Denis FRANÇOIS*, Agnès JULLIEN,
Jean-Pierre KERZREHO
Laboratoire central des Ponts et Chaussées,
Bouguenais, France

Laurent CHATEAU
Agence de l'environnement et de la maîtrise
de l'énergie, Angers, France

■ RÉSUMÉ

Depuis les années 1990, 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, économique et environnementale de telles solutions. 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. Bien qu'elle constitue un aspect essentiel du problème, 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, dans le cadre de ce travail, un panel de 17 cas d'étude français, parmi lesquels des ouvrages classiques et des ouvrages expérimentaux, a préalablement été recensé. L'analyse de ces cas d'étude a été conduite à partir d'une fiche signalétique élaborée spécifiquement et permettant de décrire : la structure de l'ouvrage ; les caractéristiques du matériau alternatif utilisé ; les facteurs locaux susceptibles d'avoir une influence ; et les réponses mécaniques et environnementales du matériau et de la structure routière. Cette analyse a abouti à des recommandations pour une meilleure conduite de futures expériences.

Back analysis of the behavior of alternative materials used in road construction: Analytical framework, inventory and study guidelines

■ ABSTRACT

Since the 1990's, the issue of road construction with various wastes and secondary materials has led to an array of various studies aimed at clarifying its relevant technical, economic and environmental feasibility. Alternative materials applied in different road configurations are subjected to the effects of mechanical, thermal and moisture stresses, which are capable of changing their physical and chemical properties, and therefore their behavior as well. Though a back analysis of roads composed of alternative materials would provide a critical contribution, such an analysis has yet to be fully achieved. As of today, only very limited data at the road scale are actually available; a set of 17 French examples, containing both conventional and experimental roads, was initially collected and examined. Each case was analyzed according to a specification sheet describing: road structure, material characteristics, local factors capable of exerting an influence, and the mechanical and environmental responses of the material and road structure. This analysis has also led to a series of recommendations for improving the performance of future experiments.

* AUTEUR À CONTACTER :

Denis FRANÇOIS*
denis.francois@lpc.fr

CONTEXTE

Les objectifs assignés par l'Union européenne dans le sixième programme communautaire d'action pour l'environnement en matière de gestion des ressources naturelles et des déchets sont de veiller à ce que la consommation des ressources renouvelables et non renouvelables ne dépasse pas ce que

l'environnement est capable de supporter. Ceci peut être réalisé notamment grâce à une efficacité accrue dans l'utilisation des ressources et à la réduction de la production de déchets. L'objectif est de réduire la production de déchets de 20 % d'ici 2010 et de 50 % d'ici 2050 [1]. Parmi les actions recommandées figure la définition de règles de bonnes pratiques, ce qui implique de mieux comprendre – et d'être capable de prévoir – les mécanismes d'évolution des déchets dans des conditions précises d'emploi. Ceci est particulièrement important dans l'optique de l'utilisation de matériaux alternatifs (déchets et sous-produits) en construction routière. En effet, quel que soit le matériau (naturel classique ou alternatif), les propriétés fonctionnelles de la route doivent être garanties de manière égale. Or, la structure routière est un système ouvert, soumis à l'influence de facteurs physiques et chimiques induits par le climat et l'usage de la route [2]. Contrairement aux matériaux naturels classiques, de nombreux matériaux alternatifs ne sont pas inertes, au moins à court terme. Mis en œuvre dans une couche routière donnée (couche de base, de fondation...) un matériau alternatif peut donc montrer des performances différentes en fonction des caractéristiques de son lieu d'utilisation et des variations de certains facteurs locaux.

Dans ce contexte, de nombreuses questions sont apparues, relatives à la prévision des performances mécaniques réelles des matériaux alternatifs, ainsi qu'à leurs effets potentiels sur l'environnement, du court au long terme. Ces questions, ne trouvant pas de réponses satisfaisantes dans les méthodes classiques d'essais [3], ont donné lieu depuis les années 1990, à des programmes de démonstration et études visant à clarifier la faisabilité technique, économique et environnementale de cette voie de valorisation. En France, certaines de ces études ont été identifiées à l'occasion de la constitution de la base de données partagée OFRIR (Observatoire Français du Recyclage dans les Infrastructures Routières) initié par le LCPC avec les ministères de l'Équipement et de l'Environnement [4]. Le projet OFRIR (<http://ofrir.lcpc.fr>) a aussi montré à ce sujet qu'un obstacle majeur à la clarification était le manque d'analyse des données produites par ces expérimentations sur ouvrages routiers. Au cas par cas, le retour d'expérience à partir des ouvrages était peu analysé. S'agissant d'un aspect majeur de l'évaluation du comportement des matériaux alternatifs en scénario routier, l'analyse du retour d'expérience à l'échelle nationale restait donc à faire. Ce constat est à l'origine de l'étude CAREX initiée par l'ADEME et conduite par le LCPC en 2004 et 2005.

DÉMARCHE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Dans les ouvrages routiers, les matériaux sont soumis à des sollicitations extérieures, d'ordre mécanique, thermique et chimique. Les matériaux alternatifs, réactifs à ces sollicitations, vont y répondre spécifiquement, en fonction des conditions locales et des caractéristiques propres de l'ouvrage. Pour comprendre le comportement des matériaux alternatifs et des ouvrages construits avec ces matériaux, il est nécessaire de décrire les sollicitations s'exerçant dans leur contexte d'utilisation. Le retour d'expérience doit donc être analysé en intégrant l'aspect *sollicitations-réponses* du système *ouvrage routier* [5].

Une analyse du retour d'expérience à l'échelle nationale nécessite de disposer du plus grand nombre possible de cas d'étude, qui soient variés et complémentaires, l'objectif étant de pouvoir identifier des scénarios-types d'emploi de certains matériaux en fonction de leur réactivité et des facteurs influents majeurs des contextes d'utilisation (conditions locales).

L'inventaire des cas d'étude répertoriés dans le cadre du projet OFRIR étant insuffisant, la première partie de l'étude CAREX a consisté à identifier le plus grand nombre possible de cas d'études ayant comporté un suivi mécanique et/ou environnemental d'ouvrages fonctionnels soumis à un trafic automobile (routes et parkings) ou expérimentaux situés hors trafic et dédiés exclusivement à l'étude (dénommés plots dans cette étude).

En parallèle à l'enquête d'inventaire, afin de classer l'information recueillie et de pouvoir l'analyser de façon complète et homogène à partir de sources variées (comptes rendus, rapports internes ou publics, thèses, articles), des tables de saisie ont été conçues spécialement.

Afin d'expliciter la méthode d'analyse des cas, cet article présente dans une première partie les tables de renseignement types qui ont servi à répertorier et analyser l'information utile au retour d'expérience. Dans la seconde partie sont présentés un aperçu des cas d'étude recensés grâce à l'enquête nationale, ainsi que les pratiques d'étude qui s'en dégagent.

MÉTHODE D'ANALYSE DES CAS D'ÉTUDES

Les tables de renseignement sont destinées à décrire i) les caractéristiques générales de l'étude (Table « Informations générales ») ; ii) la structure de l'ouvrage (Table « Description de l'ouvrage ») ; iii) les caractéristiques du matériau alternatif (Table « Description du matériau ») ; iv) les sollicitations par les facteurs extérieurs (Table « Description des facteurs extérieurs ») ; v) les comportements mécaniques et environnementaux du matériau et de la structure routière observés (Table « Description des réponses »). Le contenu de chacune des tables est détaillé ci-après.

■ Informations générales

La table « Informations générales » est présentée en **figure 1**. L'objectif de chaque étude est tout d'abord indiqué tel qu'il est décrit dans les documents disponibles sur le cas d'étude. Ces derniers sont référencés. Les partenaires de l'étude sont indiqués, ainsi que le type de structure routière, la nature du matériau alternatif utilisé, celle du matériau routier (ex. GNT, grave-ciment...) et sa couche d'emploi. L'ouvrage étudié peut être de type section autoroutière, section de route nationale, de route départementale, de chaussée urbaine (rue), de voie privée, parking, remblai.

