



# RECHERCHES TRANSPORT

BULLETIN D'INFORMATION SCIENTIFIQUE

Volume thématique no 11 : juin 1993

## RECYCLAGE DES MATÉRIAUX DANS LE DOMAINE ROUTIER

**Yves Savard, Nelson Rioux**  
Service des sols et chaussées  
Direction des sols et matériaux  
Transports Québec

MINISTÈRE DES TRANSPORTS  
CENTRE DE DOCUMENTATION  
700, BOUL. RENÉ-LÉVESQUE EST,  
21<sup>e</sup> ÉTAGE  
QUÉBEC (QUÉBEC) - CANADA  
G1R 5H1

### INTRODUCTION

La construction et la réhabilitation des routes impliquent l'utilisation d'une grande quantité de matériaux et la disposition de volumes, parfois importants, de rebuts provenant des chaussées existantes. Dans ce contexte, la réutilisation et le recyclage de matériaux dans les projets routiers contribuent à conserver les ressources naturelles non renouvelables et à réduire les quantités de résidus mis en décharge. Le développement de ces pratiques peut être une solution avantageuse sur les plans économique et environnemental.

L'intérêt de la recherche sur la réutilisation et le recyclage de matériaux pour les routes s'est accentué dans le monde depuis le milieu des années 1970. Ces recherches ont contribué à identifier les déchets de consommation et les sous-produits industriels présentant un potentiel d'utilisation dans le domaine routier.

Le présent volume thématique fait le point sur les différentes techniques traitées jusqu'à ce jour dans la documentation. Les auteurs tentent ensuite de mieux cerner les techniques présentant un certain potentiel dans le contexte québécois, compte tenu de la faisabilité technique, des effets sur le comportement des chaussées, des conséquences sur l'environnement et du rapport coût-bénéfice.

CANQ  
TR  
248  
V.11

Québec 

## LES BESOINS EN MATÉRIAUX ROUTIERS

L'intérêt de la réutilisation et du recyclage de résidus dans les travaux routiers provient des quantités importantes de matériaux que nécessitent ces travaux. En effet, la longueur en kilomètres du réseau routier québécois représente plus de 112 500 km (tableau 1), sans compter le réseau privé. À cela s'ajoute près de 7200 km de voies ferrées, sans oublier les pistes d'aéroport et les superficies importantes occupées par les aires de stationnement.

Les besoins en matériaux routiers sont donc importants. Les données disponibles sur la consommation en granulats (pierre concassée, gravier et sable) au Québec (tableau 2) indiquent que près de 80 millions de tonnes sont utilisées annuellement. Ces statistiques officielles peuvent être majorées de 25 à 30 % (exemple de l'Ontario), vue la difficulté de recueillir toutes les données (référence n° 5). Par ailleurs, ces quantités excluent les matériaux d'emprunt placés dans les remblais sous la structure de chaussée qui représentent des volumes importants.

**TABLEAU 1 : LONGUEUR EN KILOMÈTRES DU RÉSEAU ROUTIER AU QUÉBEC**

Kilométrage par juridiction			
Catégorie de routes	Ministère des Transports (longueur pondérée)	Corporations municipales	Total
Autoroutes	4 455	-----	4 455
Routes	19 008	757	19 765
Chemins	36 352	8 000	44 352
Rues	-----	48 000	48 000
Total	59 815	56 757	112 572

Source : G.-R. Tessier, 1990 (1).

TABLEAU 2 : MATÉRIAUX GRANULAIRES, DÉCHETS ET SOUS-PRODUITS AU QUÉBEC	
CATÉGORIE	QUANTITÉ (TONNES/AN)
Déchets solides (référence n° 3)	
. pneus (référence n° 5)	60 000
. verre (collecte municipale)	50 000
. rebuts de démolition	800 000
. bois	1 400 000
. boues d'épuration (municipales, pâtes et papiers)	400 000
Rejets miniers (référence n° 4) (stérile et résidus miniers)	100 000 000
Béton bitumineux et de ciment	Non disponible
Pierre concassée, gravier et sable (référence n° 2)	78 630 000
Industrie métallurgique (référence n° 3)	
. scories	300 000
. poussières	300 000

Les résidus peuvent contribuer à réduire les besoins en matériaux neufs. Cependant, les déchets et sous-produits industriels utilisables en granulats dans la structure de chaussée doivent rencontrer plusieurs spécifications au point de vue de la dureté, de la granulométrie, de la forme et de la résistance aux détériorations physique et chimique. Sur le plan de la rentabilité, l'usage de ces techniques exige un minimum de manipulation et de traitement. Certains sous-produits peuvent également être incorporés dans les liants des mélanges bitumineux et dans les matériaux granulaires pour améliorer leurs propriétés mécaniques.

Un sommaire de quelques déchets et sous-produits rencontrés au Québec est présenté au tableau 2. En première approximation, plus de 3,3 millions de tonnes de déchets solides (pneus, verre, rebuts de démolition, bois, boues d'épuration) et de sous-produits métalliques (scories, poussières) sont produits annuellement.

DOR-CEN-MON

CANQ  
TR  
248  
V. II

La quantité de rejets miniers (stériles et résidus miniers) est d'environ 100 millions de tonnes par an. Les volumes de rejets provenant des revêtements routiers (béton bitumineux et de ciment) produits annuellement sont difficiles à préciser. D'ailleurs, un inventaire sur les quantités disponibles au Québec des déchets et sous-produits pour les infrastructures routières reste à faire.

## ÉTAT DES CONNAISSANCES

Depuis le milieu des années 1970, nombre de pays s'intéressent à la réutilisation et au recyclage des déchets et sous-produits dans les infrastructures de transport. Les recherches ont conduit à identifier des produits pouvant être réutilisés dans les chaussées (références n<sup>os</sup> 6, 7, 8). Un inventaire à l'échelle du Québec a été réalisé à la même époque sur les possibilités d'utilisation des rejets miniers et métallurgiques dans la construction routière (référence n<sup>o</sup> 9). Plus récemment, certaines études ont fait une mise à jour des déchets et des sous-produits les plus utilisés dans les chaussées (références n<sup>os</sup> 10, 11, 12, 13, 14) dont un résumé est présenté au tableau 3.

Divers autres produits sont utilisés, mais généralement en quantités limitées ou restreintes à des régions spécifiques. La provenance, l'usage et la performance des principaux déchets et sous-produits utilisés dans la construction routière sont présentés ci-après.

