Déchets de construction
Granulats recyclés pour le génie civil
Recherches pilotées par le LCPC

Depuis plusieurs années, le Laboratoire central des Ponts et Chaussées est résolument engagé dans le déploiement de ses activités scientifiques et techniques dans le développement de matériaux et de structures économes en ressources non renouvelables, une de ses cinq orientations prioritaires.

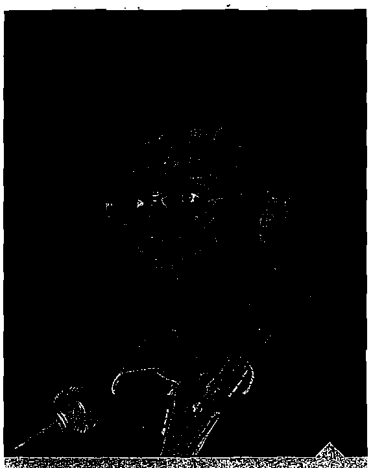
Les priorités exprimées par le Grenelle de l'environnement ont naturellement conduit le LCPC à renforcer cet engagement dans le nouveau contrat quadriennal qu'il doit prochainement passer avec l'État, en mettant l'accent sur la thématique scientifique prioritaire "Économiser l'énergie et les ressources naturelles". L'un des volets de cette thématique consiste à valoriser les déchets et les produits de déconstruction, parmi lesquels ceux du BTP qui constituent une part importante des déchets nationaux. Concrètement, les recherches pilotées par le LCPC sur le recyclage de produits de déconstruction comme granulats alternatifs pour le génie civil s'inscrivent en grande partie dans quatre opérations :

- l'opération "Matériaux granulaires et granulats alternatifs" (Agrega), pilotée par Y. Descantes et lancée en 2009, dont trois des quatre sujets traitent respectivement de la caractérisation des granulats alternatifs, du comportement des matériaux qui les incorporent, enfin des filières de recyclage ;
- l'opération "Optimisation de matériaux routiers économes et incorporant des recyclés de la route" (Optimirr), pilotée par C. de La Roche et lancée en 2006, dont le sujet 3 traite de l'optimisation des mélanges contenant des recyclés de la route ;
- l'opération "Bétons environnementaux", pilotée par A. Pavoine et en cours de clôture, dont le sujet 3 traite de la valorisation de sous-produits industriels ou de déchets en tant que constituant d'un béton ;
- enfin l'opération "Évaluation et prévision des effets sur l'environnement des infrastructures de transport", pilotée par A. Jullien et lancée en 2009, qui vise notamment à concevoir des outils intégrant des préoccupations d'ordre environnemental dans la chaîne de décisions conduisant au choix d'une solution technique pour la construction d'un ouvrage.

L'objectif de cette communication est d'illustrer les travaux menés dans le cadre de ces opérations pour favoriser l'utilisation en génie civil de granulats recyclés issus de la déconstruction d'ouvrages.

Un investissement fort

D'après les résultats de l'enquête Sessi-Unicem-FNTP-FFB portant sur l'année 2007 (UNPG, 2008), le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) consomme chaque année de l'ordre de 560 millions de tonnes de granulats et matériaux assimilés, dont 129 millions de tonnes (23 %) proviennent des déchets de chantiers de BTP après retraitement éventuel. Selon Crosnier et Leray (2007), ce même secteur produit une