■ Description de l'ouvrage

La table « Description de l'ouvrage » est présentée en **figure 2**. La description de la structure routière comprend : i) sa localisation ; ii) les dates principales de son historique ; iii) sa géométrie ; iv) sa documentation à travers des plans et des prises de vues.

figure 1

| T1 - Informations générales | | | |
|-------------------------------------|-------------------------|-----------------|----------------------|
| Titre de l'étude : | <input type="text"/> | | |
| Objectif de l'étude : | <input type="text"/> | | |
| Références documentaires : | <input type="text"/> | | |
| Partenaires de l'étude : | <input type="text"/> | | |
| Matériau alternatif : | <input type="text"/> | | |
| Matériau routier : | <input type="text"/> | | |
| Couche d'emploi dans la structure : | <input type="text"/> | | |
| Type d'ouvrage : | Urbain | Interurbain | |
| | Autoroute | Route nationale | Route départementale |
| | Rue | Voie privée | |
| | Parking | Remblai | |
| Trafic automobile : | Oui (Route, Parking) | Non (Plot) | |

figure 2

| T2 - Description de l'ouvrage | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|----------------|---------------------|-----------------|
| 2.1 Localisation : | Département : | Commune : | Détails éventuels : | Cote NGF : |
| 2.2 Dates de... : | de | à | Durée | |
| ▶ Production du déchet | | | | |
| ▶ Préparation du matériau alternatif | | | | |
| ▶ Préparation du matériau routier | | | | |
| ▶ Mise en œuvre | | | | |
| ▶ Suivi de l'ouvrage | | | | |
| ▶ Réalisation d'une étude ponctuelle | | | | Age (ouvrage) : |
| ▶▶ Diagramme historique : | | | | |
| 2.3 Géométrie de l'ouvrage : | | | | |
| ▶ Structure verticale : | Schéma | Couches | Matériaux | |
| ▶ Pentés de la couche de surface : | Longitudinale : | Transversale : | | |
| ▶ Dimensions de l'ouvrage : | Longueur : | Largeur : | Surface : | |
| ▶ Dispositif de suivi : | | | | |
| ▶▶ Collecte de percolats : | Oui : ↓ | | | Non |
| ▶▶ Volume de matériau étudié : | Épaisseur : | Longueur : | Largeur : | |
| ▶▶ Mesure de la teneur en eau : | Oui | | | Non |
| ▶▶ Mesure de la température : | Oui | | | Non |
| 2.4 Plans : | | | | |
| 2.5 Photos : | | | | |

La localisation de la structure routière est décrite par le département et le nom de la commune. L'altitude du site est renseignée. Peut être fournie également toute précision concernant la situation et/ou la fonction du tronçon routier (par exemple les caractéristiques de trafic routier et l'urbanisation dans le secteur, la distance à la principale ville, les voies connectées à ce tronçon, le gestionnaire du tronçon routier, le propriétaire...).

Les dates importantes à connaître quant à l'historique du matériau et de l'ouvrage (ainsi que la durée des différentes périodes) sont celles de production des matériaux et de préparation en tant que matériau routier (élaboration, vieillissement et traitement éventuels...), les dates de début et de fin de mise en œuvre des matériaux dans les ouvrages et celles de suivi des ouvrages. Lorsque des études ponctuelles sont réalisées sur un ouvrage, l'âge de l'ouvrage à ce moment doit être indiqué.

La géométrie des ouvrages doit être spécifiée à travers leur structure verticale (épaisseur et nature des différentes couches), la pente longitudinale et transversale de la couche de surface, la largeur et la longueur de la section étudiée, ainsi qu'à travers la description des dispositifs de suivi (capteurs implantés dans la structure et dispositifs de prélèvement).

Qu'ils soient fournis par les documents ou reconstitués à partir des informations rassemblées, les plans, comme les photographies de l'ouvrage en construction et/ou en service, sont importants pour compléter la description.

■ Description du matériau

La table « Description du matériau » est présentée en **figure 3**. La description du matériau alternatif comprend : i) la description de son origine et de sa préparation avant mise en œuvre ; ii) la description de sa composition et l'estimation de son potentiel lixiviable ; iii) la description de sa granularité ; iv) la description de ses caractéristiques géotechniques ; v) de sa perméabilité ; vi) de son comportement au gel.

La composition chimique du matériau alternatif peut évoluer, spontanément (réactions de vieillissement) ou sous l'action des procédés de préparation avant utilisation (retrait de composants). Sous

figure 3

| T3 - Description du matériau | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|
| 3.1 Déchet : | | | | |
| ▶ Nature : | | | | Code Européen des Déchets : |
| ▶▶ Lieu de Production : | | | | |
| ▶▶ Dépôt ou stock sur site : | Oui | | | Non |
| 3.2 Matériau alternatif : | | | | |
| ▶ Préparation : | Oui : → | Lieu : | Non | |
| ▶▶ Simple vieillissement : | Oui : → | Détails : | Non | |
| ▶▶ Elaboration : | Oui : → | Détails : | Non | |
| 3.3 Matériau routier : | | | | |
| ▶ Traitement : | Oui : ↓ | Non : → | | Type de matériau |
| ▶▶ Liant : | L. Hydraulique | L. Hydrocarboné | | |
| 3.4 Composition du matériau : | | | | |
| | Oui (Stade : ↓) | Non | | |
| ▶ Analyse chimique élémentaire : | Production | Préparation | Mise en œuvre | Suivi ou EP → T4 |
| ▶ Composés organiques : | Production | Préparation | Mise en œuvre | Suivi ou EP → T4 |
| ▶ Minéralogie : | Production | Préparation | Mise en œuvre | Suivi ou EP → T4 |
| 3.5 Comportement en lixiviation : | | | | |
| | Oui (Stade : ↓) | Non | | |
| | Production | Préparation | Mise en œuvre | Suivi ou EP → T4 |
| 3.6 Granulométrie : | | | | |
| | Oui (Stade : ↓) | Non | | |
| | Production | Préparation | Mise en œuvre | Suivi ou EP → T4 |
| ▶ Courbe granulométrique : | Traçage : → | % < 80 µm : | % < 2 mm : | Dmax : |
| 3.7 Caractéristiques géotechniques : | | | | |
| | Oui (Stade : ↓) | Non | | |
| | Production | Préparation | Mise en œuvre | Suivi ou EP → T4 |
| ▶ Propreté : | ES : | VBS : | | |
| ▶ Classement XP P 18-545 : | Classe : | LA : | MDE : | FS : |
| ▶ Classement NF P 11-300 (GTR) : | Classe : | | | |
| ▶ Compactage Proctor : | P. Normal : | P. Modifié : | Teneur en eau : | MV sèche : |
| | IPI : | CBR : | CBRi : | |
| ▶ Courbes Proctor et de portance : | | | | |
| 3.8 Perméabilité : | | | | |
| | Oui (Stade : ↓) | Non | | |
| | Production | Préparation | Mise en œuvre | Suivi ou EP → T4 |
| 3.9 Comportement au gel : | | | | |
| | Oui (Stade : ↓) | Non | | |
| | Production | Préparation | Mise en œuvre | Suivi ou EP → T4 |

L'effet des facteurs extérieurs, la minéralogie du matériau, ses composés organiques, sa composition élémentaire, peuvent aussi continuer à évoluer après qu'il ait été mis en œuvre dans la structure routière. Ceci peut avoir des répercussions sur le comportement à la lixiviation du matériau. L'évolution éventuelle de la granulométrie des matériaux une fois mis en œuvre peut aussi être un facteur important quant à leur comportement en lixiviation [6]. L'évolution granulométrique éventuelle des matériaux durant leur processus de préparation ainsi que leur évolution minéralogique et chimique peuvent aussi induire une évolution de leurs caractéristiques géotechniques [7]. Ces évolutions granulométriques et minéralogiques peuvent aussi induire des variations de la perméabilité du matériau mis en œuvre [8] et de son comportement au gel. C'est pourquoi, pour toute donnée relative à la composition, à la lixiviation, à la granularité, à la perméabilité et à la sensibilité au gel, il est important de connaître la période de la vie du matériau ou de l'ouvrage à laquelle elle se rapporte. Ainsi, la table de description du matériau demande-t-elle de préciser à quel stade, production (matière première), préparation (matériau élaboré) ou mise en œuvre (matériau routier), les caractérisations ont été effectuées. Les caractéristiques utiles à connaître sur le matériau sont détaillées ci-dessous.