**TABLEAU 3 : DÉCHETS ET SOUS-PRODUITS UTILISÉS  
DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE**

Fréquemment utilisés		Localement utilisés	
Résidus	Catégorie (*)	Résidus	Catégorie (*)
Béton bitumineux	D	Verre	D
Béton de ciment	D	Résidus d'incinération	D
Laitier de haut fourneau	S-P	Boues de traitement	D
Scories d'acier	S-P	Produits de démolition	D
Scories de nickel et cuivre	S-P	Bardeaux de toiture	D
Cendres volantes	S-P	Bois	D
Cendres de foyer	S-P	Résine/lignine	S-P
Fumée de silice	S-P	Poussières de four à ciment/chaux	S-P
Rejets miniers	S-P	Sable de fonderie	S-P
Pneus usés	D	Divers (plastique, huile, fer, céramique, etc.)	D

**Note: (\*)** D = déchet, S-P = sous-produit

### Béton bitumineux

Le recyclage du béton bitumineux est probablement le secteur où seront concentrés les efforts les plus considérables de recherche et développement dans les organisations routières, étant donné qu'il représente la source la plus importante de déchets routiers. Seulement au Québec, on compte environ 45 500 km de routes et 50 000 km de rues qui devraient subir des interventions tôt ou tard de leur vie utile.

Le béton bitumineux peut être recyclé sous cinq formes (références n<sup>os</sup> 14, 15, 16, 17) :

- 1) enlèvement et concassage pour utilisation comme matériaux granulaires dans les fondations, sous-fondations et remblais ;
- 2) décohesionnement ou retraitement, en place, sur la pleine épaisseur, en incorporant des matériaux de la fondation granulaire (pouvant être suivi d'une stabilisation) ;
- 3) recyclage, en place, à froid avec émulsion ;
- 4) recyclage de surface à chaud (thermorecyclage, thermoregénération et thermoreprofilage) ;
- 5) recyclage à chaud, en centrale; cette dernière technique de recyclage est la plus commune au Canada.

Des travaux de recherche ont été entrepris au ministère des Transports du Québec sur le retraitement en place (sites d'essai, suivis de comportement de chaussées et travaux en laboratoire). Depuis 1989, le Ministère utilise le retraitement en place comme méthode de réfection de chaussées (référence n<sup>o</sup> 18), et un devis est maintenant disponible (référence n<sup>o</sup> 19). Le ministère des Transports a aussi expérimenté, dans les années 1980, un granulat bitumineux concassé comme substitut dans les fondations. La performance obtenue sur les sites expérimentaux est variable et dans la plupart des cas non satisfaisante (référence n<sup>o</sup> 20). Ces matériaux ont aussi été réutilisés occasionnellement sur les accotements et sur les chemins et surfaces très peu utilisés. Des essais en laboratoire sont en cours afin d'évaluer les propriétés du mélange granulats-béton bitumineux. À titre indicatif, en Ontario, le granulat bitumineux concassé est incorporé dans les fondations, dans une proportion de 30 % et, dans certains cas, jusqu'à 40 % (référence n<sup>o</sup> 21).

Les nouvelles méthodes de recyclage du béton bitumineux en place, à chaud et à froid, sont de plus en plus utilisées (références n<sup>os</sup> 16, 22). Dans le recyclage de surface, un train routier préchauffé le béton bitumineux (brûleur au propane, infrarouge) et régénère le pavage sur une épaisseur maximale de 50 mm (référence n<sup>o</sup> 23). Le recyclage en place à froid traite le béton bitumineux sur une épaisseur maximale de 150 mm. La méthode a été employée avec succès sur des routes locales et autoroutes (références n<sup>os</sup> 24, 25, 26). Un comportement meilleur est observé lorsque le béton bitumineux est recyclé sur une épaisseur supérieure à 50 mm. Des travaux de recyclage à froid ont été réalisés au ministère des Transports, près de Windsor, en 1992.

Dans les devis actuels, le ministère des Transports autorise l'usage de béton bitumineux recyclé à l'intérieur des nouveaux mélanges à chaud, dans une proportion de 0 à 20 %, pour les couches de roulement (interdit sur les autoroutes) et jusqu'à 40 % dans les couches de base et les couches uniques. Ces spécifications sont en accord avec ce qui est pratiqué par d'autres agences (références n<sup>os</sup> 14, 27).

Sur le plan économique, le recyclage du béton bitumineux s'avère être une solution avantageuse (références n<sup>os</sup> 27, 28). Du point de vue environnemental, l'utilisation de granulats bitumineux concassés est

généralement acceptée aux États-Unis et en Ontario (références n°13, 21). Le béton bitumineux recyclé dans le revêtement est compatible avec le règlement sur les déchets solides.

### **Béton de ciment**

Les quantités de béton de ciment sont produites à partir de la démolition des éléments de béton de la route (revêtement, pont, ponceau, etc.) et des multiples ouvrages des zones urbaines. L'utilisation de cette source de matériaux est en croissance dans la construction routière (références n° 13, 21, 27).

Après concassage, enlèvement des barres d'armature et tri, le béton de ciment est réutilisé sous forme de granulats dans les fondations (stabilisées ou non), dans le béton bitumineux ainsi que dans le béton de ciment (références n° 8, 16).

Le béton de ciment concassé est principalement utilisé dans les fondations. En Ontario, les spécifications permettent jusqu'à 100 % de béton concassé dans les fondations (référence n° 21). Des études réalisées en Angleterre indiquent que l'indice CBR (California Bearing Ratio) du béton de ciment concassé est du même ordre de grandeur que celui d'un calcaire concassé (référence n°30). De plus, les propriétés mécaniques du béton de ciment concassé peuvent être améliorées en incorporant du verre (référence n°21) ou de la dolomie (référence n° 31).

Le recyclage du béton concassé dans les nouveaux bétons de ciment présente toutefois certains inconvénients (absorption, résistance, affaiblissement, agents réactifs, fissuration). Il semble que son utilisation en fondation stabilisée soit plus prometteuse (références n° 14, 27, 29).

Les études indiquent que la réutilisation du béton de ciment peut être un procédé rentable (principalement dans les grandes agglomérations urbaines), et qu'elle a peu d'effets sur l'environnement (références n° 13, 14). Cependant, une recherche qui porterait sur les problèmes de fissuration rencontrés lors du recyclage dans les nouveaux bétons de ciment serait utile.

### **Laitier de haut fourneau**

Les laitiers de haut fourneau sont un sous-produit de l'extraction du fer à partir du minerai. Leur potentiel d'utilisation dans le domaine routier est très élevé (référence n° 6). Les méthodes de refroidissement conduisent à quatre types de laitier :

- 1) refroidi à l'air ;
- 2) expansé ou moussé ;
- 3) pelletisé ;
- 4) granulé.

L'intérêt pour les laitiers fabriqués au Québec se manifeste depuis environ 20 ans (référence n° 9).

