

## Etude CAREX

(Convention Ademe N° 03 72 C 0006)

### RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET ENVIRONNEMENTAL D'OUVRAGES ET DE PLOTS ROUTIERS INSTRUMENTÉS

#### ***RAPPORT FINAL***

Novembre 2005

Rédaction	Denis FRANÇOIS Agnès JULLIEN Jean-Pierre KERZREHO Emmanuel VERNUS	LCPC LCPC LCPC Polden
Vérification	Michel LEGRET Jean-Maurice BALAY	LCPC LCPC
Approbation	Laurent CHATEAU	Ademe

Responsable d'affaire LCPC : Michel LEGRET

## SOMMAIRE

1. Contexte général de l'étude.....	4
1-1. Contexte déchet / valorisation.....	4
1-2. Contexte déchet / ouvrages routiers.....	4
2. Objectifs et déroulement de l'étude .....	5
3. Présentation des ouvrages retenus et des objectifs associés.....	7
4. Rappel des règles de l'art en matière de construction routière .....	10
4-1. Introduction à la géométrie d'une route.....	10
4-2. Règles de dimensionnement .....	10
4-2-1. Le trafic .....	10
4-2-2. Les terrassements.....	11
4-2-3. Les chaussées.....	11
4-3. Règles d'emploi des matériaux en terrassement et en chaussées.....	11
4-3-1. Utilisation en remblais et couches de forme.....	11
4-3-2. Utilisation en couches de chaussées.....	12
4-4. Règles pour la caractérisation mécanique en laboratoire.....	12
4-4-1. Caractérisation des matériaux pour terrassements.....	12
4-4-2. Caractérisation des granulats.....	13
4-5. Règles pour la construction et le suivi des routes en service .....	13
4-5-1. Ouvrage de terrassement .....	13
4-5-2. Structures de chaussées .....	16
4-5-3. Modalités d'entretien des chaussées.....	18
5. Méthodologie d'analyse des cas CAREX .....	22
5-1. Méthodologie d'analyse des études .....	22
5-1-1. Analyse de la description des ouvrages.....	22
5-1-2. Analyse de la description des sollicitations.....	24
5-1-3. Analyse de la description des réponses des ouvrages.....	25
5-2. Méthodologie d'analyse des ouvrages.....	26
6. Retour d'expérience .....	27
6-1. Exploitation des cas d'études.....	27
6-1-1. Cas 1.....	27
6-1-2. Cas 2.....	29
6-1-3. Cas 3.....	31
6-1-4. Cas 4.....	33
6-1-5. Cas 5.....	35
6-1-6. Cas 6.....	37
6-1-7. Cas 7.....	39
6-1-8. Cas 8.....	41
6-1-9. Cas 9.....	43
6-1-10. Cas 10.....	44
6-1-11. Cas 11.....	46
6-1-12. Cas 12.....	48
6-1-13. Cas 13.....	50
6-1-14. Cas 14.....	52
6-1-15. Cas 15.....	55
6-1-16. Cas 16.....	57
6-1-17. Cas 17.....	59
6-2. Analyse des pratiques d'étude .....	62
6-2-1. Pratiques de description des ouvrages.....	62

6-2-2. Pratiques de description des sollicitations .....	64
6-2-3. Pratiques de description des réponses des ouvrages .....	65
6-2-4. Proposition d'une typologie des études sur le plan environnemental .....	66
6-3. Examen global des ouvrages étudiés .....	68
6-3-1. Typologie routière des ouvrages étudiés .....	68
6-3-2. Examen spécifique des ouvrages contenant des MIOM .....	69
6-3-3. Analyse récapitulative de l'ensemble des cas d'étude .....	72
7. Bilan de l'étude et perspectives pour l'expérimentation .....	78
7-1. Bilan méthodologique environnemental .....	78
7-1-1. Pertinence des essais vis-à-vis de la caractérisation de la source .....	79
7-1-2. Pertinence des référentiels d'évaluation des effets potentiels sur les cibles .....	83
7-1-3. Recommandations pour la définition d'essais plus représentatifs .....	84
7-1-4. Pertinence des approches méthodologiques utilisées et recommandations .....	87
7-2. Synthèse relative aux effets d'échelle .....	89
7-3. Perspectives pour l'expérimentation .....	90
7-3-1. Essais sur manège de fatigue .....	90
7-3-2. Modélisation du comportement mécanique des chaussées .....	92
8. Références .....	96
Abréviations utilisées et définitions .....	98

## **1. Contexte général de l'étude**

### ***1-1. Contexte déchet / valorisation***

Les objectifs assignés par l'Europe pour la gestion des ressources naturelles et des déchets sont sans équivoques, « veiller à ce que la consommation des ressources renouvelables et non renouvelables ne dépasse pas ce que l'environnement peut supporter, en dissociant la croissance économique de l'utilisation des ressources, en améliorant l'efficacité de celles-ci et en diminuant la production de déchets ». L'objectif est de réduire la production de déchets de 20 % d'ici 2010 et de 50 % d'ici 2050. Les principales actions à entreprendre consistent notamment à réduire la consommation des ressources, recycler les déchets, mettre au point des systèmes d'évaluation environnementale nécessaires à la sécurisation des usages, donner au public l'accès à l'expertise environnementale. Pour atteindre ces objectifs les contraintes réglementaires européennes risquent de devenir de plus en plus sévères, en particulier dans le cas des décharges, des rejets dans le milieu naturel et de la qualité environnementale des matériaux.

Dans le contexte particulier des filières de valorisation de déchets minéraux en travaux publics, de nombreuses études et programmes de démonstration de la faisabilité technique, économique et environnementale se sont déroulés depuis le milieu des années 1990, impliquant l'ADEME comme partenaire.

Par ailleurs, le projet OFRIR (<http://ofrir.lcpc.fr>) débuté en 2002 a mis en évidence un manque de formalisation global du retour d'expérience tant scientifique que méthodologique du suivi mécanique et environnemental d'ouvrages routiers instrumentés. Cette situation traduit vraisemblablement le fait que le retour d'expérience était plutôt examiné au cas par cas en fonction de la demande. D'où le besoin actuel, à l'origine de cette étude CAREX, de :

- caractériser les effets d'échelle,
- prendre en compte l'influence des sollicitations extérieures mécaniques ou climatiques en situation réelle,
- caractériser la sensibilité des milieux récepteurs environnant un ouvrage routier.

### ***1-2. Contexte déchet / ouvrages routiers***

Les ouvrages routiers correspondent à des scénarios d'utilisation dans lesquels les matériaux sont soumis à des sollicitations extérieures, d'ordre mécanique, thermique et environnemental. Les matériaux alternatifs tels que les déchets, réactifs à ces différentes sollicitations, vont y répondre spécifiquement, en fonction des conditions locales et des caractéristiques propres de l'ouvrage. Le retour d'expérience sur cet aspect sollicitations-réponses n'a pas pour le moment été vraiment documenté alors qu'il s'agit d'un point crucial dans l'évaluation du comportement des déchets en scénario routier. Il est donc nécessaire pour cette étude de décrire les sollicitations auxquelles sont soumis les matériaux alternatifs dans leur contexte d'utilisation. L'analyse d'un ensemble de cas en nombre limité, doit permettre d'approcher des scénarios-types d'utilisation tenant compte de la réactivité des matériaux et des conditions d'utilisation (ouvrages, contexte). La finesse d'analyse de chaque ouvrage dépendra des données disponibles.

## 2. Objectifs et déroulement de l'étude

L'étude envisagée consiste à valoriser le retour d'expérience tant scientifique que méthodologique du suivi mécanique et environnemental d'ouvrages routiers instrumentés dans le but :

- de réaliser un bilan sur le comportement des principaux éléments majeurs et traces potentiellement polluants obtenus au laboratoire et in situ ;
- de réaliser un bilan du comportement mécanique des ouvrages ;
- de formuler des recommandations méthodologiques pour :
  - assurer une instrumentation environnementale satisfaisante des ouvrages routiers expérimentaux ;
  - mieux caractériser au laboratoire (ou à une échelle intermédiaire) le comportement des déchets utilisés comme matériaux dans ces ouvrages routiers réels.

Par ailleurs, on constate que la valorisation du retour d'expérience tant scientifique que méthodologique du suivi mécanique et environnemental d'ouvrages routiers instrumentés n'a été ni rigoureuse ni réellement formalisée. En effet, le retour d'expérience était plutôt utilisé au coup par coup en fonction de la demande, notamment de l'Administration pour :

- l'élaboration du guide technique de mise en décharge des déchets inertes ;
- les travaux de transposition de la directive « décharges » d'avril 1999 ;
- le programme RPT (Résidus de Procédés Thermiques).

Cela s'est traduit par un manque d'éléments de synthèse dans le cadre des travaux actuels d'élaboration de règles d'usage (programme RPT, guide méthodologique du demandeur d'avis) surtout au niveau :

- de la prise en compte de l'influence des sollicitations extérieures mécaniques ou climatiques en situation réelle ;
- de la caractérisation et de la sensibilité des milieux récepteurs environnant un ouvrage routier ;
- des effets d'échelles.

Cette étude visait donc à combler cette lacune.

La première partie de l'étude a consisté en un recensement des documents relatifs à des ouvrages et plots routiers ayant fait l'objet d'une étude de comportement mécanique et/ou environnemental (ouvrages réels en service, ouvrages expérimentaux, Cf Annexe 1). Ces documents ont été fournis directement par les partenaires du projet ayant participé à certaines de ces études (ADEME, Polden-EEDEMS, LCPC) ou recherchés par le LCPC auprès des acteurs d'autres études.

Afin de recenser de façon homogène les informations fournies par chaque étude, une fiche type a été élaborée (LCPC) et validée (ADEME, Polden-EEDEMS, INERIS). Elle comporte 5 parties principales : renseignements ; description de l'ouvrage ; description du matériau/déchet ; description des sollicitations ; description des réponses (ouvrage et matériau). Les fiches des cas d'études répertoriés sont fournies en Annexe 2 du rapport.

L'exploitation de ces fiches de cas renseignées a permis ensuite de faire ressortir l'apport de chaque étude à la connaissance des matériaux sur le plan mécanique et à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux sur le plan mécanique et environnemental (réalisation LCPC, validation Ademe, Polden-EEDEMS, INERIS). Sur le plan environnemental, une analyse de la pertinence des moyens d'étude mis en œuvre par rapport aux objectifs énoncés a été réalisée pour chaque étude en relation avec l'étude BILENV – Bilan de la mise en œuvre de la norme méthodologique EN 12920 (réalisation Polden-EEDEMS, Cf. Annexe 3).

Sur la base de ces observations et des types de comportements observés, différentes méthodologies d'études sont ensuite proposées en fonction des objectifs visés (réalisation Polden-EEDEMS, Cf. Annexe 4). La synthèse réalisée sur l'ensemble des cas d'étude a permis de réaliser finalement un bilan sur les pratiques d'étude et de leur représentativité, sur le plan mécanique et environnemental, ainsi que de faire des recommandations en termes d'essai des matériaux et des ouvrages en vue notamment de la résolution des problèmes de changement d'échelle du laboratoire au site réel (réalisation LCPC, validation Ademe, Polden-EEDEMS, INERIS).

### 3. Présentation des ouvrages retenus et des objectifs associés

Le tableau 1 présente les ouvrages identifiés lors de la première phase du projet avec leur code CAREX destiné à simplifier la présentation de ce rapport. Le nom du « fournisseur » des données de l'étude (colonne source de documents) et le type de documents fournis sont également précisés dans le tableau 1. Un ensemble varié d'ouvrages est donc retenu, allant du plot expérimental (pas de trafic supporté) à différents types d'ouvrages (routes, autoroutes...).

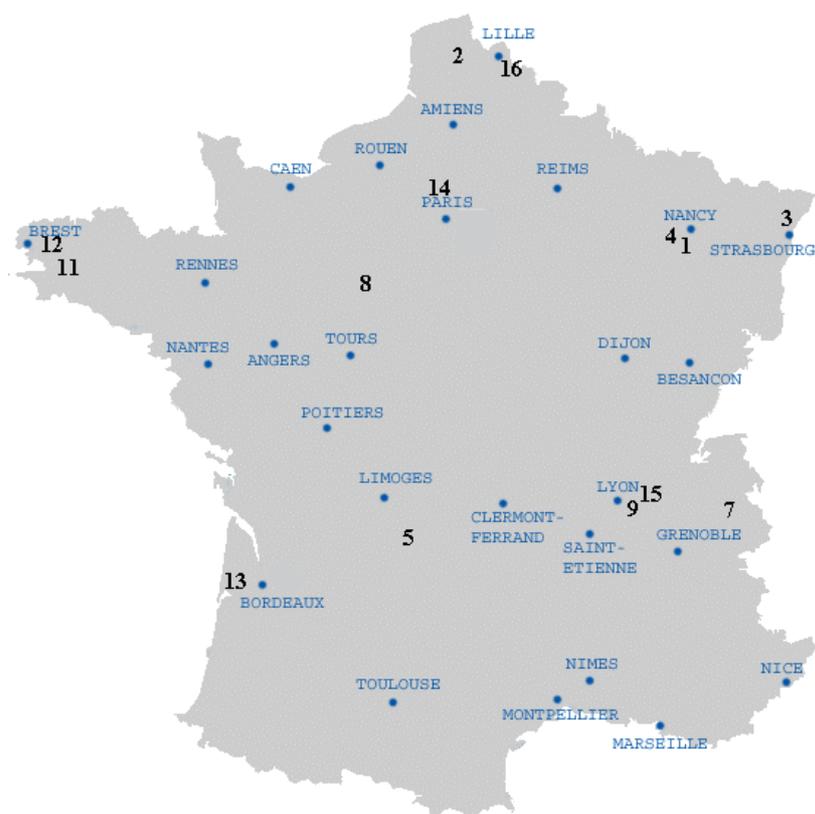
Une description détaillée des dossiers disponibles et des objectifs des études associées est proposée dans l'Annexe 1. Les documents relatifs à chaque ouvrage ou plot, qu'ils soient instrumentés ou non, ont fait l'objet d'une étude détaillée dont le rendu est proposé sous forme de fiche signalétique dans l'Annexe 2. Les conditions d'obtention des données « ouvrage » sont précisées ; les cas qui ont posé des problèmes sont signalés.

Cas CAREX	Ouvrages référencés	Source des Documents	Type	Type de documents	
				Rapports/ Thèses	Articles
1	Echangeur de Custines	LCPC	A	X	
2	A22 - Lille	LCPC	A		X
3	Rocade sud Strasbourg	LCPC	RN	X	
4	Déviation Malzéville	LCPC	RN	X	
5	RD 166 - Corrèze	LCPC	RD	X	
6		LCPC	RD	X	
7	RD 71A Crest-Volland	LCPC	RD		X
8	Le Mans	LCPC	RU		X
9	Collonges au Mont d'Or	LCPC	RU		X
10		LCPC	RU	X	X
11	Chantier pilote de Briec	ADEME	RP	X	
12	Etude CREED	ADEME	RP	X	
13	La Teste	LCPC	RP	X	
14	Hérouville	ADEME	RP	X	
15	EDF-SNET	EEDEMS	Plots	X	
16	Brite Euram	EEDEMS	Plots	X	
17	Revasol	LCPC	RP	X	

- *A : Autoroute ; RN : Route Nationale ; RD : Route Départementale ; RU : Rue (route urbaine) ; RP : Route Privée ; Plots*

**Tableau 1. Liste des ouvrages étudiés**

La figure 1 montre la distribution des études répertoriées sur le territoire français. On peut noter que les travaux réalisés regroupés dans le cadre de CAREX sont bien répartis sur le territoire.



**Figure 1. Cartographie des emplacements des différentes études**

En fonction de l'objectif initial des études (tel que rappelé dans l'annexe 1, les rubriques des fiches signalétiques sont renseignées avec plus ou moins de détails. Au final, il y a souvent peu de données sur la chimie des matériaux (analyse élémentaire, composés organiques) et sur leur minéralogie, peu d'informations sur le contexte climatique et hydrogéologique.

Il y a également peu de résultats en ce qui concerne la réponse environnementale des ouvrages : seules des valeurs sur la qualité des eaux de percolation, des sols sous-jacents et des sols avoisinants sont données. Il n'y a que peu ou pas de résultats sur les eaux avoisinantes ou souterraines. De plus, le problème de l'évolution du matériau après sa mise en œuvre est rarement traité, de même que le suivi des ouvrages n'est pas réalisé pour chaque étude. L'analyse de la géométrie des ouvrages, comportant une réflexion sur la constitution du terrassement et sur la structure du corps de chaussées, vis-à-vis du trafic à supporter, non disponible dans beaucoup d'études a été effectuée spécialement par le LCPC pour ce projet CAREX pour dégager des arguments factuels dans le cadre du retour d'expérience.

Le tableau 2 précise cas par cas le type de matériau utilisé, le type d'ouvrage (avec ou sans trafic, instrumenté ou non) ainsi que la durée de l'étude et des suivis effectués le cas échéant.

Cas d'étude :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Matériau alternatif :																	
○ MIOM	x		x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x			
○ MIDIS												x					
○ Charrées de Cr		x															
○ CV de centrale thermique															x		
○ CV d'UIOM traitées																	x
○ Laitiers							x										
○ Scories de Zn et Pb																x	
Existence d'un trafic	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x
Ouvrages (O):	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x
○ Autoroute	O	O															
○ Route Nationale			O	O													
○ Route Départementale					O	O	O										
○ Rue								O	O	O							
○ Route Privée											O	O	O	O			O
Plots (P) :															P	P	
Collecte des eaux de percolation					x	x			x	x	x	x		x	x	x	x
Usage en :																	
○ - Roulement																	
○ - Liaison																	
○ - Base										x					x		x
○ - Fondation					x			x			x	x	x	x	x		
○ - Forme	x	x		x		x	x		x								
○ - Remblai	x	x	x														
Durée du suivi	0	17 ans	0	0	2 ans	1 an	2 mois	1 jour	2 ans	2 ans	1,5 an	7 mois	1 jour	3 ans	1,5 an	1 an	1 an

Tableau 2. Présentation des cas d'étude

## 4. Rappel des règles de l'art en matière de construction routière

### 4-1. Introduction à la géométrie d'une route

Une route est un ouvrage multicouche (Figure 2) dans lequel chaque couche a une fonction différenciée qui répond à des exigences mécaniques liées aux sollicitations extérieures supportées et au terrain naturel dans lequel elle est implantée. Deux types de couches sont différenciées : les couches de chaussée en partie supérieure de l'ouvrage, proches des sollicitations appliquées en surface (efforts de contact, températures, précipitations) et les couches de terrassements en partie inférieure également soumises à des variations de teneur en eau mais moins sollicitées mécaniquement par l'action des charges roulantes.

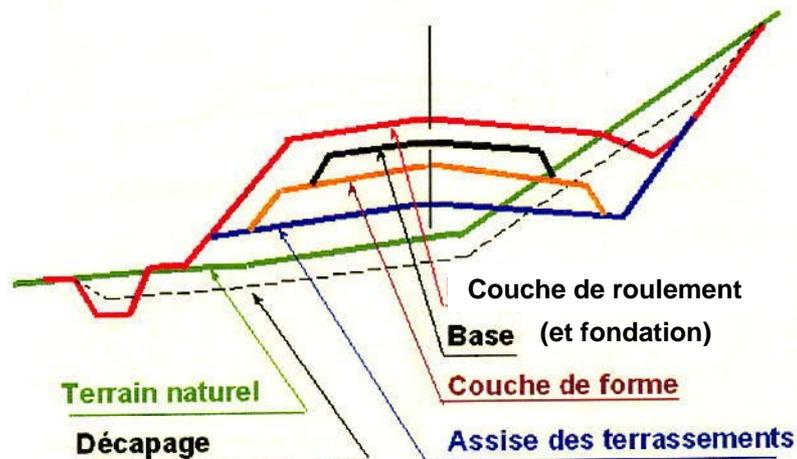


Figure 2. Les différentes couches d'une route d'après [CFTR et SETRA, 2002]

Quel que soit le matériau de construction utilisé, ses propriétés doivent être examinées selon ses modalités d'utilisation exactes dans l'ouvrage (scénario d'emploi) car les critères de comportement mécanique exigés sont directement reliés à sa fonction dans l'ouvrage. Ainsi, selon les cas, le matériau peut être mis en oeuvre avec ou sans liant. L'emploi d'un matériau alternatif, issu de l'élaboration d'un déchet, ne remet pas en cause le niveau de propriété requis usuellement avec des matériaux naturels (<http://ofrir.lcpc.fr>), il doit donc dans le cas d'un retour d'expérience être examiné selon les mêmes modalités pratiques que celles appliquées à un matériau naturel. Cette partie rappelle donc les règles de l'art suivies dans le cadre du dimensionnement des ouvrages ainsi que de leur suivi en service, afin de procéder au retour d'expérience des cas sélectionnés pour l'étude CAREX.

### 4-2. Règles de dimensionnement

#### 4-2-1. Le trafic

Du niveau de trafic découle le choix des matériaux et le calcul des épaisseurs nécessaires afin de garantir que l'ouvrage résistera pendant la durée de service prévue. La route est également dimensionnée pour une durée choisie : 30 ans pour les autoroutes et 2 x 2 voies, 20 pour les voiries. Ce dimensionnement, effectué vis-à-vis de la tenue en fatigue des *matériaux*

(solicitations répétées dues au trafic pendant la durée de service prévue) tient compte du mode de chargement le plus défavorable pour l'ouvrage et c'est donc l'effet cumulé du trafic poids lourds qui est pris en compte.

#### ***4-2-2. Les terrassements***

L'utilisation en remblais nécessite de grandes quantités de matériaux à remettre en place dans l'ouvrage de terrassement. L'utilisation en couche de forme est requise lorsque le sol est localement considéré comme non satisfaisant, dans ce cas le matériau alternatif utilisé doit présenter des caractéristiques mécaniques plus élevées que celles du sol en place. Enfin, l'emploi en couches de chaussées implique que les caractéristiques mécaniques soient d'autant plus élevées que le matériau se rapproche des roues.

#### ***4-2-3. Les chaussées***

Les matériaux utilisés dans le corps de chaussée doivent présenter une bonne résistance aux essais de fatigue pour éviter la fissuration et une bonne résistance à l'orniérage. Outre les caractéristiques mécaniques intrinsèques à chaque couche de chaussée et du terrassement, il est également très important de considérer les propriétés des interfaces entre couches et notamment l'adhérence des couches entre elles. Plus les couches sont proches de la surface et donc des sollicitations mécaniques exercées par le trafic, plus les contraintes mécaniques se rapprochent des maxima dans l'ouvrage, même si la totalité des valeurs maximales de contraintes ne sont pas observées en surface.

### ***4-3. Règles d'emploi des matériaux en terrassement et en chaussées***

L'emploi des matériaux en terrassements et techniques routières est encadré par des normes, ainsi que par des documents d'application des normes qui font référence dans la communauté technique. L'objet de cette section est simplement, en citant ces documents, de rappeler leur articulation pour les matériaux classiques avant de procéder à l'analyse du retour d'expérience sur les cas d'étude CAREX.

#### ***4-3-1. Utilisation en remblais et couches de forme***

Les matériaux utilisables en terrassements font l'objet d'une classification. Celle-ci est normalisée (NF P 11-300) et s'appuie sur les caractéristiques géotechniques des matériaux. L'utilisation des diverses classes de matériaux ainsi délimitées est codifiée dans deux documents, qui sont respectivement le « Guide Technique pour la Réalisation des Remblais et des Couches de Forme » (connu sous l'abréviation GTR), et le « Guide Technique pour le Traitement des Sols à la Chaux et / ou aux Liants Hydrauliques » (connu sous l'abréviation GTS). Pour chaque classe et sous-classe de matériaux, ces documents précisent les modalités d'extraction et de mise en œuvre. Ils précisent aussi les possibilités et les conditions de traitement (actions sur la granularité, sur la teneur en eau, ou amélioration par apport de chaux et ou liants) visant à faciliter les opérations de mise en œuvre et qui conduisent dans certains cas à améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux.

Il faut souligner que, pour des utilisations en remblais, pratiquement tous les types de sols et matériaux rocheux naturels sont utilisables sous une condition ou une autre. Les seules restrictions concernent leur état hydrique, à savoir qu'ils peuvent être considérés comme « inutilisables en l'état » s'ils sont trop secs ou trop humides. En revanche, dans le cas des

couches de forme, aux restrictions liées aux états hydriques s'ajoute l'exclusion de certaines natures de matériaux, en particulier les « A<sub>4</sub> », « C<sub>x</sub>A<sub>4</sub> » (matériaux excessivement argileux), ainsi que certains matériaux rocheux.

#### ***4-3-2. Utilisation en couches de chaussées***

De même que pour les matériaux pour terrassements, les granulats pour couches de chaussées font l'objet d'une classification. Celle-ci est normalisée (XP P 18-540) et s'appuie d'une part sur le type d'usage prévu pour le granulat, et d'autre part sur les caractéristiques géotechniques des granulats. Ainsi, la norme prévoit une classification pour les granulats destinés aux assises de chaussées (§ 7 de la norme), une autre s'ils sont destinés à des couches de roulement bitumineuses (§ 8), et une autre encore pour les utilisations en chaussées béton (§ 9). L'utilisation des diverses classes de matériaux ainsi délimitées est codifiée pour le réseau routier national dans les documents d'application suivants (documents regroupés sous SETRA, 1999) :

- le guide « Assises de chaussées », dans lequel les tableaux 4, 6 et 7 donnent les spécifications en fonction des trafics routiers visés, pour des utilisations en techniques non traitées ou traitées aux liants hydrauliques;
- le guide « Enrobés hydrocarbonés à chaud », dans lequel les tableaux 5, 6 et 7 donnent les spécifications en fonction des trafics routiers visés, pour des utilisations selon les différentes techniques bitumineuses pour couches de roulement ou d'assises ;
- le guide technique « Chaussées en béton », dont le § 4.1.1 précise les conditions de choix des granulats pour les techniques concernées ;
- le guide technique « Enduits superficiels d'usure », dont le paragraphe 1.A précise les conditions de choix des granulats pour les techniques concernées. Il est à noter que le § 2.B de ce document donne des indications sur la façon d'apprécier l'adhésivité liants - granulats.

#### ***4-4. Règles pour la caractérisation mécanique en laboratoire***

Qu'il s'agisse de granulats ou de matériaux destinés aux terrassements, quelques décennies de pratique se sont traduites par la constitution d'un référentiel solide. Dans celui-ci, les matériaux sont classés en fonction de leurs propriétés (normes NF P 11-300 et XP P 18-540 ), et les règles d'usages des différentes classes ainsi obtenues sont codifiées dans les documents d'application des normes (tels que le GTR), dans les normes de matériaux de chaussées et dans les guides d'application (textes de spécifications) les concernant.

##### ***4-4-1. Caractérisation des matériaux pour terrassements***

Pour les matériaux destinés aux terrassements, la norme NF P 11-300 prévoit plusieurs niveaux d'identifications géotechniques. Les matériaux sont d'abord classés selon leur « nature ». Concrètement, les paramètres influents sont le diamètre maximal  $D_{max}$ , la *granularité*, l'*activité* des argiles pour les sols meubles, et la nature pétrographique pour les matériaux rocheux. Un second niveau de classement fait intervenir l'état hydrique du sol, c'est à dire sa teneur en eau naturelle comparée à son comportement à différentes teneurs en eau. Pour certains matériaux, d'autres caractéristiques sont prises en compte, comme la

résistance mécanique des grains ou la masse volumique. Les méthodes de mesure de toutes ces différentes caractéristiques sont normalisées.

#### ***4-4-2. Caractérisation des granulats***

Pour les granulats, les propriétés géotechniques sont réparties en deux familles :

- les premières sont dites « intrinsèques ». Elles dépendent essentiellement de certaines propriétés physiques des roches. Il s'agit notamment des résistances mécaniques, de la masse volumique des grains, ...
- les secondes sont dites « de fabrication ». Il s'agit des paramètres sur lesquels le processus de fabrication en usine a une influence majeure. Le principal d'entre eux est la *granularité*. On citera aussi la *forme* et la *propreté*.

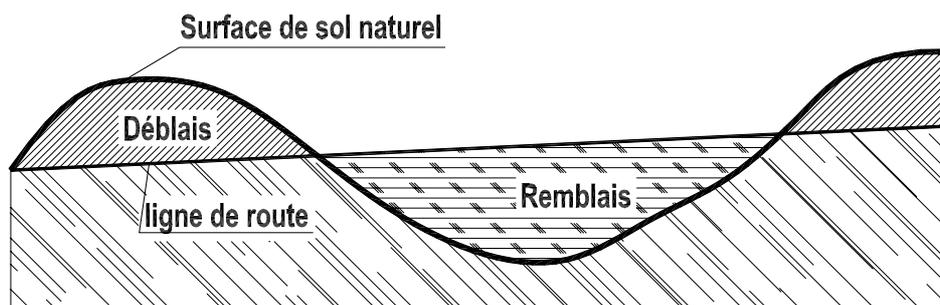
Les essais permettant de mesurer ces caractéristiques sont normalisés. La liste de ces normes fait l'objet d'un paragraphe de la norme générale XP P 18-540 à laquelle le lecteur est invité à se reporter. Un paramètre important que la norme XP P 18-540 impose aux producteurs de granulats est celui de la régularité des caractéristiques des produits qu'ils mettent sur le marché. Des fréquences d'essais et des valeurs limites sont imposées, qui confèrent aux granulats un véritable caractère de produit industriel. Les propriétés mécaniques des granulats naturels dépendent de leur origine et du traitement qu'ils ont subi entre leur extraction et leur passage à l'état de produit.

#### ***4-5. Règles pour la construction et le suivi des routes en service***

Les routes sont conçues et dimensionnées en tenant en compte des échelles spatiales liées aux territoires qu'elles traversent. Pour les structures de chaussées, les paramètres de dimensionnement sont le trafic, la durée de service, le risque de calcul ainsi que les effets thermiques liés aux conditions climatiques. La couche de forme et le sol support se déterminent sur la base des résultats des études géotechniques préalables à l'aide des guides tel que celui de la Réalisation des remblais et des couches de forme [SETRA et LCPC, 2000]. Dans la méthodologie de dimensionnement, les habitudes conduisent à définir séparément les structures de chaussées et les terrassements.

##### ***4-5-1. Ouvrage de terrassement***

Les ouvrages de terrassements servent à supporter les structures de chaussées. Ils se composent de différents éléments : déblais, remblais (Figure 3).



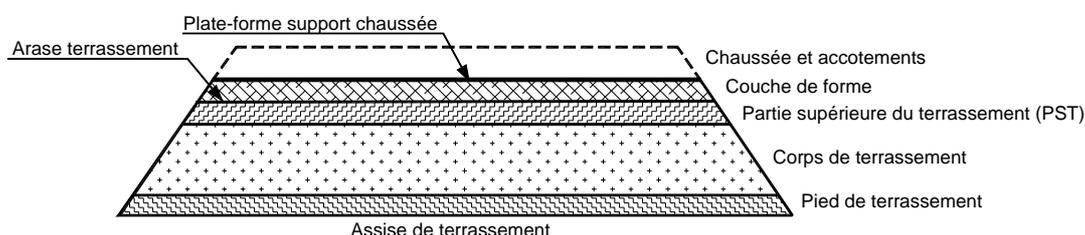
**Figure 3 . Position des remblais et des déblais**

Le fond du **déblai** peut être constitué soit d'un matériau naturel initial en place, soit d'un matériau extérieur dans le cas où la nature du matériau en place est inadaptée (caractéristiques mécaniques insuffisantes, trop sensible aux variations hydrauliques...). Comme dans le cas du remblai, l'arase du terrassement est recouverte par une couche de forme dont la surface constitue la plate-forme support de la chaussées.