› Origine et préparation du matériau

L'origine du matériau alternatif est décrite à travers son site de production (matière première), ainsi qu'à travers ses lieux d'entreposage et de préparation éventuels. En cas de préparation, des précisions complémentaires relatives aux opérations réalisées, simple vieillissement (réactions chimiques spontanées) ou élaboration plus poussée impliquant des procédés mécaniques (retrait de métaux ferreux et/ou non ferreux, broyage...), thermiques (calcination par exemple) et/ou chimiques (phosphatation par exemple) sont nécessaires. En cas de préparation comprenant un traitement au liant, la nature de ce dernier doit être fournie.

› Composition du matériau et potentiel lixiviable

Le matériau est décrit à travers sa composition chimique élémentaire, à travers l'identification de ses composés organiques et de sa minéralogie. L'appréciation du comportement à la lixiviation d'un matériau est une manière d'évaluer son potentiel polluant vis-à-vis de différentes cibles de l'environnement (sol, eaux souterraines et de surface...) [9]. De nombreux protocoles de lixiviation existent aujourd'hui basés sur différentes conditions opératoires : réduction granulométrique du matériau, nature et pH de l'éluant, rapport liquide/solide (L/S), temps de contact... [6]. Ainsi, différentes études peuvent-elles avoir recours à différents protocoles de lixiviation (percolation, batch, pH statique...), et le potentiel lixiviable d'un matériau peut-il être abordé de façon différente d'une étude à l'autre.

› Granulométrie

Le graphe de la distribution granulométrique du matériau est nécessaire. Il peut être comparé à des courbes enveloppes standard (norme NF EN 13285, 2004). Les fractions, fine ($< 80 \mu\text{m}$), et sableuse ($< 2 \text{ mm}$) ainsi que la taille maximale (D_{max}) sont précisées et serviront au positionnement par rapport aux référentiels existants pour la classification des matériaux. La granulométrie est aussi utile à l'interprétation du comportement du matériau à la lixiviation.

› Caractéristiques géotechniques

Les caractéristiques géotechniques du matériau sont exprimées à travers : i) sa propreté ; ii) sa résistance mécanique ; iii) ses références de compactage. Les propriétés sont décrites comme suit :

– la propreté est exprimée à travers l'équivalent de sable (ES) déterminé à partir de la norme EN 933-8 (1999), et grâce à la valeur de bleu de méthylène (VBS) déterminée selon la norme EN 933-9 (1999) ;

– la résistance mécanique des matériaux est déterminée à partir : i) du coefficient Los Angeles (LA) déterminé à partir de la norme EN 1097-2 (1998) ; ii) du coefficient micro-Deval (MD) déterminé avec la norme EN 1097-1 (1996) ; et iii) du coefficient de friabilité des sables (FS) déterminé à partir de la norme P 18-576 (1990). Ces éléments permettent de positionner le matériau dans le système de référence pour les granulats selon la norme XP P 18-545 (2004).

Ces caractéristiques ainsi que celles de granulométrie permettent de classer le matériau dans le système de référence des matériaux de remblais et de couches de forme selon la norme NF P 11-300 (1992). Il est alors possible de comparer le matériau alternatif aux matériaux naturels classiquement utilisés sur la base des propriétés fondamentales utilisées en terrassement [7].

Les références de compactage du matériau sont fournies tant par rapport à l'essai Proctor normal que par rapport à l'essai Proctor modifié, suivant le protocole EN 13286-2 (2005). La teneur en eau à la densité optimum Proctor doit être fournie avec la masse volumique apparente sèche (ρ_d exprimée en tonne/m³) à l'optimum Proctor. La portance est ensuite exprimée à l'optimum Proctor à travers l'indice CBR (qui exprime la capacité du matériau à servir de plate-forme pour la structure routière), l'indice portant immédiat (IPI qui exprime sa capacité à supporter le trafic des engins de chantier pendant la phase de construction), et éventuellement l'indice CBR après immersion (CBRi). Les deux premiers indices sont déterminés en suivant la norme EN 13286-47 (2004), le troisième suivant la norme NF P 94-093 (1999). Le traçage de ρ_d en fonction de la teneur en eau (W exprimé en % de la masse) permet de comparer les performances et la sensibilité à l'eau de différents matériaux.

› Perméabilité

L'eau de pluie s'infiltrant pour partie dans les structures routières [10], le flux hydrique lié à la porosité et à la perméabilité du matériau, peut être déterminant quant au relargage d'espèces chimiques et aux propriétés mécaniques du matériau en service. La perméabilité doit être évaluée sur le matériau compacté au même taux que celui de sa mise en œuvre. Les références de compactage du matériau doivent être fournies avec les résultats de perméabilité. Aujourd'hui il n'existe pas de méthode normalisée pour la mesure de perméabilité des matériaux routiers classiques. Pour les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, une méthode de laboratoire a été proposée [11].

› Estimation de la sensibilité au gel

La nécessité d'évaluer la sensibilité au gel d'un matériau dépend de son contexte climatique d'utilisation. En fonction des régions, cette information peut donc logiquement être absente de certaines études. Dans les contextes où cette évaluation est justifiée, la fissuration susceptible d'être engendrée dans les matériaux sensibles peut affecter non seulement leurs performances mécaniques mais aussi leur comportement à la lixiviation [12].

L'évaluation de la résistance au gel peut être déterminée en suivant la norme EN 1367-1 (2000). Ce protocole s'applique préférentiellement à des granulats de taille 8/16 mm, mais aussi 4/8 mm, 16/32 mm ou 32/63 mm. Une autre méthode consiste à tester le matériau compacté. Il n'existe pas de norme européenne en la matière mais la norme française NF P 98-234-2 (1996) s'applique aux sols et aux graves ($D \leq 20$ mm).

■ Description des facteurs extérieurs

La table « Description des facteurs extérieurs » est présentée en **figure 4**. L'identification des facteurs extérieurs susceptibles d'agir sur le matériau et la structure routière conduit à : i) décrire le contexte climatique ; ii) décrire l'hydrogéologie locale ; iii) rassembler les données relatives au trafic et à l'entretien routiers ainsi qu'aux éventuels déversements accidentels de produits réactifs et/ou dangereux pendant la période d'étude.

› Contexte climatique

Le contexte climatique est décrit à travers les précipitations et les températures. Idéalement, ces informations sont fournies grâce à un dispositif d'enregistrement local (pluviomètre et thermomètre). A défaut, elles peuvent être recherchées auprès de la station météorologique la plus proche, à la condition que la distance au site d'étude demeure réaliste et que la topographie locale ne soit pas trop accidentée. L'origine des données doit être précisée, de même que les dates de début et de fin de suivi (pluies et températures). La pluie totale sur la période d'étude est précisée, ainsi que les

figure 4

| T4 - Description des facteurs extérieurs | | | | |
|--|------------|----------------|--------------------|------------|
| 4.1 Contexte climatique : | | | | |
| ▶ Mesure des précipitations : | Sur site | Station météo | Statistiques météo | Absence |
| | Durée : | mm (période) : | | |
| ▶ Mesure des températures : | Sur site | Station météo | Statistiques météo | Absence |
| | Durée : | Tmini : | Tmaxi : | |
| ▶▶ Périodes de gel : | Oui | | | Non |
| 4.2 Hydrogéologie : | | | | |
| ▶ Existence d'une nappe : | Oui : → | Profondeur : | | Absence |
| ▶ Saturation du matériau alternatif : | Oui : → | Durée connue : | Durée inconnue | Non |
| ▶ Présence de piézomètres : | Oui | | | Absence |
| ▶▶ Analyse des eaux de nappe : | Oui | | | Non |
| 4.3 Trafic routier : | | | | |
| | Oui : → | Description : | Classement : | Non (Plot) |
| 4.4 Données d'entretien routier : | | | | |
| | Oui : ↓ | | | Non |
| ▶ Salage : | Produits : | Quantités : | Doses : | |
| ▶ Désherbage : | Produits : | Quantités : | Doses : | |
| 4.5 Connaissance de déversements : | | | | |
| | Oui : ↓ | | | Non |
| | Produits : | Quantités : | Doses : | |

températures extrêmes. Les éventuelles périodes de gel sont identifiées. Si aucun enregistrement météorologique n'est disponible ou exploitable, une estimation est réalisée à partir des données statistiques de Météo France (base cartographique).