Le laitier refroidi à l'air (le principal sous-produit) est incorporé sous forme de granulats dans les fondations, le béton bitumineux et de ciment. Les laitiers expansés (moussés) et pelletisés sont utilisés comme granulats légers. Le laitier pelletisé est également utilisé sous forme d'agent de cimentation ainsi que le laitier granulé (références n°s 13, 14, 27). Au Canada, un ciment de laitiers granulé a été produit par le Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET) (référence n° 2).

Cependant, les techniques pour utiliser les laitiers de haut fourneau sont considérées conventionnelles et économiques. Des doutes sont exprimés en regard de l'impact environnemental (lessivage) lorsque le laitier est utilisé dans les fondations. Toutefois, les recherches n'indiquent pas de problème de toxicité causée par la lixiviation (référence n° 14) et les États-Unis, à la suite de résultats favorables des essais de lessivage, continuent de les exclure de la classification des déchets solides (référence n° 32).

### **Scories d'acier**

Les scories d'acier sont des sous-produits des aciéries et sont produites à partir des impuretés du métal en fusion (référence n° 6). La composition des scories est variable, elle est aussi de densité élevée et peut être de nature expansive, selon sa composition. Le Québec produit annuellement environ 300 000 tonnes de scories. L'inventaire de chaque usine a été réalisé dans les années 1970 (référence n° 9).

Les scories d'acier sont utilisées pour remplacer les granulats dans les remblais et le béton bitumineux (références n°s 13, 27). Les scories d'acier ont été largement utilisées dans le béton bitumineux en Ontario et essayées dans quelques provinces canadiennes (Québec, Nouvelle-Écosse, Manitoba et Saskatchewan). Au Québec, les scories d'acier ont déjà été utilisées pour remplacer 45 % des granulats naturels dans le béton bitumineux (référence n° 33).

Les scories analysées dans la région de Contrecoeur (Québec) contiennent de la chaux hydratée, alors que les scories de l'Ontario contiennent de la chaux libre (référence n° 34). La présence de chaux libre rend les scories beaucoup moins stables et plus expansives (l'hydratation des oxydes de calcium et de magnésium produit un changement de volume de plus de 10%). C'est ce changement de volume qui empêche d'utiliser les scories d'acier dans le béton de ciment. Récemment, des mauvaises performances avec le béton bitumineux (fissuration) ont entraîné, en Ontario, l'exclusion en 1991 des scories dans les enrobages (référence n° 14).

L'utilisation de scories d'acier est économique et généralement acceptée au point de vue environnemental aux États-Unis (référence n° 13). Des recherches sur le comportement des scories dans le béton bitumineux sont nécessaires.

### **Scories de nickel et de cuivre**

Les scories de nickel et de cuivre sont des sous-produits de l'industrie métallurgique. Elles sont de composition similaire, essentiellement des silicates de fer non ferreux. Ces résidus sont très utilisés dans les ballasts pour voies ferrées et fondations d'autoroute puisqu'ils se comportent comme des granulats de très bonne qualité (référence n° 14).

Plusieurs applications font l'objet de recherche sur les scories de type non ferreux, telles que l'utilisation comme ciment, stabilisant de fondation et granulats dans le béton bitumineux (référence n° 35).

### **Cendres volantes et cendres de foyer**

Les cendres volantes et les cendres de foyer sont des sous-produits des centrales thermiques au charbon. Les cendres volantes sont récupérées du gaz par précipitation électrostatique alors que les cendres de foyer sont les résidus récupérés à la base des fours (référence n° 36). Toutefois, les sources de cendres volantes disponibles au Québec sont très limitées (référence n° 9).

Les cendres volantes sont utilisées pour stabiliser les sols et les fondations (référence n° 37). Cependant, l'application la plus importante des cendres volantes réside comme agent de cimentation dans le béton de ciment (remplace 10 à 20 % de ciment). Les cendres volantes peuvent également servir de fines d'apport dans le béton bitumineux et dans la construction de remblais légers (références n° 12, 13, 14).

Les cendres de foyer sont surtout utilisées dans les remblais et sous-fondations (référence n° 14) et même dans les fondations (référence n° 38). L'utilisation sous forme de granulats dans le béton bitumineux a aussi été étudiée (références n° 12, 39). Les premiers résultats indiquent que la performance du béton bitumineux peut diminuer lorsque le pourcentage de cendres de foyer augmente.

Étant donné le potentiel hautement corrosif des cendres de foyer, leur utilisation près de structures métalliques nécessite des précautions supplémentaires (références n° 40, 41).

L'utilisation des cendres volantes et des cendres de foyer s'avère économique (référence n° 13) et ne semble pas présenter d'inconvénients majeurs sur le plan environnemental (références n° 12, 13, 14). De plus, le potentiel de lessivage des cendres volantes est diminué lorsque stabilisé (référence n° 42).

### **Fumée de silice**

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication de silice ou des alliages contenant de la silice. La fumée de silice est une poudre très fine (100 fois plus que le ciment Portland) qui est récupérée des gaz par précipitation électrostatique. Au Québec, quelques industries sont reliées à la fabrication de la silice.

La fumée de silice est une pouzzolane hautement réactive. L'incorporation de fumée de silice dans le béton de ciment augmente sa durabilité (référence n° 14), et son utilisation fait l'objet de spécifications officielles de la part de l'Association canadienne de standardisation (CSA).

### **Rejets miniers**

Les rejets miniers sont la plus grande source de déchets au Canada (références n° 6, 7, 43). L'exploitation des carrières à ciel ouvert, les mines souterraines et les procédés de séparation des minéraux produisent d'énormes quantités de rejets non utilisés. Au Québec, 100 millions de tonnes de rejets miniers (stériles et résidus) sont produits annuellement.

Les résidus miniers présentent un intérêt, ils peuvent être utilisés comme granulats (fondation, remblai, ballast) et aussi dans le béton bitumineux et de ciment (référence n° 12). Au Québec, les stériles miniers de la région de Thetford-Mines sont utilisés comme matériaux granulaires (fondations, sous-fondations et abrasifs d'hiver) et granulats dans le béton bitumineux. Des résidus miniers de la région de Sorel sont également utilisés dans les fondations. D'autres sources au Québec présentent un potentiel pour la construction routière (référence n° 9).

Plusieurs problèmes nuisent à l'utilisation des rejets miniers : les coûts reliés aux distances, les réactions chimiques (acide), impuretés nocives, lixiviation toxique, les variabilités en composition et en dimension. Malgré les problèmes reliés à leur réutilisation, les grandes quantités de rejets miniers disponibles incitent à pousser les recherches pour maximiser le potentiel de cette ressource.