Le **remblai** est construit sur un sol support également appelé assise de remblai. Cette assise de remblai doit avoir des caractéristiques mécaniques suffisantes pour supporter l'ouvrage sans se déformer. Le remblai proprement dit est constitué (Figure 4) :

- du pied du remblai qui parfois doit être adapté du point de vue du choix du matériau constitutif à des conditions particulières (cas de remblai en zone inondable),
- du corps de terrassement,
- de la partie supérieure des terrassements (PST). Cette PST est constitué par le dernier mètre supérieur du remblai [SETRA et LCPC, 2000]. La surface supérieure de la PST constitue l'arase des terrassements.

La PST est généralement recouverte par une structure plus ou moins complexe permettant d'adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblais ou du terrain en place, aux caractéristiques mécaniques, géométriques, hydrauliques et thermiques définies (hypothèses) dans la conception de la chaussée. Il s'agit de la couche de forme. La surface supérieure de cette structure d'adaptation constitue la « plate-forme support de chaussée » (PF). Du fait de son rôle important, la couche de forme en relation avec la plate-forme qui la recouvre seront présentées en détail ci après.



**Figure 4 . Constitution du terrassement**

**Constitution de la couche de forme :** la couche de forme permet la circulation des engins et le compactage des couches de chaussées qu'elle supporte. Selon les cas de chantier (nature de sol, climat, environnement hydrogéologique, trafic de chantier...), la couche de forme se présentera sous des formes différentes. Elle peut être :

- inexistante car inutile lorsque les matériaux constituant le remblai ou le sol en place ont eux- même les qualités mécaniques requises,
- limitée à l'apport d'une seule couche d'un matériau ayant les caractéristiques nécessaires ; c'est le concept traditionnel de la couche de forme,
- constituée d'une superposition de couches de matériaux différents répondant à des fonctions distinctes.

A long terme, la couche de forme a pour fonction plus particulièrement d'homogénéiser la portance du support pour concevoir des chaussées d'épaisseur constante et le maintien dans le temps, en dépit des fluctuations de l'état hydrique des sols support sensible à l'eau, d'une portance minimale pouvant être estimée avec une précision suffisante au stade du dimensionnement de la structure de chaussée. De plus, la couche de forme peut procurer une amélioration de la portance de la plate-forme pour optimiser le coût de l'ensemble couche de forme-structure de chaussée, une protection thermique des sols supports gélifs et une contribution au drainage de la chaussée.

Les étapes relatives à la phase de réalisation d'un ouvrage de terrassement sont précisées dans le tableau 3.

Phase de réalisation	Points à examiner	Observation Recommandations
Conception du DCE	Identifier, localiser et quantifier : - les nappes, - les problèmes d'instabilité de talus.	Sur la base des études géotechniques et hydrogéologiques.
	Pour chaque type d'ouvrages de terrassement (déblai, remblai, PST, .....)	Voir chapitre correspondant
	Spécifications Techniques sur les fournitures (matériau drainant, géotextile, drain) .	
	Météorologie	Voir chapitre correspondant
	Arrêté préfectoral d'autorisation au titre de la Police de l'eau.	Le contractualiser
Préparation chantier	- organisation du recueil de l'exploitation des données météorologiques, - nature et origine des matériaux (matériaux drainants, géotextile, drain)	
Préparation de l'exécution	- validation des matériels et validation des procédures d'exécutions - vérification des interfaces techniques	
Exécution	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositions protectrices à prévoir :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- réglage de plate-forme</li> <li>- drainage provisoire</li> <li>- aménagements provisoires (bourrelets, ...)</li> <li>- aménagement d'exutoire</li> </ul> </li> <li>• Définition d'assainissement provisoire</li> <li>• Vérification de la conformité et du fonctionnement de l'assainissement définitif</li> <li>• Adaptation éventuelle des dispositifs confortatifs à la stabilité des talus</li> <li>• S'assurer en permanence des obligations de l'arrêté préfectoral au titre de l'autorisation de la Police de l'eau.</li> </ul>	Maitrise et gestion des rejets à l'extérieur (quantitatif et qualitatif) .

**Tableau 3 : Phasage de réalisation de l'ouvrage de terrassement d'après [CFTR et SETRA, 2000]**

#### 4-5-2. Structures de chaussées

En général, quelque soit le trafic supporté, une route se présente sous la forme d'une structure multicouche (Figure 5) où chaque couche possède sa fonction particulière. On peut distinguer cette structure en trois niveaux distincts

Tout d'abord, on trouve, à la surface de la couche de forme (la plate-forme support) l'assise de la chaussée, constituée généralement d'une couche de fondation et d'une couche de base. Elle permet également une répartition des contraintes verticales sur la plate-forme support afin d'éviter des déformations trop importantes de celle-ci. Ensuite, la couche de surface composée d'une couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison, donne à la chaussée les propriétés nécessaires pour son utilisation par les véhicules, en particulier l'uni et

l'adhérence. Elle assure également un rôle d'étanchéité vis-à-vis du corps de la chaussée, contribuant ainsi à sa durabilité.

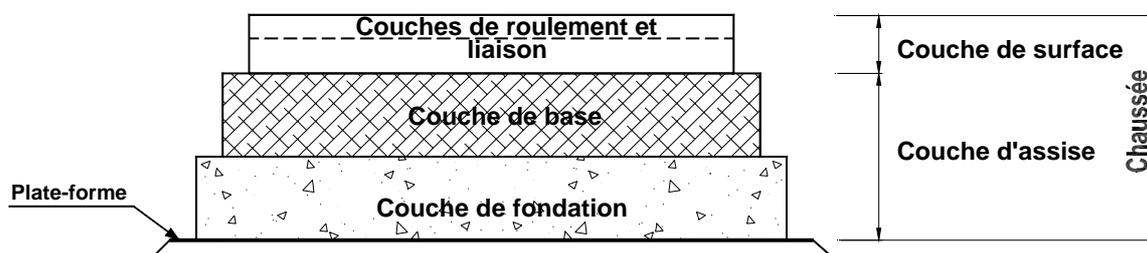


Figure 5. Constitution des structures de chaussée [SETRA et LCPC, 1998]

Par rapport au type d'ouvrages retenus pour l'étude CAREX, quelques rappels concernant les caractéristiques géométriques des chaussées sont effectués ci-dessous. Il s'agit du profil en travers d'une route à 2 ou 3 voies (Figure 6) et profil en travers d'une route à 2x2 voies (Figure 7).

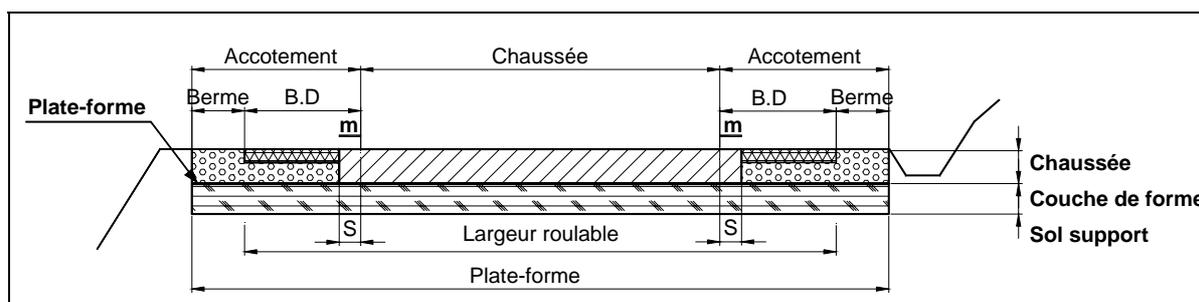


Figure 6. Profil en travers sur une route nationale (hormis voies du réseau structural) [SETRA, 1994] avec BD : Bande dérasée ; S : Sur-largeur structurelle de chaussée supportant le marquage de rive (m) ; m : marquage de rive

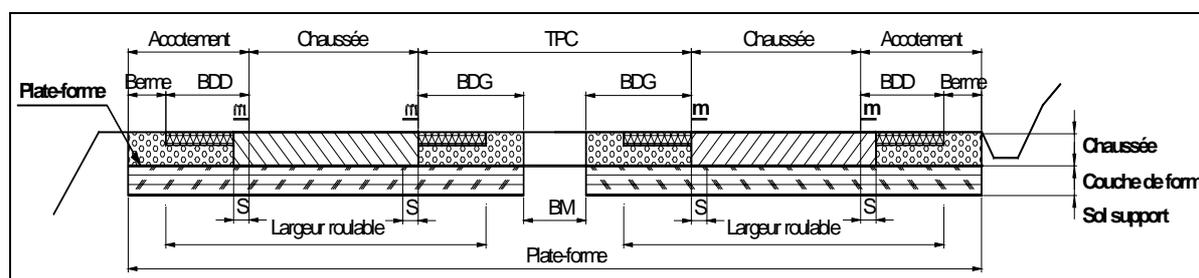


Figure 7. Profil en travers à 2x2 voies [SETRA, 1994] avec BDD : Bande dérasée de droite, BDG : Bande dérasée de gauche ; TPC : Terre plein central ; BM : Bande médiane

On précise ci-après en détail les éléments du profil en travers :

*Chaussée* : La chaussée, au sens géométrique du terme, est limitée par le bord interne du marquage de rive (et ne comprend pas les sur-largeurs de structure de chaussée portant le

marquage de rive). Dans le cas des autoroutes, elles comportent généralement deux chaussées séparées unidirectionnelles, chacune d'elles est divisée par une signalisation horizontale appropriée, en voies élémentaires d'une largeur de 3,5m ; le nombre de ces voies peut varier de 2 à 4 [SETRA, 1985]. D'ailleurs, la largeur des voies de circulation, en rase campagne, est normalement de 3,5 m pour les routes principales en aménagement neuf. Quelques fois, cette largeur peut être réduite à 3m pour le cas des artères interurbaines [SETRA, 1994].

*Terre plein central* : la séparation matérielle des deux sens de circulation est assurée par le terre plein central (TPC) dont la largeur varie de 2,5 à 3,5 m [SETRA, 1985]. En général, le TPC se compose de deux bandes dérasées de gauche (BDG) et de la bande médiane. La largeur normale de la BDG est de 1 m pour le cas d'une autoroute mais elle peut être réduite dans certains cas particuliers où il y a présence de séparateurs en béton ou de profil en travers spéciaux [SETRA, 1985]. Du côté de la bande médiane, si sa largeur est inférieure à 3 m, elle est généralement stabilisée et revêtue pour faciliter l'entretien. Dans le cas contraire, une berme engazonnée de 1 m est maintenue en bordure de la BDG [SETRA, 1985]. Selon l'axe de la route, il y a des interruptions du TPC (ITPC) pour permettre, en cas de nécessité, le passage de la circulation d'une chaussée sur l'autre. Pour l'autoroute, la longueur moyenne de l'ITPC est d'une trentaine de mètres. Elle se trouve tous les deux kilomètres environ.

*Accotement* : l'accotement comprend une partie dégagée de tout obstacle appelé bande dérasée, généralement bordée à l'extérieur d'une berme engazonnée (voir détail dans la partie ci-après). Pour l'autoroute, cette partie est appelée bande d'arrêt d'urgence (BAU). La bande dérasée est constituée, à partir du bord géométrique de la chaussée, d'une sur-largeur (S) de chaussée, de structure identique à la chaussée elle-même, d'une largeur de 0,25 m dans le cas général qui porte le marquage de rive [SETRA, 1994] et puis d'une partie stabilisée ou revêtue (pouvant supporter le passage occasionnel de poids lourds).

L'eau de pluie percole au travers du TPC et des talus, lorsque aucune étanchéité n'a été prévue pour l'éviter.

### **4-5-3. Modalités d'entretien des chaussées**

#### **➤ Principes généraux d'entretien**

Le contenu des études routières est toujours placé dans la perspective de la décision qui doit être prise par le gestionnaire (maître d'ouvrage). Selon qu'il s'agit d'évaluer l'état d'un réseau à un instant donné, de bâtir un programme pluriannuel d'entretien, ou de préciser la nature des travaux de renforcement d'une section, les informations utiles et strictement nécessaires varieront.

Ainsi, les examens de l'état de la chaussée qui permettent de déterminer le type, l'importance et l'étendue des dégradations font habituellement partie intégrante des systèmes de gestion et sont un élément essentiel de tout programme d'entretien préventif. Toutefois, concernant l'entretien préventif, il faut aussi repérer toute condition particulière et chercher à reconnaître les indicateurs précoces qui signalent la nécessité d'exécuter des travaux d'entretien préventif. Les effets bénéfiques des traitements d'entretien préventif dépendent des caractéristiques de la structure de la chaussée, du type et de l'étendue des dégradations, et de certains autres facteurs, tels que le drainage et les matériaux. Pour que l'entretien préventif soit rentable, il faut appliquer *le bon traitement à la bonne chaussée au bon moment*.

Le relevé de dégradation de surface est un élément de base de l'appréciation de l'état des chaussées. Pour établir un diagnostic et définir les opérations de remise en état, il peut

quelquefois suffire à lui seul. Sinon l'information est à compléter par des résultats d'essais permettant de quantifier les caractéristiques mécaniques de la structure et les caractéristiques de surface. L'objectif du relevé est de localiser les dégradations présentes, en précisant leur type, leur gravité et l'extension de chaussée concernée.

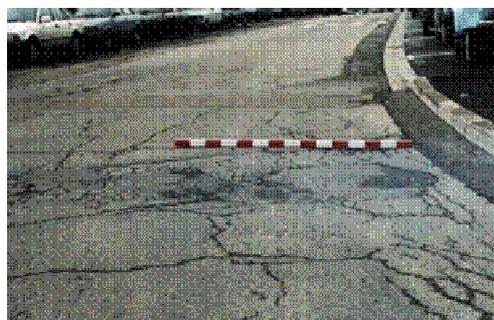
Les besoins en relevé des dégradations pour les études routières sont couverts par 7 modes opératoires indiqués dans le tableau 4 ci-après, selon l'objectif, les conditions d'exploitation et le type de chaussée.

Objectifs de l'étude	Conditions d'exploitation et type de chaussée			
	Chaussées souples, semi rigides, inverses, mixtes, BAC		Dalles béton	
	Rase campagne et VRU*		Urbain hors VRU	Tous sites
	Forts trafics**	Faibles trafics**	Tous trafics	
Diagnostic - entretien - renforcement	M1	M1 ou M2	M6	M7
Programmation	M2	M2 ou M3	M6	M7
Évaluation - surveillance	M3	M3 ou M4	M6	M7
Suivi de sections témoins	M5	M5	-	M5

VRU\* : Voies Rapides Urbaines      Trafics\*\* : forts ( $\geq T2$ ), faibles ( $< T2$ )



fissure longitudinale



fissuration en « dalles »



fissure transversale



fissuration en coin ouverte (béton)  
de dalle (béton)

Tableau 4. Conditions d'exploitation en fonction des objectifs de l'étude et types de dégradations d'après (LPC, Méthodes d'essai n°38-2, 1997)

Pour chaque mode opératoire correspondent différentes natures de dégradations (orniérage, affaissement, ressuage, nid de poule...), ceci dépend du type de chaussée, des sollicitations appliquées (trafic) et de la politique d'entretien envisagée par le gestionnaire. Les résultats de transcription sont agrégés selon un pas fixé en accord avec le gestionnaire.

D'autres modes opératoires sont appliqués pour des relevés de déformations du profil en travers (*LPC, Méthodes d'essai n° 49*).

Un catalogue des dégradations de surface des chaussées (LCPC, 1998) répertorie des fiches types par nature de dégradation (nature et gravité). Pour chaque mode opératoire un bordereau de relevé est établi. Un code est attribué à chaque type de dégradation en fonction du diagnostic établi.

La méthodologie adoptée permet à partir des relevés et mesures d'adhérence caractérisant l'état de la chaussée, d'estimer le coût au m<sup>2</sup> de chaussée des travaux conventionnels et d'en déduire les notes N<sub>p</sub>, N<sub>s</sub> et N<sub>g</sub>, représentant respectivement une note patrimoine, une note de surface et une note globale, cette dernière est une agrégation des deux premières. N<sub>g</sub> est par définition le minimum de N<sub>p</sub> et N<sub>s</sub>.

➤ ***Diagnostic de l'état des chaussées : Images Qualité du Réseau routier National (IQRN)***

Publiée en 1993, la première version de la méthode LPC n° 38, a été largement appliquée sur divers réseaux routiers français, dont le réseau de routes nationales avec l'opération IQRN (Image Qualité des Routes Nationales).

Ci-après est proposé, à titre indicatif, un extrait de la note intitulée « Chaussées, dépendances » (SETRA, 2000) qui visait à préciser les conditions dans lesquelles le suivi des chaussées *du réseau routier national* a été effectué ces dernières années selon la démarche IQRN, mise en place par le SETRA suivant les décisions et orientations de la Direction des Routes. Elle mobilise environ 90 personnes sur l'ensemble du réseau technique (hors rôle des DDE), et s'appuie sur un réseau de correspondants basés dans les CETE et les Laboratoires de la Région Parisienne. Les DDE ont en charge les dispositifs de sécurité lors des opérations de mesures.

Dans le cadre de l'opération IQRN, un tiers des chaussées du réseau routier national non concédé est ausculté chaque année. L'objectif est d'évaluer l'état des chaussées et d'en suivre leur évolution; localement, les différentes campagnes fournissent des éléments utiles pour la gestion de l'entretien. Cette note d'information a pour objet de rappeler les principes de cette évaluation, de décrire l'organisation mise en oeuvre chaque année et d'exposer les résultats issus de chaque campagne ainsi que leurs exploitations, aux niveaux central et local. En 1992 la Direction des Routes a décidé de mettre en place un système d'évaluation et de suivi des chaussées du réseau routier national non concédé afin d'une part, d'appréhender globalement la qualité des chaussées et d'autre part d'apprécier son évolution dans le temps. Un système de notation basé sur un relevé visuel des dégradations de chaussée et des mesures d'adhérence sur l'ensemble du réseau a été mis en place, issu de l'expérience acquise par le réseau technique et les différents services gestionnaires.

Les deux systèmes de notation N<sub>p</sub> et N<sub>s</sub> ont pour objet d'explicitier le besoin en entretien de la section élémentaire de chaussée, et sont établis suivant le processus ci-après :

1. détermination des pourcentages de chacune des dégradations pour chaque section élémentaire ;
  2. affectation, à chaque section élémentaire, d'une solution conventionnelle de travaux nécessaire pour ramener la chaussée à l'état de référence ;
  3. estimation du coût des travaux conventionnels de remise à l'état de référence ;
  4. calcul de la note (0 à 20) à partir de l'éventail des coûts.
- Le calcul de l'IQRN est réalisé à partir de relevés de dégradations et de mesures d'adhérence (micro-texture, macro-texture).

Ces éléments de diagnostic sont classiques au sein du ministère de l'équipement ; ils ont uniquement pour vocation à éclairer le lecteur sur les modalités courantes de surveillance et de suivi du patrimoine routier existant.

## **5. Méthodologie d'analyse des cas CAREX**

Le principe du retour d'expérience a consisté à effectuer une analyse détaillée de l'ensemble des cas retenus précédemment, tels que présentés dans l'Annexe 2 sur la base :

- des principes appliqués aux routes réalisées avec des matériaux classiques pour ce qui concerne les aspects mécaniques ;
- de l'étude de l'adéquation objectifs/moyens/conclusions pour ce qui concerne l'aspect environnemental.

L'analyse comporte deux parties : l'analyse des études et l'analyse des ouvrages.

### ***5-1. Méthodologie d'analyse des études***

L'analyse effectuée s'appuie sur les fiches signalétiques proposées pour chaque ouvrage. Elle comprend :

- l'analyse de la description de l'ouvrage ;
- l'analyse de la description des sollicitations ;
- l'analyse de la description des réponses.

Les essais de caractérisation initiale des matériaux alternatifs utilisés seront analysés a posteriori du point de vue de leur pertinence par rapport aux objectifs initiaux des études et par rapport aux réponses des ouvrages sur le plan mécanique et sur le plan environnemental. De la même façon, lorsqu'une modélisation du relargage a été effectuée et que le suivi de l'ouvrage le permet, une analyse a posteriori de la pertinence du modèle sera effectuée. Du point de vue environnemental une typologie des études a été élaborée par Polden en fonction des objectifs des études sur ce plan. L'analyse de cas selon cette typologie est présentée en Annexe 3.

#### ***5-1-1. Analyse de la description des ouvrages***

Dans la description des ouvrages et des matériaux constitutifs, 16 points importants ressortent :

➤ ***Dates de production du matériau***

➤ ***Dates de préparation du matériau***

➤ ***Dates de mise en oeuvre du matériau***

Les 3 points précédents se justifient par l'intérêt de connaître l'histoire du matériau avant sa mise en oeuvre. Celle-ci pouvant aller de quelques jours à quelques années et donc induire des réactions de vieillissement différentes avant usage ;

➤ ***Description de la structure verticale de l'ouvrage***

Ce point est important pour comprendre le rôle joué par le matériau dans la structure et pour comprendre ses sollicitations ;

➤ ***Dimensions de l'ouvrage***

Ce point est important pour faire des extrapolations de l'échelle échantillon analysé à l'ensemble de l'ouvrage. Il permet aussi d'apprécier l'échelle de l'ouvrage ;

➤ ***Masse de matériau en jeu***

L'importance de ce point est comparable à celle du point précédent ;

➤ ***Dénivelé***

Ce point est important pour l'interprétation de l'infiltration des eaux de pluies ;

➤ ***Composition chimique du matériau***

➤ ***Minéralogie du matériau***

➤ ***Composés organiques***

Les 3 points précédents sont importants pour décrire la nature du matériau et pour apprécier sa réactivité potentielle;

➤ ***Détermination du potentiel polluant et/ou évaluation du comportement à la lixiviation***

Ce point est important pour décrire le potentiel relargable par le matériau, que ce soit de manière conventionnelle ou dans le cadre d'une démarche d'évaluation méthodologique spécifique;

➤ ***Granulométrie du matériau***

Ce point est fondamental à l'interprétation du comportement tant mécanique qu'environnemental du matériau ;

➤ ***Caractéristiques géotechniques du matériau***

Ce point est important pour situer le matériau par rapport au référentiel de classification usuel des matériaux de construction routière, et pour vérifier, à partir de son comportement en place, s'il s'intègre bien à ce référentiel ou non ;

➤ ***Caractéristiques de portance du matériau***

Ces caractéristiques sont importantes à connaître pour savoir si le matériau est bien capable de jouer au moins la première fonction que l'on attend de lui dès la phase de construction, à savoir supporter un trafic ;

➤ ***Comportement au gel du matériau***

Ce point est important à connaître dans les contextes d'utilisation où des périodes de gel sont prévisibles, et plus généralement afin de capitaliser de la connaissance sur le caractère gélif ou non d'un type de matériau encore insuffisamment connu ;

➤ ***Perméabilité du matériau compacté***

Ce point est important à connaître pour interpréter le comportement du matériau en place (facteur influant sur le relargage) et de la structure en général (transfert vertical de l'eau dans l'ouvrage).

### ***5-1-2. Analyse de la description des sollicitations***

Dans la description des sollicitations appliquées à l'ouvrage, 6 points importants ressortent:

➤ ***Connaissance des précipitations***

Ce point est important pour interpréter certaines réponses (portance en place, déflexion, taux d'infiltration, qualité et volume des eaux de percolation, état des sols sous-jacents), en relation avec certains paramètres de description de l'ouvrage (structure, dimensions, masse, dénivelé, essais de solubilisation, caractéristique de portance, perméabilité) ;

➤ ***Connaissance de l'existence ou de l'absence d'une nappe phréatique***

Ce point est important pour interpréter les effets éventuels sur une nappe sous-jacente, ainsi que les effets éventuels (mécaniques et environnementaux) de celle-ci sur la structure par marnage en particulier ;

➤ ***Connaissance du trafic automobile ou de son absence***

Ce point est important pour interpréter l'effet des contraintes de trafic sur le comportement mécanique et l'état de l'ouvrage, ainsi que sur son comportement environnemental (influence de la dégradation mécanique de la structure sur l'infiltration et le relargage consécutif). Ce point est important d'une façon générale pour estimer les performances du matériau et leur fonction effective dans la structure ;

➤ ***Connaissance des températures atmosphériques***

Ce point est important pour interpréter le comportement mécanique et environnemental du matériau en période critique de basse et haute température (influence sur les réactions chimiques, influence sur l'état de l'eau dans l'ouvrage et en surface) ;

➤ ***Connaissance de données relatives à l'entretien routier***

Ce point est important pour interpréter le comportement mécanique et environnemental de l'ouvrage (par exemple régénération des couches de roulement améliorant les propriétés mécaniques de l'ouvrage et modifiant l'infiltration, donc le relargage consécutif ; ou l'utilisation de produits d'entretien s'infiltrant dans la structure et réagissant avec le matériau ou modifiant sa solubilité) ;

➤ ***Connaissance de déversements accidentels ou de leur absence***

L'importance de ce point est comparable à celle du point précédent concernant les conséquences éventuelles de l'infiltration de produits déversés accidentellement sur l'ouvrage.

### ***5-1-3. Analyse de la description des réponses des ouvrages***

Dans la description des réponses des ouvrages, 10 points importants ressortent :

- ***Appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage***  
Ce point important permet d'attester que la structure remplit ou non la fonction que l'on attend d'elle et le cas échéant d'identifier des désordres structurels présents ou à venir ;
- ***Essais de portance en place***  
Ce point est important pour attester, ou non, de l'aptitude de la couche de matériau à remplir la première fonction que l'on attend d'elle dès la phase de chantier ;
- ***Mesures de déflexion***  
Ce point est important pour attester, ou non, de l'aptitude de la structure routière à remplir la fonction première que l'on attend d'elle, c'est à dire supporter la charge du trafic en se déformant dans des limites acceptables ;
- ***Taux d'infiltration des eaux de pluie dans l'ouvrage***  
Ce point est important pour interpréter le comportement mécanique et environnemental de l'ouvrage ;
- ***Suivi de la qualité des eaux de percolation***  
Ce point est important pour évaluer le relargage du matériau en place dans l'ouvrage et son évolution dans le temps ;
- ***Suivi des volumes d'eaux de percolation***  
Ce point est important pour évaluer les volumes d'eau d'infiltration transitant dans l'ouvrage et pour déterminer les flux polluants générés ;
- ***Connaissance de l'état (qualité) des eaux souterraines avoisinantes***  
Ce point est important pour évaluer l'impact éventuel des eaux de percolation sur la nappe sous-jacente s'il en existe une et s'il n'y a pas de dispositif d'étanchéification/collecte des eaux de percolation ;
- ***Connaissance de l'état (qualité) des eaux superficielles avoisinantes***  
Ce point est important pour évaluer l'impact éventuel des eaux de percolation sur les cours d'eau avoisinants en cas de drainage de l'ouvrage notamment ;
- ***Connaissance de l'état (qualité) des sols sous-jacents***  
Ce point est important pour évaluer l'impact éventuel des eaux de percolation sur les sols naturels sous-jacents ;

➤ ***Connaissance de l'état (qualité) des sols avoisinants***

Ce point est important pour évaluer l'importance relative de l'effet éventuel des eaux de percolation sur les sols naturels sous-jacents.

## ***5-2. Méthodologie d'analyse des ouvrages***

L'analyse ci-après des cas étudiés dans CAREX qui englobe des cas de routes ou de plots réalisés avec des matériaux alternatifs, s'appuie sur les connaissances et expériences reconnues dans les métiers routiers.

Le retour d'expérience sera effectué au cas par cas, notamment d'après les critères suivants :

- existence d'un trafic significatif ou pas, notamment d'un trafic poids lourds déterminant dans le comportement en fatigue des couches de chaussées ;
- nature de la couche dans laquelle le matériau alternatif a été utilisé, et adéquation entre la fonction prévue (type de couche réalisée dans l'ouvrage) et la fonction réelle (vérification du fait que les couches supérieures n'ont pas été surdimensionnées contrairement à ce qui est fait classiquement).

Cette analyse fonctionnelle permettra de tirer des conclusions quant à la tenue des ouvrages dans des conditions d'utilisation connues. Trois distinctions seront donc faites : i) vis-à-vis de l'intensité du trafic existant sur l'ouvrage réalisé car c'est le trafic qui est dimensionnant dans la conception d'une route, ii) vis-à-vis de la chaussée réalisée et iii) vis-à-vis du terrassement.

Le cas des plots de taille réduite (tels que lysimètres par exemple) sera également examiné selon les règles appliquées classiquement aux ouvrages.

## 6. Retour d'expérience

Afin de dégager les apports de chaque cas d'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux alternatifs, cette section expose les résultats d'analyse, cas par cas. Cette analyse a été conduite en se référant au modèle de fiche élaboré dans la première partie de l'étude (voir Annexe 2) en suivant l'ensemble des points décrits à la section 5-1. Les principales conclusions sont indiquées dans la présente section.

Afin de compléter les informations fournies par les rapports, articles et autres documents rassemblés pendant la première phase de l'étude, le LCPC a pris contact avec des partenaires locaux. Ceci permet de compléter le retour d'expérience et d'identifier d'éventuels problèmes survenus sous trafic après la fin des études. Ainsi est aussi analysée la pertinence de l'usage de chaque matériau dans sa couche d'emploi et les perspectives d'évolution des structures routières réalisées.

### 6-1. Exploitation des cas d'études

Le ou les objectifs de chaque étude sont indiqués de façon détaillée dans l'Annexe 1 du rapport, tels qu'ils sont précisés par les auteurs des différents documents compulsés. Ce ou ces objectifs sont indiqués sommairement ci-après pour chaque cas d'étude.

#### 6-1-1. Cas 1

##### ➤ *Objet de l'étude*

Documentation des données mécaniques et environnementales relatives à la construction d'un ouvrage routier avec des MIOM utilisés en remblai et couche de forme.

##### ➤ *Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux*

Il ne s'agit pas d'une étude en tant que telle mais de la documentation de la construction d'un ouvrage réel. L'ouvrage n'a donc pas été instrumenté. Par contre la description de l'état général de l'ouvrage ainsi que la fourniture des essais de portance en place sont des informations importantes pour l'évaluation de l'ouvrage dans son ensemble et du matériau en place dans sa couche d'emploi. De telles mesures sont à préconiser pour le suivi des ouvrages expérimentaux. Compte tenu de la nature de cette opération, les essais géotechniques sont des essais classiques d'identification et de caractérisation. L'essai de solubilisation pratiqué est celui de la circulaire « mâchefers » et s'inscrit dans une logique réglementaire et non cognitive. L'appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage est l'autre réponse fournie. Elle peut être mise en relation avec les caractéristiques géotechniques du matériau et la structure de l'ouvrage.

Aucune sollicitation n'est connue.

##### ➤ *Descriptions réalisées*

- Description de l'ouvrage à travers :
  - dates de préparation du matériau

- description de la structure verticale de l'ouvrage
- essais de solubilisation du matériau
- granulométrie du matériau
- caractéristiques géotechniques du matériau
- caractéristiques de portance du matériau
- Description des sollicitations à travers :
  - aucun des points énumérés
  - On a uniquement connaissance de l'existence d'un trafic automobile (ouvrage en service) mais ses caractéristiques ne sont pas fournies.
- Description des réponses à travers :
  - appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage
  - essais de portance en place

➤ ***Dimensions***

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : non spécifiée
  - Largeur : non spécifiée
  - Surface : non spécifiée
- Volume de matériau en jeu dans l'étude: non spécifié
  - Longueur : non spécifiée
  - Largeur : non spécifiée
  - Epaisseur : 0,60 m

➤ ***Apport sur le plan mécanique***

Pour complément d'information, contact a été pris avec le LRPC de Nancy.