▶ Hydrogéologie

L'existence de toute nappe sous-jacente à l'ouvrage est à indiquer, ainsi que sa profondeur courante par rapport à la base de l'ouvrage. Les éventuelles remontées d'eau dans la couche de matériau alternatif sont ensuite mentionnées, en fournissant si possible une estimation de la durée probable de saturation de la couche. Enfin, la présence de piézomètres aux abords de l'ouvrage ainsi que la nature des éventuelles analyses d'eau de nappe, sont précisées.

▶ Trafic, entretien saisonnier et déversements accidentels

L'existence ou l'absence de trafic automobile sur l'ouvrage doit être explicite. Pour les ouvrages fonctionnels (routes et parkings), l'importance du trafic doit être décrite, et autant que possible rapportée aux classes de trafic [13]. Les principales interactions possibles entre la maintenance de la route et le matériau alternatif résident dans les opérations de salage et de désherbage des remblais et accotements. Si de telles opérations ont été effectuées pendant la durée de l'étude [14], alors la nature, les quantités et concentrations des produits utilisés doivent être connues. En cas de déversement accidentel connu sur l'ouvrage, la nature du produit, les quantités déversées et la date de l'évènement doivent être précisées.

■ Description des réponses

Sur site, les effets des facteurs extérieurs agissant sur la structure routière peuvent être identifiés à l'échelle de l'ouvrage dans son ensemble, ou à l'échelle du matériau lui-même, ce qui implique dans ce cas un carottage dans la structure pour prélever le matériau. La Table « Description des réponses » envisage ces deux possibilités (figure 5). La structure routière, comme le matériau, étant susceptibles d'évoluer dans le temps (cf. Table « Description du matériau »), il est important de préciser ici aussi à quel moment de la vie de l'ouvrage la description est réalisée : i) au stade de la mise en œuvre ; ii) durant la période de suivi ; ou iii) au moment d'une étude ponctuelle (EP). Dans tous ces cas, les dates d'opération et l'âge de l'ouvrage sont requis.

› Réponse de l'ouvrage

De la même façon que pour les routes construites avec des matériaux naturels classiques, pour les matériaux alternatifs, l'observation visuelle de l'état général de l'ouvrage routier fournit des informations sur l'existence ou l'absence de désordres internes majeurs. Par conséquent, la description du comportement en place de la structure routière commence par une évaluation visuelle de l'ouvrage.

L'état général de la structure est décrit à travers l'absence ou la présence d'affaissement, de fissuration, d'orniérage, de faïençage, de gonflement localisé ou étendu... La description de l'état fonctionnel de l'ouvrage consiste à mesurer différents paramètres macroscopiques et microscopiques, tels que la portance (essais à la plaque ou à la dynaplaque), la compacité (pénétrömètre dynamique), la densité, la déflexion.

L'analyse du comportement environnemental de la structure routière nécessite un recensement de toutes les données relatives aux différentes cibles susceptibles d'être atteintes par la migration des polluants émis. De telles données concernent la qualité des eaux de percolation [15], la qualité des eaux de surface avoisinantes, la qualité des eaux souterraines, la qualité des sols sous-jacents et des sols avoisinants l'ouvrage (qui peuvent fournir un état de référence du contexte local [16]) et enfin l'état des biocénoses avoisinantes [17].

› Réponse du matériau

L'état du matériau au moment de sa mise en œuvre a été décrit dans la table « Description du matériau » (cf. partie 5.2 de la Table). Il s'agit ici d'observations relatives à son éventuel suivi ou à une éventuelle étude ponctuelle (EP). Ici aussi les précisions relatives aux dates, durées et âges, sont requises. L'analyse de la réponse du matériau consiste à rassembler les données relatives à : i) sa granularité ; ii) ses caractéristiques géotechniques ; iii) sa perméabilité ; iv) sa sensibilité au gel ; v) sa composition chimique élémentaire ; vi) ses composés organiques ; vii) sa minéralogie ; viii) son comportement à la lixiviation.

L'analyse granulométrique du matériau, réalisée sur des échantillons carottés, est exploitée de façon analogue à celle décrite dans la table « Description du matériau » : courbe granulométrique, fraction fine, fraction sableuse, Dmax.

Les caractéristiques géotechniques du matériau sont ici aussi (voir table « Description du matériau ») exprimées à travers : i) sa propreté ; ii) sa résistance mécanique ; iii) son classement consécutif selon la norme XP P 18-545 ; iv) son classement dans le système de référence des matériaux de remblais et de couches de forme selon la norme NF P 11-300 ; et v) ses références de compactage (densité sèche et portance).

Les autres caractéristiques du matériau prélevé dans la structure routière (perméabilité, sensibilité au gel, composition chimique, composés organiques, minéralogie, comportement en lixiviation) sont décrites de façon analogue à celles de l'état initial (cf. Table T3).

figure 5

| T5 - Description des réponses | | | | |
|---|-------------------------|------------------------|-------------------|-----------|
| 5.1 Réponse de l'Ouvrage : | | | | |
| 5.1.1 Appréciation visuelle générale : | Affaissement | Fissuration | Omierage | Faïençage |
| | Gonflement | Plumage | Pelage | Autres : |
| 5.1.2 Mécanique : | Oui (Stade : ↓) | | | Non |
| | Mise en œuvre | Suivi (Dates :) | EP (Age :) | |
| ▶ Portance : | Plaque | Dynaplaque | | |
| ▶ Compacité : | Mise en œuvre | Suivi | EP | |
| ▶ Densité : | Mise en œuvre | Suivi | EP | |
| ▶ Déflexion : | Mise en œuvre | Suivi | EP | |
| 5.1.3 Environnement : | Oui (Stade : ↓) | | | Non |
| | Mise en œuvre | Suivi (Dates :) | EP (Age :) | |
| ▶ Qualité des eaux de percolation : | Mise en œuvre | Suivi | EP | |
| ▶ Qualité des eaux superficielles : | Mise en œuvre | Suivi | EP | |
| ▶ Qualité des eaux souterraines : | Mise en œuvre | Suivi | EP | |
| ▶ Qualité des sols sous-jacents : | Mise en œuvre | Suivi | EP | |
| ▶ Qualité des sols avoisinants : | Mise en œuvre | Suivi | EP | |
| ▶ Qualité des biocénoses avoisinantes : | Mise en œuvre | Suivi | EP | |
| 5.2 Réponse du Matériau : | Oui (Stade : ↓) | | | Non |
| | Mise en œuvre | Suivi (Dates :) | EP (Age :) | |
| 5.2.1 Granulométrie : | Oui : ↓ | | | Non |
| ▶ Courbes granulométriques : | Traçage : → | % < 80 µm : | % < 2 mm : | Dmax : |
| 5.2.2 Caractéristiques géotechniques : | Oui : ↓ | | | Non |
| ▶ Propreté : | ES : | VBS : | | |
| ▶ Classement XP P 18-545 : | Classe : | LA : | MDE : | FS : |
| ▶ Classement NF P 11-300 (GTR) : | Classe : | | | |
| ▶ Compactage Proctor : | P. Normal | P. Modifié | Teneur en eau | MV sèche |
| | IPI | CBR | CBRi | |
| ▶ Courbes Proctor et de portance | | | | |
| 5.2.3 Perméabilité : | Oui | | | Non |
| 5.2.4 Comportement au gel : | Oui | | | Non |
| 5.2.5 Composition : | | | | |
| ▶ Analyse chimique élémentaire : | Oui | | | Non |
| ▶ Composés organiques : | Oui | | | Non |
| ▶ Minéralogie : | Oui | | | Non |
| 5.2.6 Comportement en lixiviation : | Oui | | | Non |

RÉSULTATS DE L'INVENTAIRE DE CAS D'ÉTUDES

L'enquête conduite à partir du rassemblement de documents (relevés de chantiers, rapports internes ou publics, thèses, actes de congrès, articles) a abouti au recensement de 17 cas d'étude documentés. Les principales caractéristiques de ces cas d'étude sont rassemblées dans le **tableau 1**.