### **Pneus usés**

Le problème des pneus usés mis en décharge a suscité une attention particulière depuis les incendies de Saint-Amable (Québec) et de Hagersville (Ontario). L'ampleur du problème au Québec se chiffre à 6 500 000 pneus mis en décharge annuellement, soit environ 60 000 tonnes. Le recyclage représente donc une mesure intéressante pour diminuer l'amoncellement de pneus usés.

Dans le domaine routier, plusieurs possibilités se présentent pour réutiliser les pneus. Une première application est dans le béton bitumineux. Les résidus de pneus sont incorporés dans le revêtement sous forme de granules ou de liants modifiés au caoutchouc (références n° 44, 45). L'utilisation la plus intensive de pneus recyclés dans le béton bitumineux a été effectuée à Phoenix (référence n° 46). Le recyclage des pneus dans le béton bitumineux fait l'objet d'expérimentations en Ontario (référence n° 47) et au Québec (référence n° 48). La performance des liants modifiés et des granules de caoutchouc dans les enrobages ne fait toutefois pas l'unanimité.

Des études se poursuivent pour tenter d'expliquer le comportement aléatoire observé (référence n° 13). Des développements récents indiquent que de nouveaux procédés semblent prometteurs pour utiliser les pneus

usés sous forme de poudrettes, granules (références n<sup>os</sup> 49, 50) et liants modifiés au caoutchouc (références n<sup>os</sup> 48, 51). L'utilisation de pneus usés dans le béton bitumineux semble diminuer l'orniérage dans les chemins (référence n<sup>o</sup> 52). Des études montrent que la durée de vie du pavage peut être améliorée avec un liant de caoutchouc (références n<sup>os</sup> 12, 53). L'empêchement majeur à une utilisation étendue des pneus dans les enrobages est le coût élevé (références n<sup>os</sup> 13, 14). Les études se poursuivent pour optimiser les résultats avec le béton bitumineux. Les possibilités de retraiter le béton bitumineux contenant du caoutchouc sont à évaluer.

Pour le scellement de fissures, un liant de caoutchouc est fabriqué à partir de 15 à 30 % de pneus recyclés. Le même liant de caoutchouc est utilisé pour le traitement intercouche ou de surface. Il absorbe les contraintes ou imperméabilise la chaussée.

Les pneus déchiquetés (références n<sup>os</sup> 54, 55, 56), ou entiers (référence n<sup>o</sup> 57), sont également utilisés pour alléger les remblais. Ils servent aussi dans la stabilisation de pentes et la réduction de contraintes au niveau des ponceaux, sous des remblais importants (référence n<sup>o</sup> 57). D'autres applications peuvent servir à recycler les pneus comme dans les cadres de caoutchouc pour regard (référence n<sup>o</sup> 58), pavés (référence n<sup>o</sup> 59) et murs anti bruit (référence n<sup>o</sup> 60). Toutefois, l'usage de pneus dans les remblais doit se conformer au règlement sur les déchets solides.

### **Rebuts de verre**

La technique la plus efficace pour récupérer le verre dans les municipalités est la collecte sélective. Cependant, les quantités récupérées ne peuvent pas être entièrement recyclées dans la fabrication de nouveau verre (présence de céramique, mélange des couleurs, etc.). Dans ces conditions, des quantités de verre sont disponibles pour d'autres applications. Au Québec, 50 000 tonnes de verre sont récupérées annuellement par les collectes municipales. Le potentiel de verre récupérable, avec les rejets commerciaux, est estimé à 275 000 tonnes/an, ce qui correspond environ à 186 000 tonnes/an, avec le taux de récupération actuel (référence n<sup>o</sup> 3).

Les rebuts de verre sont expérimentés comme granulats dans le béton bitumineux depuis le début des années 1970. Dans cette application, 40 à 80 % de rebuts de verre ont été employés (référence n<sup>o</sup> 44) et dans d'autres cas, les rebuts étaient employés dans une proportion de 20 % (référence n<sup>o</sup> 14). Ils remplaçaient les granulats naturels, avec 1 à 2 % de chaux hydratée, pour éviter le désenrobage des particules. Une étude réalisée en Virginie indique que le contenu en verre doit être limité à 15 % et la granulométrie contrôlée (100 % inférieur à 9,5 mm et un maximum de 6 % inférieur à 80 m) (référence n<sup>o</sup> 61). Les problèmes d'adhésion (désenrobage), de faible rugosité (polissage) et de fragmentation des particules tendent à limiter l'utilisation du verre dans les couches de base de béton bitumineux (référence n<sup>os</sup> 13, 21). L'ajout d'anti désenrobage augmente les coûts et rend le produit moins compétitif. Du côté environnemental, l'usage du verre dans un enrobé bitumineux ne pose pas de problème.

L'utilisation du verre pour remplacer les granulats dans le béton de ciment n'est pas recommandée. Une réaction alcaline entre le verre et le ciment conduit à une expansion du verre, et par conséquent, à une diminution de la résistance du béton (référence n° 13). La présence de résidus de sucre sur la surface du verre peut également nuire à la réaction d'hydratation du ciment (référence n° 21). Une étude réalisée en Ontario montre cependant un potentiel d'utilisation des rebuts de verre avec du béton de ciment concassé dans les fondations et sous-fondations (référence n° 21). Dans ce cas, l'incorporation de 10 à 15 % de verre dans le béton concassé en augmente la valeur CBR (California Bearing Ratio).

L'utilisation du verre dans les remblais et fondations est techniquement réalisable (moins de problème que dans le revêtement) et économique sous certaines conditions (référence n° 13). Le verre doit être exempt de contamination (lessivage) pour être utilisable dans les fondations granulaires. La stabilité des matériaux granulaires contenant du verre est un sujet à l'étude (référence n° 21).

### **Résidus d'incinération**

L'incinération des déchets produit des cendres de foyer (scories, verre, roches, métaux et matières inorganiques) et des cendres volantes (particules de matières organiques brûlées et partiellement brûlées). Les quantités de cendres provenant de l'incinération des déchets sont en croissance puisqu'il est nécessaire de réduire les volumes de déchets mis en décharge.

Les résidus d'incinération utilisés comme granulats dans les couches de base de béton bitumineux semblent bien se comporter (références n° 12, 13, 44). De plus, quelques remblais ont été construits avec des résidus d'incinération (référence n° 44) et les cendres volantes peuvent servir de remblais légers (référence n° 62). L'usage de résidus d'incinération dans le béton de ciment n'est pas recommandé (référence n° 12). L'optimisation de l'utilisation des résidus d'incinération va nécessiter des recherches plus poussées pour caractériser les propriétés physiques et chimiques des résidus.