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation de MIOM en **remblai et couche de forme** sur les bretelles d'accès à l'autoroute: l'utilité de l'emploi en terrassement est évidente par économie sur les matériaux de remblais. (couche de forme + terrassement, épaisseur de 60 cm minimum et plus suivant la hauteur du remblai).

- Description de la structure de l'ouvrage

Les MIOM ont été utilisés seulement sous les chaussées de l'échangeur avec l'A31. Ces chaussées sont posées sur un remblai en MIOM avec une couche de fondation de 20 cm en grave hydraulique (Grave Ciment probablement), une couche de base en Grave Ciment de 25 cm surmontée d'un enduit et d'une couche de roulement de 8cm de BB.

Cette chaussée est apte à accueillir un trafic poids lourds important, elle a été mise en service en 1996 . Cette structure s'apparente à une chaussée de classe TC7-PF2 pouvant recevoir entre 14 et 18 millions de Véhicules Poids Lourds sur 20 ans avant l'apparition de dégradations. Soit un trafic journalier compris entre 1500 et 2000 PL/jour.

*Actuellement, aucun problème en ce qui concerne l'utilisation de ces matériaux n'est à déplorer (chaussée + terrassement). La chaussée présente un bon comportement après près de dix ans d'utilisation. Il y a eu simplement une rénovation de la couche de roulement pour maintenir de bonnes caractéristiques de surface. Mais compte tenu de la présence d'une grave-ciment en couche de base, on peut s'attendre à une fissuration*

*de retrait transversale susceptible d'apparaître en surface et à quelques fissures longitudinales dans les traces de roues dues au décollement entre BB et GC (phénomène habituellement constaté sur ce type de structure). La fissuration potentielle serait pour ce type d'ouvrage liée à la grave ciment, à la qualité d'interface et non aux MIOM. Par contre, si ce type de fissuration se développe en surface, l'infiltration de l'eau dans le corps de chaussée peut augmenter et par conséquent la cinétique de percolation aussi (l'étanchéité des fissures est à prévoir ou a peut être été faite). L'infiltration a pu également se produire par les talus avec une circulation d'eau dans les MIOM. Les couches de MIOM ne sont pas protégées par le dessus et ne sont pas isolées du sol support, il est probable qu'il y a eu migration des polluants du fait de la circulation d'eau dans les MIOM.*

➤ **Aspect environnemental**

L'aspect environnemental n'a pas été examiné dans le cadre de cette étude, dont l'objectif est limité à la caractérisation du comportement mécanique de l'ouvrage (Cf. Annexe 3, Typologie proposée par Polden).

## **6-1-2. Cas 2**

➤ **Objet de l'étude**

Documentation de l'impact d'un remblai réalisé en charrées de chrome et des techniques de remédiation envisagées.

➤ **Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux**

Il ne s'agit pas d'une étude en tant que telle mais de la documentation de l'impact d'un remblai autoroutier réalisé en charrées de chrome et des techniques de remédiation envisagées. L'ouvrage n'a pas été instrumenté. Par contre la description de l'état général de l'ouvrage est une information importante pour l'évaluation de celui-ci. La nécessité de caractériser les effets de l'ouvrage sur les diverses cibles et celui des techniques de remédiation, a conduit à une étude (la seule) complète sur site (eaux souterraines, superficielles, sols sous-jacents et avoisinants). Des piézomètres ont été utilisés pour le suivi de la nappe. Les matériaux n'ont à l'origine pas été caractérisés dans la perspective d'une étude environnementale. Aux résultats d'essais de caractérisation géotechnique classiques (qui ont forcément été réalisés à l'origine compte tenu de l'importance de l'ouvrage routier en question mais qui ne sont pas fournis dans les documents analysés qui eux portent sur le traitement du problème environnemental) s'ajoutent la composition chimique totale et la caractérisation de la perméabilité du matériau compacté. L'appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage peut être mise en relation avec la structure de l'ouvrage.

En matière de connaissance des sollicitations, celle du trafic sert à l'interprétation de l'état général de l'ouvrage. La connaissance de l'existence d'une nappe phréatique proche aurait pu aider à l'interprétation des réponses sur les sols et les eaux souterraines (en fait, ces dernières n'ont pu être collectées dans le cadre du projet Carex).

➤ **Descriptions réalisées**

- Description de l'ouvrage à travers :
  - description de la structure verticale de l'ouvrage
  - dimensions de l'ouvrage
  - masse de matériau en jeu
  - composition chimique du matériau
  - granulométrie du matériau
  - perméabilité du matériau compacté
- Description des sollicitations à travers :
  - connaissance de l'existence ou de l'absence d'une nappe phréatique
  - connaissance du trafic automobile ou de son absence
- Description des réponses à travers :
  - appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage
  - connaissance de l'état (qualité) des eaux souterraines avoisinantes
  - connaissance de l'état (qualité) des eaux superficielles avoisinantes
  - connaissance de l'état (qualité) des sols sous-jacents
  - connaissance de l'état (qualité) des sols avoisinants

➤ **Dimensions**

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : 12 000 m
  - Largeur : 33 m
  - Surface : 396 000 m<sup>2</sup>
- Volume de matériau en jeu : 388 000 m<sup>3</sup>
  - Longueur : 12 000 m
  - Largeur : 33 m
  - Epaisseur : 0,98 m

➤ **Apport sur le plan mécanique**

Pour complément d'information, contact a été pris avec le LRPC de Lille.

- Pertinence de l'usage du matériau :

Utilisation en **remblai** ; l'utilité de l'emploi en terrassement est avérée du fait de l'économie sur les matériaux de remblais qui vont jusqu'à 8 mètres de hauteur.

- Description de la structure de l'ouvrage :

L'ouvrage à 2 x 2 voies réalisé dans les années 1970 est en majorité en remblai avec un large terre-plein central non revêtu pendant plusieurs années. Le sol support est un limon sableux sensible à l'eau, celui ci est surmonté d'un remblai constitué de charrées pouvant aller jusqu'à 6 à 8 m de haut. Sur ce remblai, une couche de forme de 30 cm de limon traité à la chaux a été mise en place. La chaussée mise en œuvre est constituée : de 22 à 30 cm de cendres chaux gypse en couche de fondation et de 20 à 25 cm de Graves cendres volantes chaux ou graves laitiers en couche de base. Les couches de liaison et de roulement sont constituées de 7 et 6 cm de BB.

Cette chaussée est apte à accueillir un trafic poids lourds important. Cette structure s'apparente à une classe TC7-PF2 pouvant recevoir entre 14 et 18 millions de Véhicules Poids Lourds sur 20 ans avant l'apparition de dégradations. Soit un trafic journalier compris entre 1500 et 2000 PL/jour.

*Actuellement il n'y a pas de désordres importants constatés sur la chaussée. Le seul entretien que cette chaussée ait reçu est la rénovation des couches de roulement par application de 6 cm de BB sur l'ancienne chaussée.*

*Les eaux de pluies, entrées par le large terre plein central non revêtu et par les talus, ont circulé dans le remblai constitué de charrées, entraînant une forte pollution des eaux par le chrome. Des travaux d'imperméabilisation du terre plein et des talus ont été réalisés après mise en service, afin « d'emmailloter » l'ouvrage, évitant ainsi les réactions à l'intérieur du remblai (tassements, dissolution...etc..) et la pollution des eaux. A ce jour, il n'est pas prévu de déconstruction. Le trafic de Poids Lourds actuel (2005) est compris entre 2000 et 3000 pl/jour.*

➤ **Aspect environnemental**

Aucune information sur le comportement ou l'impact environnemental des matériaux employés dans l'ouvrage n'a pu être obtenue dans le cadre du projet CAREX. Ce cas d'étude n'est donc pas inclus dans la typologie proposée par Polden (Cf. Annexe 3).

### **6-1-3. Cas 3**

➤ **Objet de l'étude**

Documentation des données mécaniques et environnementales relatives à la construction d'un ouvrage routier avec des MIOM utilisés en remblai.

➤ **Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux**

Cet ouvrage n'a pas été instrumenté. La seule information relative à la réponse de l'ouvrage est la description de son état général. On ne peut donc pas faire d'évaluation de la pertinence des essais de caractérisation initiale du matériau. Cette dernière a pourtant été réalisée de façon relativement complète en intégrant notamment la caractérisation de la solubilisation du matériau (selon une approche réglementaire conforme à la circulaire « mâchefers »), ses caractéristiques géotechniques et de portance, et en particulier son comportement au gel. Il ne s'agit donc pas d'une étude en tant que telle mais de la documentation de la construction d'un ouvrage réel. L'appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage peut être mise en relation avec les caractéristiques géotechniques du matériau et la structure de l'ouvrage.

Aucune sollicitation n'est connue.

➤ **Descriptions réalisées**

- Description de l'ouvrage à travers :
  - dates de production du matériau
  - dates de préparation du matériau
  - dates de mise en oeuvre du matériau

- description de la structure verticale de l'ouvrage
- essais de solubilisation du matériau
- granulométrie du matériau
- caractéristiques géotechniques du matériau
- caractéristiques de portance du matériau
- comportement au gel du matériau
- Description des sollicitations à travers :
  - aucun des points énumérés
  - On a uniquement connaissance de l'existence d'un trafic automobile (ouvrage en service) mais ses caractéristiques ne sont pas fournies.
- Description des réponses à travers :
  - appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage

➤ **Dimensions**

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : non spécifiée
  - Largeur : 3,5 m par voie
  - Surface : non spécifiée
- Volume de matériau en jeu : non spécifié
  - Longueur : non spécifiée
  - Largeur : non spécifiée
  - Epaisseur : non spécifiée

➤ **Apport sur le plan mécanique**

Pour complément d'information, contact a été pris avec le LRPC de Nancy.

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation de MIOM en **remblai** ; il s'agit d'une économie de ressources naturelles grâce aux MIOM pour remonter le niveau de l'ouvrage, c'est à dire rattraper la ligne rouge du projet (surface de l'ouvrage). L'économie sur les matériaux des remblais est substantielle du fait de leur hauteur de 4 à 8 m.

- Description de la structure de l'ouvrage

L'ouvrage est à 2 x 2 voies de 7 m avec un terre plein central de 3 m pour un linéaire voisin de 400 m. Dans le même secteur des remblais en MIOM ont été utilisés au niveau d'échangeurs de part et d'autre de la rocade. Au total 175000 m<sup>3</sup> de mâchefers ont été utilisés. Entre le sol support et le remblai en MIOM, on trouve 50 cm de grave, ce qui permet de compacter aisément la première couche de MIOM. Les MIOM, utilisés en remblais (épaisseur variable de plusieurs mètres) ont été isolés du sol support au moyen d'un géotextile. La structure de chaussée posée sur le remblai est composée d'une couche de forme fondation en grave non traitée d'environ 50 cm d'épaisseur surmontée d'une couche de base de 21 cm de Grave Bitume et d'une couche de roulement de 6 cm de BB.

Cette chaussée est apte à accueillir un trafic poids lourds important, elle a été mise en service en 1998. La structure s'apparente à une classe TC6-PF2 pouvant recevoir entre

4 et 7 millions de Véhicules Poids Lourds sur 20 ans avant l'apparition de dégradations. Soit un trafic journalier compris entre 400 et 800 PL/jour.).

*Il semble au vu de la structure de chaussée et de sa date de construction que peu de dommages de surface aient été observés, même si le trafic est important. A cette profondeur d'usage, les MIOM ne sont pas sollicités par le trafic poids lourds. Aucune remarque concernant la réalisation du terrassement n'est faite, or de la qualité du compactage des MIOM, dépend la qualité du compactage des couches qui les recouvrent et finalement la tenue de la structure de chaussée.*

➤ **Aspect environnemental**

L'aspect environnemental n'a pas été examiné dans le cadre de cette étude, dont l'objectif est limité à la caractérisation du comportement mécanique de l'ouvrage (Cf. Annexe 3).

#### **6-1-4. Cas 4**

➤ **Objet de l'étude**

Documentation des données mécaniques et environnementales relatives à la construction d'un ouvrage routier avec des MIOM utilisés en couche de forme.

➤ **Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux**

Il ne s'agit pas d'une étude en tant que telle mais de la documentation de la construction d'un ouvrage réel. L'ouvrage n'a donc pas été instrumenté. Par contre la description de l'état général de l'ouvrage ainsi que la fourniture des essais de portance en place sont des informations importantes pour l'évaluation de l'ouvrage dans son ensemble et du matériau en place dans sa couche d'emploi. De telles mesures sont à préconiser pour le suivi des ouvrages expérimentaux. Compte tenu de la nature de cette opération, les essais géotechniques sont des essais classiques d'identification et de caractérisation. L'essai de solubilisation pratiqué est celui de la circulaire « mâchefers » et s'inscrit dans une logique réglementaire et non cognitive. L'appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage peut être mise en relation avec les caractéristiques géotechniques du matériau et la structure de l'ouvrage.

La connaissance des sollicitations par le trafic sert à l'interprétation de l'état général de l'ouvrage

➤ **Descriptions réalisées**

- Description de l'ouvrage à travers :
  - dates de mise en oeuvre du matériau
  - description de la structure verticale de l'ouvrage
  - essais de solubilisation du matériau
  - granulométrie du matériau
  - caractéristiques géotechniques du matériau
  - caractéristiques de portance du matériau
  - comportement au gel du matériau
- Description des sollicitations à travers :

- connaissance du trafic automobile ou de son absence
- Description des réponses à travers :
  - appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage

➤ ***Dimensions***

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : non spécifiée
  - Largeur : non spécifiée
  - Surface : non spécifiée
- Volume de matériau en jeu : non spécifié
  - Longueur : non spécifiée
  - Largeur : non spécifiée
  - Epaisseur : 0,40 m

➤ ***Apport sur le plan mécanique***

Pour complément d'information, contact a été pris avec le LRPC de Nancy.

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation de MIOM en **couche de forme** en déblai et parfois en remblai ; il a été utilisé des MIOM pour réaliser les voies d'accès au giratoire et la couche de forme du giratoire. Les MIOM ont été utilisés en couche de forme d'au moins 40 cm d'épaisseur sur des profils en déblai et parfois en remblai. Les MIOM ont probablement amélioré la portance du sol et permis ainsi la circulation des engins et de compacter les graves laitiers qui sont utilisées dans cet ouvrage en couche de fondation et de base.

- Description de la structure de l'ouvrage

L'ouvrage se situe en milieu péri-urbain dans une zone où les tracés sont sinueux avec des carrefours à feux. De par son tracé, ce n'est pas un itinéraire adapté aux Poids Lourds. La structure de chaussée est constituée de 4cm de BB surmontant 22 cm de Grave Laitier en couche de base et 20 cm de Grave Laitier en couche de fondation, cette structure étant posée sur au moins 40 cm de MIOM.

Cette chaussée est apte à accueillir un trafic poids lourds soutenu, elle a été mise en service en 1994. La structure s'apparente à une classe TC5-PF2 pouvant recevoir entre 2 et 3 millions de Véhicules Poids Lourds sur 20 ans avant l'apparition de dégradations. Soit un trafic journalier compris entre 200 et 300 PL/jour.

*Cette structure a reçu un fort trafic PL immédiatement après sa mise en service. Suite à la construction de nouveaux itinéraires à proximité de ce site, le trafic Poids lourds a diminué sur les chaussées menant au giratoire. Depuis la mise en œuvre (1994) de la chaussée, aucun problème d'ordre structurel majeur n'est à déplorer.*

➤ ***Aspect environnemental***

L'aspect environnemental n'a pas été examiné dans le cadre de cette étude, dont l'objectif est limité à la caractérisation du comportement mécanique de l'ouvrage (Cf. Annexe 3).

### 6-1-5. Cas 5

➤ **Objet de l'étude**

Explication du comportement mécanique et environnemental d'un ouvrage réalisé avec des MIOM utilisés en couche de fondation.

➤ **Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux**

Les réponses de l'ouvrage ont été analysées sous l'angle de mesures de déflexion, renseignant sur le comportement mécanique général de l'ouvrage sous trafic, et sous l'angle de la l'évolution de la qualité des percolats générés. Une appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage complète cette analyse des réponses. Du point de vue de la caractérisation initiale, des points tels que la masse de matériau en jeu, la composition chimique du matériau, sa minéralogie, les essais de solubilisation (en l'occurrence un essai à vocation plus opérationnelle que cognitive : X31-210<sup>1</sup>) et la perméabilité du matériau compacté, sont des éléments importants d'interprétation du relargage en place. Les essais géotechniques sont des essais classiques d'identification et de caractérisation. L'appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage peut être mise en relation avec les caractéristiques géotechniques du matériau et la structure de l'ouvrage. Aucune sollicitation n'est connue.

➤ **Descriptions réalisées**

- Description de l'ouvrage à travers :
  - dates de production du matériau
  - dates de préparation du matériau
  - dates de mise en oeuvre du matériau
  - description de la structure verticale de l'ouvrage
  - dimensions de l'ouvrage
  - masse de matériau en jeu
  - composition chimique du matériau
  - minéralogie du matériau
  - essais de solubilisation du matériau
  - granulométrie du matériau
  - caractéristiques géotechniques du matériau
  - caractéristiques de portance du matériau
  - perméabilité du matériau compacté
- Description des sollicitations à travers :
  - connaissance des précipitations
  - On a connaissance de l'existence d'un trafic automobile (ouvrage en service) mais ses caractéristiques ne sont pas fournies
- Description des réponses à travers :
  - appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage
  - mesures de déflexion
  - suivi de la qualité des eaux de percolation

---

<sup>1</sup> Voir remarque sur la vocation de cet essai (§ *Analyse de la pertinence des essais de caractérisation initiale...*)

➤ **Dimensions**

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : 60 m
  - Largeur : 6,5 m
  - Surface : 390 m<sup>2</sup>
- Volume de matériau en jeu : 23,40 m<sup>3</sup>
  - Longueur : 18 m
  - Largeur : 6,5 m
  - Epaisseur : 0,20 m

➤ **Interprétation sur le plan mécanique**

Pour complément d'information, contact a été pris avec le Centre Technique Départemental de Corrèze.

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation de MIOM en **couche de forme** ; le sol support est issu d'une roche gneissique arénisée donc plutôt de nature sableuse argileuse, en tout cas sensible à l'eau et peu propice à développer une portance. Les MIOM (25 cm) ont été utilisés comme couche de forme, pour obtenir une plate-forme permettant de compacter aisément la grave non traitée.

- Description de la structure de l'ouvrage

La structure de chaussée expérimentale est très courte (40 m de long environ) , elle est située sur la D166 entre Neuvic et la Tronche. La structure de chaussée est constituée de 30 cm de GNT recouverts d'un enduit tri couche. La couche de 25 cm de MIOM peut à la limite être considérée comme une couche de fondation si une circulation de Poids Lourds même minime vient à y passer.

Cette chaussée est apte à accueillir un très faible trafic poids lourds, elle a été mise en service en 2000. Elle est classée suivant les chaussées à faible trafic. Cette structure s'apparente à une classe inférieure à TC2, pouvant recevoir moins de 100 000 Véhicules Poids Lourds avant l'apparition de dégradations après 20 ans de service. Soit un trafic journalier compris entre 0 et 50 PL/jour.

*Au vu de la structure s'il y avait une circulation de Poids lourds importante, on pourrait craindre de l'orniérage. Il s'agit d'une chaussée à faible trafic avec des MIOM relativement exposés à l'eau d'infiltration du fait de leur position assez haute dans la structure. L'enduit n'empêche pas l'eau de s'infiltrer à travers la grave jusqu'aux MIOM, ce qui conduit à une percolation d'eau à travers les MIOM. Les eaux circulant à travers les MIOM sont récupérées.*

*Actuellement la structure reçoit environ 40 Poids Lourds par jour. Cinq ans après sa mise en service, la chaussée de la RD 166 ne présente pas de problèmes particuliers.*

➤ **Aspect environnemental**

Cas s'inscrivant dans le type « Emission de polluants au cours d'une exposition de durée courte » de la typologie proposée par Polden (Cf. Annexe 3).

Le volet environnemental a été appréhendé à travers :

- la caractérisation minéralogique et physico-chimique approfondie du mâchefer, afin de mettre en évidence l'origine et le mode de formation de ses principaux constituants ;

- la mise en œuvre et le suivi d'une chaussée expérimentale, afin d'établir un lien entre l'évolution minéralogique du matériau et son comportement environnemental. Les moyens mis en œuvre dans le cadre de cette étude permettent une meilleure compréhension des principaux mécanismes responsables de l'évolution du mâchefer mais ne permettent pas de prévoir leur impact lors d'une utilisation en techniques routières ni l'extrapolation à long terme des résultats obtenus.

### **6-1-6. Cas 6**

#### ➤ **Objet de l'étude**

Suivi du comportement mécanique et environnemental de MIOM utilisés en couche de forme.

#### ➤ **Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux**

Les réponses de l'ouvrage ont été analysées sous l'angle de la description de l'état général de l'ouvrage et des essais de portance en place. L'instrumentation de l'ouvrage permet le suivi de la quantité et de la qualité de percolats produits. Du point de vue de la caractérisation initiale, des points tels que la masse de matériau en jeu, les essais de solubilisation (en l'occurrence un essai à vocation plus opérationnelle que cognitive : X31-210<sup>2</sup>) et la perméabilité du matériau compacté, sont des éléments importants d'interprétation du relargage en place. L'enregistrement des volumes de percolats permet de calculer les flux de matière générés. Les essais géotechniques sont des essais classiques d'identification et de caractérisation dont les résultats peuvent donc être aisément reliés aux caractéristiques de portance en place. L'appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage peut être mise en relation avec les caractéristiques géotechniques du matériau et la structure de l'ouvrage.

Aucune sollicitation n'est connue.

#### ➤ **Descriptions réalisées**

- Description de l'ouvrage à travers :
  - description de la structure verticale de l'ouvrage
  - masse de matériau en jeu
  - essais de solubilisation du matériau
  - granulométrie du matériau
  - caractéristiques géotechniques du matériau
  - caractéristiques de portance du matériau
  - perméabilité du matériau compacté
- Description des sollicitations à travers :
  - aucun des points énumérés
  - On a uniquement connaissance de l'existence d'un trafic automobile (ouvrage en service) mais ses caractéristiques ne sont pas fournies.
- Description des réponses à travers :

---

<sup>2</sup> Voir remarque sur la vocation de cet essai (§ *Analyse de la pertinence des essais de caractérisation initiale...*)

- appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage
- essais de portance en place
- suivi de la qualité des eaux de percolation
- suivi des volumes d'eaux de percolation

➤ ***Dimensions***

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : non spécifiée
  - Largeur : non spécifiée
  - Surface : non spécifiée
- Volume de matériau en jeu : 300 m<sup>3</sup>
  - Longueur : non spécifiée
  - Largeur : non spécifiée
  - Epaisseur : 0,30 m (axe) ; 0,44 m (rive)

➤ ***Apport sur le plan mécanique***

Pour complément d'information, contact a été pris avec le LRPC.

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation de MIOM en **couche de forme** ; les MIOM ont été rapportés sur un sol qui devait présenter une faible portance. On peut penser que la couche de MIOM (de 40 cm d'épaisseur en moyenne) apporte un supplément en portance, permettant de compacter aisément la première couche de chaussée (couche de fondation) en grave bitume.

- Description de la structure de l'ouvrage

L'ouvrage est une route desservant une zone industrielle avec 4 voies de circulation, sur une longueur d'environ 1 km. La structure de chaussée présente des épaisseurs importantes de matériaux traités (35 cm de Grave Bitume + 5 cm de BB).

Cette chaussée est apte à accueillir un trafic poids lourds important, elle a été mise en service en 1997. Cette structure s'apparente à une classe TC7-PF2 pouvant recevoir entre 8 et 18 millions de Véhicules Poids Lourds sur 20 ans avant l'apparition de dégradations. Soit un trafic journalier compris entre 1000 et 2000 PL/jour.

*Cette chaussée est très épaisse, ce qui est de nature à limiter le travail mécanique des MIOM au passage des véhicules lourds. Au vu des épaisseurs de GB, des désordres d'ordre structurel repérés par des dégradations en surface susceptibles de modifier la perméabilité de l'ouvrage (fissures) sont peu probables.*

➤ ***Aspect environnemental***

Cas s'inscrivant dans le type « Emission de polluants au cours d'une exposition de durée courte » de la typologie proposée par Polden (Cf. Annexe 3).

Les données environnementales fournies dans cette étude sont :

- le « potentiel polluant » déterminé selon l'essai X31-210 de différents lots de mâchefers avant leur utilisation pour les positionner au regard de la circulaire du 9 mai 1994,
- la masse cumulée d'éléments potentiellement polluants relarguée pendant les 11 mois de suivi d'un ouvrage.

Les données disponibles concernant le suivi de cet ouvrage ne permettent pas d'évaluer la qualité des eaux de percolation de l'ouvrage.

### **6-1-7. Cas 7**

#### ➤ **Objet de l'étude**

Etude du comportement (uniquement mécanique) d'un laitier utilisé en couche de forme dans un ouvrage, lors de cycles hydriques gel-dégel.

#### ➤ **Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux**

Cette étude, à vocation uniquement mécanique, n'a pas entraîné d'instrumentation de l'ouvrage. Les réponses mécaniques de ce dernier sont décrites à travers l'appréciation de son état général, des essais de portance en place et de mesures de déflexion sur l'ouvrage fini. Du point de vue de la caractérisation initiale, les essais pratiqués sont les essais géotechniques classiques d'identification et caractérisation. Leurs résultats peuvent donc être aisément reliés aux caractéristiques en place (portance et déflexion). Compte tenu du contexte climatique d'utilisation des matériaux, les essais de description du comportement au gel et de perméabilité sont tout à fait pertinents. L'appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage peut être mise en relation avec les caractéristiques géotechniques du matériau et la structure de l'ouvrage.

La connaissance des précipitations et des températures sert à l'interprétation du comportement de l'ouvrage (déflexion).

#### ➤ **Descriptions réalisées**

- Description de l'ouvrage, à travers :
  - description de la structure verticale de l'ouvrage
  - granulométrie du matériau
  - caractéristiques géotechniques du matériau
  - caractéristiques de portance du matériau
  - comportement au gel du matériau
  - perméabilité du matériau compacté
- Description des sollicitations, à travers :
  - connaissance des précipitations
  - On a connaissance de l'existence d'un trafic automobile (ouvrage en service) mais ses caractéristiques ne sont pas fournies
  - connaissance des températures atmosphériques
- Description des réponses, à travers :
  - appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage
  - essais de portance en place
  - mesures de déflexion

#### ➤ **Dimensions**

- Dimensions de l'ouvrage :

- Longueur : 50 m
- Largeur : non spécifiée
- Surface : non spécifiée
- Volume de matériau en jeu : non spécifié
  - Longueur : non spécifiée
  - Largeur : non spécifiée
  - Epaisseur : non spécifiée

➤ ***Apport sur le plan mécanique***

Pour complément d'information, contact a été pris avec la Subdivision UGINE et le CETE de Lyon.

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation de laitiers en **couche de fondation** ; des scories de laitiers issues de la fonderie de matériaux INOX d'UGINE ont été utilisées en couche de forme dans une zone en léger remblai entre Crest-Voland et le col des Saisies, sur une épaisseur d'environ 70 cm. Cette couche de forme a été mise en œuvre à des fins expérimentales, pour évaluer son aptitude au compactage, sa tenue aux cycles gel-dégel et son apport visant à améliorer la plateforme.

- Description de la structure de l'ouvrage

La chaussée expérimentale de 100 m de long environ est constituée de 60 à 70 cm de laitiers posés sur un géotextile, surmontés de BB.

N'ayant aucune indication sur les performances mécaniques de ces laitiers, en considérant qu'ils sont au moins équivalents à une bonne grave non traitée, cette structure pourrait recevoir entre 1,5 et 2,5 millions de véhicules poids lourds sur 20 ans avant l'apparition de dégradations. Soit un trafic journalier compris entre 150 et 250 PL/jour.

*La chaussée a été construite en 2000. Actuellement, aucun problème en ce qui concerne l'utilisation de ce matériau n'a été relevé. La route présente un bon comportement à ce jour après 5 ans d'utilisation où elle a reçu une circulation de camions de grumes et de cars menant aux stations de sport d'hiver ainsi que subi plusieurs cycles de gel-dégel. L'ouvrage est construit (au niveau du terrain naturel) sur un sol support de moyenne qualité (moraines argileuses). Un drainage a été effectué en amont de l'ouvrage pour éviter le lessivage des laitiers. On note également que ces laitiers avaient un prix de vente proche de celui pratiqué pour des matériaux issus de carrière, l'utilité de l'emploi de ces laitiers n'est pas complètement prouvée.*

➤ ***Aspect environnemental***

L'aspect environnemental n'a pas été examiné dans le cadre de cette étude, dont l'objectif est limité à la caractérisation du comportement mécanique de l'ouvrage. Ce cas d'étude n'est donc pas inclus dans la typologie proposée par Polden (Cf. Annexe 3).

### 6-1-8. Cas 8

➤ **Objet de l'étude**

Caractérisation de l'état physique et chimique de MIOM utilisés en couche de fondation après 20 ans de service et de leur impact sur le sol sous-jacent.

➤ **Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux**

Cette étude, à vocation de diagnostic à moyen terme d'un ouvrage en service n'a pas entraîné d'instrumentation. Les réponses de l'ouvrage ont été décrites à travers l'appréciation de son état général, des mesures de déflexion, et la reconnaissance de la qualité du sol sous-jacent. La qualité du sol avoisinant a été reconnue pour servir d'état de référence dans l'évaluation de l'effet sur le sol sous-jacent. Concernant la caractérisation des matériaux on ne peut pas parler ici de caractérisation initiale car aucun document ne subsiste de la construction (années 70). En relation avec l'appréciation des effets sur le sol sous-jacent, la caractérisation du matériau à la date du diagnostic a porté sur la masse en jeu et les essais de solubilisation (en l'occurrence l'essai X31-210<sup>3</sup>). Les essais classiques d'identification géotechnique et les caractéristiques de portance, aussi ré-effectués à l'occasion du diagnostic peuvent être mis en relation avec les mesures de déflexion et l'état général de l'ouvrage. L'appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage peut être mise en relation avec les caractéristiques géotechniques du matériau et la structure de l'ouvrage.

Il faut souligner que le trafic et de l'absence de nappe phréatique aident à l'interprétation des réponses.