■ Caractéristiques des cas d'étude identifiés

Les différents types d'ouvrages routiers sont représentés de façon relativement équilibrée : 2 sections autoroutières, 2 sections de routes nationales, 3 sections de routes départementales, 3 sections de rues (milieu urbain), 4 sections de voies privées. Quatre études sont à vocation purement mécanique (notée M dans le **tableau 1**), parmi les quelles les 3 suivis de chantiers routiers (CR). Six études sont à vocation purement environnementale (notée E), parmi lesquelles les 3 études sur plots. Sept études sont à vocation mixte, parmi lesquelles les 2 études ponctuelles (EP). Dans la plupart des cas d'étude, la structure routière est soumise à un trafic automobile. L'inventaire ne recense finalement que 3 cas d'étude basés sur le suivi de plots instrumentés. Hormis ces trois plots, huit ouvrages sont instrumentés.

Les suivis (notés S dans le **tableau 1**) constituent le principal type d'étude réalisé. Le plus long cas d'étude de ce type est de 17 ans, et le plus bref est de 2 mois. La durée de suivi la plus courante est de 1 à 2 ans (8 cas). Dans certains cas, la durée d'étude s'est limitée aux quelques semaines

tableau 1
Principales
caractéristiques
des cas d'étude.

| Cas | Matériaux | Trafic | Type d'ouvrage | Vocation de l'étude | Ouvrage instrumenté | Type d'étude | Couche routière | Épaisseur d'application (m) | Volume de matériau (m³) | CE ₂₀ (PL/j) |
|-----|--|--------|----------------|---------------------|---------------------|--------------|-----------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | MIOM | X | Autoroute | M | - | CR | Remblai - forme | 0,60 à 1,50 | milliers | 1500-2000 |
| 2 | Charrées de chrome | X | Autoroute | M+E | X | S-17 ans | Remblai - forme | 6,00 à 8,00 | 400.000 | 1500-2000 |
| 3 | MIOM | X | RN | M | - | CR | Remblai | 4,00 à 8,00 | 175.000 | 400-800 |
| 4 | MIOM | X | RN | M | - | CR | Remblai - forme | 0,40 à 1,50 | 10.000 | 200-300 |
| 5 | MIOM | X | CD | M+E | X | S-2 ans | Forme | 0,25 | 100 | < 50 |
| 6 | MIOM | X | CD | M+E | X | S-1 an | Forme | 0,40 | 300 | 1000-2000 |
| 7 | Laitiers sidérurgiques | X | CD | M | - | S-2 mois | Forme-fondation | 0,70 | 600 | 150-250 |
| 8 | MIOM | X | Rue | M+E | - | EP (20 ans) | Forme | 0,25 | 1.000 | 50-100 |
| 9 | MIOM | X | Rue | E | X | S-2 ans | Forme | 0,35 | 200 | 50-100 |
| 10 | MIOM traités | X | Rue | E | X | S-2 ans | Base-fondation | 0,30 | 30 | 50-100 |
| 11 | MIOM | X | Voie privée | M+E | X | S-1,5 an | Forme-fondation | 0,30 | 600 | 50-100 |
| 12 | MIOM & MIDIS | X | Voie privée | E | X | S-7 mois | Fondation | 0,25 | 60 | 50-100 |
| 13 | MIOM | X | Voie privée | M+E | - | EP (22 ans) | Base-fondation | 0,20 et 0,50 | 500 | < 50 |
| 14 | MIOM et MIOM traités | - | Plot | E | X | S-3 ans | Fondation | 0,25 | 20 | 100-150 |
| 15 | Cendres volantes de centrale thermique | - | Plot | E | X | S-1,5 an | Base- forme | 0,50 | 20 | 100-150 |
| 16 | Scories de plomb et de zinc | - | Plot | E | X | S-1 an | Base | 0,25 et 0,40 | 50 | 100-150 |
| 17 | CVIOM traitées | X | Voie privée | M+E | X | S-1 an | Base | 0,2 | 40 | 100-150 |

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 neuf cas d'étude, 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 huit 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 huit derniers cas de figure, peu conventionnels, sont moins représentatifs des pratiques de construction routière, dans lesquelles les couches sont bien distinctes en termes de matériaux utilisés (en réponse aux fonctions différentes des couches ; propriétés mécaniques différentes des matériaux ; taux de compactage différents). Ces huit cas présentent donc moins d'intérêt du point de vue de l'analyse fonctionnelle des matériaux. Ce recensement n'a finalement pas révélé d'expérimentation documentée en couche de liaison ni en couche de roulement.

L'épaisseur des couches routières réalisées avec les matériaux alternatifs varie de 20 cm (2 cas) à 8 mètres (2 cas). Toutefois, en relation avec le type de couche routière généralement réalisée, dans la majeure partie des cas (11), l'épaisseur mise en œuvre est inférieure à 50 cm. Les volumes de matériau mis en œuvre dans les différents cas d'étude sont aussi très variables, allant de quelques dizaines à quelques centaines de milliers de mètres cubes. Dans sept cas ce volume est inférieur à 100 m³, dans 6 cas il est compris entre 100 et 1000 m³ et dans 4 cas seulement il est supérieur (jusqu'à 400 000 m³).

Afin de conférer une dimension fonctionnelle à ce retour d'expérience, pour les plots expérimentaux comme pour les ouvrages en service, indépendamment du trafic subi ou non, la structure réalisée permet d'estimer, pour une durée donnée, le trafic qu'elle serait capable de supporter avant de nécessiter une opération d'entretien structurel. Pour cette évaluation, la durée de 20 ans a été choisie (cf. **tableau 1**, Capacité estimée sur 20 ans, en poids-lourd/jour – CE₂₀). Pour 5 cas (portant tous sur des MIOM), cette capacité est de 50 à 100 PL/j, et pour 4 cas (portant sur des matériaux variés), elle est de 100 à 150 PL/j. Les autres gammes de capacité (CE₂₀ < 50 PL/j ; 150 < CE₂₀ < 250 PL/j ; etc.) ne comptent que 1 ou 2 cas d'étude. Les capacités représentées par la majorité des cas correspondent donc à des trafics relativement faibles (11 cas d'étude inférieurs à 150 PL/j, c'est-à-dire ne dépassant pas la classe de trafic T3 [13]).

Les cas d'étude sont distribués sur une grande partie du territoire. La distribution géographique des sites d'expérimentation suit la distribution des principales zones de production de matériaux alternatifs (régions parisienne et lyonnaise, nord et est de la France). Elle indique aussi des zones où l'utilisation de ces matériaux est émergente (Bretagne, Auvergne, Aquitaine).

■ Le cas des études sur les MIOM

De ce recensement il ressort que les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) sont le matériau ayant donné lieu aux plus nombreuses expérimentations : 12 cas portant essentiellement sur des MIOM non traités (**tableau 1**). Tous les autres cas d'étude traitent de matériaux différents les uns des autres : 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.

De ce panel d'études réalisées en France depuis une décennie, se dégage un mode d'étude type. Cette dernière porterait sur des MIOM, qui seraient mis en œuvre en couche de forme, en quantité inférieure à 100 m³, sur une épaisseur ne dépassant pas 50 cm, dans une structure dimensionnée pour recevoir un trafic relativement faible ($\leq T3$), et pour lesquels serait réalisé un suivi d'une durée de 1 à 2 ans. Ce profil type correspond bien aux fortes préoccupations relatives aux MIOM dans la dernière décennie, à un type d'application dans lequel leur emploi est *a priori* facilement acceptable

par les maîtres d'ouvrages, ainsi qu'à la dimension des programmes d'étude sur lesquels les partenaires de tels projets sont prêts à s'engager (dimensions et coûts de réalisation des ouvrages, enjeu limité en cas de défaillance mécanique, coût de réalisation des suivis).