### **Boue de traitement**

Les boues sont un sous-produit du traitement des eaux. Les boues peuvent servir de fertilisant dans les talus d'autoroute (référence n° 13). Lorsqu'elles sont stabilisées, ce qui augmente leurs caractéristiques mécaniques (résistance au cisaillement, compressibilité), les boues de traitement peuvent être utilisées pour construire des remblais (référence n° 63). En Pennsylvanie, des résultats intéressants ont été obtenus en utilisant 10 % de boues dans un remblai stabilisé avec des cendres volantes et des poussières de four à chaux (références n° 12, 44). De plus, l'utilisation de poussières de four à chaux aide à assécher, à désodoriser et à désinfecter les boues. La réaction de cimentation augmente la qualité structurale des remblais, et les éventuels éléments lourds restent confinés à l'intérieur du remblai.

### **Résidus de démolition et bardeaux de toiture**

Les principaux résidus de démolition utilisés pour la construction routière sont le béton de ciment, les briques, des éléments de maçonnerie, le plâtre, le bois, l'isolant et les toitures en bardeaux bitumineux. Ces résidus sont disponibles en grande quantité dans les agglomérations urbaines d'importance.

Ces résidus peuvent être réutilisés comme granulats dans les remblais (références n<sup>os</sup> 13, 30), dans le béton bitumineux et dans le béton de ciment (référence n<sup>o</sup> 27). Les bardeaux de toitures peuvent être recyclés dans le béton bitumineux pour récupérer la cellulose, les fines d'apport, les granulats et le liant de bitume (référence n<sup>o</sup> 64). Quelques essais ont été réalisés en Ontario, et la méthode semble être rentable (référence n<sup>o</sup> 14). La réutilisation des résidus de démolition dans les zones urbaines présente un intérêt économique. Un besoin de recherche pour optimiser cette ressource se fait sentir.

### **Rebuts de bois**

L'industrie forestière produit des résidus sous forme de copeaux, écorces et sciure de bois. La part de cette industrie dans l'économie du Québec est importante, et la quantité de résidus de bois produit annuellement est de l'ordre de 1 400 000 tonnes. Une large proportion de ces déchets sont toutefois incinérés. Les copeaux, l'écorce et la sciure de bois sont utilisés dans la construction de remblais légers sur des sols de faible capacité portante (argile molle, savane). Ces remblais légers sont utilisés pour limiter et contrôler les tassements des sols sous-jacents.

Depuis le début des années 1970 le ministère des Transports utilise cette méthode avec succès (référence n<sup>o</sup> 65). Il est admis que sous la nappe phréatique, les résidus de bois ne se dégradent pas (absence d'air). Dans les remblais au-dessus de la nappe phréatique, les résidus de bois sont peu ou pas dégradés lorsqu'ils sont protégés par une couche de sol, même après 15 ans (référence n<sup>o</sup> 66). Cette solution est techniquement et économiquement viable. Sur le plan environnemental, l'impact de la lixiviation reste à étudier.

### **Déchets cellulósiques**

Les résidus cellulósiques sont un sous-produit provenant de plusieurs sources : l'agriculture (résidus de culture et plantation), l'industrie (alimentation, bois, papier) et les rejets urbains (municipalités et manufactures). Les quantités importantes de ce type de résidus en font un produit intéressant. Un procédé a été mis au point pour transformer la cellulose (pyrolyse et hydrogénation) afin de l'utiliser comme additif au liant dans le béton bitumineux (référence n<sup>o</sup> 12). Les résultats de durabilité d'un béton bitumineux contenant ce type de liant ne montrent pas de différences significatives avec un liant bitumineux conventionnel.

### **Lignine de bois**

La lignine de bois est créée en grande quantité par les industries des pâtes et papier. L'intérêt de la lignine est son utilisation comme liant dans le béton bitumineux. La lignine peut être incorporée dans le liant bitumineux, jusqu'à une proportion de 30 %, sans affecter les propriétés physiques du mélange (référence n° 12). Les essais de lessivage sur la lignine indiquent que c'est un produit stable au point de vue environnemental.

### **Poussière de four à ciment/chaux**

Des poussières sont produits dans les fours lors de la fabrication du ciment et de la chaux. La composition de ces poussières varie en fonction de la matière première utilisée et des procédés de fabrication. Les poussières de ciment et de chaux sont employées pour remplacer la chaux dans le procédé de stabilisation des sols et sert aussi de fines d'apport dans le béton bitumineux (références n° 12, 14).

### **Sable de fonderie**

L'industrie de la fonderie (acier, fer, voiture) utilise des moules fabriqués de sable de fonderie. C'est un sable silicieux de très bonne qualité minéralogique. Cependant, les résidus des sables de fonderie présentent quelques inconvénients à leur réutilisation. La présence occasionnelle de métaux lourds et de phénols peuvent nuire à l'utilisation des sables de fonderie en remblai ou en fondation. De plus, le potentiel hautement corrosif de ceux-ci empêche de les utiliser comme matériaux granulaires près des structures métalliques. Dans ces conditions, l'usage le plus prometteur est comme granulats fins dans le béton bitumineux, dans des proportions, pouvant être admises, jusqu'à 15 % (référence n° 14).

### **Divers**

Les produits tels que le plastique, les huiles, le fer et autres peuvent trouver certains débouchés de recyclage dans le domaine routier. Ces matériaux ne seront toutefois pas examinés.

## **PERSPECTIVES AU QUÉBEC**

L'évaluation des déchets et sous-produits présentant le plus d'intérêt dans la construction routière requiert une analyse globale. Un premier inventaire doit identifier les résidus découlant de l'activité économique et établir les quantités disponibles. Les produits incorporant l'emploi de résidus doivent être compétitifs (coûts, traitement, transport, mise en place) par rapport aux produits conventionnels. Des points de vue technique

et économique, le comportement des produits réutilisés ou recyclés doit généralement être équivalent ou supérieur aux matériaux conventionnels. Enfin, la réutilisation et le recyclage des résidus dans les projets routiers doivent être compatibles avec l'environnement.

Dans le contexte d'une organisation routière, l'accent devrait être mis d'abord sur les résidus provenant des interventions sur son réseau. La réhabilitation des routes produit des quantités considérables de résidus de béton bitumineux pouvant être recyclés dans le revêtement ou réutilisés dans les fondations. Dans le cas des pneus usés, des avenues intéressantes se présentent pour la construction de remblais légers, de renforcement de pentes, de réutilisation dans les mélanges bitumineux et dans certains éléments préfabriqués. Les résidus de bois sont également utilisés avec succès dans les remblais légers. Les pneus et résidus de bois sont aussi employés pour isoler le sol support. Les résidus miniers sont une source considérable de granulats. Cependant, chaque résidu minier doit être analysé individuellement étant donné la grande variabilité et les contraintes environnementales. Les résidus de démolition sont également une source potentielle de granulats dans les zones urbaines. Finalement, les cendres, laitiers et scories trouvent des applications comme granulats et substituts de cimentation. Un sommaire des différentes applications proposées dans la documentation portant sur les déchets et sous-produits dans la construction routière est présenté au tableau 4.