➤ **Descriptions réalisées**

- Description de l'ouvrage à travers :
  - dates de production du matériau
  - dates de mise en oeuvre du matériau
  - description de la structure verticale de l'ouvrage
  - dimensions de l'ouvrage
  - masse de matériau en jeu
  - composition chimique du matériau
  - essais de solubilisation du matériau
  - granulométrie du matériau
  - caractéristiques géotechniques du matériau
  - caractéristiques de portance du matériau
- Description des sollicitations à travers :
  - connaissance de l'existence ou de l'absence d'une nappe phréatique
  - connaissance du trafic automobile ou de son absence
- Description des réponses à travers :
  - appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage
  - mesures de déflexion
  - connaissance de l'état (qualité) des sols sous-jacents

---

<sup>3</sup> Voir remarque sur la vocation de cet essai (§ *Analyse de la pertinence des essais de caractérisation initiale...*)

- connaissance de l'état (qualité) des sols avoisinants

➤ ***Dimensions***

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : 430 m
  - Largeur : 10 m
  - Surface : 4 300 m<sup>2</sup>
- Volume de matériau en jeu : non spécifié
  - Longueur : non spécifiée
  - Largeur : non spécifiée
  - Epaisseur : 0,25 m

➤ ***Apport sur le plan mécanique***

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation de MIOM en **couche de forme** dans laquelle il s'agissait d'une amélioration grâce à des purges (remplacement de zones de sol support impropre au compactage) ; les MIOM ont été utilisés ici comme couche de forme (sur une épaisseur moyenne de 25 cm), en cherchant à améliorer la portance de la plate-forme autant qu'un matériau naturellement frottant aurait pu le faire. Aucun problème de mise en place de la couche recouvrant les MIOM n'a été soulevé, ce qui valide son utilité mécanique.

- Description de la structure de l'ouvrage

On note dans cet ouvrage, au dessus des MIOM, une couche de sable de 3 cm d'épaisseur sans véritable utilité mécanique, surmontée d'une grave non traitée de 15 cm et de 17 cm de BB.

Cette chaussée est apte à accueillir un trafic de poids lourds trafic de type moyen à faible. Cette structure s'apparente à celle d'une chaussée pouvant recevoir entre 0,5 et 1 million de Véhicules Poids Lourds sur 20 ans avant l'apparition de dégradations, soit un trafic journalier compris entre 50 et 100 PL/jour.

*La chaussée a été mise en service en 1978. Actuellement, aucun problème en ce qui concerne l'utilisation de ce matériau n'a été relevé. La chaussée présente un bon comportement à ce jour après 26 ans d'utilisation.*

➤ ***Aspect environnemental***

Cas s'inscrivant dans le type « Diagnostic historique » de la typologie proposée par Polden (Cf. Annexe 3).

Les caractéristiques des MIOM au regard de l'essai X31-210 sont relativement proches de celles de mâchefers non exposés. L'analyse des teneurs en métaux dans le sol sous-jacent met en évidence des teneurs proches de celles du sol témoin à l'exception des sulfates, du chrome et du zinc pour lesquels on observe un enrichissement notable du sol sous-jacent.

### 6-1-9. Cas 9

➤ **Objet de l'étude**

Caractérisation du relargage de MIOM utilisés en couche de forme dans un ouvrage expérimental.

➤ **Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux**

Cette étude uniquement à vocation de démonstration environnementale, décrit la réponse seulement au travers du suivi de la qualité et des volumes de percolats générés. Ces réponses permettent d'accéder à la connaissance des flux de matière. Cette réponse est mise en relation avec la masse de matériau en jeu et les résultats d'essais de solubilisation (en l'occurrence l'essai X31-210<sup>4</sup>).

Aucune sollicitation n'est connue.

➤ **Descriptions réalisées**

- Description de l'ouvrage à travers :
  - dates de production du matériau
  - dates de préparation du matériau
  - dates de mise en oeuvre du matériau
  - description de la structure verticale de l'ouvrage
  - dimensions de l'ouvrage
  - masse de matériau en jeu
  - composition chimique du matériau
  - essais de solubilisation du matériau
- Description des sollicitations à travers :
  - aucun des points énumérés
  - On a uniquement connaissance de l'existence d'un trafic automobile (ouvrage en service) mais ses caractéristiques ne sont pas fournies.
- Description des réponses à travers :
  - suivi de la qualité des eaux de percolation
  - suivi des volumes d'eaux de percolation

➤ **Dimensions**

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : 180 m
  - Largeur : 4 m
  - Surface : 720 m<sup>2</sup>
- Volume de matériau en jeu : 56 m<sup>3</sup> (« plot » A) ; 140 m<sup>3</sup> (« plot » B)
  - Longueur : 40 m (« plot » A) ; 100 m (« plot » B)
  - Largeur : 4 m (« plot » A) ; 4 m (« plot » B)
  - Epaisseur : 0,35 m (« plot » A) ; 0,35 m (« plot » B)

---

<sup>4</sup> Voir remarque sur la vocation de cet essai (§ *Analyse de la pertinence des essais de caractérisation initiale...*)

➤ ***Apport sur le plan mécanique***

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation de MIOM en **couche de forme-fondation** ; les MIOM ont été utilisés ici sur 35 cm d'épaisseur environ, posés sur un sol constitué de limons de Saône avec un film étanche de séparation. Ils doivent permettre le compactage de la couche supérieure en Grave Non Traitée. Trois plots de 40 m, 40 m et 100 m de long ont été réalisés en 1992.

- Description de la structure de l'ouvrage

Les structures de chaussée sont constituées de 10 cm de BB sur 25 cm de Grave non traitée. Les plots A et C sont décrits avec une couche de fondation en MIOM de 35 cm d'épaisseur. Pour comparaison, la couche correspondante du plot B est constituée de 35 cm de GNT.

Ces structures pourraient recevoir entre 0,5 et 1 million de Véhicules Poids Lourds sur 20 ans avant l'apparition de dégradations. Soit un trafic journalier compris entre 50 et 100 PL/jour.

*Peu de véhicules lourds ont circulé sur ces planches, il n'y a pas de dommages à ce jour. Puisque les plots A et C ont une tenue au trafic semblable au plot B, on peut estimer que les MIOM ont remplacé avantageusement la GNT. Cependant pour un faible trafic PL, les 10 cm BB + 25 cm GNT posés sur un sol de qualité moyenne doivent être suffisants. Les MIOM ont en fait plus un rôle de **couche de forme**.*

➤ ***Aspect environnemental***

Cas s'inscrivant dans le type « Emission de polluants au cours d'une exposition de durée courte » de la typologie proposée par Polden (Cf. Annexe 3).

Les essais X31-210 ont permis de déterminer le « potentiel polluant » au regard de la circulaire du 9 mai 1994. En revanche, l'absence de données sur l'évolution des concentrations et du pH ne permet pas de caractériser le comportement environnemental des MIOM, mais seulement de quantifier le relargage de l'ouvrage en quelques éléments au cours d'une période correspondant à 677 jours d'exposition.

## ***6-1-10. Cas 10***

➤ ***Objet de l'étude***

Caractérisation du relargage de MIOM utilisés en couche de base dans un ouvrage expérimental.

➤ ***Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux***

Cette étude uniquement à vocation environnementale, décrit la réponse seulement au travers du suivi de la qualité des percolats. Cette réponse est mise en relation avec les essais de solubilisation (en l'occurrence l'essai X31-210<sup>5</sup>) et la masse de matériau en jeu. En terme de réponse de l'ouvrage, son état général est apprécié de façon visuelle, mais la corrélation avec les caractéristiques géotechniques n'est pas possible faute de données.

---

<sup>5</sup> Voir remarque sur la vocation de cet essai (§ *Analyse de la pertinence des essais de caractérisation initiale...*)

L'appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage peut être mise en relation avec la structure de l'ouvrage.

Aucune sollicitation n'est connue.

➤ ***Descriptions réalisées***

- Description de l'ouvrage à travers :
  - dates de préparation du matériau
  - dates de mise en oeuvre du matériau
  - description de la structure verticale de l'ouvrage
  - dimensions de l'ouvrage
  - masse de matériau en jeu
  - essais de solubilisation du matériau
- Description des sollicitations à travers :
  - aucun des points énumérés
  - On a uniquement connaissance de l'existence d'un trafic automobile (ouvrage en service) mais ses caractéristiques ne sont pas fournies.
- Description des réponses à travers :
  - appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage
  - suivi de la qualité des eaux de percolation

➤ ***Dimensions***

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : 12 m
  - Largeur : 8 m
  - Surface : 96 m<sup>2</sup>
- Volume de matériau en jeu : 28 m<sup>3</sup>
  - Longueur : 12 m
  - Largeur : 8 m
  - Epaisseur : 0,29 m

➤ ***Apport sur le plan mécanique***

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation de MIOM traités en **couche de base** : ici, les MIOM sont employés dans la structure même de chaussée et reprennent les sollicitations appliquées par les poids lourds lorsqu'il y a une circulation de PL. L'ouvrage se trouve en site urbain avec vraisemblablement peu de circulation de Poids Lourds. Dans ce cas, il semble que le sol soit bon puisqu'il a été possible de compacter les couches de chaussées. Dans les 4 planches, on trouve une planche de référence en grave ciment qui sert de comparaison avec les MIOM traités au ciment.

- Description de la structure de l'ouvrage

Il s'agit de 4 plots de 12 m x 8 m mis en œuvre en 1994. Les 4 planches comprennent des géotextiles et géomembranes sur le sol support. Les épaisseurs d'emploi des MIOM traités ou non sont importantes (29 cm), ils sont surmontés de 6 cm de BB dense ou drainant. Les MIOM sont sollicités par le trafic puisqu'ils ne sont qu'à 6 cm sous la roue

des véhicules. On peut craindre avec le temps une perte de rigidité mécanique des MIOM traités au ciment du fait de leur décohesion, cela a déjà été constaté sur d'autres chantiers. Par ailleurs le type d'interface entre les couches de roulement (enrobés drainant ou enrobé dense) et les couches de base traitées au ciment (pour toutes les planches) est très sensible aux effets du trafic (notamment les PL), un décollement généralisé serait attendu en cas de circulation de PL soutenue.

Les planches réalisées sont de petites dimensions, et cette chaussée est apte à accueillir un trafic de poids lourds faible, elle a été mise en service en 1994. Cette structure pourrait recevoir entre 0,5 et 1 million de Véhicules Poids Lourds sur 20 ans avant l'apparition de dégradations. Soit un trafic journalier compris entre 50 et 100 PL/jour.

*Il aurait été souhaitable d'avoir un suivi de l'ouvrage à différentes dates pour évaluer une probable décohesion des mâchefers traités au ciment ou la venue de décollements entre le BB et la couche de base sous trafic. Après 11 ans de service, un carottage dans chaque planche, suivi d'un essai mécanique, pourrait apporter de précieux renseignements si il était disponible. Actuellement, aucun problème en ce qui concerne l'utilisation de ces matériaux en couche de base n'est à déplorer. La route présente un bon comportement à moyen terme.*

➤ **Aspect environnemental**

Cas s'inscrivant dans le type « Emission de polluants au cours d'une exposition de durée courte » de la typologie proposée par Polden (Cf. Annexe 3).

Les résultats exploitables des essais X31-210 indiquent que les MIOM mis en place ne respectaient pas les seuils V de la circulaire du 9 mai 1994 (seuil de la catégorie S dépassé pour le cadmium).

Concernant l'ouvrage, il est intéressant de signaler qu'un plot témoin (grave traditionnelle sans MIOM) a également été mise en œuvre dans le cadre de cette étude.

L'analyse des eaux de percolation a uniquement porté sur les paramètres MES, DCO, Fe, Cd, Pb, choix peu pertinent, dont les résultats de suivi ne permettent pas de conclure quant à l'impact de l'ajout de MIOM traité (à 5 % de ciment) dans la structure de chaussée sur la qualité des eaux de percolation.

## **6-1-11. Cas 11**

➤ **Objet de l'étude**

Suivi mécanique et environnemental (eaux de percolation et sols) d'un ouvrage expérimental utilisant de MIOM en couche de fondation et suivi des MIOM eux-mêmes.

➤ **Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux**

Cette étude, à vocation mécanique et environnementale, décrit la réponse de l'ouvrage à travers la reconnaissance de la qualité du sol sous-jacent, le suivi de la qualité des eaux de percolation, les essais de portance en place et une appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage. L'état du sol sous-jacent peut partiellement être interprété en s'appuyant sur la qualité des percolats (les volumes générés n'étant pas connus). La qualité des percolats peut elle-même être mise en relation du point de vue de la caractérisation initiale avec la

masse de matériau en jeu et les essais de solubilisation (en l'occurrence X31-210<sup>6</sup>). Les essais classiques d'identification et de caractérisation géotechnique peuvent aisément être reliés aux caractéristiques de portance en place. L'appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage peut être mise en relation avec les caractéristiques géotechniques du matériau et la structure de l'ouvrage.

En terme de connaissance des sollicitations, celle du trafic sert à l'interprétation de l'état général de l'ouvrage.

➤ ***Descriptions réalisées***

- Description de l'ouvrage à travers :
  - dates de production du matériau
  - dates de préparation du matériau
  - dates de mise en oeuvre du matériau
  - description de la structure verticale de l'ouvrage
  - masse de matériau en jeu
  - essais de solubilisation du matériau
  - granulométrie du matériau
  - caractéristiques géotechniques du matériau
  - caractéristiques de portance du matériau
- Description des sollicitations à travers :
  - connaissance du trafic automobile ou de son absence
- Description des réponses à travers :
  - appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage
  - essais de portance en place
  - suivi de la qualité des eaux de percolation
  - connaissance de l'état (qualité) des sols sous-jacents

➤ ***Dimensions***

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : non spécifiée
  - Largeur : non spécifiée
  - Surface : 1 800 m<sup>2</sup>
- Volume de matériau en jeu : 592,5 m<sup>3</sup>
  - Longueur : non spécifiée
  - Largeur : non spécifiée
  - Epaisseur : 0,30 m

➤ ***Apport sur le plan mécanique***

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation de MIOM en **couche de forme-fondation** ; la couche de MIOM (30 cm) est utilisée en couche de forme-fondation. L'ouvrage reçoit une circulation de PL de par l'existence de l'usine d'incinération. Les 15cm de GRH en couche de base sont

---

<sup>6</sup> Voir remarque sur la vocation de cet essai (§ *Analyse de la pertinence des essais de caractérisation initiale...*)

habituellement insuffisants, donc les MIOM situés juste en dessous en couche de fondation ont un apport structurant pour la chaussée.

- **Description de la structure de l'ouvrage**

La structure de chaussée comprend 30 cm de MIOM + 15 cm de GRH +10 cm de béton bitumineux.

Cette chaussée est apte à accueillir un trafic de poids lourds faible, elle a été mise en service en 1994. Cette structure pourrait recevoir entre 0,5 et 1 million de Véhicules Poids Lourds sur 20 ans avant l'apparition de dégradations. Soit un trafic journalier compris entre 50 et 100 PL/jour.

*La chaussée a été mise en service en 1994-1995. Si le nombre cumulé de poids lourds devenait trop important on pourrait voir apparaître des fissures et de l'orniérage à moyen terme. Durant les 18 mois de service, la chaussée expérimentale de l'usine d'incinération de Briec n'a pas subi de désordres particuliers.*

➤ **Aspect environnemental**

Cas s'inscrivant dans le type « Emission de polluants au cours d'une exposition de durée courte » de la typologie proposée par Polden (Cf. Annexe 3).

Dans le cadre de cette étude des analyses et essais ont été effectués sur les mâchefers, sur les eaux de percolation et sur les sols sous-jacents.

Les résultats de l'essai X31-210 mené sur différents lots de MIOM montrent qu'ils sont conformes aux seuils V de la circulaire mâchefers depuis la production jusqu'à leur mise en œuvre (après 3 mois de maturation). Au cours de l'exposition (à 3 mois et à 18 mois) on observe une augmentation des sulfates lixiviables dans les conditions de l'essai X31-210.

Le suivi des eaux de percolation au cours des 18 mois (4 prélèvements seulement) montre que les concentrations sont faibles comparées aux seuils « eaux potables » d'une part et aux normes de rejets d'eau des plate-formes de maturation dans le milieu naturel d'autre part. Toutefois, des incertitudes pèsent sur l'efficacité le dispositif de collecte de ces eaux.

Enfin la détermination de la teneur en métaux et du potentiel polluant (X31-210) du sol sous-jacent avant et après exposition montrent que les teneurs en Cu, Pb, Zn sont augmentées de manière importante suite à l'exposition mais sans accroissement du potentiel polluant pour ces éléments. Seul le relargage des sulfates, des chlorures et le pH augmentent. Néanmoins, les auteurs estiment que l'exploitation de ces résultats est hasardeuse pour des raisons liées à l'échantillonnage : la limite entre la couche de mâchefers et le sol étant difficile à faire, ils estiment qu'il est difficile de savoir si le sol ne contient pas de MIOM.

## **6-1-12. Cas 12**

➤ **Objet de l'étude**

Suivi du relargage d'un ouvrage expérimental réalisé avec des MIOM et des MIDIS en couche de fondation.

➤ **Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux**

Cette étude, à finalité environnementale, décrit la réponse de l'ouvrage à travers des essais de portance en place et le suivi des volumes et de la qualité des percolats. Ces deux dernières réponses permettent de calculer les flux de matière générés. Ils peuvent être mis

en relation avec la caractérisation des matériaux en termes de masse en jeu et d'essais de solubilisation (en l'occurrence X31-210<sup>7</sup>). La portance en place peut elle être mise en relation avec les essais géotechniques classiques d'identification et caractérisation et les caractéristiques de portance évaluées en laboratoire.

La connaissance des précipitations sert à l'interprétation de l'évolution des flux de matière.

➤ *Descriptions réalisées*

- Description de l'ouvrage à travers :
  - dates de préparation du matériau
  - dates de mise en oeuvre du matériau
  - description de la structure verticale de l'ouvrage
  - dimensions de l'ouvrage
  - masse de matériau en jeu
  - essais de solubilisation du matériau
  - granulométrie du matériau
  - caractéristiques géotechniques du matériau
  - caractéristiques de portance du matériau
- Description des sollicitations à travers :
  - connaissance des précipitations
  - connaissance de l'existence d'un trafic automobile (ouvrage en service) mais dont les caractéristiques ne sont pas fournies
- Description des réponses à travers :
  - essais de portance en place
  - suivi de la qualité des eaux de percolation
  - suivi des volumes d'eaux de percolation

➤ *Dimensions*

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : 60 m
  - Largeur : 3,5 m
  - Surface : 210 m<sup>2</sup>
- Volume de matériau en jeu : 56,7 m<sup>3</sup>
  - Longueur : 60 m
  - Largeur : 3,5 m
  - Epaisseur : 0,27 m

➤ *Apport sur le plan mécanique*

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation de MIOM en couche de **forme-fondation** ; les MIOM sont utilisés en couche de forme-fondation (structurant pour la chaussée) sur un accès à une décharge. Habituellement 20cm de GNT + 7 cm de Béton Bitumineux sont insuffisants pour recevoir un trafic Poids Lourd moyen.

---

<sup>7</sup> Voir remarque sur la vocation de cet essai (§ *Analyse de la pertinence des essais de caractérisation initiale...*)

- Description de la structure de l'ouvrage

En considérant que les 27 cm de MIOM ont une qualité proche de la GNT, c'est une structure qui peut recevoir un trafic compris entre 0,5 et 1 million de Véhicules Poids Lourds sur 20 ans avant l'apparition de dégradations. Soit un trafic journalier compris entre 50 et 100 PL/jour.

*L'ouvrage a été construit en 1995-1996. Bien que pouvant recevoir un trafic TC2, un risque d'orniérage et de fissuration existe de par la faible épaisseur de la couche de roulement posée sur des matériaux non liés si le trafic PL devenait plus important. D'autre part, les MIOM en place doivent avoir de bonnes caractéristiques mécaniques pour bien jouer leur rôle de couche de fondation.*

➤ ***Aspect environnemental***

Cas s'inscrivant dans le type « Comportement à la lixiviation en scénario » de la typologie proposée par Polden (Cf. Annexe 3).

L'étude du comportement environnemental s'est appuyée sur trois outils :

- chaussées expérimentales représentant la valorisation en milieu réel,
- lysimètres permettant de tester différentes conditions de valorisation,
- extractions séquentielles permettant de déterminer les conditions qui influencent le relargage.

De plus, l'essai X31-210 a été réalisé pour comparaison des mâchefers entre eux (caractéristiques très différentes) et pour les positionner par rapport aux seuils de la circulaire mâchefer (mâchefers V).

Les extractions séquentielles ayant été effectuées sur des échantillons broyés et séchés (donc carbonatés) les résultats sont difficilement exploitables. Les auteurs observent des limites importantes en termes de reproductibilité et de répétabilité des essais.

La durée du suivi des lysimètres est trop limitée pour conclure.

L'absence de données sur la pluviométrie, les volumes recueillis ou le taux d'infiltration rend l'interprétation hasardeuse (pas connaissance des flux). Toutefois, le suivi a permis aux auteurs de mettre en évidence

- la très nette influence de la phase chantier pour laquelle des concentrations très importantes sont observées ;
- le caractère discriminant de l'expérimentation « ouvrage » par rapport à l'essai X31-210 : « il est intéressant de remarquer que deux mâchefers donnant des concentrations semblables en un élément donné avec l'essai X31-210 peuvent relarguer différemment ce même élément lorsqu'ils sont placés dans des conditions réelles ».

### **6-1-13. Cas 13**

➤ ***Objet de l'étude***

Caractérisation de l'état physique et chimique de MIOM utilisés en couche de fondation après plus de 20 ans de service et de leur impact sur le sol sous-jacent.

➤ ***Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux***

Cette étude à vocation de diagnostic à moyen terme d'un ouvrage en service n'a pas entraîné d'instrumentation. Les réponses de l'ouvrage ont été décrites à travers

l'appréciation de son état général, des mesures de déflexion, et la reconnaissance de la qualité du sol sous-jacent. La qualité du sol avoisinant a été reconnue pour servir d'état de référence dans l'évaluation de l'effet sur le sol sous-jacent. Concernant la caractérisation des matériaux on ne peut pas parler ici de caractérisation initiale car aucun document ne subsiste de la construction (années 70). En relation avec l'appréciation des effets sur le sol sous-jacent, a caractérisation du matériau à la date du diagnostic, a porté sur la masse en jeu et les essais de solubilisation (en l'occurrence l'essai X31-210<sup>8</sup>). Les essais classiques d'identification géotechnique et les caractéristiques de portance, aussi ré-effectués à l'occasion du diagnostic, peuvent être mis en relation avec les mesures de déflexion et l'état général de l'ouvrage. L'appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage peut être mise en relation avec les caractéristiques géotechniques du matériau et la structure de l'ouvrage.

La connaissance du trafic et de l'existence d'une nappe phréatique proche aide à l'interprétation des réponses.

➤ **Descriptions réalisées**

- Description de l'ouvrage à travers :
  - dates de production du matériau
  - dates de mise en oeuvre du matériau
  - description de la structure verticale de l'ouvrage
  - dimensions de l'ouvrage
  - masse de matériau en jeu
  - composition chimique du matériau
  - essais de solubilisation du matériau
  - granulométrie du matériau
  - caractéristiques géotechniques du matériau
  - caractéristiques de portance du matériau
- Description des sollicitations à travers :
  - connaissance de l'existence ou de l'absence d'une nappe phréatique
  - connaissance du trafic automobile ou de son absence
- Description des réponses à travers :
  - appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage
  - mesures de déflexion
  - connaissance de l'état (qualité) des sols sous-jacents
  - connaissance de l'état (qualité) des sols avoisinants

➤ **Dimensions**

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : 320 m
  - Largeur : 7 m
  - Surface : 2 240 m<sup>2</sup>
- Volume de matériau en jeu : non spécifié
  - Longueur : non spécifiée
  - Largeur : non spécifiée

---

<sup>8</sup> Voir remarque sur la vocation de cet essai (§ *Analyse de la pertinence des essais de caractérisation initiale...*)

- Epaisseur : 0,20 m (Tranchée 1) ; 0,65 m (Tranchée 2)

➤ **Apport sur le plan mécanique**

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation de MIOM en **couche de base-fondation** ; il y a deux structures de chaussées mises en place sur un accès à une usine d'incinération. Dans les deux ouvrages testés, les MIOM sont utilisés dans la structure de chaussée en couche de base-fondation. Ils participent à la reprise des efforts appliqués par les poids lourds. Sur la seconde structure une couche de forme supplémentaire de 50 cm de MIOM a été mise en place. Dans ce deuxième cas le MIOM doit permettre d'obtenir une meilleure portance. L'utilité de la couche de sable de 6 cm d'épaisseur située entre les deux couches de MIOM (tranchée 2) n'est pas évidente.

- Description de la structure de l'ouvrage

Ces types de structures constituées globalement de 4cm de BB + 8 à 10 cm de GNT présentent une épaisseur de couche de GNT trop faible qui s'apparente plutôt à une couche de réglage, les 15 à 20 cm de MIOM sont alors considérés comme une couche de base.

C'est une structure pouvant recevoir peu de véhicules lourds (autour de 30 PL/jour).

*Les structures ont été construites en 1975-1976. Il semble qu'il y a eu un bon comportement des MIOM en sous couche de chaussée après 20 ans de service et un entretien. Ces types de chaussées peuvent présenter des désordres tels que de l'orniérage et de la fissuration du BB au vu de la faible épaisseur de la couche de roulement. Lorsque l'ornière se crée, elle trouve son origine en parties supérieures de la grave et des MIOM, suite à ces grandes déformations, la mince couche de roulement se fissure. Généralement un entretien réalisé après quelques années de trafic au moyen d'environ 6 à 8 cm de BB assure une longévité structurelle d'une quinzaine d'années pour des trafics faibles en poids lourds.*

➤ **Aspect environnemental**

Cas s'inscrivant dans le type « Diagnostic historique » de la typologie proposée par Polden (Cf. Annexe 3).

Les MIOM utilisés présentent une teneur importante en métaux bien qu'inférieure à celle de l'ouvrage décrit au cas 8. Le niveau directement en contact avec la couche de mâchefers, sur une épaisseur de 5 cm, présente un accroissement significatif des teneurs en plomb et surtout en zinc, et dans une moindre mesure, en sulfates et en cuivre.

## **6-1-14. Cas 14**

➤ **Objet de l'étude :**

Suivi du relargage de différents « plots » (terme utilisé par les auteurs) d'un ouvrage expérimental réalisé avec des MIOM, traités ou non, utilisés en couche de fondation.

➤ ***Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux***

Cette étude, à vocation environnementale, décrit la réponse des ouvrages à travers le suivi de la qualité et des volumes de percolats. Ces réponses permettent de décrire ensuite les flux de matière générés. Ils peuvent être mis en relation avec la caractérisation des matériaux en termes de masse en jeu et d'essais de solubilisation (X31-210<sup>9</sup>). L'appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage est l'autre réponse fournie. Elle peut être mise en relation avec les caractéristiques géotechniques du matériau et la structure de l'ouvrage.

La connaissance des précipitations sert à l'interprétation de l'évolution des flux de matière. L'absence de déversement accidentel de produits susceptibles d'influencer la qualité des percolats est bien spécifiée.

➤ ***Descriptions réalisées***

- Description de l'ouvrage à travers :
  - description de la structure verticale de l'ouvrage
  - dimensions de l'ouvrage
  - masse de matériau en jeu
  - essais de solubilisation du matériau
  - granulométrie du matériau
  - caractéristiques géotechniques du matériau
- Description des sollicitations à travers :
  - connaissance des précipitations
  - On a connaissance de l'existence d'un trafic automobile (ouvrage en service) mais ses caractéristiques ne sont pas fournies
  - connaissance de déversements accidentels ou de leur absence, et en l'occurrence de leur absence
- Description des réponses à travers :
  - appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage
  - suivi de la qualité des eaux de percolation
  - suivi des volumes d'eaux de percolation

➤ ***Dimensions***

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : 16 m
  - Largeur : 5 m
  - Surface : 80 m<sup>2</sup>
- Volume de matériau en jeu : 20 m<sup>3</sup>
  - Longueur : 16 m
  - Largeur : 5 m
  - Epaisseur : 0,25 m

---

<sup>9</sup> Voir remarque sur la vocation de cet essai (§ *Analyse de la pertinence des essais de caractérisation initiale...*)

➤ **Apport sur le plan mécanique**

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation de MIOM en **couche de base-fondation** ; les cinq « plots » (terme utilisé par les auteurs) sont situées sur une voie de désenclavement à un carrefour giratoire, donc peu ou pas circulées. Elles ont été suivies du point de vue environnemental. Elles sont employées en couche de base-fondation dans la chaussée

- Description de la structure de l'ouvrage

Il s'agit de structures de chaussées construites au milieu des années 90. Sous l'action du trafic lourd, les structures 1, 2 et 5 avec des mâchefers traités au ciment ou à la mousse de bitume sont théoriquement plus résistantes que les structures 3 et 4 réalisées avec des mâchefers non traités ou graves non traitées qui en font une structure un peu plus souple.

Ici les MIOM sont employés en couche de base-fondation dans la structure de chaussée en minimisant les risques potentiels d'endommagement au niveau de l'interface du fait de l'épaisseur et de la nature des couches de surface bitumineuses (15 cm).

Si les MIOM sont de bonne qualité, 25 cm de scorgrave traités +15 cm de GB peuvent reprendre un trafic cumulé de 1 à 1,5 million de PL. C'est à dire pour 20 ans de service, un trafic journalier compris entre 100 et 150 PL/Jours environ.

*Les plots ont été réalisés au milieu des années 1990. Le recul est insuffisant sur ce type de structures circulées pour évaluer ces couches de mâchefers traités utilisés en couche de base afin de savoir quelle est l'épaisseur bitumineuse optimum à mettre en couche de roulement. Cependant, même si les chaussées ne sont pas circulées, il serait intéressant de carotter les structures contenant du scorcim et du scormousse pour évaluer la possible décohésion des matériaux après 10 ans de vieillissement, ainsi que la qualité des interfaces GB/MIOM traités*

➤ **Aspect environnemental**

Cas s'inscrivant dans le type « Emission de polluants au cours d'une exposition de durée courte » de la typologie proposée par Polden (Cf. Annexe 3).

Les données environnementales recueillies dans le cadre de cette étude sont des résultats d'essais de lixiviation X31-210 sur des MIOM maturés et NF X31-211 sur des MIOM traités aux liants (hydraulique ou hydrocarboné) et des résultats d'analyse des eaux de percolation d'ouvrages contenant ces matériaux sur 3 ans d'exposition.

Après 3 ans de suivi des plots, les auteurs indiquent que les essais de lixiviation selon les normes X31-210 et X31-211 aboutissent, à quelques exceptions près, à un relargage potentiel qui est loin d'être atteint en fin d'expérience sur site. Les auteurs concluent qu'en aucun cas ces essais n'auraient permis de prédire leur comportement, ces essais restant des outils de vérification de la conformité réglementaire.

Le mode d'expression des résultats permet seulement de mettre en évidence le phénomène d'atténuation ou d'épuisement de la fraction mobilisable pour certains éléments.

La comparaison des résultats de suivi des ouvrages montre que :

- le traitement des MIOM a un effet bénéfique visible sur les quantités relarguées,
- l'ouvrage témoin relargue 4 à 80 fois moins de substances que les autres ouvrages.

Les eaux de percolation présentent des concentrations en éléments métalliques souvent supérieures aux concentrations maximales admissibles dans les eaux destinées à la consommation humaine (eaux potables) mais toutes les concentrations observées sont inférieures aux concentrations maximales admissibles pour les eaux brutes.

## 6-1-15. Cas 15

### ➤ *Objet de l'étude*

Suivi du relargage de différents plots (terme défini par le LCPC car cas hors trafic) réalisés avec des cendres volantes silico-alumineuses de charbon placées en position de couche de base et de fondation.

### ➤ *Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux*

Cette étude à vocation environnementale décrit la réponse des ouvrages à travers le suivi de la qualité et des volumes de percolats générés. Ces réponses permettent de décrire ensuite les flux de matière générés. Ils peuvent être mis en relation avec la caractérisation des matériaux en termes de masse en jeu, d'essais de solubilisation (essais de lixiviation selon la norme X31-210<sup>10</sup> pour les cendres et selon la norme X31-211 pour les graves cendres, essais de percolation), de perméabilité, de dénivelé des couches.