ENSEIGNEMENTS SUR LES PRATIQUES D'ÉTUDES

■ Pratiques de description des matériaux et des ouvrages

Un aperçu des pratiques de description des matériaux et des ouvrages est présenté dans la **figure 6**. Pour chaque point de l'inventaire des informations utiles au retour d'expérience, le taux de prise en compte (PC) des différents points de l'inventaire d'informations est calculé sur l'ensemble des 17 cas d'étude.

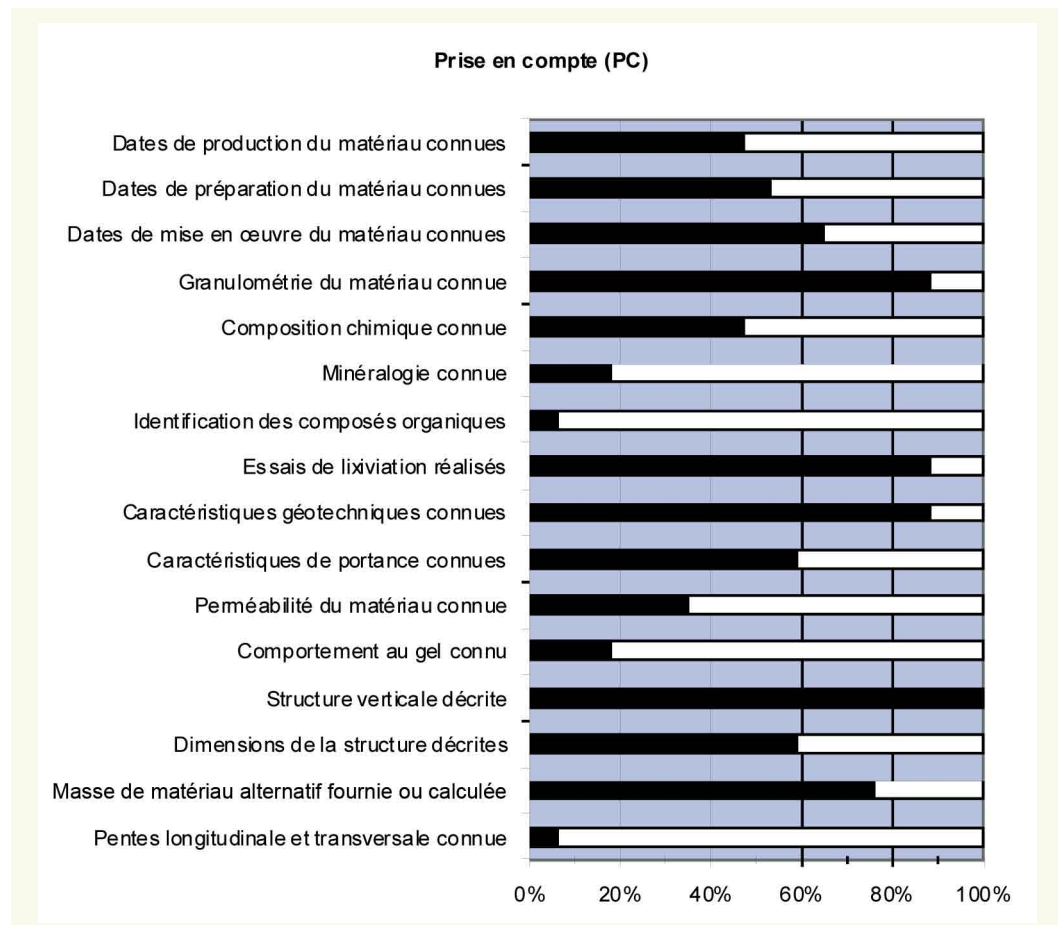
› Historique des matériaux et des ouvrages

Les procédés d'élaboration des matériaux ayant pu changer au cours du temps, et leur conférer des propriétés différentes, il est important de connaître les dates de production, de préparation et de mise en œuvre des matériaux. Or, parmi les 17 cas recensés, elles sont rarement intégralement fournies. L'histoire du matériau avant sa mise en œuvre est donc dans la plupart des cas difficile à retracer. Certaines études sur ouvrage pré-existant n'indiquent pas la date de mise en œuvre. De façon plus surprenante, ceci concerne aussi des études sur ouvrages expérimentaux (plots) réalisés spécialement. La mention des dates de production des matériaux ainsi que celle des dates et modes de préparation sont souvent négligées. Ceci concerne aussi étonnamment certains ouvrages expérimentaux.

› Dimensions des ouvrages et des matériaux

La structure verticale de l'ouvrage est toujours bien décrite, mais les dimensions de la couche concernée par l'étude, ou de l'ouvrage, sont omises près d'une fois sur deux. Ceci rend difficile

figure 6
Pratiques de description
des matériaux et des
ouvrages.



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 (PC = 6 %), vraisemblablement en raison d'une sous-estimation de l'importance du problème hydrique dans l'environnement routier [18].

Une très faible minorité d'études (paradoxalement il s'agit d'études sur plots expérimentaux) omet de décrire la granulométrie des matériaux. Celle-ci est utilisée différemment selon les objectifs (mécaniques ou environnementaux) des études.

› Composition des matériaux

La composition chimique des matériaux n'est décrite que dans les cas d'étude ayant une vocation environnementale (toutefois certaines de ces études ne la recherchent pas, se reposant sur l'évaluation du potentiel lixiviable). L'étude minéralogique est rarement réalisée pour décrire les matériaux (PC = 18 %), de même que l'identification des composés organiques (PC = 6 %). Bien que les matériaux considérés dans les études recensées 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.

› Usage des essais de lixiviation

Quel que soit le type d'étude, l'utilisation d'essais de lixiviation apparaît comme une pratique généralisée (PC = 88 %). Les résultats d'essais peuvent être utilisés dans certaines études à des fins de prévision du relargage à plus ou moins long terme dans des conditions d'utilisation réelles, selon des modes d'extrapolation propres aux études. Ils sont aussi parfois utilisés par les auteurs pour situer la qualité du matériau par rapport à l'unique système de référence existant aujourd'hui en France quant à l'évaluation environnementale d'un matériau alternatif pour la construction routière, à savoir la circulaire « mâchefers » de 1994 [19]. Dans la plupart des cas répertoriés la référence aux seuils de cette circulaire est justifiée par le fait que les matériaux sont effectivement des MIOM. Le protocole de lixiviation recommandé dans la circulaire ministérielle est celui de la norme NF X31-210 (1992), remplacée aujourd'hui par la norme EN 12457-2 (2002). Dans les études ayant pour but d'améliorer la compréhension des mécanismes d'émission des polluants, des protocoles de lixiviation supplémentaires sont pratiqués.

› Caractéristiques routières des matériaux

La description des caractéristiques géotechniques des matériaux est bien intégrée dans la grande majorité des études (PC = 88 %), que leur objectif soit mécanique ou environnemental. Ainsi tous les matériaux sont-ils bien décrits, au moins en partie, par rapport au référentiel existant pour les matériaux de construction routière. Cette caractérisation est en effet rarement complète. 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.

› Perméabilité et sensibilité au gel

La description de la sensibilité au gel du matériau est très rarement fournie (PC = 18 %), et ceci même dans des contextes climatiques où des périodes de gel sont courantes. Malgré son importance tant du point de vue mécanique qu'environnemental, la perméabilité du matériau compacté est peu décrite (PC = 35 %). Sur le plan environnemental, ceci représente un inconvénient par rapport à l'exploitation des résultats de lixiviation en vue de la prévision du comportement du matériau en place.