Cependant, ce qui fait la force d'un produit, lors de son utilisation à l'origine, devient souvent un obstacle de taille lors du recyclage. Ainsi, il est souvent difficile d'isoler les composantes d'un produit qui sont favorables à une seconde utilisation. D'autres produits présentent une très grande variabilité suivant les procédés industriels de transformation utilisés. Enfin, plusieurs résidus non triés généralement, et les manipulations en vue de les classer augmentent considérablement les coûts des procédés.

Le développement d'un marché pour les applications proposées nécessite un approvisionnement constant en résidus, des prix compétitifs, une garantie de revente (créer un besoin) et des installations bien localisées. Des moyens incitatifs peuvent aussi favoriser la réutilisation des déchets et sous-produits et les rendre plus compétitifs comme des mesures réglementant la disposition des déchets, au moyen de restrictions et de tarifications. Par contre, après les procédés de recyclage, des matériaux bruts considérés comme des rebuts sans valeur peuvent devenir plus dispendieux si une demande se crée. L'utilisation de ces résidus doit aussi être compatible avec les règlements environnementaux; ce qui est accepté ailleurs ne l'est pas nécessairement au Québec.

Finalement, la mesure préventive la plus efficace contre l'accumulation de résidus demeure la réduction à la source. Par exemple, pour les administrations routières, l'augmentation de la durée de vie utile des routes par l'optimisation du dimensionnement, le développement de techniques plus performantes, une meilleure qualité de mise en oeuvre, suivie d'un entretien approprié, conduisent à réduire les quantités de déchets produits. Lors de la construction, l'emploi de matériaux recyclables dans les procédés de réhabilitation des routes s'inscrit également dans cet objectif.

## CONCLUSION

Les réseaux provincial et municipal représentent plus de 112 500 km de routes. Les besoins en matériaux pour la construction et la réhabilitation du réseau routier sont donc importants.

Plus d'une vingtaine de déchets et sous-produits industriels sont réutilisés ou recyclés dans le domaine routier. Les résidus présentant le plus d'intérêt pour une organisation routière sont les rebuts provenant de la réhabilitation de son réseau, les résidus disponibles en grandes quantités et les résidus qui contribuent à améliorer le comportement des chaussées. Ces facteurs sont importants puisque d'autres techniques de valorisation des résidus sont en concurrence avec la construction routière.

La réutilisation et le recyclage des déchets et sous-produits dépendent non seulement des applications techniques, mais aussi de la disponibilité, de la localisation de la source et de la compatibilité des résidus avec l'environnement. Jusqu'à quel point la réglementation sur l'environnement peut intervenir en vue de favoriser la réutilisation et le recyclage de rebuts, cela demeure un choix de société. Pour le concepteur et l'entrepreneur, l'essentiel est de développer des procédés et des produits rentables, performants et conformes à cette réglementation.

**TABLEAU 4 : UTILISATION PROPOSÉE DES DÉCHETS  
ET SOUS-PRODUITS**

Déchets/ sous-produits	Applications proposées	Commentaires
Béton bitumineux	1) Recyclé dans le revêtement  2) Granulats dans les fondations, remblais	1) Techniquement et économiquement réalisable, potentiel de pollution d'air  2) Qualité de la lixiviation à vérifier
Béton de ciment	1) Granulats dans les fondations  2) Fondations stabilisées  3) Granulats dans le béton de ciment	1 et 2) Économique (principalement dans les zones urbaines)  3) Fissuration : nécessite plus de recherche
Laitier de haut fourneau	1) Granulats dans les fondations, le béton bitumineux et de ciment  2) Agent de cimentation (granulé et pelletisé)	Techniquement et économiquement réalisable, doute sur la qualité de la lixiviation (fondation)
Scories d'acier	1) Granulats dans le béton bitumineux  2) Granulats dans les remblais	1) Fissuration : nécessite plus de recherche  2) Qualité de la lixiviation à déterminer
Scories de nickel/cuivre	Granulats dans les fondations	Granulats de très bonne qualité physique, usage dans le béton bitumineux et liant stabilisant sont étudiés

Cendres volantes	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Agent de cimentation et stabilisant</li> <li>2) Fines d'apport dans le béton bitumineux</li> <li>3) Remblais légers</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 et 2) Économique, nécessite plus de recherche pour appliquer dans le béton bitumineux et de ciment</li> <li>3) Compatibilité environnementale à vérifier</li> </ol>
Cendres de foyer	Granulats dans les remblais, sous-fondation (possibilités dans les fondations)	Économique, potentiel corrosif, nécessite plus de recherche pour utiliser dans le béton bitumineux
Fumée de silice	Additif dans le béton de ciment	Spécifications officielles CSA
Rejets miniers	Granulats dans les fondations, le béton bitumineux et de ciment	L'utilisation dépend de la source (coûts/distance, compatibilité environnementale, propriétés physiques)
Pneus usés	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Liant et granules dans le béton bitumineux</li> <li>2) Scellement de fissures</li> <li>3) Couche imperméabilisante ou absorption de contrainte</li> <li>4) Remblais</li> <li>5) Renforcement de pente</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Coût supérieur à conventionnel, besoin de recherche sur la performance</li> <li>2) Bonne performance</li> <li>3) Coût élevé</li> <li>4 et 5) Techniquement intéressant; compatibilité avec l'environnement à étudier</li> </ol>
Rebuts de verre	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Granulats dans les fondations</li> <li>2) Granulats dans le béton bitumineux (préférentiellement)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Doit être exempt de contamination; coût à vérifier; stabilité à étudier</li> <li>2) Coût plus élevé que conventionnel, problème de désenrobage, rugosité, fracturation</li> </ol>