La connaissance des précipitations sert à l'interprétation de l'évolution des flux de matière. L'absence de déversement accidentel de produits susceptibles d'influencer la qualité des percolats est bien spécifiée.

### ➤ *Descriptions réalisées*

- Description de l'ouvrage à travers :
  - description de la structure verticale de l'ouvrage
  - dimensions de l'ouvrage
  - masse de matériau en jeu
  - dénivelé
  - composition chimique du matériau
  - essais de solubilisation du matériau
  - granulométrie du matériau
  - caractéristiques géotechniques du matériau
  - perméabilité du matériau compacté
- Description des sollicitations à travers :
  - connaissance des précipitations
  - connaissance du trafic automobile ou de son absence, et en l'occurrence de son absence
  - connaissance de déversements accidentels ou de leur absence, et en l'occurrence de leur absence
- Description des réponses à travers :
  - suivi de la qualité des eaux de percolation
  - suivi des volumes d'eaux de percolation

---

<sup>10</sup> Voir remarque sur la vocation de cet essai (§ *Analyse de la pertinence des essais de caractérisation initiale...*)

➤ **Dimensions**

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : 10 m
  - Largeur : 4 m
  - Surface : 40 m<sup>2</sup>
- Volume de matériau en jeu : 20 m<sup>3</sup> (plots 1,2,3) ; 16 m<sup>3</sup> (plots 4, 5, 6)
  - Longueur : 10 m
  - Largeur : 4 m
  - Epaisseur : 0,50 m (plots 1, 2, 3) ;                      0,40 m (plots 4, 5, 6)

➤ **Apport sur le plan mécanique**

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation de cendres volantes de centrale thermique en **couche de forme** ; les structures de chaussées sont des plots (six au total) non circulés qui ont été suivis du point de vue environnemental. Les plots 1, 2 et 3 correspondent à des chaussées souples à très faible trafic destinées à des chemins de desserte. Les plots 4, 5 et 6 correspondent à des structures destinées à recevoir un trafic moyen de poids lourds. Les cendres ont été utilisées en couche de forme ou mélangées à de la grave pour réaliser des couches de base sur les plots 5 et 6.

- Description de la structure de l'ouvrage

Pour le plot 4, la couche de base est constituée d'une grave ciment de 30 cm surmontée de 6 cm de BB, donc comparable à une chaussée à faible trafic PL de classe TC4 pouvant accepter un trafic cumulé de 1,5 million de PL, soit 150 PL/jour pendant 20 ans. Dans les plots 5 et 6, la couche de cendres a servi de couche de forme et a seulement pu influencer sur le taux de compactage de la GCV (Grave-Cendre Volante). Concernant le comportement de la chaussée, on observe généralement une interface BB/GC de piètre qualité et l'apparition à long terme de fissures de retrait de la GC. Les plots ont été construits vers 1997. Après 4 à 5 ans d'étude les plots étaient en bon état mais ils n'ont subi aucune sollicitation de trafic PL, ce qui ne permet pas de les évaluer mécaniquement.

➤ **Aspect environnemental**

Cas s'inscrivant dans le type « Comportement à la lixiviation en scénario » de la typologie proposée par Polden (Cf. Annexe 3).

L'évaluation environnementale a été menée suivant la norme méthodologique EN 12920 pour un des scénarios de valorisation étudiés (« remblai » non recouvert). Pour la mener à bien, les moyens suivants ont été mis en œuvre : détermination de la composition chimique des cendres, détermination de la capacité de neutralisation acido-basique, mise en œuvre d'essais paramétriques concernant l'influence du pH et l'influence du ratio L/S sur la solubilisation des polluants, réalisation de lysimètres et modélisation du relargage.

A titre informatif, les cendres ont été positionnée vis-à-vis du référentiel de la circulaire du 9 mai 1994. Les seuils « V » sont dépassés pour l'arsenic et pour le chrome hexavalent.

La modélisation géochimique et hydrodynamique couplée a abouti à une description qualitative du comportement des cendres sans pouvoir faire de réelle prédiction du comportement. Les essais en lysimètre n'ont pas permis de valider le modèle en raison de la

prise en compte de conditions hydrodynamiques non vérifiées à l'échelle du lysimètre et de la non prise en compte par le modèle de l'alternance de périodes humides et sèches.

Une évaluation grossière du comportement à long terme est néanmoins proposée sur la base d'un flux observé en lysimètre durant 18 mois et considéré comme globalement constant.

Enfin, la composition des cendres a été déterminée à nouveau après 42 mois d'exposition en scénario remblai non protégé sans mettre en évidence de perte massive en métaux, seule la teneur en arsenic est diminuée d'environ 38 % pour une des cendres et 58 % pour l'autre.

## **6-1-16. Cas 16**

### ➤ **Objet de l'étude**

Suivi du relargage de différentes planches d'un ouvrage expérimental réalisé avec des scories de première fusion de plomb et de zinc, placées en position de couche de base.

### ➤ **Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux**

Cette étude, à vocation environnementale, décrit la réponse de l'ouvrage à travers le suivi de la qualité et des volumes de percolats. Ces réponses permettent de décrire ensuite les flux de matière générés. Ils peuvent être mis en relation avec la caractérisation des matériaux en termes de masse en jeu et d'essais de solubilisation (essai de lixiviation selon la norme X31-210<sup>11</sup>, essais de solubilisation en fonction du pH, test de lixiviation dynamique sur monolithe), de perméabilité, de minéralogie.

La connaissance des précipitations sert à l'interprétation de l'évolution des flux de matière.

### ➤ **Descriptions réalisées**

- Description de l'ouvrage à travers :
  - dates de production du matériau
  - dates de préparation du matériau
  - dates de mise en oeuvre du matériau
  - description de la structure verticale de l'ouvrage
  - masse de matériau en jeu
  - composition chimique du matériau
  - minéralogie du matériau
  - essais de solubilisation du matériau
  - granulométrie du matériau
  - caractéristiques géotechniques du matériau
  - perméabilité du matériau compacté
- Description des sollicitations à travers :
  - connaissance des précipitations
  - connaissance du trafic automobile ou de son absence, et en l'occurrence de son absence
- Description des réponses à travers :
  - suivi de la qualité des eaux de percolation

---

<sup>11</sup> Voir remarque sur la vocation de cet essai (§ *Analyse de la pertinence des essais de caractérisation initiale...*)

- suivi des volumes d'eaux de percolation

➤ **Dimensions**

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : non spécifiée
  - Largeur : non spécifiée
  - Surface : 158 m<sup>2</sup>
- Volume de matériau en jeu : non spécifié
  - Longueur : non spécifiée
  - Largeur : non spécifiée
  - Epaisseur : 0,24 m (sable-bitume) ; 0,38 m (sable-ciment)

➤ **Apport sur le plan mécanique**

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation de MIOM en **couche de base** : il y a eu un suivi environnemental des plots (non circulés). Les 4 plots avec des sables traités en couche de base recouverts seulement de 4 cm de BB drainants sont des structures pour une circulation de véhicules légers. Un essai mécanique de laboratoire aurait pu renseigner sur l'apport structurel des scories dans les sables traités afin de vérifier si les scories entraînaient ou non un durcissement des sables bitume et des sables ciment.

- Description de la structure de l'ouvrage

Il s'agit de plots mis en œuvre en 1996. Les plots 1 et 2 présentent une couche de base en sable bitume (en épaisseur très importante: 24 cm) plutôt imperméable et une couche de roulement en enrobé drainant entraîne une présence d'eau quasi permanente entre les couches de roulement et de base.

Les deux premières structures ne s'apparentent pas à des couches de chaussées pouvant supporter un trafic de poids lourds même modeste car elles sont susceptibles d'aboutir à de l'orniérage dû au sable bitume. Pour les plots 3 et 4, les 38 cm de sable ciment permettraient de recevoir un trafic TC4 correspondant à un trafic journalier de 100 à 150 PL/Jour, mais une décohésion du sable-ciment en partie supérieure est probable.

*On ne met pas habituellement ce type de matériau en couche de base mais en couche de fondation car à 4 cm sous les roues, ils sont trop sollicités lorsqu'il y a une circulation de Poids Lourds.*

➤ **Aspect environnemental**

Cas s'inscrivant dans le type « Comportement à la lixiviation en scénario » de la typologie proposée par Polden (Cf. Annexe 3).

L'évaluation environnementale a été menée en suivant partiellement la norme méthodologique EN 12920. Les moyens suivants ont été mis en œuvre : détermination de la composition chimique des scories, détermination de leur capacité de neutralisation acido-basique, mise en œuvre d'essais paramétriques concernant l'influence du pH et l'influence du ratio L/S sur la solubilisation des polluants, et réalisation de lysimètres (test et témoin). En revanche, la modélisation du relargage n'a pas été réalisée.

Les mesures et analyses montrent que les matériaux alternatifs contiennent de grandes quantités de plomb et de zinc et que le relargage de ces éléments est principalement contrôlé

par le pH de la solution en contact. Ce relargage est limité par le vieillissement des scories du fait notamment de leur carbonatation. Les deux types de scories présentent des niveaux de relargage différents.

Les résultats d'essais en lysimètre sont très cohérents avec les conclusions des essais de disponibilité des polluants en laboratoire. Ils montrent en effet que les niveaux de solubilisation du plomb et du zinc sont dépendants du pH et du même ordre de grandeur que ceux observés lors de l'essai visant à étudier l'influence du pH sur la solubilisation des éléments.

L'auteur estime que la valorisation de ces scories (à hauteur d'environ 50 %) dans des sables ciment n'est pas à recommander sans étanchéification de la route (ce qui n'est pas concevable dans la pratique), alors qu'elle semble envisageable dans des sables bitume au vu des résultats observés in-situ.

### **6-1-17. Cas 17**

#### ➤ **Objet de l'étude**

Suivi mécanique et du relargage d'un ouvrage expérimental réalisé avec des cendres volantes d'incinération d'ordures ménagères, traitées (CT) utilisées en couche de base.

#### ➤ **Apport de l'étude à l'élaboration de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages expérimentaux et la caractérisation pertinente des matériaux**

Cette étude à finalité mécanique et environnementale décrit la réponse de l'ouvrage à travers l'appréciation visuelle de son état général, des mesures de déflexion, le taux d'infiltration de précipitation dans la structure, le suivi des volumes et de la qualité des percolats générés. Ces deux dernières réponses permettent ensuite de décrire les flux de matière générés. Ils peuvent être mis en relation avec la caractérisation des matériaux en terme de masse en jeu, d'essais de solubilisation (essai de lixiviation selon la norme X31-210<sup>12</sup>, fraction maximale mobilisable, tests de solubilisation en fonction du pH, percolation en colonne), de minéralogie, d'identification des composés organiques. Le taux d'infiltration provient de la connaissance des précipitations (sollicitation). Cette étude suit une démarche telle que celle de la norme EN 12920.

Les essais classiques d'identification géotechnique et les caractéristiques de portance, peuvent être mis en relation avec les mesures de déflexion et l'état général de l'ouvrage. L'appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage peut être mise en relation avec les caractéristiques géotechniques du matériau et la structure de l'ouvrage.

La connaissance du trafic et l'absence de nappe phréatique, aide à l'interprétation des réponses. La connaissance des précipitations sert à l'interprétation de l'évolution des flux de matière. L'existence de déversement accidentel de produits susceptibles d'influencer la qualité des percolats est bien spécifiée.

#### ➤ **Descriptions réalisées**

- Description de l'ouvrage à travers :
  - dates de production du matériau
  - dates de préparation du matériau

---

<sup>12</sup> Voir remarque sur la vocation de cet essai (§ *Analyse de la pertinence des essais de caractérisation initiale...*)

- dates de mise en oeuvre du matériau
- description de la structure verticale de l'ouvrage
- dimensions de l'ouvrage
- masse de matériau en jeu
- composition chimique du matériau
- minéralogie du matériau
- composés organiques
- essais de solubilisation du matériau
- granulométrie du matériau
- caractéristiques géotechniques du matériau
- caractéristiques de portance du matériau
- Description des sollicitations à travers :
  - connaissance des précipitations
  - connaissance de l'existence ou de l'absence d'une nappe phréatique
  - connaissance du trafic automobile ou de son absence
  - connaissance de déversements accidentels ou de leur absence
- Description des réponses à travers :
  - appréciation visuelle de l'état général de l'ouvrage
  - mesures de déflexion
  - taux d'infiltration des eaux de pluie dans l'ouvrage
  - suivi de la qualité des eaux de percolation
  - suivi des volumes d'eaux de percolation

➤ ***Dimensions***

- Dimensions de l'ouvrage :
  - Longueur : 30 m
  - Largeur : 6,5 m
  - Surface : 165 m<sup>2</sup>
- Volume de matériau en jeu : 28,3 m<sup>3</sup>
  - Longueur : 21,5 m
  - Largeur : 5,5 m
  - Epaisseur : 0,24 m

➤ ***Apport sur le plan mécanique***

- Pertinence de l'usage du matériau

Utilisation en **couche de base** ; le matériau innovant est une grave cendre volante hydraulique avec 12% de cendres Revasol issues du traitement chimique puis thermique de cendres volantes d'usine d'incinération d'ordures ménagères. Ces cendres sont rajoutées à une grave hydraulique constituée de 3,5% d'un liant routier dénommé ARC3 (liant laitier-ciment) pour améliorer les performances de cette grave traitée. Ce matériau test a été comparé à cette même grave hydraulique sans cendres.

- Description de la structure de l'ouvrage

Deux planches d'une centaine de mètres carrés environ ont été réalisées sur l'accès à l'usine Solvay Carbonates. Une planche test et une planche témoin ont été mises en oeuvre en été 2002. La planche témoin était constituée de 6 cm de BBSG 0/10 + 20 à 22

cm de Grave Hydraulique + 20 cm de grave non traitée, l'ensemble posé sur une plateforme présentant environ une déflexion de 2 mm sous un essieu de 13 tonnes. Pour la planche test, la grave hydraulique contenait 12 % de cendres traitées (permettant un gain de 1,5 % de ciment par rapport à la formule de la planche témoin).

Les essais de laboratoire ont montré que la grave hydraulique témoin sans cendres était de niveau G3 et que la grave hydraulique avec cendres était de niveau G4 donc avec de meilleures performances mécaniques que la grave hydraulique témoin. Par contre, lorsque l'on regarde les rigidités globales des deux structures au travers de la déflexion sous l'essieu de 13 tonnes, elles sont équivalentes (Déflexion moyenne de 30/100ème de mm 1 an après la construction). Il est à noter que la grave test a eu une maniabilité de 3 heures contre 10 heures pour la grave hydraulique témoin.

Les structures reçoivent le trafic des poids lourds allant à l'usine Solvay. Ce sont des structures pouvant recevoir entre 1 et 1,5 million de Véhicules Poids Lourds sur 20 ans avant l'apparition de dégradations. Soit un trafic journalier compris entre 100 et 150 PL par jour.

*Les rigidités mécaniques globales des deux structures de chaussées sont très proches, et après 3 ans de trafic, on ne note aucune dégradation ni sur la planche témoin, ni sur la planche test. Bien que les essais mécaniques du matériau innovant soient un peu à l'avantage de celui-ci, on peut penser qu'il n'y aurait pas une meilleure durée de vie de la chaussée innovante si elle était circulée par un fort trafic PL.*

#### ➤ **Aspect environnemental**

Cas s'inscrivant dans le type « Comportement à la lixiviation en scénario » de la typologie proposée par Polden (Cf. Annexe 3).

L'évaluation environnementale a été menée suivant la norme méthodologique EN 12920. Les moyens suivants ont été mis en œuvre : détermination de la composition chimique et minéralogique des cendres traitées, détermination de la fraction maximale mobilisable, détermination de la capacité de neutralisation acido-basique, mise en œuvre d'essais paramétriques concernant l'influence du pH sur la solubilisation des polluants. Les matériaux élaborés ont fait l'objet quant à eux d'essais de détermination de l'influence du ratio L/S et des lysimètres ont été réalisés en intégrant ces matériaux. La composition physico-chimique des eaux de percolation issues des lysimètres a été complétée par une caractérisation écotoxicologique. Enfin l'évaluation a été complétée par la réalisation d'une planche routière exposée dans des conditions réelles en termes de trafic routier et de contraintes climatiques.

Les essais de laboratoire et en lysimètre ont été réalisés sur trois matériaux élaborés à partir des cendres traitées en vue d'identifier leurs possibles voies de valorisation. Des conclusions ont pu être formulées sauf pour le matériau grave hydraulique pour lequel une étape complémentaire de modélisation a été nécessaire.

La modélisation du relargage a permis d'observer que des phénomènes pouvant contrôler le transport des espèces solubles n'avaient pas été pris en compte au laboratoire (les conditions réelles d'exposition des matériaux conduisent à une mobilisation plus importante de certains éléments que les conditions imposées en laboratoire). Il a permis aux auteurs de prédire l'évolution des concentrations de polluants dans les percolats et d'évaluer les dates d'épuisement des polluants disponibles dans les conditions de mise en œuvre et d'exploitation similaires aux conditions imposées dans les lysimètres. En revanche, le modèle établi à l'échelle laboratoire s'est révélé non extrapolable en l'état à une échelle supérieure.

Les résultats d'analyse des eaux de percolation des sections de route expérimentale contenant des graves hydrauliques GHC et GHT (témoin) confirment que la section contenant la GHC présente un relargage supérieur en chlorures, sulfates, chrome total et chrome hexavalent par

rapport à la section témoin. Les autres éléments analysés sont présents en quantités très faibles et/ou très peu différentes entre les deux sections de route.

## **6-2. Analyse des pratiques d'étude**

### **6-2-1. Pratiques de description des ouvrages**

#### ➤ ***Dates de production, préparation et de mise en oeuvre du matériau***

Ces points sont rarement intégralement renseignés parmi les cas d'études : 3, 5, 9, 11, 16, 17. L'histoire du matériau, de sa production à sa mise en oeuvre, est donc dans la plupart des cas difficile à tracer.

Même si la date de *mise en oeuvre du matériau* semble a priori un point évident et facile à renseigner, il se trouve que des études ne l'ont pas renseigné. Ce point concerne certaines études sur des ouvrages pré-existants mais aussi, de façon encore plus surprenante des études sur ouvrages expérimentaux réalisés ex-nihilo.

Les dates de *préparation des matériaux* sont moins connues. Ceci peut s'expliquer dans le cas d'ouvrages en service par le fait que les maîtres d'oeuvre n'ont pas pensé utile de mentionner ce genre d'information. Dans le cadre d'études sur ouvrages expérimentaux, en général plus récentes, ceci est surprenant.

Les dates de *production des matériaux* sont aussi moins connues, de même que les conditions précises de préparation. Ceci amène le même commentaire que pour les dates de préparation.

#### ➤ ***Description de la structure verticale de l'ouvrage, dimensions, masse en jeu et dénivelé***

Alors que la structure verticale, élément fondamental de la mise en situation du matériau, est toujours bien décrite dans les études, les dimensions de la couche concernée par l'étude, ou de l'ouvrage, sont omises près d'une fois sur deux. Ce point rend difficile la connaissance de la masse de matériau mis en jeu (calculable si l'étude fournit la densité en place du matériau). Parfois la masse en jeu est tout de même indiquée, sans que l'on connaisse pour autant les dimensions. Enfin, l'indication du dénivelé longitudinal de l'ouvrage est en règle générale omise, vraisemblablement en raison de la méconnaissance des phénomènes d'écoulement en surface et dans les corps de chaussées.

#### ➤ ***Description de la granulométrie du matériau***

Même s'il se trouve une faible minorité d'études pour l'omettre (paradoxalement des études sur ouvrages expérimentaux), la granulométrie du matériau est en général bien décrite par les études. Elle sera ensuite utilisée différemment selon les objectifs, mécaniques et/ou environnementaux, des études. En tout état de cause, l'analyse granulométrique doit permettre de classer le matériau sur le plan géotechnique et doit aussi décrire la fraction fine ( $< 80 \mu\text{m}$ ) de sorte de permettre une exploitation environnementale (la fraction fine (i) étant généralement la plus chargée en polluants et (ii) influençant l'écoulement de l'eau) et géotechnique (comportement argileux des matériaux).

➤ ***Description de la composition chimique du matériau, de sa minéralogie et de sa composition organique***

La composition chimique des matériaux n'est décrite que dans le cas des études à vocation environnementale, bien que certaines d'entre elles ne l'aient pas recherchée, se reposant sur des essais de type solubilisation (voir plus loin). L'étude minéralogique est peu pratiquée pour décrire les matériaux : peu d'études cherchent à expliquer le comportement environnemental et mécanique des matériaux à travers leur minéralogie initiale et leur évolution minéralogique éventuelle. Les techniques d'investigation minéralogique des matériaux sont peut-être aussi considérées comme moins accessibles en terme de coût et d'interprétation plus complexe qu'une estimation des teneurs totales, d'autant qu'il n'existe pas de normes. La description des composés organiques est en règle générale absente, ceci pouvant s'expliquer par diverses raisons. En premier lieu, les matériaux considérés dans les cas d'études répertoriés sont considérés comme essentiellement minéraux et la fraction organique peut s'en trouver sous-estimée, de même que sont sous-estimées les interactions entre matière organique et éléments minéraux. Ensuite, la grande diversité des formes organiques susceptibles d'être rencontrées, si l'on ne cible pas l'analyse sur des formes connues au préalable, des techniques d'analyse et une interprétation plus complexe que la simple analyse et interprétation chimique.

➤ ***Description du potentiel polluant et/ou du comportement à la lixiviation du matériau***

L'utilisation d'un essai de solubilisation pour décrire le matériau, quel que soit le type d'étude, apparaît comme une pratique généralisée. Ceci s'explique par le fait que les résultats d'essais peuvent servir à des prévisions du relargage à plus ou moins long terme dans les conditions d'utilisation réelles (selon des modes de prévisions propres aux études), et qu'à minima, à défaut d'autres moyens, ces résultats sont parfois utilisés par les auteurs pour situer la qualité du matériau par rapport à l'unique système de référence existant aujourd'hui quant à l'évaluation environnementale d'un matériau alternatif pour la construction routière, à savoir la circulaire « mâchefers » de 1994. Il se trouve que dans la plupart des cas d'étude répertoriés, la référence à la circulaire et l'utilisation de l'essai normalisé X31-210 sont justifiées par le fait qu'il s'agit de MIOM. Ce même protocole est aussi utilisé pour d'autres matériaux. Pour certains de ces matériaux, référence est faite aux seuils de la circulaire « mâchefers », ce qui n'est pas justifié. Enfin, des protocoles de solubilisation supplémentaires sont pratiqués dans les études visant à caractériser plus précisément le comportement à la lixiviation du matériau (études réalisées dans le cadre méthodologique de la norme EN 12920), en vue de préciser son comportement à long terme en place. Les seuls cas ne comportant pas d'essai de solubilisation sont, une étude réalisée avant la diffusion de la circulaire et une étude postérieure à 1994 mais affichant un objectif strictement mécanique pour un matériau qui n'est pas un MIOM.

➤ ***Description des caractéristiques géotechniques du matériau, des caractéristiques de portance, du comportement au gel et de sa perméabilité***

La description des caractéristiques géotechniques des matériaux est bien intégrée dans la grande majorité des études, quel que soit leur objectif, mécanique ou environnemental. Ceci traduit bien, même si l'objectif d'une étude est uniquement environnemental, que les auteurs ont bien intégré l'idée qu'il est primordial pour la pertinence de l'étude, de montrer ou de vérifier, que le matériau étudié est bien potentiellement un matériau de construction routière et qu'il peut être décrit par rapport au référentiel existant (même si cette caractérisation est rarement exhaustive).

Les caractéristiques de portance du matériau sont moins souvent décrites. L'absence de description des caractéristiques géotechniques du matériau s'accompagne, dans les mêmes cas

d'étude, d'une absence de description de la portance. Mais on observe plus de cas où l'on a la première description mais pas la seconde. Ceci concerne uniquement des études à finalité environnementale et peut s'expliquer par la méconnaissance de l'importance de cette caractéristique du point de vue géotechnique.

La description de la sensibilité au gel du matériau est très rarement fournie et ceci, même dans des contextes climatiques où des périodes de gel sont courantes. Ceci, compte tenu de la méconnaissance des caractéristiques des matériaux étudiés de ce point de vue est surprenant et s'explique vraisemblablement par un « oubli » général de ce sujet.

Malgré son caractère essentiel tant d'un point de vue mécanique qu'environnemental, la perméabilité du matériau compacté est peu décrite. Sur le plan environnemental, ceci est peu cohérent avec l'intérêt porté aux essais de solubilisation, car dans la structure routière, l'interprétation de l'un ne va pas sans l'autre.

## **6-2-2. Pratiques de description des sollicitations**

### ➤ ***Description des précipitations***

Les études à finalité strictement mécanique ne décrivent pas les précipitations. Ces dernières ne sont pas non plus décrites dans les études ponctuelles. Elles le sont par contre bien pour la plupart des études intégrant la finalité environnementale. De façon étonnante, il se trouve pourtant des études à finalité environnementale n'intégrant pas la description des précipitations. Ceci est bien évidemment gênant dans l'interprétation de la réponse de l'ouvrage lorsqu'on veut analyser le taux d'infiltration à travers l'ouvrage et la variation temporelle éventuelle de ce taux. La description des précipitations peut se faire à un pas de temps variable en fonction de la durée du suivi des ouvrages et de la fréquence de prélèvements de percolats.

### ➤ ***Description de la nappe***

Une très faible proportion d'études indique explicitement l'existence ou l'absence d'une nappe phréatique dans l'environnement de l'ouvrage. On conçoit bien que les moyens de caractérisation de la nappe (son marnage, sa qualité) ne soient pas toujours disponibles pour toutes les études, et que donc toute nappe existante ne soit pas systématiquement décrite. Cependant il est dommage que la simple indication de son existence ou de son absence soit en règle générale omise 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. Ceci s'explique notamment par le fait qu'en règle générale, toute la surface occupée par le matériau alternatif est étanchée par la géomembrane et qu'il n'y a pas d'infiltration possible vers le sous-sol.

### ➤ ***Description du trafic automobile***

Les caractéristiques du trafic supporté par l'ouvrage ne sont indiquées que dans la moitié des cas d'étude, qu'il y ait trafic ou pas. Tous les autres cas d'étude correspondent à des ouvrages sous trafic, mais ce dernier n'est pas précisé, ce qui est gênant pour l'interprétation de la durée de vie mécanique des structures testées, notamment sous l'action du trafic poids lourds.

➤ ***Description des températures atmosphériques***

La description des températures atmosphériques n'est dans sa grande majorité pas réalisée. Cette composante n'est prise en compte que dans une étude s'intéressant au risque de gel du matériau. La grande majorité des études ne prenant pas en compte le comportement au gel du matériau, ce manque de suivi n'est pas surprenant. L'absence de cette composante au sujet des hautes températures manque pour interpréter la réponse des ouvrages en termes de bilan hydrique et de vieillissement de la structure. L'utilisation des données des services météorologiques locaux lors du suivi d'un ouvrage pourrait, à l'avenir, pourtant facilement combler cette lacune.

➤ ***Description de l'entretien et aux déversements accidentels***

Les données relatives à l'entretien des ouvrages et à l'entretien saisonnier, ne sont jamais précisées. Les déversements accidentels sont mentionnés dans très peu de cas, pour indiquer soit qu'il y a eu déversement ou bien préciser qu'il n'y en a pas eu. Dans la grande majorité des cas cette précision n'est pas fournie.

### ***6-2-3. Pratiques de description des réponses des ouvrages***

➤ ***Appréciation visuelle de l'état général***

Ce type de réponse, classique dans le domaine routier et qui plus est relativement simple à obtenir, est en règle générale bien fourni par les études obtenues ou facile à obtenir a posteriori. Les études sur plots quant à elles, hors trafic, ne l'intègrent pas, ce qui se comprend. Les études sur ouvrages sous trafic n'intégrant pas cette appréciation sont à finalité environnementale.

➤ ***Essais de portance en place***

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 études. Elles le sont toutefois autant par des études à finalité environnementale qu'à finalité mécanique.

➤ ***Mesure de déflexion***

Les mesures de déflexion apparaissent aussi peu souvent précisées que les mesures de portance. Elles sont réalisées dans des études qui intègrent de façon forte la dimension fonctionnelle de l'incorporation de matériaux nouveaux dans la construction routière. On conçoit que cette mesure ne soit pas réalisée sur des plots non soumis au trafic routier. On comprend aussi que des études n'abordant la question de la réutilisation de matériaux alternatifs que sous l'angle structurel (simple substitution à des matériaux classiques) et pas la dimension fonctionnelle de la question, omettent cette mesure.

➤ ***Volume des eaux de percolation***

Les volumes de percolats recueillis sont indiqués dans moins de la moitié des cas d'étude. Ceci est fait dans des études à finalité environnementale et dans des études à double finalité. Cependant certaines études à finalité environnementale omettent de préciser ces volumes, ce qui constitue un inconvénient majeur d'une part pour l'estimation des flux de matière produits 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).

➤ ***Taux d'infiltration***

Le taux d'infiltration dans l'ouvrage n'est précisé que de façon exceptionnelle, encore plus rarement que l'indication des volumes percolés. Ceci est lié en particulier au fait que des études mesurent l'une ou l'autre des grandeurs nécessaires à calculer ce taux (les précipitations ou les volumes percolés) et pas les deux. La méconnaissance de cette réponse de l'ouvrage sur la période de suivi représente un handicap quant à la prévision du comportement (en particulier la percolation) à long terme.

➤ ***Effets sur qualité des eaux de percolation***

Le suivi de la qualité des eaux de percolation constitue la motivation essentielle de la majeure partie des études relatives à l'évaluation des matériaux alternatifs pour la construction routière. On voit donc qu'hormis les études ponctuelles et les études à finalité strictement mécanique, la plupart des études recensées l'intègrent. La qualité des dispositifs de conservation des eaux de percolation avant prélèvement pour analyse est très variable selon les études. En particulier le risque d'évolution des paramètres physico-chimiques susceptibles de jouer sur la solubilité des espèces chimiques (effet de la carbonatation notamment) est rarement pris en compte.

➤ ***Effets sur la qualité des eaux souterraines et des eaux superficielles***

Parmi l'ensemble des cas d'étude, la qualité des eaux souterraines et superficielles n'a été contrôlée que dans un cas, ceci en relation avec des problèmes avérés. La rareté de cette information pour ce qui concerne les eaux souterraines est en relation avec la rareté de la description des nappes souterraines. Pour ce qui est des eaux superficielles, la rareté de cette composante de la réponse est probablement plus à mettre en relation avec la difficulté de réalisation d'un diagnostic de l'effet éventuel.

➤ ***Effets sur la qualité des sols sous-jacents et des sols avoisinants***

La qualité des sols sous-jacents et avoisinants aux ouvrages n'est considérée que dans très peu de cas d'étude. Pour un des cas des problèmes de pollution des eaux étaient avérés, justifiant de se soucier des sols. Les autres études concernées intègrent ainsi le sol comme cible potentielle par rapport aux éléments solubilisés. Au final, même si le nombre de cas est faible, force est de constater que dans les faits, la cible sol s'avère sensiblement plus souvent appréhendée que les cibles eaux souterraines ou eaux avoisinantes.