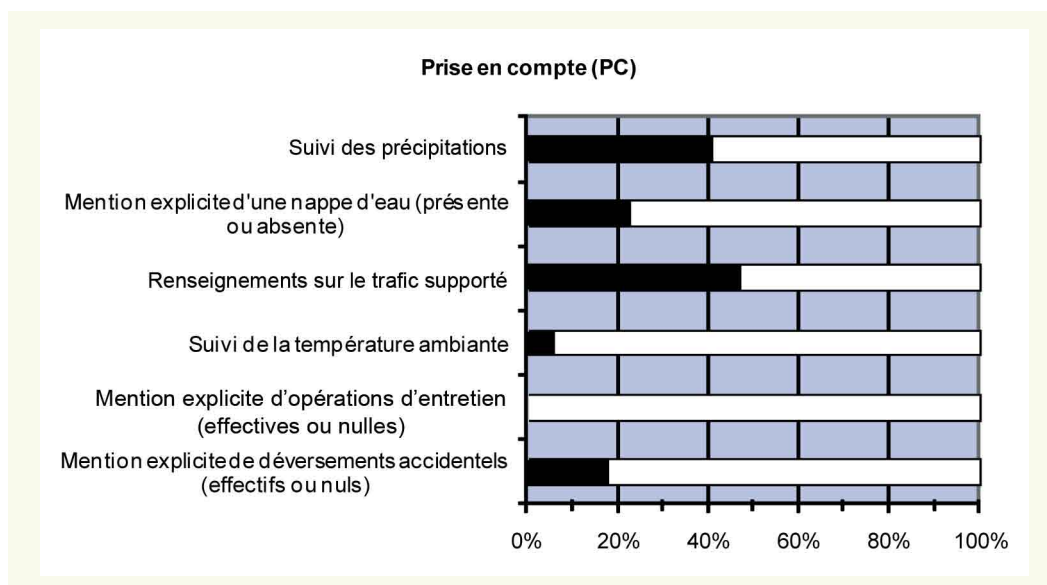
■ Pratiques de description des facteurs extérieurs

Un aperçu des pratiques de description des facteurs extérieurs est présenté dans la [figure 7](#).

› Environnement de la route

Les études à finalité strictement mécanique ne décrivent pas les précipitations. De façon plus surprenante, il se trouve aussi des études à finalité environnementale n'intégrant pas la description des

figure 7
Pratiques de description
des facteurs extérieurs.



pluies. Ceci constitue un handicap pour l'interprétation de la réponse de l'ouvrage : analyse du taux d'infiltration à travers la structure, de la variation éventuelle de ce taux au cours du temps, et de leurs conséquences mécaniques et environnementales. Une très faible proportion d'études indique explicitement l'existence ou l'absence d'une nappe phréatique dans l'environnement de l'ouvrage (PC = 23 %). Les moyens de caractérisation de la nappe (son marnage, sa qualité) ne sont pas toujours disponibles pour toutes les études. Ceci ne permet toutefois pas d'expliquer que la simple indication explicite de l'existence ou de l'absence d'une nappe phréatique dans l'environnement de l'ouvrage soit en règle générale omise dans les études, alors que le risque potentiel sur la qualité des eaux souterraines est généralement le premier cité dans la problématique de l'utilisation de matériaux alternatifs en construction routière. En règle générale, dans les études à vocation environnementale, toute la surface occupée par le matériau alternatif est étanchée par une géomembrane afin de prévenir l'infiltration vers le sous-sol.

La description des températures atmosphériques n'est généralement pas réalisée (PC = 6 %). Une seule étude (s'intéressant au risque de gel du matériau) considère ce facteur. Le manque de données relatives aux températures les plus élevées constitue aussi un inconvénient pour interpréter la réponse des ouvrages en termes de bilan hydrique et de vieillissement de la structure [20].

› Contraintes mécaniques et entretien de la route

Les caractéristiques du trafic supporté par l'ouvrage ne sont indiquées que dans la moitié des cas, qu'il y ait trafic ou non. L'omission de ces données, pour des structures effectivement soumises à cette contrainte, constitue un handicap pour l'interprétation de leur durabilité mécanique. Les données relatives à l'entretien des ouvrages et à l'entretien saisonnier, ne sont jamais précisées. La survenue ou l'absence de déversements accidentels ne sont mentionnées explicitement que dans très peu de cas (PC = 18 %).

■ Pratiques de description des réponses des ouvrages

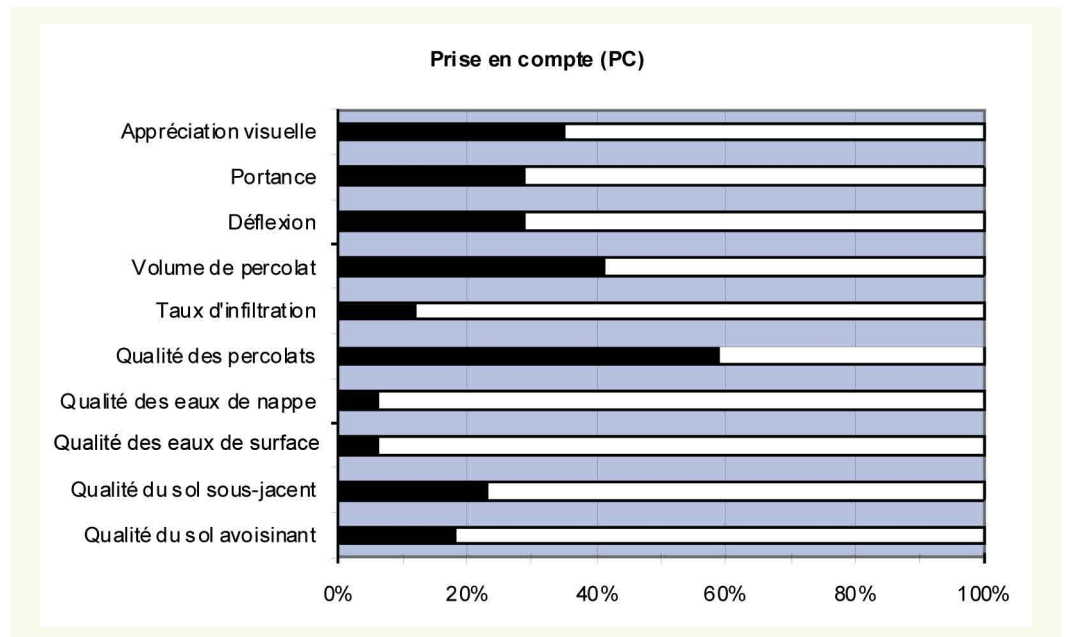
Un aperçu des pratiques de description des réponses des ouvrages est présenté dans la **figure 8**.

› Réponses d'ordre mécanique

Les études qui n'intègrent pas d'appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage sont celles réalisées sur plots expérimentaux (par définition hors trafic) et celle à vocation strictement environnementale réalisées sur des ouvrages fonctionnels.

Les caractéristiques de portance, alors qu'elles sont forcément vérifiées lors de la construction des ouvrages, tant réels qu'expérimentaux, sont étonnamment peu décrites dans les documents d'étude

figure 8
Pratiques de description
des réponses des ouvrages.



(PC = 29 %). Elles le sont toutefois autant par des études à finalité environnementale qu'à finalité mécanique. Les mesures de déflexion apparaissent aussi peu souvent précisées que les mesures de portance. Elles sont caractéristiques d'études intégrant 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 matériel (simple substitution à des matériaux classiques) omettent cette mesure.

► Réponses d'ordre environnemental

Les volumes de percolats recueillis ne sont indiqués que dans moins de la moitié des cas d'étude (études à finalité environnementale et études à finalité double). Cependant certaines études à finalité environnementale omettent de préciser ces volumes, ce qui constitue un handicap, 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 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).

Le taux d'infiltration dans l'ouvrage n'est précisé que de façon exceptionnelle (PC = 12 %). Les études ne mesurent généralement que l'une ou l'autre des deux grandeurs nécessaires à calculer ce taux : précipitations ou volumes percolés. La méconnaissance de cette réponse de l'ouvrage sur la période de suivi représente un handicap quant à la prévision du comportement à long terme, en particulier vis-à-vis de la percolation [21, 22].

Le suivi de la qualité des eaux de percolation constitue l'objectif premier de la majorité des études. Hormis les études ponctuelles et les études à finalité strictement mécanique, la plupart des cas d'étude recensés intègrent ce suivi (PC = 59 %). La qualité des dispositifs de stockage et de conservation des percolats avant analyse est très variable selon les études. Le risque d'évolution des paramètres physico-chimiques susceptibles de jouer sur la solubilité des espèces présentes est rarement considéré.