	3) Granulats dans le béton de ciment	3) Non souhaitable : possibilité de réaction silice-alcalin
Résidus d'incinération	Granulats dans les remblais et couche de base de béton bitumineux	Expérience limitée; caractérisations physique et chimique supplémentaires requises
Boue de traitement	1) Fertilisant 2) Granulats dans les remblais stabilisés	1) Doit être exempt de contamination 2) Expérience limitée; caractérisations physique et chimique supplémentaire requises
Résidus de bitumineux	1) Utilisation des résidus de toiture dans le béton bitumineux 2) Granulats dans les remblais	Intérêt économique si exempt de contamination
Copeaux, écorce, sciure de bois	Remblais légers	Technique efficace, coût compétitif, compatibilité environnementale à étudier, performance à long terme à établir
Déchets celluloses	Additif dans le liant de bitume	Expériences limitées; caractérisations physique et chimique supplémentaires requises
Lignine de bois émulsion	Additif dans le liant de bitume et	Expériences limitées; caractérisations physique et chimique supplémentaires requises
Poussière de four (ciment/chaux)	1) Remplacer la chaux pour la stabilisation 2) Fines d'apport dans le béton bitumineux	Expériences limitées; caractérisations physique et chimique supplémentaires
Sable de fonderie	Granulats dans le béton bitumineux	La présence de contaminant et le potentiel hautement corrosif peuvent nuire à sa réutilisation

## RÉFÉRENCES

- 1- Tessier, G.-R. (1990). *Guide de construction et d'entretien des chaussées*. Association québécoise du transport et des routes, Québec, 394 p.
- 2- Énergie, Mines et Ressources Canada (1991). *Annuaire des minéraux du Canada*. Ministère des Approvisionnements et Services Canada 1992, Ottawa.
- 3- Environnement Québec (1988). *L'environnement au Québec, un premier bilan (document technique)*. Ministère de l'Environnement du Québec. 430 p.
- 4- Énergie et Ressources Québec (1993). Communication personnelle avec André Paquette, janvier 1993, ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec.
- 5- Recyc-Québec (1992). Présentation de Arlette PetitPas. *Colloque sur le recyclage des pneus hors d'usage : des solutions*, Montréal.
- 6- Miller, R.H. and Collins, R.J. (1976). *Waste materials as potential replacements for highway aggregates*. N.C.H.R.P. Report 166, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- 7- OECD (1977). *Use of waste materials and by-products in road construction*. Organisation for economic co-operation and development, Paris, 168 p.
- 8- Gutt, W and Nixon, P.J. (1978). *Use of waste materials in the construction industry - Analysis of the Rilem Symposium by correspondence, Matériaux and Construction*. Vol. 12, N° 70, p. 255-306.
- 9- Lefebvre, G. et Aitcin, P.C. (1975). *Possibilités d'utilisation des rejets miniers et métallurgiques dans la construction de routes au Québec*. Rapport présenté au ministère des Transports, Québec.
- 10- AIPCR (1989). *Matériaux marginaux - État des connaissances*. Association internationale permanente des congrès de la route, Paris, 110 p.
- 11- AIPCR (1991). *Essais sur les matériaux marginaux*. Association internationale permanente des congrès de la route, Paris, 47 p.
- 12- Ormsby, W.C. and Fohs, P.G. (1990). *Use of waste and by-products in highway construction*. Transportation Research Record 1288, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 47-58.
- 13- Ahmed, I. and Lovell, C.W. (1992). *Use of waste materials in highway construction : State of the practice and evaluation of the selected waste products*. Transportation Research Record 1345, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 1-19.
- 14- Emery, J.J., Mackay, M.H., Umar, P.A., Vanderveer, D.G. and Pichette, R.J. (1992). *Use of waste and by products as pavement construction materials*. Compte rendu de la 45<sup>e</sup> conférence canadienne de géotechnique, Toronto, communication n° 45.
- 15- Earl, J.F. and Emery, J.J. (1987). *Practical experience with high ratio hot mix recycling*. Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association, 32<sup>nd</sup> Annual Conference, Toronto, p. 326-339.

- 16- FHWA (1987). *Pavement recycling guidelines for local governments*. Federal Highway Administration, U.S. Department of transportation, report FHWA-TS-87-230, Washington, D.C.
- 17- OCDE (1981). *Séminaire sur le recyclage des matériaux de construction de chaussées*, Tome 1. Programme de recherche routière de l'Organisation de coopération et de développement économique, Rome, 339 p.
- 18- Bergeron, G. (1992). *État des connaissances sur le retraitement en place des chaussées*. Compte rendu du colloque - Direction infrastructures de transport. Association québécoise du transport et des routes, Saint-Hyacinthe.
- 19- MTQ (1992). *Le retraitement en place des chaussées*. Devis D-1199, ministère des Transports du Québec, Québec.
- 20- Gagner, R., Amiri, A. et De Montigny, P. (1987). *Étude du comportement structural du granulat bitumineux concassé (GBC)*. Rapport interne, ministère des Transports du Québec, Québec.
- 21- Senior, S.A. (1992). *New development in specification for road base materials in Ontario*. Compte rendu de la 45<sup>e</sup> conférence canadienne de géotechnique, Toronto, communication n° 99.
- 22- Epps, J.A. (1990). *Cold-recycled bituminous concrete using bituminous materials*. NCHRP synthesis 160, TRB. National Research council, Washington, D.C.
- 23- Emery, J.J. and Terao, M. (1992). *Asphalt technology for hot in-place surface recycling*. Transportation Research Record 1337, TRB. National Research Council, Washington, D.C. p. 18-27.
- 24- Kazmierowski, T.J., Bradsbury, A., Cheng, S. and Raymond, C. (1992). *Performance of cold in-place recycling in Ontario*. Transportation Research Record 1337, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 28-36.
- 25- Rogge, D.F., Hicks, R.G., Scholz, T.V. and Allen, D. (1992). *Case histories of cold in-place recycled asphalt pavements in central Oregon*. Transportation Research Record 1337, TRB. National Research Council, Washington, D.C. p.61-70.
- 26- O'Leary, M.D. and Williams, R.D. (1992). *In situ cold recycling of bituminous pavements with polymer-modified high float emulsions*. Transportation Research Record 1342, TRB. National Research Council, Washington, D.C. p. 20-25.
- 27- Emery, J.J. (1992). *Mineral aggregate conservation - Reuse and recycling*. Report prepared for the Ontario Ministry of Natural Resources, Aggregate and Petroleum Resources Section, Ontario.
- 28- Wood, L.E., White, T.D. and Nelson, T.B. (1989). *Current practice of cold in-place recycling of asphalt pavements*. Transportation Research Record 1178, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 31-37.
- 29- Goodwin, S. and Roshek, M.W. (1992). *Recycling project : concrete grinding residue*. Transportation Research Record 1345, TRB. National Research Council, Washington, D.C. p. 101-105.
- 30- O'Mahony, M.M. and Melligan, G.W.E. (1991). *Use of recycled materials in subbase layers*. Transportation Research Record 1310, TRB. National Research Council, Washington, D.C. p. 73-80.