#### ***6-2-4. Proposition d'une typologie des études sur le plan environnemental***

Sur le plan environnemental, en complément des points déjà mentionnés dans la pratique de description des ouvrages (§ 6-2-1), des sollicitations (§ 6-2-2) et des réponses (§ 6-2-3), à partir de l'ensemble des cas d'études intégrant l'évaluation environnementale des matériaux et des ouvrages, une typologie est proposée par Polden (Cf. Annexe 3), elle vise à rassembler les expériences présentant des objectifs similaires. Cette typologie distingue 4 types d'études :

- celles sans objectif environnemental ;
- celles visant à réaliser un diagnostic des l'état des matériaux et de leur environnement après une période d'exposition relativement longue ;
- celles visant à quantifier les émissions de polluant au cours d'une période d'exposition relativement courte ;
- celles visant à déterminer le comportement à la lixiviation dans des conditions représentant celles qui seront déterminantes en conditions réelles d'utilisation (dit « scénario d'utilisation »).

➤ ***Etudes sans objectif environnemental***

Ces études visent à vérifier la conformité aux seuils réglementaires en vue d'une valorisation en techniques routières. Les seules valeurs réglementaires existantes sont celles définies par la circulaire du 9 mai 1994 concernant la valorisation des mâchefers ; dans ces études concernant les mâchefers, aucune mesure ni essai d'ordre environnemental n'a été réalisé sur l'ouvrage contenant les mâchefers. L'objectif est défini de manière très précise et l'utilisation de l'essai X31-210 (3 fois 16 heures) est le seul moyen pertinent permettant de vérifier la conformité des mâchefers aux seuils V de la circulaire du 9 mai 1994.

➤ ***Etudes visant à réaliser un diagnostic de l'état des matériaux et de leur environnement après une période d'exposition relativement longue***

Les analyses et essais cherchent à contribuer aux connaissances sur l'état des matériaux (en l'occurrence des MIOM) et des sols sous jacents après une certaine durée de vie en œuvre (20 à 22 ans dans les 2 cas référencés) donc d'exposition en conditions réelles de sollicitation mécanique et climatique. Dans ce cas, l'exploitation de ces données (conformité aux seuils de la circulaire mâchefers) est limitée par l'absence de références (en particulier sur les caractéristiques des mâchefers et des sols avant exposition). On notera d'ailleurs que selon les pratiques, les mâchefers produits il y a 20 ans pouvaient également contenir les cendres volantes de l'UIOM, ce qui est interdit depuis 1991.

➤ ***Etudes visant à quantifier les émissions de polluants au cours d'une période d'exposition relativement courte (< 3 ans)***

Les objectifs décrits dans ces études sont relativement ambitieux et généraux alors que les résultats fournis, basés essentiellement sur des résultats d'essai X31-210 et d'analyse d'eaux de percolation, permettent au mieux, grâce au second type de résultats, de quantifier le relargage des matériaux dans des conditions d'exposition données.

La détermination de la composition chimique du matériau à l'état initial (au minimum), la détermination de la fraction maximale mobilisable (tel que l'essai FMM ou tout autre permettant d'atteindre cet objectif) ainsi que la caractérisation minéralogique (au minimum DRX) semblent être les caractérisations les plus appropriées pour répondre aux objectifs auxquels les auteurs ont répondu par la réalisation de l'essai X31-210.

Les protocoles de collecte et de conditionnement des eaux de percolation sont rarement décrits, ce qui pourtant, peut avoir une incidence forte sur les résultats de laboratoire (notamment les phénomènes liés à la carbonatation du matériau).

Un bilan hydrique complet comprenant le suivi régulier de la pluviométrie, des eaux de ruissellement et des volumes percolés est essentiel pour déterminer le taux d'infiltration, et interpréter les données de qualité des percolats. Il n'est généralement pas fourni.

La démonstration de l'impact de l'ouvrage sur la qualité des sols sous jacents est pertinente lorsqu'elle consiste à caractériser l'enrichissement du sol par comparaison avec la composition initiale du même sol (et/ou celle d'un ouvrage témoin). Ces données méritent

toutefois d'être complétées par la caractérisation du profil de concentration en polluants dans les couches plus profondes du sol ainsi que des valeurs de référence quant aux concentrations acceptables dans les sols (fond géochimique naturel par exemple).

➤ ***Etudes visant à déterminer le comportement à la lixiviation en scénario d'utilisation***

Les objectifs décrits dans ces études sont également ambitieux, mais les moyens mis en œuvre sont plus conséquents et semblent, dans une première approche, plus adaptés pour déterminer le comportement à la lixiviation des matériaux dans des conditions d'exposition données. La démarche méthodologique s'appuie en général sur la norme EN 12920 dont c'est l'objet.

La plupart des essais paramétriques effectués au laboratoire s'avèrent pertinents vis-à-vis des sollicitations et mettent bien en évidence l'influence du paramètre considéré sur le relargage. Cependant, l'identification des facteurs d'influence du scénario visé et leur hiérarchisation en vue d'élaborer un programme expérimental adapté est généralement imparfaite.

En corollaire, la modélisation permettant de prendre en compte l'ensemble des influences étant souvent complexe, le lien entre essais paramétriques et essais multi-paramétriques (lysimètres ou chaussées expérimentales) est rarement établi. La difficulté semble en effet liée à la complexité de l'ensemble des phénomènes à modéliser pour rendre compte du relargage, les modèles trop simplistes se révélant inadaptés pour l'extrapolation. Il en résulte une étape de modélisation lourde nécessitant encore des travaux de recherche. Quand les chaussées expérimentales destinées à valider le modèle comportemental ne peuvent pas répondre à cet objectif, les résultats sont donc utilisés par comparaison avec des valeurs seuils liées à des référentiels existants.

### ***6-3. Examen global des ouvrages étudiés***

#### ***6-3-1. Typologie routière des ouvrages étudiés***

Une typologie routière des ouvrages répertoriés dans CAREX a été réalisée par le LCPC. Le classement réalisé sépare les matériaux des ouvrages et des plots selon qu'ils appartiennent au terrassement, ou qu'ils sont utilisés en couche de forme ou de chaussées (Tableau 5). On constate que dans l'ensemble, tous les emplois possibles dans les routes sont proposés. Ensuite, le tableau 5 montre que lorsque les matériaux alternatifs ont été utilisés dans le corps de chaussée, ils ont été traités, afin d'en augmenter les caractéristiques mécaniques. Dans le cas d'emplois en couche de forme, l'analyse doit prendre en compte la qualité du sol en place car on s'attend à ce que le matériau d'apport présente des propriétés plus élevées que celles du sol en place. De même, il faut souligner que les emplois en remblais correspondaient bien à du comblement pour des remblais de grande hauteur, pour lesquels une économie substantielle de ressources naturelles a été réalisée.

Du point de vue environnemental, les résultats des études de cas ne permettent pas d'identifier de typologie de comportement des matériaux dans les ouvrages selon cette typologie routière (Cf. Annexe 4). Le comportement à la lixiviation des matériaux dans les conditions d'un scénario semble avant tout ici dépendant du matériau lui-même, les différences entre les différents scénarios (ici couche d'usage), en termes de conditions d'exposition étant minimes et essentiellement liées au taux d'infiltration et à la nature des couches supérieures. Néanmoins, ce constat se base sur les résultats de lysimètres non soumis aux sollicitations

d'un ouvrage réel (absence de trafic notamment), il conviendrait donc de le confirmer par les résultats d'ouvrages réels.

Cas CAREX	Volume de matériau en jeu (m <sup>3</sup> )	Année de mise en service	Utilisation des matériaux				Matériau	Epaisseur (m)	Circulation	Capacité estimée en PL/jour pour une durée de 20 ans
			Terrassement	Forme	Chaussées					
1	milliers	1996	Forme et remblai				MIOM	0,6 à 1,5	Oui	1500-2000
2	400000	1970	Remblai				Charrées	6 à 8	Oui	1500-2000
3	175000	1998	Remblai				MIOM	4 à 8	Oui	400-800
4	10000	1994	Forme et remblai				MIOM	0,4 à 1,5	Oui	200-300
5	100	2000			Forme-fondation		MIOM	0,25	Oui	0-50
6	300	1997		Forme			MIOM	0,4	Oui	1000-2000
7	600	2000			Forme-fondation		Laitiers	0,7	Oui	150-250
8	1000	1978		Forme			MIOM	0,25	Oui	50-100
9	200	1992			Forme-fondation		MIOM	0,35	Oui	50-100
10	30	1994				Base	MIOM traités	0,29	Oui	50-100
11	600	1994			Forme-fondation		MIOM	0,3	Oui	50-100
12	60	1995-96			Forme-fondation		MIOM	0,27	Oui	50-100
13	500	1975-76				Fondation-base	MIOM	0,5 et 0,2	Oui	0-50
14	20	1995					MIOM traités	0,25	Non (très faible)	100-150
15	20	1997		Forme	Fondation	Base	Cendres	0,5	Non	100-150
16	50	1996				Base	Sables traités + scories	0,24 et 0,38	Non	100-150
17	40	2002				Base	Grave hydraulique + CT	0,22	Oui	100-150

**Tableau 5. Typologie routière des ouvrages étudiés**

### **6-3-2. Examen spécifique des ouvrages contenant des MIOM**

Pour les MIOM qui sont le matériau le plus fréquemment utilisé dans les différents cas d'étude (12 cas sur 17 dont 10 cas de mâchefers non traités), et qui donc offraient une possibilité d'analyse plus approfondie, il a été entrepris par Polden de déterminer s'il existait des similitudes de comportement observable entre les différents cas d'études (Cf. Annexe 4, section 3 spécifique aux MIOM).

Parmi les études recensées, 5 concernent des MIOM maturés (entre 3 et 12 mois), classés en catégorie V telle que définie par la circulaire du 9 mai 1994, utilisés en tant que graves non

traitées en couche de fondation voire en couche de forme (dans 1 seul cas). L'examen détaillé de ces études fait l'objet d'un chapitre spécifique du rapport Polden (Cf. Annexe 4) et conclut notamment que :

- La plupart des études mettent en évidence l'importance de la phase chantier, quand les MIOM sont en contact direct avec les eaux de pluie. Les concentrations observées lors de cette phase sont en général très élevées, et incitent à recommander des précautions telles que la couverture ou le décalage des travaux en cas de mauvaises conditions climatiques.
- L'observation du bilan hydrique des ouvrages montre une grande variabilité du taux d'infiltration (entre 5 % et 30 %) à relativiser en fonction de l'origine des données de pluviométrie (parfois établies à partir d'une moyenne au niveau de la région), de la durée de suivi et en fonction de l'épaisseur des couches supérieures. Une phase transitoire de ressuyage des MIOM est également observée (du fait de l'humidification des MIOM durant la phase chantier), d'une durée variant de 2 à 6 mois, avant l'établissement d'un régime hydrique stationnaire.
- L'évolution du pH des eaux de percolation montre aussi de grandes différences entre les ouvrages, les valeurs constatées s'échelonnant entre 7 et 12 environ. Ces valeurs sont à rapprocher des conditions de collecte et de conditionnement des percolats (les précautions nécessaires pour éviter la carbonatation des éléments contenus dans les percolats n'ayant probablement pas toujours été prévues), de l'état du MIOM avant son utilisation (certains, maturés 12 mois, présenteraient un niveau de carbonatation plus avancé) et éventuellement de la composition chimique et minéralogique des MIOM (données rarement disponibles). L'un de ces travaux démontre toutefois que le MIOM ne se carbonate pas pendant le suivi.
- Durant les 2 premières années de suivi, la composition des percolats est majoritairement contrôlée par la dissolution de phases minérales constitutives du matériau. Certaines phases commencent néanmoins à précipiter : il s'agit d'hydrates dont certains se forment par réaction pouzzolanique et sont susceptibles de piéger certains métaux.
- L'évolution du relargage en chlorures des différents ouvrages se déroule en 2 temps avec un important lessivage durant les 6 à 9 premiers mois, suivi d'un niveau stationnaire autour de 250 mg/l environ.
- Le relargage des sulfates, partant d'un haut niveau dans le premier éluat, tend à se stabiliser autour d'une concentration proche de 300 mg/l. Le suivi minéralogique effectué pour l'un des ouvrages a montré que la libération des sulfates est contrôlée par la dissolution du gypse et de l'anhydrite et que ces sulfates peuvent aussi précipiter sous forme d'ettringite ou de phases sulfo-chloroaluminates de calcium hydraté.
- Si les concentrations en métaux (principalement cuivre et plomb) tendent à diminuer en fonction du temps et de la quantité de percolat, en revanche, le chrome présente un relargage retardé. Ce comportement du chrome a également été observé dans l'étude LIMULE<sup>13</sup> qui a conclu à une influence des réactions d'oxydo-réduction entre le chrome et l'aluminium, le relargage de Cr VI n'intervenant qu'une fois l'oxydation de l'aluminium métal en alumine terminée (ce comportement du Cr VI est également observé pour d'autres études CAREX)

---

<sup>13</sup> LIMULE : Lixiviation Multi-Echelles. Programme financé par l'ADEME, coordonné par le BRGM dont l'objectif a été d'étudier les effets d'échelle et l'hydrodynamique et leur influence sur le relargage d'éléments, dans une perspective de prédiction du comportement en scénario dans le temps.

D'une manière générale, on retiendra que le relargage est majoritairement contrôlé par la dissolution / précipitation des phases minérales constitutives du matériau, que des chlorures et des sulfates sont relargués surtout en début de suivi, que les teneurs en métaux lourds dans les eaux de percolation sont relativement faibles et tendent à diminuer en fonction du temps dans la plupart des cas, à l'exception du chrome.

Enfin, il apparaît que les cinétiques de relargage sont complexes et ne peuvent pas être simulées de manière convenable par un modèle simple de décroissance exponentielle.

### 6-3-3. Analyse récapitulative de l'ensemble des cas d'étude

Dans la grille suivante, les signes (+ ou 0) indiquent respectivement que la description du point évoqué a été traitée ou pas dans le cas d'étude. Le signe (0e) indique que le point n'est pas renseigné explicitement dans les documents obtenus, alors que ces derniers indiquent que la grandeur (par exemple le trafic) existe bien. De façon analogue, le signe (+i) indique que le point est renseigné mais que la grandeur est inexistante.

1 - Analyse de la description des ouvrages	+ / 0	Cas d'études																	Tot +
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Dates de production du matériau	connue / inconnue	0	0	+	0	+	0	0	+	+	0	+	0	+	0	0	+	+	8
• Dates de préparation du matériau	connue / inconnue	+	0	+	0	+	0	0	0	+	+	+	+	0	0	0	+	+	9
• Dates de mise en oeuvre du matériau	connue / inconnue	0	0	+	+	+	0	0	+	+	+	+	+	+	0	0	+	+	11
Description de la structure verticale de l'ouvrage	connue / inconnue	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	17
Dimensions de l'ouvrage	connue / inconnue	0	+	0	0	+	0	0	+	+	+	0	+	+	+	+	0	+	10
Masse de matériau en jeu connue ou calculable	oui / non	0	+	0	0	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	13
Dénivelé	précisé / non	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	1
Composition chimique du matériau	connue / inconnue	0	+	0	0	+	0	0	+	+	0	0	0	+	0	+	+	+	8
Minéralogie du matériau	connue / inconnue	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	3
Composés organiques	identifiés / non	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	1
Essais de solubilisation du matériau	réalisé / non	+	0	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	15
Granulométrie du matériau	connue / non	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	+	+	+	+	+	+	+	15
Caractéristiques géotechniques du matériau	connues / non	+	0	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	15
Caractéristiques de portance du matériau	connues / non	+	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+	+	0	0	0	+	10
Comportement au gel du matériau	connu / non	0	0	+	+	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Perméabilité du matériau compacté	connue / non	0	+	0	0	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	+	+	0	6

<b>Bilan Description des ouvrages</b>	<b>Tot +/16</b>	6	6	9	7	13	7	6	10	8	7	8	9	10	6	9	11	13	
<b>2 - Analyse de la description des sollicitations</b>	<b>+ / 0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>Tot +</b>
<i>Précipitations</i>	<i>suivies / non</i>	0	0	0	0	+	0	+	0	0	0	0	+	0	+	+	+	+	7
<i>Nappe (connue ou identifiée comme inexistante)</i>	<i>précisé / non</i>	0	+	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	+	0	0	0	+	4
<i>Trafic automobile (existant ou inexistant)</i>	<i>précisé / non</i>	0e	+	0e	+	0e	0e	0e	+	0e	0e	+	0e	+	0e	+i	+i	+	8
<i>Température atmosphérique</i>	<i>suivie / non</i>	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>Données relatives à l'entretien</i>	<i>précisées / non</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Déversements accidentels (existants ou inexistant)</i>	<i>précisé / non</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+i	+i	0	+	3
<b>Bilan Description des sollicitations</b>	<b>Tot +/6</b>	0	2	0	1	1	0	2	2	0	0	1	1	2	2	3	2	4	
<b>3 - Analyse de la description des réponses des ouvrages</b>	<b>+ / 0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>Tot +</b>
<i>Appréciation visuelle de l'état général</i>	<i>précisé / non</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	0	+	0	+	0	+	13
<i>Essais de portance en place</i>	<i>précisé / non</i>	+	0	0	0	0	+	+	0	0	0	+	+	0	0	0	0	0	5
<i>Mesure de déflexion</i>	<i>précisé / non</i>	0	0	0	0	+	0	+	+	0	0	0	0	+	0	0	0	+	5
<i>Taux d'infiltration dans l'ouvrage</i>	<i>précisé / non</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	+	2
<i>Suivi de la qualité des eaux de percolation</i>	<i>oui / non</i>	0	0	0	0	+	+	0	0	+	+	+	+	0	+	+	+	+	10
<i>Suivi du volume des eaux de percolation</i>	<i>oui / non</i>	0	0	0	0	0	+	0	0	+	0	0	+	0	+	+	+	+	7
<i>Qualité des eaux souterraines</i>	<i>contrôlé / non</i>	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>Qualité des eaux superficielles</i>	<i>contrôlé / non</i>	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>Qualité des sols sous-jacents</i>	<i>contrôlé / non</i>	0	+	0	0	0	0	0	+	0	0	+	0	+	0	0	0	0	4
<i>Qualité des sols avoisinants</i>	<i>contrôlé / non</i>	0	+	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	+	0	0	0	0	3
<b>Bilan Description des réponses des ouvrages</b>	<b>Tot +/10</b>	2	6	1	1	3	4	3	4	2	2	4	3	4	3	3	2	5	

➤ *Analyse de la pertinence des essais de caractérisation initiale des matériaux par rapport aux réponses environnementales des ouvrages*

Les points permettant d'analyser la réponse des ouvrages sur le plan environnemental sont :

- le taux d'infiltration des eaux de pluie en tant que facteur influent sur les réponses;
- le suivi de la qualité des eaux de percolation ;
- le suivi des volumes des eaux de percolation ;
- les effets sur la qualité des eaux souterraines ;
- les effets sur la qualité des eaux superficielles ;
- les effets sur la qualité des sols sous-jacents ;
- la qualité des sols avoisinants, soit qu'elle serve de référence locale de qualité des sols, soit que les sols avoisinants soient envisagés comme des cibles potentielles.

- Taux d'infiltration des eaux de pluie et volume des eaux de percolation

L'analyse de l'ensemble des cas d'étude montre que le taux d'infiltration dans les ouvrages n'est pas souvent précisé par les auteurs, faute de mesure des volumes de percolats recueillis ou faute de mesure des précipitations.

- Qualité des eaux de percolation

Le suivi de la qualité des percolats est évidemment pratiqué par toutes les études intégrant la finalité environnementale. L'essai de caractérisation initiale en relation avec cette réponse de l'ouvrage est l'essai de solubilisation. Il existe plusieurs types d'essais de solubilisation.

- Essais à finalité opérationnelle

Un essai particulièrement pratiqué dans les cas d'études recensés est l'essai X31-210. Ce dernier a une notoriété particulière car il est préconisé dans la circulaire « mâchefers » de 1994. Il est donc pratiqué en premier lieu par les auteurs comme un essai de type « réglementaire » pour toutes les études de cas concernant les MIOM.

L'essai X31-210 constitue donc avant tout un test à finalité de contrôle opérationnel et non un essai à finalité cognitive, même s'il est compréhensible que dans les cas d'études de suivi environnemental, ses utilisateurs aient la curiosité de comparer la qualité des percolats générés aux résultats de l'essai de lixiviation. Son rapport L/S élevé incite à l'assimiler à une simulation des conditions hydrauliques à long terme.

Normalisé en 1992, le protocole de l'essai X31-210 a été développé dans les années 1980 avec le cahier des charges suivant : être facile de mise en œuvre, largement applicable à des déchets de nature variable (solide, pâteux, granulaire, pulvérulent), répétable, reproductible et robuste. La durée variable permettait dans l'option 3 x 16h d'avoir une première approche de cinétique et d'éventuel épuisement. Les caractéristiques de l'essai reflètent ce cahier des charges : ratio L/S élevé, fragmentation éventuelle, agitation, durée courte, matériel courant de laboratoire. Ce sont ces caractéristiques qui ont conduit l'administration à recommander cet essai tout d'abord pour l'admission en décharge des déchets industriels spéciaux en 1992, puis en 1994 pour le classement des mâchefers en vue d'une utilisation en techniques routières. Elles ne reflètent aucunement des conditions réelles d'exposition dans l'un ou l'autre de ces scénarios. Les seuils, quant à eux ont été déterminés de manière statistique sur la base de la mise en œuvre de l'essai sur de nombreux échantillons de déchets. Ils n'ont donc pas été déterminés dans une logique d'impact éventuel (de l'usage de MIOM en techniques routières pour ce qui est de la circulaire « mâchefers » en particulier). Il ne faut donc pas

chercher dans la comparaison des résultats de cet essai à ceux issus du suivi sur ouvrage une valeur explicative.

○ Essais à finalité cognitive

Il existe d'autres types d'essais de solubilisation, pratiqués dans un nombre plus restreint d'études affichant une finalité cognitive ; l'objectif est alors de prévoir le comportement à la lixiviation du matériau en place à partir de l'interprétation de ces essais et d'éventuels modèles de prévision. Parmi les cas d'étude recensés, ces essais sont par exemple la mesure de la fraction maximale mobilisable, le test de capacité de neutralisation acido-basique (et l'analyse des solutions générées à différents pH), le test de percolation en colonne.

Les essais à finalité cognitive sont un moyen de décrire finement la solubilisation des constituants du matériau dans différentes conditions d'exposition (pH, ratio L/S, renouvellement dynamique ou statique, intermittent ou non, etc.). Destinés à identifier la sensibilité des matériaux en terme de lixiviation, ces essais sont qualifiés de « paramétriques » dans la norme EN 12920. Ils sont mis en œuvre en fonction des conditions identifiées comme susceptibles d'influencer le relargage dans le scénario d'emploi envisagé. A partir des résultats de ces essais un modèle comportemental hiérarchisant les influences des différents paramètres peut être élaboré. Il devra ensuite être validé.

L'analyse de la pertinence de ces essais du point de vue de la prévision du comportement en place doit quant à elle se faire par comparaison avec la qualité et la quantité des percolats générés en conditions réelles (mesure des concentrations instantanées et des flux de matière) afin de pouvoir établir une relation non ambiguë (le modèle) entre ces grandeurs. L'analyse des études de cas CAREX dans lesquels ces essais de types cognitifs ont été réalisés ne fournit malheureusement pas d'éléments de comparaison entre les résultats obtenus sur ouvrage et ceux obtenus au laboratoire. Leur interprétation se cantonne à celle du comportement du matériau soumis aux conditions spécifiques des tests pour décrire le terme source. La pertinence de ces essais de solubilisation du point de vue de la réponse sur site est donc une analyse qui reste à conduire pour aller vers des essais de caractérisation environnementale (solubilisation) prédictifs<sup>14</sup>.

• Evaluation des effets sur les cibles

La prévision de la percolation en place des matériaux alternatifs n'est qu'une étape du processus conduisant à l'évaluation des ouvrages routiers sur le plan environnemental ; elle doit servir à caractériser l'émission effective des polluants par le matériau dans la structure routière. Concernant l'évaluation de l'effet réel sur l'environnement, différentes cibles peuvent *a priori* être considérées comme visées par les percolats générés en l'état actuel des connaissances sur le cheminement de l'eau dans les ouvrages routiers (eaux souterraines, superficielles, sols sous-jacents et avoisinants). Les réponses des ouvrages sur le plan environnemental ont ainsi été envisagées pour ces 4 cibles.

○ Eaux souterraines

Les effets sur la qualité des eaux souterraines ne sont malheureusement indiqués que dans le cadre d'une étude (mesures à partir de piézomètres pour évaluer une pollution avérée). Cette étude (cas 2) portait sur un ouvrage réalisé avant que la caractérisation environnementale des

---

<sup>14</sup> Par rapport à l'essai de percolation TS 14-405 (), le projet LIMULE a montré que les résultats de ce dernier permettaient d'extrapoler le relargage de composés solubles (type sels) à différentes échelles en termes de L/S, autorisant une extrapolation dans le temps, mais ne permettaient pas à eux seuls une extrapolation pour les éléments réactifs.

matériaux ne devienne un réflexe. L'essai de caractérisation initiale en relation avec cette réponse (l'essai de solubilisation) n'a donc pas été réalisé, de même que n'est pas connu l'autre élément important d'interprétation : le taux d'infiltration. Il n'y a donc pas ici matière à analyser la pertinence de l'essai de caractérisation initiale.

- Eaux superficielles

Les effets sur la qualité des eaux superficielles avoisinantes n'ont aussi été considérés que dans une étude (la même que celle s'intéressant aux eaux souterraines – cas 2). L'absence de résultats d'essai de solubilisation ne permet, comme indiqué précédemment, aucune analyse de pertinence.

- Sols sous-jacents

Les effets sur la qualité du sol sous-jacent ont été pris en compte dans 4 cas d'études. Le premier (cas 2) concerne le site soumis à une pollution avérée des eaux. Les auteurs ont donc cherché à savoir si le sol sous-jacent à l'ouvrage avait été affecté ou non par les percolats. Dans le cas de cette étude, les données relatives au contrôle de la qualité des eaux et des sols n'ont pu être obtenues.

Les deux cas d'étude suivants (cas 8 et 13) concernent des études ponctuelles sur des sites en service, plusieurs années après la construction (l'objectif était un diagnostic d'impact). Ces ouvrages ayant été construits plusieurs années avant la parution de la circulaire « mâchefers », leur caractérisation via l'essai de lixiviation X31-210 ou tout autre essai de solubilisation n'a pas été faite. L'essai de lixiviation X31-210 a toutefois été réalisé sur les matériaux (des MIOM) extraits lors de l'étude : il caractérise le potentiel lixiviable résiduel du matériau après plusieurs années en place. Le potentiel initial n'étant pas connu, l'évaluation de la pertinence de cet essai par rapport à l'effet constaté n'est pas possible. Par ailleurs le taux d'infiltration dans les ouvrages (élément indispensable à l'interprétation) n'est pas non plus connu.

Le quatrième cas d'étude (cas 10) est le seul à fournir à la fois une description de l'effet (qualité du sol sous-jacent) et une description du terme source via l'essai de caractérisation initiale X31-210. Comme dit plus haut, cet essai n'est pas à vocation cognitive, mais le seul cas d'étude offrant les deux éléments, caractérisation initiale et effet sur une cible, mérite d'être souligné. Une analyse des teneurs en certains métaux dans le sol sous-jacent avant construction et après un an et demi de mise en contact, montre un accroissement des teneurs en cuivre, plomb et zinc. Les effets sur les autres paramètres (cadmium, nickel, chrome, arsenic, mercure). Cuivre et zinc n'ont pas été dosés sur les lixiviats d'origine, le taux de Pb solubilisé était faible (inférieur à 0,16 mg/kg de matière sèche). Ce cas d'étude ne fournit pas de taux d'infiltration dans l'ouvrage ni le volume de percolats générés qui permettrait d'estimer les flux de matière mis en contact avec le sol sous-jacent.

- Sols avoisinants

La qualité des sols avoisinants a été mesurée dans le cas de l'étude ayant visé à trouver une solution à un problème de pollution avéré des eaux souterraines et superficielles. L'absence de caractérisation du terme source (par un essai de solubilisation) obère toute recherche de relation entre le terme source et les effets. Pour les deux seuls autres cas recensés, s'inscrivant dans un diagnostic d'impact sur les sols sous-jacents après plusieurs années de mise en contact, il n'y a pas de recherche de relation à faire entre le terme source et l'effet puisque dans ces cas, du fait de l'absence de caractérisation initiale de l'état du sol sous-jacent, les sols avoisinants étaient utilisés comme sol de référence local pour distinguer la pollution éventuelle apportée par l'ouvrage de la pollution ambiante (bruit de fond).

Du point de vue environnemental, l'essai de solubilisation (dont le ou les protocoles pertinents sont encore à définir aujourd'hui) est l'essai fondamental de caractérisation initiale des matériaux. La pertinence de ce ou ces protocoles à définir, doit se juger par rapport aux effets éventuels sur des cibles (eaux et sols). Leur évaluation par rapport à la qualité des percolats générés sur ouvrage (observable grâce à un dispositif de collecte) est une étape intermédiaire, le percolat n'étant qu'un vecteur de la charge polluante vers les cibles. La pertinence des essais de solubilisation doit dans un premier temps au moins être évaluée par rapport à la qualité des percolats générés. Pour les ouvrages réels, les percolats générés ne seront pas extraits de la structure routière mais continueront à s'infiltrer en interagissant avec le sol et ensuite éventuellement les eaux. La pertinence des essais de solubilisation doit dans un second temps être évaluée par rapport aux effets sur ces cibles. L'ensemble des cas d'étude recensés fournit très peu d'éléments pour conduire ces évaluations.

➤ *Analyse de la pertinence des essais de caractérisation initiale des matériaux par rapport aux réponses mécaniques des ouvrages*

Concernant les matériaux naturels, il n'y pas lieu d'évoquer une pertinence quelconque à ce jour, du fait, comme cela a été expliqué dans le chapitre 4 relatif aux pratiques routières que tous les essais sont codifiés en fonction de l'emploi prévu. Par contre concernant les caractérisations initiales des matériaux alternatifs, le référentiel d'essais appliqué aux matériaux naturels est utilisé dans de nombreux cas comme l'attestent les 16 rubriques produits détaillées sur le site OFRIR (<http://ofrir.lcpc.fr>). Selon le type de déchets, certains essais de laboratoire peuvent ne pas être réalisables lorsque les matériaux sont liés et destinés à une utilisation en couches de chaussées (cela pourrait être le cas des MIOM traités par exemple pour des raisons de dimensions d'éprouvette et d'hétérogénéité du déchet). Clairement, une étape de validation à l'échelle de l'ouvrage s'avère indispensable, au moins pour évaluer sa tenue en fatigue sous charges roulantes, et le cas échéant les mécanismes de dégradation en surface et en profondeur susceptibles de se produire. Ce point est d'autant plus crucial qu'au voisinage de la surface d'une route, la distribution des contraintes de traction et de cisaillement supportées par la structure, associée à la différence de propriétés mécaniques des couches engendre des discontinuités qui peuvent conduire à :

- une dé-cohésion locale aux interfaces d'une couche à l'autre, d'où la nécessité de valider le comportement des interfaces,
- une micro-fissuration en profondeur, se propageant jusqu'à l'interface et constituant un réseau de fissures, néfastes au confort de l'utilisateur et augmentant très fortement la perméabilité de la route, point qui n'est jamais abordé dans aucune des approches environnementales mentionnées dans CAREX.