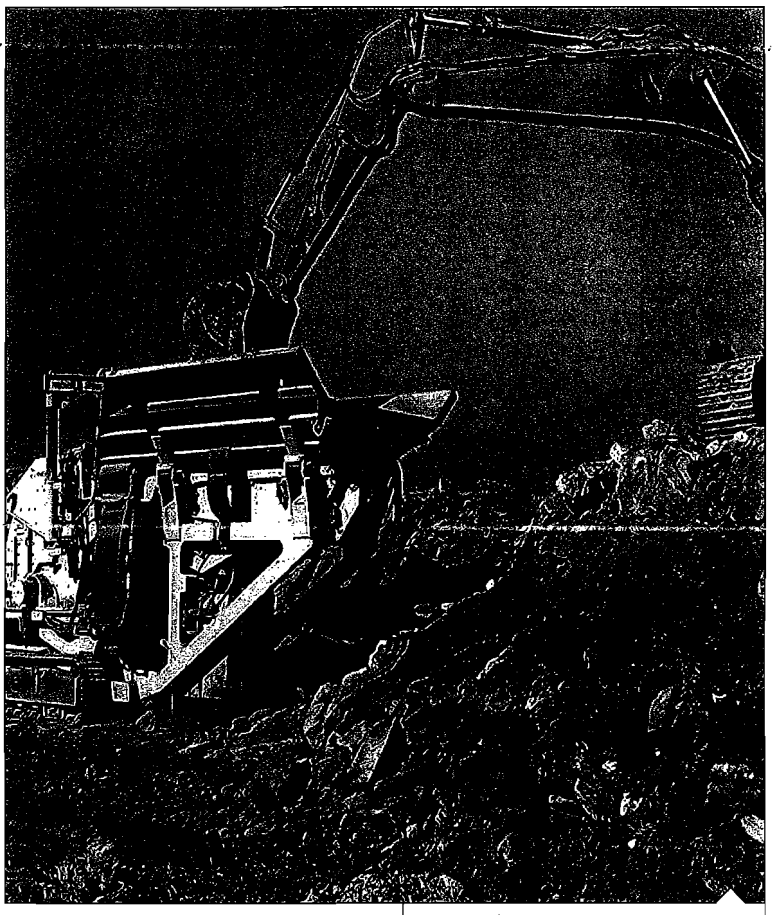
R&V

Yannick Descantes, chercheur et directeur de thèse au sein du groupe Granulats et procédés d'élaboration des matériaux du département Matériaux du LCPC. Coordinateur du projet européen Direct-Mat du 7e PCRD de la Commission européenne. Responsable de l'opération de R&D du LCPC "Agrega". Président du groupe d'experts européens TG11 au sein du Comité technique 154 (granulats) du Comité européen de normalisation (CEN). Délégué français au sein du sous-comité 6 (essais de granulats) du comité 154 du CEN.

grande partie des déchets français, estimée pour l'année 2004 à 343 millions de tonnes dont 97 % sont inertes – constitués de terre, gravats, pierres, bétons et tuiles – et 86 % proviennent des travaux publics. Dès lors, en soustrayant à ce tonnage les déchets réutilisés comme granulats et matériaux assimilés par le BTP ainsi que 50 millions de tonnes supplémentaires utilisées en remblais pour réaménager les carrières, la quantité de déchets inertes du BTP éliminés soit vers les décharges de classe III, soit dans des décharges "sauvages" (29 millions de tonnes de déchets d'après Pasquet, 2006), peut être estimée à plus de 100 millions de tonnes par an.

Préoccupée par l'accroissement de la production de déchets, l'union européenne a publié la directive 2008/98/CE, visant à réduire les effets qui lui sont associés et à optimiser l'utilisation des ressources. En particulier, cette directive impose aux États membres de prendre les mesures nécessaires pour limiter la production de déchets (article 9), promouvoir un réemploi et un recyclage de qualité des déchets (article 11, assorti d'un objectif de réemploi de 70 % des déchets de construction et de démolition à horizon 2020), et contrôler les déchets dangereux dans le respect de la santé humaine et de l'environnement (article 17). En France, les engagements du grenelle de l'environnement répondent à l'exigence européenne de recyclage, notamment au chapitre 3.5.2[1] qui prescrit "*l'accroissement drastique par divers outils du recyclage des déchets dans le bâtiment et les travaux publics*" (alinea 3). Bien entendu, le respect de ces dispositions européennes et nationales suppose des efforts pour réunir les conditions techniques, économiques, environnementales et sociales nécessaires à la réduction des déchets du BTP et de leurs effets.