- 31- Barksdale, R.D., Itani, S.Y. and Swor, T.E. (1992). *Evaluation of recycled concrete, open-graded aggregate and large top-size aggregate bases*. Transportation Research Record 1345, TRB. National Research Council, Washington, D.C. p. 92-100.
- 32- Owens, J.F. (1988). *Slag-iron and steel*. Mineral yearbook, Bureau of Mines, U.S. Department of the Interior, Washington, 13 p.
- 33- Amiri, A. (1990). *Nouveaux mélanges bitumineux : MB-12,5, MB-16, scories d'acier et enrobés amianteux - Bilan du comportement structurel*. Rapport interne, ministère des Transports du Québec, Québec.
- 34- Laforte, M.-A., Tessier, G.-R. et Thériault, R. (1989). *Performance d'un béton bitumineux fabriqué de scorie d'aciérie*. Routes et transports, printemps 1989. Association québécoise du transport et des routes, p.15-20.
- 35- Douglas, E., Malhotra, V.M. and Emery, J.J. (1985). *Cementitious properties of nonferrous slags from canadian sources*. Cement, concrete and aggregates, 7 (1), p. 3-14.
- 36- FHWA (1986). *Fly ash facts for highway engineers*. Demonstration projects-program, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 47 p.
- 37- Lin, C. and Zhang, X. (1992). *Use of cement kiln dust, fly ash, and recycling technique in low-volume road rehabilitation*. Transportation Research Record 1345, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 19-27.
- 38- Lovell, C.W., Ke, T.-C., Hvang, W.-H., and Lovell, J.E. (1991). *Bottom ash as a highway material*. Transportation Research Record 1310, TRB. National research council, Washington, D.C., p. 106-116.
- 39- Gress, D., Zhang, S., Tarr, S., Paziienza, I., and Eighmy, T. (1992). *Physical and environmental properties of Asphalt-amended bottom ash*. Transportation Research Record 1345, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 10-18.
- 40- Long, R.P. (1992). *Corrosion of steel piles in some waste fills*. Transportation Research Record 1345, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 53-59.
- 41- KE, T.-C. and Lovell, C.W. (1992). *Corrosivity of Indiana bottom ash*. Transportation Research Record 1345, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 113-117.
- 42- Creek, D.N. and Shackelford, C.D. (1992). *Permeability and leaching characteristics of fly ash liner materials*. Transportation Research Record 1345, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 74-83.
- 43- Collings, R.K. (1984). *Current and potential uses for mining and mineral processing waste in Canada : standards*. Journal of testing and evaluation, 12 (1), p. 46-50.
- 44- Collins, R.J. (1988). *Synthesis of waste utilization in highway construction*. 67<sup>th</sup> Annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 29 p.
- 45- Heitzman, M. (1992). *Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier*. Transportation Research Record 1339, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 1-8.

- 46- Charania, E., Cano, J.O. and Schnormeier, R.H. (1991). *Twenty year study of asphalt rubber pavements in the city of Phoenix, Arizona*. Transportation Research Record 1307, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 29-38.
- 47- Lynch, D.F. and Northwood, R.P. (1991). *The waste tire demonstration project at Thamesville, Ontario*. Proceedings of transport association of Canada, Winnipeg, 17 p.
- 48- Langlois, P. (1993). *Recyclage des pneumatiques dans les enrobés*. Compte rendu du 28<sup>e</sup> congrès annuel de l'AQTR, Association québécoise du transport et des routes, Sainte-Adèle, sous-presse.
- 49- Takallou, M.B. and Takallou, H.B. (1991). *Benefits of recycling waste tires in rubber asphalt paving*. Transportation Research Record 1310, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 87-92.
- 50- Takallou, H.B. and Sainton, A. (1992). *Advances in technology of asphalt paving materials containing used tire rubber*. Transportation Research Record 1339, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 23-29.
- 51- Estakhri, C.K., Button, J.W. and Fernando, E.G. (1992). *Use, Availability, and cost-effectiveness of asphalt rubber in Texas*. Transportation Research Record 1339, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 30-37.
- 52- Krutz, N.C. and Stroup-Gardiner, M. (1992). *Permanent deformation characteristics of recycled tire rubber-modified and unmodified asphalt concrete mixture*. Transportation Research Record 1339, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 38-44.
- 53- Kearny, A.T. (1990). *Scrap tire use/Disposal Study, Final report*. Scrap tire Management Council, Washington, D.C., 68 p.
- 54- Eldin, N.N. and Senouci, A.B. (1992). *Use of scrap tires in road construction*. Journal of construction engineering and management, vol. 118 (3), p. 561-576.
- 55- Bosscher, P.T., Edil, T.B. and Eldin, N.N. (1992). *Construction and performance of a shredded waste tire test embankment*. Transportation Research Record 1345, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 44-52.
- 56- Devata, M. (1992). *Utilisation des copeaux de pneus comme matériau léger de remblayage. Compte rendu du colloque sur le recyclage des pneus hors d'usage : des solutions*. Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec, Montréal.
- 57- Long, N.T. (1990). *The Pneusol*. Études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, série géotechnique GT44, Paris, 76 p.
- 58- Sauren, M. (1992). *Regards d'égout. Compte rendu du colloque sur le recyclage des pneus hors d'usage : des solutions*. Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec, Montréal.
- 59- Richards, D.C. (1992). *Interlocking block paving. Compte rendu du colloque sur le recyclage des pneus hors d'usage : des solutions*. Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec, Montréal.

- 60- Beyler, R. and Fritsch, D. (1992). *Murs anti bruit. Compte rendu du colloque sur le recyclage des pneus hors d'usage : des solutions.* Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec, Montréal.
- 61- Hughes, C.S. (1990). *Feasibility of using recycled glass in asphalt.* Report n° VTRC90R3, Virginia Transport Research Council, Charlottesville, Virginia, 21 p.
- 62- Poran, C.J. and Ahtchi-Ali, F. (1989). *Properties of solid waste incinerator fly ash.* Journal of geotechnical engineering, vol. 115(8), p. 1118-1133.
- 63- Wang, M.C., Hull, J.Q. and Jao, M. (1992). *Stabilization of water treatment plant sludge for possible use as embankment material.* Transportation Research Record 1345, TRB. National Research Council, Washington, D.C., p. 36-43.
- 64- Paulsen, G., Stroup-Gardiner, M. and Epps, J. (1987). *Recycling waste roofing material in asphalt paving mixtures.* Transportation Research Record 1115, TRB. National Research Council, Washington, D.C. p. 171-182.
- 65- Poulin, M. (1991). *Construction de remblais allégés à l'aide de résidus de bois.* Présentation interne, ministère des Transports du Québec, Québec.
- 66- Hardcastle, J.H. and Howard, T.R. (1991). *Wood fiber fill to reduce airport pavement settlement.* Transportation Research Record 1310, TRB. National Research Council, Washington, D.C. p. 81-86.



MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 056 797