## **7. Bilan de l'étude et perspectives pour l'expérimentation**

Sur le plan de l'étude des mécanismes de relargage, il est indiqué par Polden dans son rapport (présenté en intégralité dans l'Annexe 3) que les conditions d'exposition des matériaux ayant finalement été peu différentes d'un cas d'étude à un autre, il n'est pas envisageable d'établir une typologie de ces dernières.

Le contenu de la section 2 du rapport final de Polden (Annexe 3) se retrouve intégré et fusionné avec le bilan du LCPC dans la section 7.1 ci-après, en termes de recommandations méthodologiques globales.

Pour les MIOM qui sont le matériau le plus fréquemment rencontré dans les différents cas d'étude (12 cas sur 17), il a été entrepris par Polden de déterminer s'il existait des similitudes de comportement entre les différents cas d'études (Cf. Annexe 4).

La section 4 du rapport Polden précise que « les bilans hydriques et les taux d'infiltration sont très différents dans une même typologie. Ces paramètres dépendent en effet de la nature et de l'épaisseur des couches supérieures (pas forcément les mêmes pour une même typologie), de l'épaisseur de la couche elle-même, mais également de la composition du matériau routier à base de matériau alternatif ».

En intégrant les réflexions de Polden (Annexes 3 et 4) comme précisé ci-dessus, le LCPC propose ci-après une synthèse générale relative à l'ensemble des travaux examinés dans CAREX en plaçant autant que possible sur le même plan les pratiques courantes dans les domaines de la mécanique et de la géotechnique des ouvrages routiers et celles menées dans le domaine environnemental (cf. Polden, rapport CAREX tâches 4 et 5), à savoir :

- l'analyse de la pertinence des essais réalisés en laboratoire, destinés à obtenir des propriétés ;
- l'analyse de la pertinence des essais en vraie grandeur et des ouvrages ;
- l'analyse sur modèle réduit ; car au vu des cas d'études relatifs à CAREX, aucune approche de ce type n'a été identifiée pour les matériaux recyclés.

C'est pourquoi le manège de fatigue du LCPC est présenté dans les perspectives pour montrer comment une approche couplée environnementale/mécanique peut être réalisée pour des couches de chaussées.

### ***7-1. Bilan méthodologique environnemental***

Dans un premier temps, la pertinence des essais de solubilisation (lixiviats générés en laboratoire) doit être évaluée par rapport à la qualité des percolats générés sur ouvrages, en gardant à l'esprit que ces percolats, dans la réalité finiront par atteindre une cible (avec ou sans impact sur celle-ci). La pertinence des essais de solubilisation doit ensuite être évaluée par rapport aux effets de ces percolats sur les cibles potentielles dans l'environnement.

On propose ainsi dans cette section une analyse de la pertinence des essais de solubilisation par rapport à la source, puis par rapport aux effets. Ensuite, le bilan que l'on en tire permet de faire des recommandations pour la définition d'essais plus pertinents. Enfin, sur la base de l'analyse conduite par Polden, une analyse de la pertinence des différentes méthodologies d'études employées sur le plan environnemental est réalisée et permet de formuler des recommandations.

### **7-1-1. Pertinence des essais vis-à-vis de la caractérisation de la source**

Cette analyse est conduite sur la base de la comparaison entre la qualité des lixiviats produits artificiellement au laboratoire et la qualité des percolats générés par les ouvrages.

#### ➤ **Cas d'études ne caractérisant pas la source**

Parmi les cas recensés, très peu d'études ne comportent pas d'essais de solubilisation. Il s'agit d'une étude à finalité purement mécanique sur un matériau autre qu'un mâchefer. Référence est faite ici aux MIOM car étant le seul matériau à avoir fait l'objet d'un texte (la circulaire de 1994) indiquant officiellement une méthode d'évaluation environnementale à partir de l'essai de lixiviation X31-210. Ce protocole de lixiviation est devenu le plus connu dans le domaine, et son champ d'application a pu dans la pratique, par usage pour d'autres matériaux et des seuils d'acceptation, dépasser celui prévu par la circulaire de 1994. Par conséquent, qu'une étude à finalité purement mécanique sur un matériau autre qu'un MIOM, ne procède pas à un essai de solubilisation (notamment le X31-210) est tout à fait logique.

L'autre étude n'incluant pas d'essai de solubilisation est antérieure à 1994 et en outre, ne porte pas sur les mâchefers.

#### ➤ **Cas d'études ne considérant que l'essai X31-210**

Des essais de solubilisation du matériau (quels qu'ils soient) sont pratiqués dans tous les autres cas d'étude, y compris dans les études n'intégrant pas le suivi de la qualité des percolats (Cf. Tableau 6). Cinq études sont dans ce dernier cas. Pour trois d'entre elles (elles portent sur des MIOM), les recommandations de la circulaire ayant été édictées, la réalisation de l'essai (en l'occurrence l'essai X31-210) et la comparaison aux seuils de la circulaire, s'inscrit dans une approche de type réglementaire. Pour les deux autres (elles portent aussi sur des MIOM), les essais et la comparaison aux seuils de la circulaire, s'inscrivent dans une démarche de diagnostic de l'état du matériau extrait de l'ouvrage après plusieurs années de vieillissement en place.

Dans ces 5 cas, aucun suivi des eaux de percolation n'existant (cela ne correspondait pas aux objectifs des auteurs des études), la discussion de la pertinence est sans objet. Par contre de tels résultats d'essais sont intéressants pour la constitution de bases de données sur le comportement à la lixiviation des MIOM en général.

Parmi les autres cas d'étude, c'est-à-dire ceux comportant à la fois une caractérisation du matériau par essai de solubilisation et un suivi qualitatif des eaux de percolation, on identifie 7 cas d'études, portant tous sur des MIOM, dont la caractérisation du potentiel lixiviable ne se fait qu'au moyen de l'essai X31-210. D'après l'analyse menée par Polden (Cf. Annexe 3), ces 7 cas d'études ont mis en évidence l'inaptitude de l'essai X31-210 à caractériser le comportement à la lixiviation en scénario et *a fortiori* à prévoir le comportement des matériaux alternatifs (cf. § 6-3-3). Parmi les conclusions de ces études, certains auteurs ont d'ailleurs noté que « deux mâchefers présentant des concentrations proches pour un même élément selon l'essai X31-210 peuvent relarguer différemment cet élément lorsqu'ils sont placés dans des conditions réelles. »

Dans certaines de ces études, l'essai X31-210 semble pratiqué uniquement dans un but réglementaire, aucun lien n'étant fait entre la qualité des lixiviats et celle des percolats. Dans d'autres au contraire, une relation est recherchée entre ces deux grandeurs. Les résultats de l'essai X31-210 étant exprimés en mg de substance chimique extraite par Kg de matière sèche de matériau, les auteurs n'utilisent pas la qualité des percolats comme base de comparaison,

mais les quantités cumulées de substance extraite (aussi en mg/Kg) à l'issue du suivi. Ceci signifie que les volumes de percolat générés doivent avoir été enregistrés pendant le suivi. Ceci réduit le nombre de cas d'études à trois. Les taux exprimant la fraction percolée cumulée sur la fraction lixiviée (X31-210) sont variables. Leur dispersion s'explique par le faible nombre de cas en jeu (variabilité des MIOM) et par les différents taux de lixiviation en place des matériaux (exprimé en valeur de L/S). L'utilisation de S nécessite de connaître la masse de matériau en jeu.

	Nature de l'essai	Non intrinsèque	Non intrinsèque	Intrinsèque
<b>Cas</b>	Matériau	Essais de lixiviation		
5	MIOM	X31-210		
6	MIOM	X31-210		
9	MIOM	X31-210		
10	MIOM	X31-210		
11	MIOM	X31-210		
12	MIOM – MIDIS	X31-210		Extractions séquentielles
14	MIOM	X31-210		
15	Cendres volantes	X31-210 – X31-211	TLM – Colonne - Sol° fonc° pH	CNA
16	Scories	X31-210	TLM – Sol° fonc° pH	CNAB
17	Cendres traitées	X31-210	Colonne	CNAB – FMM

TLM : Test de Lixiviation sur Monolithe

Sol° fonc° pH : Solubilisation en fonction du pH

CNA(B) : Capacité de Neutralisation Acide (Basique)

FMM : Fraction Maximale Mobilisable

**Tableau 6. Cas d'études incluant des essais de solubilisation**

➤ *Cas d'études visant à caractériser le terme source*

Dans ces quatre cas d'étude (dont un seul porte sur des MIOM), la démarche choisie consiste à étudier les propriétés du déchet en vue de comprendre le relargage dans un ouvrage réel et de prédire éventuellement le comportement à la lixiviation. Ces études sont réalisées au moyen d'essais de caractérisation intrinsèque et/ou d'essais paramétriques (non intrinsèque) généralement choisis en fonction de la nature des paramètres du scénario considérés comme susceptibles d'avoir une influence sur le relargage (cette adéquation n'est pas toujours vérifiée). Des lysimètres ou plots sont constitués et font l'objet de suivi de la qualité des eaux de percolation. Dans 3 cas sur 4, ils constituent des essais de simulation destinés à reproduire l'effet combiné de différents paramètres sur le relargage dans le scénario considéré afin de valider les modèles comportementaux établis à partir des résultats précédents.

Si l'essai de lixiviation X31-210 a été réalisé dans le cadre de ces études, c'est uniquement dans le but de positionner ces matériaux vis-à-vis des seuils de conformité réglementaires existants, c'est-à-dire ceux de la circulaire « mâchefers » et ceux de l'arrêté du 18/12/92 sur le stockage des déchets dangereux.

Les propriétés intrinsèques dont la détermination peut être pertinente vis-à-vis de la modélisation du comportement en scénarios de valorisation sont la fraction maximale

mobilisable (FMM), la capacité de neutralisation acido-basique (CNAB) et la spéciation des éléments polluants.

Les essais paramétriques considérés *a priori* comme pertinents au regard des conditions d'exposition en scénario susceptibles d'avoir une influence sur le relargage sont des essais de détermination de l'influence du pH et de la dynamique de renouvellement de l'eau (en colonne ou sur monolithe) sur la solubilisation des polluants.

Ce n'est que l'intégration des résultats de ces essais et l'interprétation qui en est faite (généralement par la modélisation) en termes de concentration et de flux de polluants émis dans les conditions du scénario, qui peut faire l'objet d'une comparaison avec des concentrations et flux de polluants mesurés lors du suivi d'un ouvrage expérimental incorporant les déchets étudiés.

Conformément à la norme EN 12920, le modèle comportemental doit être validé en utilisant une des procédures suivantes :

- la vérification de la cohérence entre les essais paramétriques et des essais de simulation (exemple : lysimètres) ;
- la vérification in-situ du comportement prévu (exemple : ouvrage réel) ;
- la comparaison avec des matériaux naturels / archéologiques.

Parmi les quatre études, au moins un de ces trois types de validation a été conduit. Selon que les études ont mis en œuvre ou non une modélisation et/ou des chaussées expérimentales, l'interprétation des résultats des essais en lysimètre est différente.

● Dans le cas de l'étude 12 portant sur l'étude du comportement de mâchefers en contact avec un sol, la caractérisation intrinsèque des mâchefers par un protocole d'extractions séquentielles en vue de déterminer la spéciation des éléments polluants n'a pas permis de conclure, compte tenu des difficultés de reproductibilité des essais. Aucune relation n'a donc pu être mise en évidence entre ces essais de caractérisation et la composition des percolats de lysimètre et de l'ouvrage expérimental.

La comparaison de la composition des percolats de lysimètre avec celle des percolats de chaussée expérimentale est rendue délicate par la présence d'une couche de sol entre les mâchefers et la collecte des percolats dans les lysimètres alors que les percolats de chaussée expérimentale sont recueillis directement après percolation des mâchefers. De plus la durée limitée de suivi de ces deux types de dispositifs rend également l'interprétation délicate en termes de caractérisation du comportement. Les conclusions de cette étude font apparaître la nécessité d'une poursuite de l'étude et d'une meilleure connaissance des mécanismes associés au relargage des polluants des mâchefers en scénario.

● Dans le cas de l'étude 15, la caractérisation intrinsèque des cendres volantes de charbon (composition chimique et capacité de neutralisation) et les essais paramétriques déterminant l'influence du pH et de la dynamique renouvellement de l'eau sur la solubilisation des polluants ont conduit à la construction d'un modèle comportemental sur la base des conditions hydrodynamiques de la colonne de percolation en laboratoire. Ces conditions se sont avérées non transposables aux conditions hydrodynamiques des lysimètres simulant l'exposition de cendres en scénario non recouvert. Un problème de changement d'échelle apparaît. Une caractérisation de l'hydrodynamique du lysimètre aurait été nécessaire pour vérifier la validité du modèle.

L'absence de chaussée expérimentale (initialement prévue) dans le cadre de ce programme ne permet pas de conclure quant à l'impact d'un effet d'échelle entre les lysimètres de structure de chaussée exposés aux aléas climatiques naturels pendant 18 mois et une chaussée expérimentale.

- Dans le cas de l'étude 16 portant sur la valorisation de scories de plomb et de zinc, l'interprétation des essais de caractérisation intrinsèque des scories (composition chimique, capacité de neutralisation acido-basique) et des essais paramétriques de détermination de l'influence du pH, du vieillissement (carbonatation) et de la dynamique de renouvellement de l'eau sur la solubilisation montre une bonne cohérence avec les résultats du suivi des lysimètres (rôle majeur du pH et de la carbonatation). Ces résultats peuvent servir à orienter les choix d'emploi des matériaux en fonction de leur sensibilité à différentes composantes du contexte dans lequel ils peuvent être amenés à être placés

Le choix des essais paramétriques à réaliser sur les matériaux constitués à partir des scories n'a pas été aussi pertinent, puisque l'étude de l'influence du ratio L/S la solubilisation des polluants des sables bitume et sable ciment contenant les scories a été réalisée en considérant un mécanisme de transfert de surface alors que les matériaux se sont avérés percolants dans les lysimètres.

La comparaison entre les résultats de suivi des lysimètres de sable bitume et de sable ciment et ceux des lysimètres témoins ont permis de distinguer nettement les conditions d'exposition pouvant générer des risques importants de relargage de plomb de celles qui semblent acceptables.

L'absence de modélisation du comportement à la lixiviation ne permet pas de répondre à la question de l'évaluation du comportement environnemental en scénario réel.

- Dans le cas de l'étude 17, l'ensemble des étapes de la méthodologie EN 12920 a été mis en œuvre. Ainsi, la caractérisation des propriétés intrinsèques des cendres traitées (composition chimique et minéralogique, fraction maximale mobilisable, capacité de neutralisation acido-basique) et les essais paramétriques sur les matériaux élaborés (influence du pH et de la dynamique du relargage) ont permis de comparer les 3 couples de matériaux/usage envisagés au regard de leur relargage. Les niveaux de relargage sont différents et confirmés par les essais en lysimètre. Seul le couple matériau/usage présentant un niveau de relargage intermédiaire a fait l'objet d'une modélisation du comportement à la lixiviation car c'est celui qui correspondait à la mise en œuvre dans l'ouvrage.

La comparaison des résultats fournis par le modèle comportemental et du suivi en lysimètre a mis en évidence l'importance de la prise en compte de l'alternance de périodes humides et sèches dans la caractérisation des mécanismes de relargage en vue de la prédiction du comportement. C'est l'interprétation de l'ensemble des données acquises par la caractérisation intrinsèque, les essais paramétriques et les essais en lysimètre qui a permis la mise au point du modèle comportemental satisfaisant puisque ses résultats sont validés à l'échelle du lysimètre. Ainsi le modèle traduit une bonne compréhension des mécanismes régissant le relargage observé à l'échelle du lysimètre. Par contre, les résultats de la modélisation n'ont pas été confirmés par le suivi de l'ouvrage expérimental. Les raisons de ce manque de correspondance peuvent tenir à l'influence de paramètres négligés lors de la construction du modèle, mais aussi à des différences entre les conditions de suivi entre l'ouvrage expérimental et le lysimètre (hydraulique différente entre les systèmes, modes de collecte et conservation des percolats différents entre les deux échelles).

Les problèmes de changement d'échelle rencontrés aux cas d'étude 15 et 17 amènent à se poser la question suivante : est-il judicieux de chercher à résoudre des problèmes de changement d'échelle entre le laboratoire et l'échelle lysimètre lorsque l'on sait que l'on en aura d'autres à résoudre entre l'échelle lysimètre et l'échelle ouvrage ? On peut craindre en effet que l'échelle lysimètre (entendu dans le sens « modèle réduit et simplifié d'ouvrage ») ne crée des distortions physiques et chimiques pas rapport aux ouvrages routiers réels,

introduisant un niveau de complexité dans la résolution du passage entre le laboratoire et l'ouvrage.

Toutefois, les essais en lysimètre permettent une instrumentation et un suivi plus aisés que les ouvrages expérimentaux. Ils permettent également d'imposer facilement des conditions d'exposition variées en termes de quantité d'eau apportée par aspersion, de fréquence des apports, de composition des eaux d'arrosage, et ainsi d'observer l'influence de ces paramètres. Les alternances de périodes humides et sèches et l'observation de leurs effets sur le relargage y sont notamment plus faciles à réaliser que sur un ouvrage.

### ➤ *Conclusion*

En conclusion de l'analyse précédente des cas d'études, il ressort que l'évaluation de la pertinence des essais de solubilisation par les différents auteurs est relativement limitée. Dans certains cas, la représentativité de l'essai de solubilisation (dans tous ces cas il s'est agi du protocole de la norme X31-210) est recherchée à travers la comparaison des flux produits lors de cet essai, avec les flux produits par la percolation réelle dans les ouvrages. Dans d'autres cas, où une gamme plus large d'essai de solubilisation (essais en batch et en colonne ; sur matériau granulaire ou massif ; à différents pH ou rapports L/S ) et de caractérisation des propriétés des matériaux (capacité de neutralisation, fraction maximale mobilisable) est utilisée. L'ensemble des résultats sert à une définition des caractéristiques du terme source permettant de décrire et prévoir le comportement en lixiviation du matériau en terme de qualité des lixiviats et de variation de cette qualité en fonction de la variation d'un certain nombre de facteurs influents (sensibilité au pH, au taux de lessivage en terme de rapport L/S...). Par contre, cette connaissance approfondie du terme source (qui donne lieu parfois à une modélisation), bute sur la description - et a fortiori sur la prévision - de la percolation en grandeur réelle sur ouvrage. Des problèmes de changement d'échelle entre le laboratoire et l'ouvrage réel sont soulevés. De ce bilan, il ressort qu'il n'est donc pas possible en l'état actuel des choses de réaliser un quelconque tri parmi l'ensemble des essais de solubilisation existants. De ce bilan il ressort aussi qu'afin d'améliorer la description et la prévision de la percolation réelle sur ouvrage, la description fine du terme source et de son comportement en laboratoire ne suffit pas. Les problèmes posés par le changement d'échelle pourront être résolus par une meilleure description des caractéristiques influentes de l'ouvrage routier d'une part dans la modélisation, et d'autre part dans la conduite des essais de solubilisation.

### ***7-1-2. Pertinence des référentiels d'évaluation des effets potentiels sur les cibles***

Parmi les cas d'études recensés, une seule étude a fourni des mesures de qualité des eaux souterraines, des eaux superficielles, des sols sous-jacents et des sols avoisinants. Ces mesures ont été effectuées à l'occasion de l'évaluation d'un impact avéré. Or dans ce cas d'étude, le potentiel lixiviable du matériau qui s'est avéré polluant, n'a pas été évalué à l'origine (ni même après le constat d'impact).

Trois autres cas d'études se sont intéressés aux effets sur les sols sous-jacents. Deux d'entre eux pour la réalisation d'un diagnostic à moyen terme (20 ans), le troisième pour une évaluation après mise en contact de court terme (18 mois). Cette dernière étude a été faite en relation avec le suivi de la qualité et de la quantité de percolats générés (données qui n'étaient pas disponibles pour les diagnostics à moyen terme). Cette étude n'a utilisé que l'essai de

lixiviation X31-210 comme essai de solubilisation. Le matériau (un MIOM) appartenait à la catégorie valorisable. Les teneurs dans le sol sous-jacent, comme dans les deux autres études de diagnostic sont fournies, ainsi que leur variation par rapport à l'état initial. Le fait que ces variations apparaissent comme des augmentations (Ni, Cu, Pb, Zn, As) mais aussi des diminutions (Cr) est lié à un trop faible échantillonnage par rapport à la variabilité des teneurs dans le sol initial. Pour les deux études de diagnostic, l'état initial du sol n'étant pas connu, référence est prise dans la qualité des sols avoisinants.

De cette analyse il apparaît un grand manque d'observations sur la qualité des eaux et des sols en général, voire sur le milieu vivant (flore, faune). A ceci s'ajoute un manque de référentiels adaptés pour juger de la qualité des sols et des eaux souterraines. Pour ce qui est des eaux superficielles, le référentiel établi par les agences de l'eau (utilisé dans un cas d'étude) pour qualifier l'état des cours d'eau, peut être utilisé.

Des référentiels moins généraux sont utilisés par d'autres études. Le rapport de Tâche 4 de Polden en dresse une liste. Ainsi, dans certains cas, des comparaisons sont faites par rapport aux limites de rejets des installations classées, ou par rapport aux limites de rejets fixées aux plate-formes de maturation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères. Parfois ce sont les limites de qualité pour les eaux potables qui sont utilisées, ou celles des eaux brutes potabilisables, ou les valeurs de constat d'impact des eaux superficielles proposées par le BRGM dans son Guide de gestion des sites potentiellement pollués. Parfois, la qualité des percolats est comparée à celle de percolats de chaussées témoin, ou à des valeurs issues de la littérature (concentration dans les percolats de chaussées).

L'exploitation des données de percolation et d'effet sur les eaux et les sols, la comparaison entre sites (ouvrages et matériaux) nécessite l'existence et l'emploi de référentiels communs. On voit que ce manque de référentiels conduit à l'emploi de référentiels au cas par cas, à la multiplication de ces référentiels et à l'extrême difficulté de recouplement des conclusions d'une étude à l'autre.

### ***7-1-3. Recommandations pour la définition d'essais plus représentatifs***

Seuls les trois derniers cas d'études (cas 15, 16 et 17) présentent un éventail d'essais de caractérisation environnementale permettant une analyse de leur pertinence ou représentativité par rapport aux résultats observés à l'échelle des ouvrages. Cette analyse a d'ailleurs été engagée par J. Mewton (Evaluation de l'utilisation de déchets en travaux publics, Travail de Fin d'Etudes de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, juin 2004). Ses conclusions sont reprises ici, commentées et renforcées selon les cas. Les propositions qui suivent visent à décrire quelles sont les caractéristiques (paramètres influents) que devrait intégrer le ou les essais de caractérisation à la lixiviation d'un matériau utilisé en construction routière, pour une détermination plus complète du terme source.

#### ***➤ Paramètres à intégrer dans les essais***

- Perméabilité et porosité

Puisqu'ils vont déterminer les conditions d'écoulement dans le matériau, écoulement qui est à la base de la mise en solution des polluants potentiels, les premiers paramètres à intégrer pour

la caractérisation à la lixiviation sont la perméabilité et la porosité du matériau. Pour un matériau donné, ces deux caractéristiques vont dépendre de son taux de compactage, de sa prise spontanée éventuelle, ou de l'emploi de liants. On voit donc que les paramètres de la caractérisation environnementale dépendent de la forme sous laquelle sera utilisé le matériau. Cette forme dépend de la fonction que le matériau devra remplir dans l'ouvrage, donc de sa place dans la structure routière.

Il est admis aujourd'hui que le comportement à la lixiviation d'un matériau alternatif va dépendre des facteurs agissant sur lui. On parle de scénario d'utilisation pour décrire l'ensemble des conditions déterminantes de ce contexte d'utilisation. Dans un contexte où l'on veut rationaliser à grande échelle, sur le plan environnemental et sur le plan fonctionnel, l'usage des matériaux alternatifs en construction routière. L'approche par scénarios ne s'entend pas comme une étude à reproduire pour chaque cas particulier d'utilisation, mais comme une méthode visant à proposer des types d'emploi rationnels de ces différents matériaux. Dans cette perspective, l'importance des facteurs perméabilité et porosité, puisqu'ils seront dépendants de la couche d'emploi du matériau dans la structure routière, conduit à considérer cette dernière comme un élément fondamental du scénario d'utilisation en construction routière.

- Agent lixiviant

Le second paramètre envisagé dans le rapport de J. Mewton, est la nature de l'agent lixiviant, la lixiviation pouvant être pratiquée avec de l'eau déminéralisée (dont le pH est proche de la neutralité ; environ 6,4), représentant une « pluie normale », ou bien avec de l'eau acidifiée à pH 4 pour représenter une pluie acide. Ces considérations sur le pH des eaux de pluies sont pertinentes par rapports à des applications du domaine routier dans lesquelles les matériaux ne seraient pas recouverts. Toutefois, la majorité des utilisations impliquant une couverture, si l'on veut être aussi rigoureux dans la représentativité pour ces dernières, il faudrait utiliser un agent lixiviant représentant la qualité de l'eau d'infiltration dans la chaussée après son passage à travers la couche de roulement.

- Cycles humidification-séchage et gel-dégel

L'alternance de périodes de séchage-humidification est aussi proposée comme paramètre à prendre en compte. Bien que les chaussées soient perméables aux eaux de pluies, il n'en est pas moins vrai qu'elles ne sont fort heureusement quasiment jamais saturée d'eau (hors périodes d'inondation). Les structures routières sont d'ailleurs conçues pour évacuer l'eau rapidement. Or, les essais de solubilisation imposent des conditions de saturation. La proposition de J. Mewton a pour objectif principal de déterminer l'influence de la carbonatation sur le comportement à la lixiviation des matériaux. On notera que cette carbonatation peut aussi jouer un rôle mécanique. On ajoutera que l'alternance séchage-humidification est aussi un facteur de modification des propriétés hydrodynamiques du matériau par la création de fissures de retrait, phénomène susceptible d'apparaître dans tout ouvrage réel. A ce titre les alternances gel-dégel pour les zones climatiques concernées sont aussi à prendre en compte par la fracturation qu'elles vont créer. On peut envisager que carbonatation et fissuration soient obtenues de façon accélérée.

- Choix des rapports L/S

Le rapport L/S est un paramètre fondamental des essais de solubilisation. Dans le domaine routier, le rapport L/S (que l'on préférera au rapport L/A) peut être représentatif dans l'ouvrage réel (toutes choses égales par ailleurs) de la plage de temps pendant laquelle la

masse de matériau en jeu (S) aura été soumise au volume d'eau de percolation L. Toutefois, compte tenu de la méconnaissance actuelle des taux d'infiltration des eaux de pluie dans les ouvrages routiers et de la grande variabilité des quelques chiffres existants, la proposition de rapports L/S précis susceptibles de correspondre à des échelles de temps particulières est encore difficilement justifiable.

- Facteur Température

Enfin, l'influence des températures est mentionnée comme paramètre à prendre en compte dans le rapport de J. Mewton. Comme il l'indique, ce paramètre n'est pas pris en compte dans les études de laboratoire. Dans le domaine routier, il est pris en compte concernant les températures basses, à propos du risque de gel, dans une perspective mécanique. Dans la perspective environnementale, il semble que températures extrêmes hautes et basses soient à considérer sur deux plans différents. Concernant les dernières, comme indiqué plus haut, on doit plutôt prévoir un effet mécanique aboutissant à de la fissuration-fragmentation modifiant les surfaces d'échange et les conditions d'écoulement dans le matériau lorsque la température repassera au dessus de zéro. Concernant les hautes températures, ce sont les vitesses de réactions qui peuvent être modifiées mais les gradients de températures étant forts dans les structures routières, ce sont essentiellement les couches supérieures qui peuvent être affectées.

➤ *Valeurs des paramètres à intégrer*

En conclusion de cette analyse des paramètres à prendre en compte dans la conception d'essai de solubilisation permettant d'établir une relation avec les résultats observés sur ouvrages, il apparaît que parmi les essais existant actuellement, il ne s'en trouve pas qui réponde à ces exigences. Pour aller plus loin vers la définition de ces futurs essais que la simple description des paramètres importants, il est nécessaire de fixer les gammes de valeurs dans lesquelles tester les matériaux.

En terme de perméabilité-porosité, référence doit être faite au référentiel routier existant en terme de compactage et de traitement de matériaux. Les caractéristiques fonctionnelles du matériau mis en œuvre étant ainsi déterminées, c'est ce matériau qui devra être évalué en lixiviation.

Concernant la représentativité de l'agent lixiviant, on a vu que le caractère couvert ou non du matériau jouera un rôle dans les choix. Des références en terme de qualité des eaux d'infiltration dans les chaussées pourraient servir pour déterminer la nature de l'agent lixiviant pour les applications recouvertes. Comme pour la détermination de perméabilité et de la porosité, on voit ici que la couche d'emploi du matériau est un élément important du scénario d'utilisation.

La réalisation d'alternances humidification-séchage et gel-dégel doit se faire en respectant la logique des cycles appliqués dans le domaine mécanique, ces cycles ayant été déterminés pour représenter des phénomènes susceptibles de survenir dans la réalité. La conduite d'une carbonatation accélérée doit se faire en prenant en compte la carbonatation sur stock des matériaux avant emploi et les taux de carbonatation observés dans les ouvrages réels.

Le choix des rapports L/S susceptibles de représenter des plages de temps particulières in situ (court terme, moyen terme, long terme) doit se faire à partir d'en ensemble de données mesurées sur ouvrages réels.

L'influence des températures extrêmes doit être prise en compte dans la gamme des températures enregistrées sur ouvrages réels.

#### ***7-1-4. Pertinence des approches méthodologiques utilisées et recommandations***

L'analyse des différents cas d'études a permis de dégager une typologie d'études basée sur l'objectif visé et l'approche méthodologique suivie (Cf. Annexe 4). Les différents types d'étude ont été classés ainsi :

- 1) Caractérisation du comportement mécanique de l'ouvrage : aucune analyse ni essai à caractère environnemental ;
- 2) Caractérisation de matériaux après plusieurs années de mise en œuvre dans un ouvrage : diagnostic de chaussées anciennes : caractérisation de matériaux après plusieurs années de service ;
- 3) Quantification de l'émission de polluants issus d'un ouvrage expérimental : suivi des percolats issus de l'ouvrage et comparaison à des référentiels existants (témoin, valeurs seuils) ;
- 4) Détermination du comportement à la lixiviation de matériaux dans les conditions spécifiées par le scénario d'utilisation : programme expérimental visant à la compréhension et la prise en compte des phénomènes liés au couple matériau/scénario « technique routière ».

L'analyse des cas d'études permet de proposer des recommandations méthodologiques pour les types 2, 3 et 4.

##### **➤ *Diagnostic historique d'un ouvrage***

Lorsqu'une opération de diagnostic est envisagée sur un ouvrage réalisé au moyen de matériaux alternatifs, deux types d'information peuvent être recherchés :

- l'effet sur le sol et les eaux environnant l'ouvrage ;
- l'évolution des caractéristiques physico-chimiques voire comportementales du matériau alternatif suite à son exposition pendant sa durée de service.

Pour être pertinente, la méthodologie d'étude doit distinguer clairement ces deux objectifs. Dans tous les cas, une description détaillée de la structure de l'ouvrage doit être précisée, en particulier s'il est envisagé d'extrapoler des résultats à d'autres ouvrages contenant les mêmes matériaux alternatifs. En l'absence de données de caractérisation initiale des matériaux employés et/ou de suivi dans le temps, seul le premier objectif est accessible.