Animé d'une volonté constante de s'inscrire dans les objectifs du développement durable, le Laboratoire central des Ponts et Chaussées contribue à ces efforts par les activités de recherche qu'il mène avec ses partenaires. Après s'être fortement investi dans le développement de matériaux et de structures économes en ressources non renouvelables, le LCPC entend marquer son engagement sur les priorités exprimées par le Grenelle de l'environnement en signant avec l'État son nouveau contrat quadriennal 2010-2013, dont l'une des cinq orientations majeures vise à économiser l'énergie et les ressources naturelles. La réduction des prélèvements de ressources naturelles non renouvelables tient une place de choix dans cette orientation et comporte deux volets : d'une part, favoriser le plein emploi des matériaux de carrière, seules ressources capables de couvrir l'essentiel des besoins du génie civil dans un avenir prévisible, en fondant scientifiquement la rationalisation des spécifications d'usage des granulats et en développant des outils permettant d'améliorer l'adéquation entre les procédés d'élaboration des granulats et les besoins du BTP ; d'autre part, valoriser comme granulats alternatifs les déchets industriels et ceux provenant du BTP.



DR

Figure 1 - Stock hétérogène

Le présent article vise à illustrer les travaux scientifiques menés par le LCPC pour soutenir la valorisation les déchets du BTP comme granulats alternatifs. Actuellement, ces travaux s'inscrivent principalement dans quatre opérations de recherche et visent respectivement à réduire l'empreinte écologique des granulats utilisés dans les travaux de construction routière ou ferroviaire (opération Agrega), à valoriser des déchets en tant que constituants d'un béton (opération Bétons environnementaux),

à optimiser la formulation des mélanges contenant des recyclés de la route (opération Optimirr), enfin à intégrer des préoccupations d'ordre environnemental dans la chaîne de décisions conduisant à retenir une solution technique pour construire un ouvrage (opération Epees).
Après avoir clarifié les problèmes posés par la valorisation des déchets du BTP comme granulats alternatifs, les travaux de recherche menés au LCPC sont illustrés à travers plusieurs actions concrètes.

Problèmes liés à la valorisation en granulats alternatifs

La valorisation des déchets du BTP (principalement des bétons de démolition concassés et des déchets résultants du mélange de matériaux non traités, bitumineux et traités aux liants hydraulique) comme granulats alternatifs se heurte à des difficultés d'ordre technique, économique, social et environnemental qu'il convient d'analyser avant d'envisager des travaux de recherche et de développement susceptibles d'apporter des solutions.

Point de vue technique

Du point de vue technique, les stocks de déchets du BTP étant souvent alimentés par plusieurs chantiers différents, ou bien résultant du mélange de matériaux différents provenant du même chantier (cas du fraisage simultané de plusieurs couches d'une même chaussée), ils sont par nature hétérogènes (figure 1). Cette première difficulté pénalise fortement le prélèvement d'échantillons représentatifs du stock, étape indispensable pour le caractériser en vue de définir ses possibilités de réemploi.
L'hétérogénéité du stock est également pénalisante au stade de la formulation d'un mélange, en particulier dans le cas d'un mélange hydraulique où une variation de la teneur en fines ou de l'absorption d'eau va rendre délicat le choix du dosage en ciment capable de lui assurer des propriétés de maniabilité et de résistance mécanique acceptables. L'hétérogénéité pose enfin de gros problèmes au stade de la fabrication des mélanges, l'absence d'une connaissance en temps réel de la teneur en fines ou de l'absorption d'eau ne permettant pas d'ajuster instantanément le dosage en eau et en ciment, pour reprendre l'exemple précédent. Une seconde difficulté pénalisant la valorisation des déchets du BTP comme granulats alternatifs provient des niveaux insuffisants de certaines caractéristiques mesurées en regard des exigences traditionnelles appliquées aux granulats naturels. A titre d'illustration, la résistance mécanique des déchets du BTP est généralement faible (les résultats des essais Los Angeles et micro-Deval peuvent chacun atteindre 30, voire 50), leur absorption

Bulletin d'abonnement

OUI, je désire m'abonner à Recyclage et Valorisation pour 4 numéros par an :

☐ 56 € **tarif normal** (70 € hors UE et Suisse)
☐ 45 € **tarif adhérent** (56 € hors UE et Suisse) { ☐ déjà adhérent Sim (n°.....) ☐ nouveau adhérent Sim