Parmi l'ensemble des cas d'étude, la qualité des eaux souterraines et superficielles n'a été suivie que dans un cas, ceci en relation avec des problèmes de pollution avérés. Pour ce qui concerne les eaux souterraines, la rareté de cette information est à mettre en relation avec la rareté de la description des nappes souterraines. Pour les eaux superficielles, cette rareté est plutôt imputable à la

difficulté de réalisation d'un échantillonnage et d'un diagnostic fiables des eaux de surface dans l'environnement routier [23, 24].

La qualité des sols sous-jacents aux ouvrages et des sols avoisinants n'est considérée que dans très peu de cas d'étude (PC = 23 %). Pour l'un d'entre eux, des problèmes de pollution des eaux étaient avérés, justifiant de s'intéresser aux sols. Même si le nombre de cas reste faible, dans les pratiques d'étude, les sols s'avèrent finalement être une cible sensiblement plus souvent appréhendée que les eaux souterraines ou avoisinantes.

CONCLUSION

Une analyse globale 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. L'enquête réalisée a permis de répertorier 17 cas d'étude variés, en termes de matériaux utilisés, de types d'ouvrages, de couches d'emploi, de localisation. Malgré cette diversité, une partie importante des cas d'étude a concerné les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, en relation avec les fortes préoccupations sur ce matériau depuis les années 1990.

Une méthode spécifique d'analyse des cas d'étude a été développée afin de réaliser un retour d'expérience complet, incluant les performances mécaniques et environnementales, à l'échelle des structures routières et à celle des matériaux alternatifs, à différents stades de leur vie (de la production à la période de service). Des tables de saisie types ont été élaborées afin de rassembler les données les plus pertinentes pour l'analyse. L'analyse du retour d'expérience a été réalisée à partir des informations répertoriées.

L'étude réalisée montre qu'il existe une grande hétérogénéité dans le traitement de l'information d'une étude à une autre, mais dans l'ensemble cette procédure d'analyse a mis en lumière des lacunes dans la compilation de données au regard du nombre de paramètres à connaître. La description des matériaux et des ouvrages apparaît mieux traitée dans l'ensemble que celle des facteurs extérieurs et celle des réponses des ouvrages.

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

L'étude CAREX a été commanditée par l'ADEME et menée en lien avec la division Polden d'Insavalor (E. Vernus et G. Bröns-Laöet) et l'INERIS (B. Schnuriger). Les auteurs remercient également C. Durand, M. Legret et J.M. Balay (LCPC) pour leur contribution au projet.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 COMMISSION EUROPÉENNE, *Environnement 2010 : Notre Avenir, Notre Choix*, 6e programme communautaire d'action pour l'Environnement 2001-2010, Office des publications officielles des communautés européennes, 2001, 11 pages.
- 2 FRANÇOIS D., An approach toward an assessment methodology of alternative materials for road construction, Albi, *1st International Conference on Engineering for Waste Treatment*, EMAC, mai 2005, Albi, 8 pages.
- 3 REID J.M., EVANS R., HOLNSTEINER R., WIMMER B., GAGGL W., BERG F., PIHL K.A., MILVANG-JENSEN O., HJELMAR O., RATHMAYER H., FRANÇOIS D., RAIMBAULT G., JOHANSSON H.G., HAKANSSON K., NILSSON U., HUGENER M., *Alternative Materials in Road Construction*, Alt-Mat Final Report for the EU Commission, 2001, 190 pages.
- 4 JULLIEN A., DE LARRARD F., An overview of recycling in road infrastructures in France from the OFRIR project, Albi, *1st International Conference on Engineering for Waste Treatment*, EMAC, mai 2005, Albi, 7 pages.
- 5 FRANÇOIS D., JULLIEN A., A framework of analysis for field experiments with alternative materials in road construction, *Waste Management*, 29, 2009, pp. 374-382.
- 6 VAN DER SLOOT H.A., DIJKSTRA J.J., *Development of horizontally standardized leaching tests for*

construction materials: a materials based or a release based approach?, Report ECN-C-04-060, ECN, 2004, 55 pages.

- 7 **MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT DU LOGEMENT ET DES TRANSPORT (MELT)**, *Guide technique Réalisation des remblais et des couches de forme, Fascicules I et II*, SETRA & LCPC, 2000, 200 pages.
- 8 **HILLEL D.**, *L'eau et le sol, principes et processus physiques*, Academia, collection Pédasup, 1988, 266 pages.
- 9 **AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE**, *Evaluation de l'écocompatibilité de scénarios de stockage et de valorisation des déchets*, Ademe, 2002, 148 pages.
- 10 **RAMIER D., BERTHIER E., ANDRIEU H.**, Urban lysimeter to assess runoff losses on asphalt concrete plates, *Physics and Chemistry of the Earth*, 29, 2004, pp. 839-847.
- 11 **FRANÇOIS D., AUZIEAU J., RAIMBAULT G.**, Caractérisation hydrodynamique de mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, *Revue Française de Géotechnique*, 103, 2003, pp. 25-32.
- 12 **FRANÇOIS D., GAGGL W., HOLNSTEINER R.**, Essais en chambre climatique sur des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères – Appréciation du gonflement au gel et du relargage, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 244-245, 2003, pp. 113-129.
- 13 **MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT ET DU LOGEMENT ET DES TRANSPORT**, *Guide technique Conception et dimensionnement des structures de chaussée*, SETRA & LCPC, 1997, 214 pages.
- 14 **FRANÇOIS D., CRIADO C.**, Monitoring of leachate at a test road using treated fly ash from municipal solid waste incinerator, *Journal of Hazardous Materials*, B139, 2007, pp. 543-549.
- 15 **CLÉMENT B., TRIFFAULT-BOUCHET G., LOTTMANN A., CARBONEL J.**, Are percolates released from solid waste incineration bottom ashes safe for lentic ecosystems? A laboratory ecotoxicological approach based on 100 litre indoor microcosms, *Aquatic Ecosystems Health and Management*, 8, Issue 4, 2005, pp. 427-439.
- 16 **JULLIEN A., FRANÇOIS D.**, Soil indicators used in road environmental impact assessment, *Resources Conservation and Recycling*, 48, 2006, pp. 101-124.
- 17 **PERRODIN Y., GOBBEY A., GRELIER-VOLATIER L., CANIVET V., FRUGET J.F., GIBERT J., TEXIER C., CLUZEAU D., GROS R., POLY F., JOCTEUR-MONROZIER L.**, Waste ecocompatibility in storage and reuse scenarios : Global methodology and detailed presentation of the impact study on the recipient environments, *Waste Management*, 22, 2002, pp. 215-228.
- 18 **APUL D.S., GARDNER K.H., EIGHMY T.T.**, Modeling hydrology and reactive transport in roads : the effect of cracks, the edge, and contaminant properties. *Waste Management*, 27, 2007, pp. 1465-1475.
- 19 **MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT**, *Circulaire relative à l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains*, DPPR/SEI/BPDSIED/FC/FC N° 94-IV-1, Ministère de l'Environnement, 1994, 6 pages.
- 20 **JEONG S.M., OSAKO M., KIM Y.J.**, Utilizing a database to interpret leaching characteristics of lead from bottom ashes of municipal solid waste incinerators. *Waste Management*, 25, 2005, pp. 694-701.
- 21 **SCHEURS J.P.G.M., VAN DER SLOOT H.A., HENDRICKS CH.**, Verification of laboratory-field behavior of coal fly ash and MSWI bottom ash as a road base material, *Waste Management*, 20, 2000, pp. 193-201.
- 22 **IZQUIERDO M., QUEROL X., JOSA A., VAZQUEZ E., LOPEZ-SOLER A.**, Comparison between laboratory and field leachability of MSWI bottom ash as a road material. *Science of the Total Environment*, 389, 2008, pp. 10-19.
- 23 **BONTOUX J.**, *Introduction à l'étude des eaux douces, eaux naturelles, eaux usées, eaux de boisson*, CEBEDOC, 1993, 169 pages.
- 24 **PAGOTTO C.**, *Etude sur l'émission et le transfert dans les eaux et les sols des éléments traces métalliques et des hydrocarbures en domaine routier*, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 1999, 316 pages.