La caractérisation de l'effet de l'ouvrage sur le sol sous-jacent doit reposer sur une caractérisation de l'extension de la pollution en profondeur depuis l'ouvrage et la comparaison des mesures avec le fond géochimique local. L'étude de l'effet de l'ouvrage sur les eaux souterraines nécessite des connaissances suffisantes du contexte hydrogéologique de l'ouvrage pour réaliser un prélèvement en amont hydraulique et au moins 2 prélèvements en aval hydraulique afin d'effectuer une comparaison amont/aval.

Dans le cas d'une étude de l'évolution des caractéristiques du matériau alternatif on cherchera à minima à quantifier la perte d'éléments polluants par la comparaison du contenu total initial du matériau pour cet élément, et après exposition. Il est aussi possible d'observer les tendances d'évolution du comportement du déchet soit vers une meilleure rétention soit vers une mobilisation plus importante. Ceci peut se faire par le biais d'une caractérisation

minéralogique comparative et la détermination comparée (avant et après exposition) de la fraction maximale mobilisable (par exemple au moyen d'un essai permettant de quantifier par l'atteinte d'une asymptote la quantité maximale mobilisable en mg/kg en fonction du ratio L/S). De plus, utilisées en complément d'une caractérisation du terme source du même matériau dans le même scénario, selon les conditions de la norme EN 12920, de telles données peuvent permettre d'apporter une validation de modèles comportementaux.

➤ ***Quantification de l'émission de polluants issus d'une chaussée expérimentale***

Ces études visent à positionner l'émission de polluants d'un ouvrage expérimental, quantifiée par dosage dans les percolats, par rapport aux référentiels existants (exemple : qualité des eaux).

Pour être représentative du relargage d'un ouvrage réel, la quantification de l'émission de polluants doit reposer sur une construction d'ouvrage expérimental représentative, une bonne maîtrise des entrées et sorties d'eaux en contact avec le déchet, une bonne représentativité des conditions climatiques d'exposition d'un ouvrage réel (avec identification des aléas techniques et climatiques intervenant durant la période d'exposition), ainsi qu'un certain nombre de précautions relatives au conditionnement des percolats recueillis (Cf. Annexe 4 – chapitre 4) pour éviter leur évolution physico-chimique avant analyse. D'autre part, le choix du référentiel doit prendre en compte la nature des milieux environnants et la vocation de ces milieux mais aussi les facteurs d'atténuation liés à la rétention de polluants par le sol et/ou leur dispersion dans les eaux souterraines.

Enfin, utilisées en complément d'une caractérisation du terme source du même matériau dans le même scénario, selon les conditions de la norme EN 12920, ces données peuvent permettre d'apporter une validation d'un modèle comportemental.

➤ ***Détermination du comportement à la lixiviation dans des conditions spécifiées***

Lorsque la démarche d'étude cherche à s'appuyer sur la compréhension des mécanismes impliqués dans le relargage en scénario pour en prédire l'évolution, la norme méthodologique EN 12920 constitue une procédure de référence (unique de procédure normalisée dans ce domaine). Les étapes de cette démarche sont décrites au chapitre 4.3 de l'Annexe 4. Dans le cadre de l'étude BILENV, Polden-EEDEMS a dressé pour l'ADEME un bilan de l'application de cette norme ce qui lui a permis de proposer des recommandations pour les applications à venir.

Pour le bon déroulement d'une étude selon cette norme, il s'agit dans un premier temps, de décrire l'ouvrage, en mentionnant les flux d'agent lixiviant, les milieux récepteurs et cibles, la nature des couches au-dessus et au-dessous de la couche considérée, ainsi que les dimensions, masse, détails de préparation (humidification, compactage...) et les conditions d'exposition relatives à l'agent lixiviant, qu'il s'agisse de la pluie (dont la composition et les données de pluviométrie devront être indiquées) ou d'une nappe en contact avec le matériau (composition, mode de circulation et débit à mentionner).

Les propriétés intrinsèques considérées comme pertinentes pour la détermination du comportement à la lixiviation en scénario sont a minima la composition chimique, la caractérisation minéralogique, la fraction maximale mobilisable (contenu disponible à la lixiviation) et la capacité d'absorption en eau.

Le scénario conceptuel constitue une simplification et une schématisation de l'ouvrage routier envisagé. Sa description consiste à énumérer toutes les hypothèses simplificatrices retenues pour représenter au mieux la réalité et la modéliser. Les facteurs d'influence jugés pertinents sont des facteurs liés à :

- à la pluie : composition (de la pluie elle-même ou de l'eau après percolation à travers les couches supérieures), quantités (pluviométrie ou pluie efficace), régime (succession de phases sèches et humides ou orageuses, ...) ;
- à la nappe si contact direct (composition, débit, ...) ;
- au vent et à l'ensoleillement dans le cas d'une valorisation en couche de roulement ou en remblai (carbonatation, ...) ;
- au mode de circulation à travers les couches supérieures et la couche considérée en lien avec la perméabilité du matériau en place ;
- aux conditions d'usage (trafic, ...) ;
- aux conditions exceptionnelles (salage, ...).

Il s'agit ensuite de déterminer la dynamique de relargage des éléments issus du matériau routier en conditions standard au moyen d'essais adaptés à la perméabilité des matériaux. Ensuite ces mêmes essais sont reproduits en faisant varier le paramètre dont on veut déterminer l'influence (la composition de l'agent lixiviant, le régime, etc ...). L'influence de chaque facteur pertinent est ainsi estimée, et selon les résultats, négligée ou prise en considération, ce qui alimente le scénario conceptuel.

A l'issue de cette étape, si les concentrations sont estimées trop élevées, les étapes de modélisation et de validation peuvent ne pas être nécessaires pour décider de la faisabilité environnementale de la valorisation.

Si les concentrations en polluants sont toutes inférieures à la limite de détection ou du même ordre de grandeur que celles du témoin, seule l'étape de validation peut être nécessaire.

Dans tout autre cas, le recours à la modélisation et à l'étape de validation est nécessaire.

La modélisation est construite sur la base des hypothèses simplificatrices du scénario conceptuel en intégrant les données des propriétés intrinsèques du matériau routier et les résultats des essais paramétriques. Ce modèle doit permettre de décrire le comportement du matériau en scénario. Elle doit faire l'objet d'une validation ; les deux niveaux de validation proposés par l'étude BILENV et complétée par les enseignements de l'étude CAREX sont ici repris :

- le lysimètre pour valider le modèle comportemental dans les conditions retenues par le scénario conceptuel.
- L'ouvrage expérimental permet de valider ou non la bonne représentativité du scénario conceptuel par rapport à la réalité et peut être utilisé également pour valider le modèle comportemental.

Enfin, la conclusion de l'étude doit permettre, à l'issue de l'étape de validation, de présenter une prédiction du relargage sur la période de temps visée, et de positionner les concentrations obtenues par simulation par rapport aux valeurs de référence retenues.

## ***7-2. Synthèse relative aux effets d'échelle***

De tous temps dans les domaines de la mécanique l’essai de laboratoire visait à déterminer des propriétés intrinsèques des matériaux en vue de dimensionner les ouvrages. La méthode de dimensionnement quant à elle, selon le niveau de complexité de sollicitations et le type d’ouvrage de génie civil a plutôt été fondée sur des approches théoriques/analytiques (avec un héritage fort en provenance des siècles passés), empiriques (avec une connaissance des métiers de la construction et donc des pratiques) et enfin numériques (depuis une vingtaine d’années du fait de l’arrivée des ordinateurs). Dans différents domaines, l’étape de validation de nouvelles solutions technologiques s’est par tradition appuyée sur une approche à une échelle spatiale plus petite que celle de l’ouvrage mais jugée pertinente vis-à-vis de la représentativité fonctionnelle exigée : celle de l’essai en vraie grandeur ou sur modèle réduit. En général l’approche sur modèle réduit permet également d’obtenir une analyse de type « retour d’expérience » mais à relativement court terme, soit pour des plages de temps de quelques années sans prendre de risque particulier sur un ouvrage réel, y compris sur un petit tronçon. Il y a dans ce cas une gestion « accélérée » de la durée de l’expérimentation, contrairement à celle de l’essai en vraie grandeur qui s’adapte nécessairement à la vraie échelle de temps.

Eu égard à ces pratiques, le tableau 7 récapitule dans chaque domaine les grands types de propriétés intrinsèques des matériaux utiles à la prédiction du comportement mécanique et hydraulique des ouvrages, du fait du type de sollicitations auxquelles les couches de l’ouvrage sont soumises : le trafic, les cycles hydriques et la pluie, les cycles thermiques. Ce tableau récapitule également les propriétés de fabrication qui ont une incidence sur la durée de vie de l’ouvrage et ses échanges hydrauliques avec l’extérieur et qui ne sont pas mesurables ou quantifiables par des essais directs ; il s’agit en particulier de la cohésion des interfaces et de la microfissuration.

<b>Propriétés</b>	<b>Mécaniques</b>	<b>Hydrauliques</b>
Intrinsèques	Contraintes/déformations admissibles (sollicitations monotones et en fatigue) Module d’Young ...	Perméabilité intrinsèque Porosité totale connectée
De fabrication	Cohésion des interfaces entre couches	Microfissuration

**Tableau 7. Types de propriétés macroscopiques des matériaux utiles à l’étude du comportement à long terme des ouvrages**

### ***7-3. Perspectives pour l’expérimentation***

Cette dernière section trace quelques pistes de validation expérimentale à l’échelle 1, possibles en se fondant à la fois sur des essais Manège réalisés au L.C.P.C. et sur une modélisation mécanique du comportement de la chaussée.

#### ***7-3-1. Essais sur manège de fatigue***

➤ ***Intérêt pour simuler le trafic***

Le manège de fatigue du LCPC est un simulateur circulaire de trafic lourd de 40 mètres de diamètre (Figure 8 ). Il comporte 4 bras, entraînant des charges roulantes similaires

aux trains de roulement des poids lourds courants à des vitesses pouvant atteindre 100 km/h, grâce à une motorisation électrique centrale d'une puissance de 1000 CV (736 kW). Ces vitesses de rotation élevées permettent au manège d'appliquer à la chaussée expérimentale sur laquelle il circule, en quelques semaines voire en quelques mois, le nombre total de charges lourdes que supporte une chaussée réelle pendant toute sa durée de service. Pour fixer les idées, ce trafic est, sur le réseau national, de plusieurs millions de chargements répartis sur deux à trois dizaines d'années suivant le type et l'importance de la voie. Ces possibilités d'accélération du trafic offertes par le manège sont mises à profit pour réaliser des études et des recherches sur le comportement et l'endommagement, sous charges routières lourdes, des matériaux et des structures de chaussées.



**Figure 8. Le manège de Fatigue du LCPC, vue d'ensemble**

Le rayon de brochage des charges roulantes entraînées par le manège est réglable entre 15,5 m et 19,5 m, par pas de 0,50 m. En fonctionnement courant, le manège peut reproduire en continu le balayage transversal du trafic réel poids lourds, le positionnement des modules de roulement étant alors assujéti à des fluctuations d'une cinquantaine de cm d'amplitude maximale de part et d'autre du rayon de brochage sur les bras.

Ces charges roulantes reproduisent des demi essieux. Ceci est justifié par la quasi-absence d'interaction entre les files de pneumatiques droite et gauche, vis-à-vis des sollicitations créées par le trafic dans les matériaux, dans les chaussées routières et autoroutières courantes. Il est possible de reproduire sur le manège la majorité des configurations des essieux poids lourds du trafic routier et autoroutier : essieu à roues simple, à roue jumelées, essieux tandem et essieux tridem.

Les efforts appliqués par les trains de roulement à la surface de la chaussée sont maintenus constants pendant toute la durée des expériences, indépendamment de l'état de dégradation de la chaussée expérimentale. Ceci est assuré par un système de suspension à

faible raideur et à un module de roulement intermédiaire prenant appui sur une bande de roulement en béton armé indéformable. La machine peut fonctionner les nuits ou les week-end, grâce à de multiples sécurités autorisant une surveillance humaine minimale. Ce fonctionnement automatique permet d'atteindre des cadences de chargements élevées, de l'ordre de l'ordre du million de charges par mois au maximum, compte tenu des périodes d'arrêt nécessitées par les travaux d'entretien et de maintenance de la machine et la réalisation des opérations de suivi et d'auscultation des pistes.

➤ ***Intérêt pour tester le comportement mécanique et environnemental de chaussées***

- Les structures de chaussées testées sur le manège

Sur le site du LCPC à Bouguenais, trois anneaux sont disponibles pour la construction des chaussées expérimentales et la réalisation des expériences. Le manège est, lui, unique. Il est facilement démontable, et peut être transporté d'un site à un autre en moins d'une semaine.

Les chaussées expérimentales sont des anneaux de largeur comprise entre 3 mètres et 6 mètres, dont le rayon moyen est compris entre 19,50 mètres et 15,50 m, selon le type d'expérience. Ainsi, au rayon 19 m, valeur habituellement adoptée pour les essais de fatigue, la longueur de la chaussée est de 120 mètres. Chaque anneau est divisé, pour la réalisation des expériences, en 4 ou 5 structures de chaussée différentes. Leur construction est toujours confiée à des entreprises routières, et elle s'effectue donc à l'aide de matériel couramment utilisé sur les chantiers routiers. Dès leur construction, les chaussées expérimentales sont instrumentées par des capteurs de différents types permettant de mesurer les sollicitations créées par les charges roulantes dans les différentes couches de matériaux constituant la structure de chaussée. Les températures dans la chaussée, de même que les paramètres d'état hydriques du sol support et des matériaux non traités, feront l'objet eux aussi d'un suivi continu pendant toute la durée des expériences.

- Contrôle des conditions hydriques

L'anneau « C » du manège de fatigue est équipé d'un cuvelage étanche en béton armé, constitué de deux parois cylindriques verticales et concentriques (rayons 12,10 m et 23 m) et d'un radier fondé à la cote -3,30 m. Il assure l'isolation hydraulique totale du massif de sol intérieur, support des chaussées expérimentales, vis à vis de la nappe phréatique extérieure. Un système de drainage et une station de pompage permet de contrôler le niveau de la nappe à l'intérieur du cuvelage. En jouant sur ce niveau, il devient ainsi possible d'ajuster la portance de la plate-forme à la valeur souhaitée pour telle ou telle expérience. On peut également faire varier cette portance en cours d'essai, par exemple pour reproduire et accélérer les cycles hydriques saisonniers dans les sols. Cette possibilité de jouer en cours d'expérience sur la portance de massif de sol support de chaussée sera utilisée pendant la dernière phase de la présente expérience.

### ***7-3-2. Modélisation du comportement mécanique des chaussées***

Enfin, au delà de l'essai manège de fatigue ci-dessus qui caractérise les matériaux en fatigue, une modélisation peut être effectuée afin de mettre en évidence la réponse de l'ouvrage à différents chargements. Ainsi, cette dernière partie illustre au moyen du logiciel LCPC CESAR la réponse de deux types de structures de routes à un chargement poids lourds en

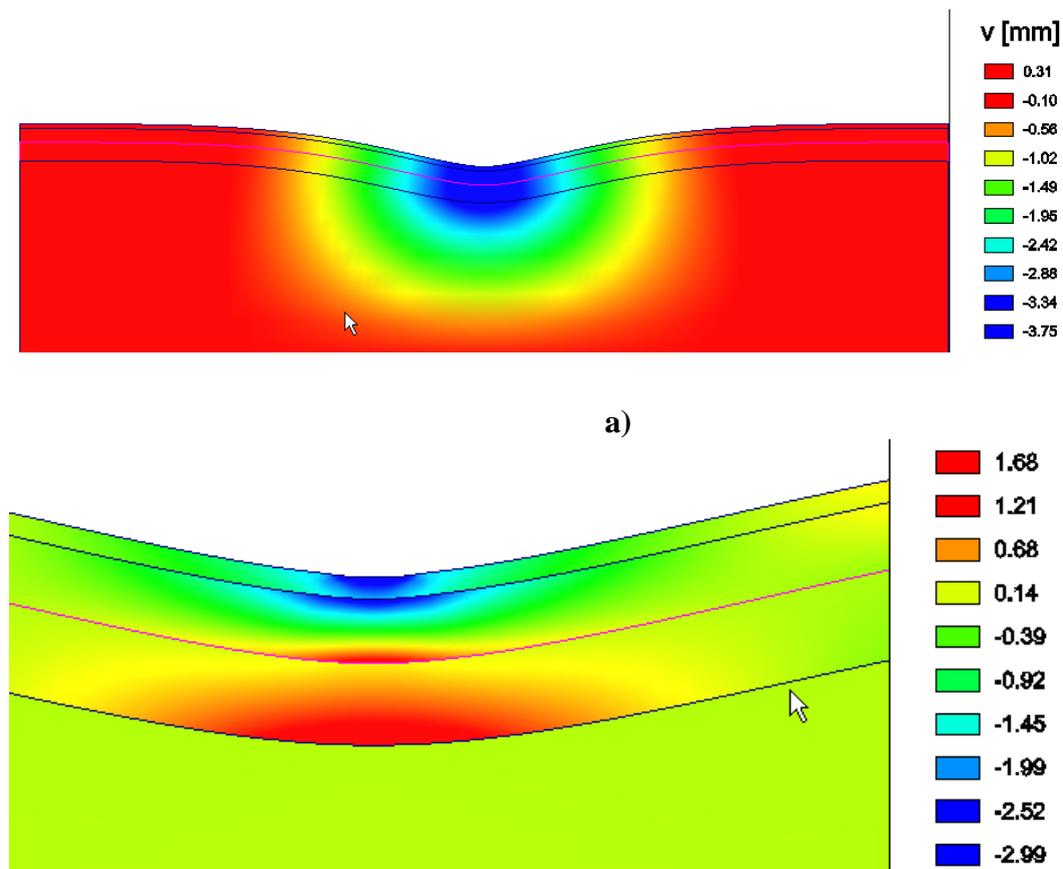
fonction de la position du MIOM dans les couches de chaussées (plus ou moins près des roues). Pour cette illustration le cas d'un MIOM traité a été retenu.

➤ **Premier modèle réalisé**

Structure étudiée : 6 cm de BBS+18 cm de GB3+10 cm de MIOM traité au ciment

Plateforme PF2 : E = 80 MPa

Le chargement correspond à l'essieu standard de référence de 130 kN (essieu simple à roues jumelées).



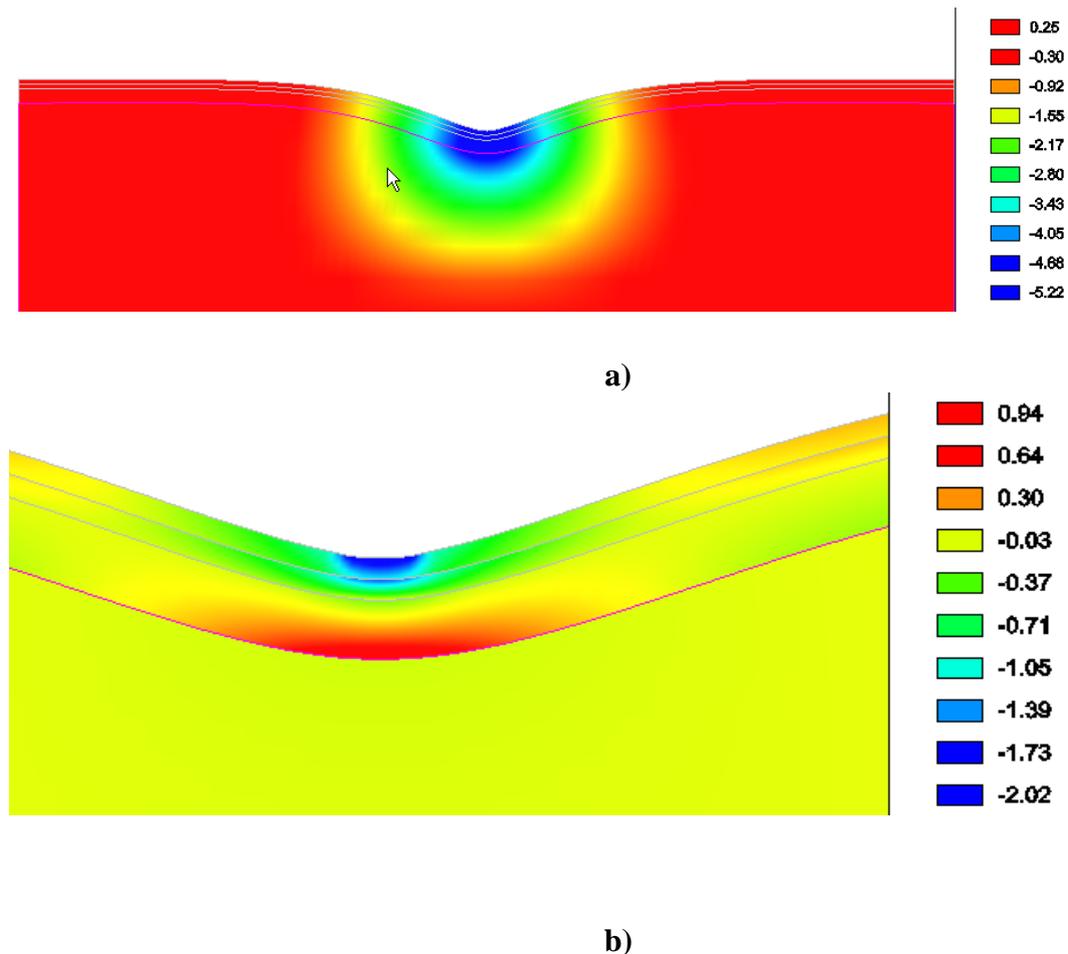
**Figure 9. Présentation a) du bassin de déflexion type ; b) des contraintes d'une chaussée bitumineuse avec couche de forme en MIOM traité**

➤ **Second modèle réalisé :**

Structure étudiée : 6 cm de BBSG+8 cm de GB3+10 cm de MIOM traité au ciment

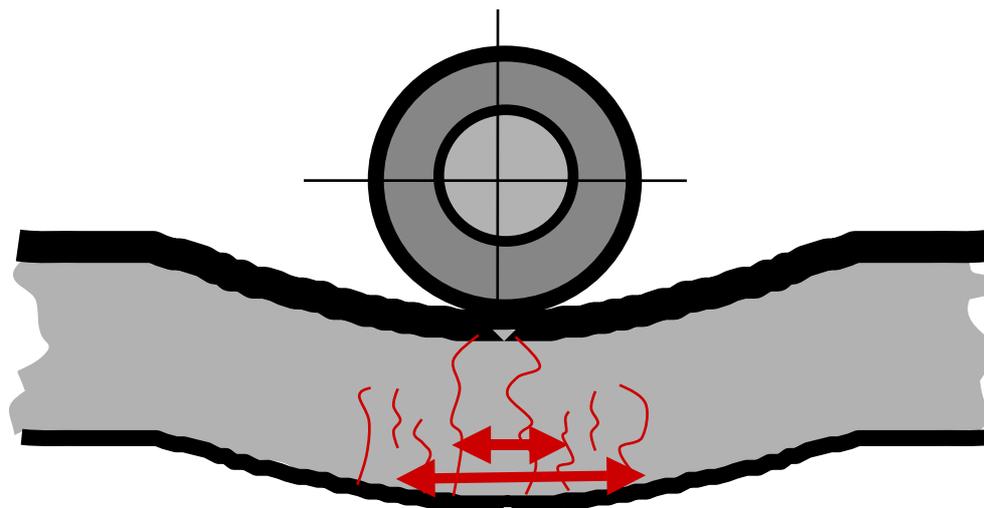
Plateforme PF2 : E = 80 MPa

Le chargement correspond à l'essieu standard de référence de 130 kN (essieu simple à roues jumelées).



**Figure 10. Distribution a) du bassin de déflexion ; b) des contraintes de traction par flexion créées dans les matériaux par une charge roulante**

Ce type d'approche donne des éléments de réflexion quant aux zones susceptibles d'être le lieu de création de microfissuration (figure 11)



**Figure 11. Schéma de principe de la fissuration susceptible d'être engendrée sous contraintes dues au chargement mécanique**



## 8. Références

- AFNOR, 1992. Norme NF P 11-300 « Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières » .
- AFNOR, 1997. Norme XP P 18-540 « Granulats ». Il est à noter que, dans le cadre de la construction européenne, ce texte unifié disparaîtra en juin 2004 et sera remplacé par une série de nouvelles normes.
- AFNOR, NF P 18-557. « indications sur la nature et la texture des roches utilisables à des fins de production de granulats. »
- AFNOR, X31-210 «Déchets – Essai de lixiviation
- CFTR, (Comité Français pour les Techniques Routières), à paraître en 2006. Guide technique « Conception et réalisation des terrassements généraux ».
- Cimpelli C., Doridot M., UNICEM Ile-de-France, 1996. Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France – Les calcaires , décembre 1996, 38 p..
- LCPC, SETRA, 1997. Guide technique. Enduits superficiels d'usure.
- LCPC, SETRA, 1981. Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic.
- LCPC, SETRA, 1994. Conception et dimensionnement des structures de chaussées. Guide Technique D9511.
- LCPC, SETRA, 1994. Guide d'application des normes pour le réseau routier national. Enrobés hydrocarbonés à chaud.
- LCPC, SETRA, 1997. Guide technique. Chaussées en béton.
- LCPC, SETRA, 1998. Guide d'application des normes pour le réseau routier national. Assises de chaussées.
- LCPC, SETRA, 2000. Traitement des sols à la chaux et / ou aux liants hydrauliques. Guide Technique. appelé GTS dans le réseau du ministère de l'équipement.
- Le ministre de l'Environnement, 1994. Circulaire DPPR/SEI/BPSIED n° 94-IV-1 relative à l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains,. 9 mai 1994.
- Le Premier ministre, 1953, modifié en 2002. Rubriques : N° 2510 (exploitation de carrières) ; N° 2525 (broyage, concassage, criblage, ensachage, pulvérisation, nettoyage, tamisage, mélange de pierres, cailloux, minerais et autres produits minéraux naturels ou artificiels) ; N° 2517 (station de transit de produits minéraux solides). Décret n° 2002-680 du 30 avril 2002 modifiant la nomenclature des installations classées. JO du 2 mai 2002.
- Décret du 20/05/53 modifié (dernière mise à jour avril 2002), rubriques : N° 2510 (exploitation de carrières) ; N° 2525 (broyage, concassage, criblage, ensachage, pulvérisation, nettoyage, tamisage, mélange de pierres, cailloux, minerais et autres produits minéraux naturels ou artificiels) ; N° 2517 (station de transit de produits minéraux solides).
- Ministère de l'Environnement, 1991. Texte abrogé à compter du 28 décembre 2005. Arrêté ministériel du 25 Janvier 1991, relatif aux installations d'incinération de résidus urbains. JO du 8 mars 1991, et remplacé par l'arrêté du 20 septembre 2002, article 35, JO du 1er décembre 2002.
- Ministère de l'Environnement, 1994. Circulaire n° 94-35 relative aux déchets industriels assimilables aux déchets ménagers et plans départementaux d'élimination, 1<sup>er</sup> mars 1994. BOMETT n° 632-94/12 du 10 mai 1994.
- Ministère de l'Equipement, 1997. Cahier des clauses techniques générales. Fascicule 23. Fourniture de granulats employés à la construction et à l'entretien des chaussées.

- Ministre de l'écologie et du développement durable, 2002 modifié en 2005. Arrêté ministériel du 20 Septembre 2002 modifié le 10 février 2005, relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets non dangereux et aux installations incinérant des déchets d'activités de soins à risques infectieux. JO du 1<sup>er</sup> décembre 2002 et du 17 mars 2005.
- Préfecture d'Ile-de-France, Conseil Régional d'Ile-de-France, UNICEM, SPRIR Ile-de-France, Contrat de Plan interrégional du Bassin parisien, SYCTOM, SVDU, 1998. Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France – Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, novembre 1998, 44 p.
- SCETAUROUTE, 1994. Manuel de conception des chaussées d'autoroute.
- SETRA-LCPC, 2000 2<sup>ème</sup> édition. Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide Technique D 9233, encore appelé couramment **GTR** dans le réseau du ministère de l'équipement.
- SETRA, 1997. Note d'information CD 103. Utilisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères en technique routière, août 1997, 6 p..
- SETRA, 1999. Répertoire des textes réglementaires et techniques- Chaussées, terrassements.
- SETRA-LCPC, 1981. Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic.
- SETRA-LCPC, 1992. Guide technique D 9233. Réalisation des remblais et des couches de forme.
- SETRA-LCPC, 1994. Guide technique D 9511. Conception et dimensionnement des structures de chaussées.
- SVDU, 1995. Guide méthodologique pour l'échantillonnage des mâchefers d'usine d'incinération d'ordures ménagères à la production sur flux, Juin 1995.
- SVDU, 1996. Guide méthodologique pour l'échantillonnage des mâchefers d'usine d'incinération d'ordures ménagères après maturation, Mai 1996.

## Abréviations utilisées et définitions

### Abréviations :

**BB** : Béton Bitumineux  
**EME** : Enrobés à Module Elevé  
**ES** : Equivalent de Sable  
**FS** : Friabilité des Sables  
**G** : Grave  
**GB** : Grave Bitume  
**GC** : Grave Ciment  
**GL** : Grave Laitier  
**GNT** : Grave Non Traitée  
**GRH** : Grave Reconstituée Humidifiée  
**GTR** : Guide Technique Routier  
**IPI** : Indice Portant Immédiat  
**LA** : Coefficient Los Angeles  
**MDE** : Coefficient Micro-Deval en présence d'Eau  
**MIDIS** : Mâchefers d'Incineration de Déchets Industriels Spéciaux  
**MIOM** : Mâchefers d'Incineration d'Ordures Ménagères  
**RPT** : Résidu de Procédé Thermique  
**VBS** : Valeur au Bleu de méthylène du sol

?: Donnée non précisée dans les documents disponibles

### Définitions :

*Type de dégradations :*

**Plumage** : Décollement des gravillons d'un enduit superficiel sous l'effet de sollicitations mécaniques.

**Pelage** : Désenrobage des granulats (visuel).

**Orniérage** : Formation d'ornières.

**Faièçage** : Réseau maillé de craquelures affectant une couche de roulement. Le faièçage est dû à la fissuration par fatigue d'un revêtement épais placé sur une couche de chaussée (base, fondation) trop déformable : couche de base impropre (faisant panse de vache) ou fatiguée, par exemple.

*Types de trafics (guide SETRA-LCPC, 1998) :*

**T0** : trafic qui correspond à des chiffres de 750 à 2000 poids lourds qui ont circulé sur une même chaussée durant une journée. On rappelle les caractéristiques des autres types de trafic :  $300 < T1 < 750$ ,  $150 < T2 < 300$ ,  $50 < T3 < 150$ ,  $25 < T4 < 50$ ,  $0 < T5 < 25$

*Types de matériaux (GTR, 2002):*

**D** : sols insensibles à l'eau

**D2** : la classe D2 est assimilée à des graves alluvionnaires propres et à des sables et lorsque le LA et MDE  $\leq 45$ , le matériau est classé dans la sous classe D<sub>21</sub> et si LA et MDE sont  $\geq 45$ , le matériau est classé dans la sous classe D<sub>22</sub>.

**B3** : la classe B<sub>3</sub> est assimilée aux graves silteuses et lorsque le LA et le MDE  $\leq 45$ , le matériau est classé dans la sous classe B<sub>31</sub>.