Nom : ..... Prénom : .....
Fonction : ..... Société : .....
Adresse : .....
Code postal : ..... Ville : ..... Pays : .....
Tél. : ..... Fax : ..... E-mail : .....
Numéro de TVA intracommunautaire : .....
Secteur d'activité : ☐ mines ☐ transformation ☐ carrières ☐ enseignement ☐ recyclage ☐ constructeur ☐ administration ☐ services ☐ autre

Veuillez trouver ci-joint mon règlement pour : ☐ **un abonnement** ☐ **une adhésion à la Sim**

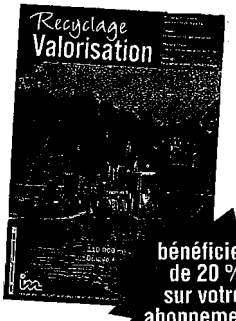
par ☐ CB ☐ Eurocard Mastercard ☐ Visa ☐ American Express
N° : |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|
Date d'expiration : |_|_| / |_|_|
3 derniers chiffres au dos de la carte : |_|_|_|
Titulaire : .....

☐ par chèque joint, à l'ordre de la Sim, tiré sur une banque française

☐ par virement, en euros, sur le compte bancaire de la Sim
HSBC Paris Maubert-IBAN :
FR 76 CPT 30056-00065-00655400022-02
BIC : CCFRFRPP

date, cachet et signature

R&V 773



bénéficiez de 20 % sur votre abonnement !

profitez-en pour adhérer à la Sim !

☐ société 285 €
☐ individuelle 50 €
☐ retraité, sans-emploi, étudiant, enseignant 30 €
(à régler séparément à l'ordre de la Sim)

Adhérer à la Sim, c'est :
✓ être informé des **évolutions techniques** de vos métiers ;
✓ bénéficier de l'organisation de la Sim, **lieu d'échanges et de rencontres** ;
✓ profiter des **synergies existant entre toutes les professions réunies** au sein de l'Association.

Adhérer à la Sim c'est aussi **bénéficier de 20 % de réduction** sur toutes les manifestations et publications de l'association.

www.lasim.org

société de l'industrie minérale
17 rue Saint-Séverin, 75005 Paris France
www.lasim.org - tél. +33 (0)1 53 10 14 70 - fax +33 (0)1 53 10 14 71

d'eau est souvent élevée (6 %, voire au-delà), leur propreté mesurée par l'essai au bleu de méthylène est souvent insuffisante en raison de la présence de sol dans les déchets (MB pouvant atteindre 4), enfin leur angularité et leur texture sont souvent jugées trop élevées (http://ofrir.lcpc.fr; Sinis et Gonzales, 2006). Or, une résistance mécanique insuffisante engendre une production de fines accrue qui va piéger l'eau et nécessiter un accroissement du dosage en eau pour hydrater le ciment dans le cas d'une utilisation en béton hydraulique, ce qui peut avoir pour conséquence une réduction significative (jusqu'à 30 %) de la résistance mécanique du béton. Pour autant, les exigences dont il est question ne reflètent pas toujours un classement performantiel des matériaux naturels, encore moins des mélanges à base de granulats alternatifs, ce qui constitue une difficulté supplémentaire. Ainsi, les travaux de Balay et al. (1998) ont montré que, si le comportement mécanique d'une grave non traitée dépend bien de la nature pétrographique de la roche, en revanche un bon comportement mécanique n'implique pas nécessairement de bonnes caractéristiques mécaniques des granulats (Los Angeles et micro-Deval). Des travaux plus récents menés par Aurstad et al. (2006) dans le cadre du programme de recherche et de développement norvégien relatif au recyclage des routes ont d'ailleurs ajouté un niveau de difficulté supplémentaire, lié au comportement évolutif de certains granulats alternatifs. En effet, ces travaux concluent tant en laboratoire que sur site au très bon comportement de graves de granulats de bétons concassés, avec de fortes valeurs du module élastique (jusqu'à 650 MPa, à comparer au seuil minimal de 500 MPa définissant la catégorie la plus noble dans le tableau C1 de l'annexe C de la norme EN 13286-7) et des déformations permanentes plus faibles qu'avec des granulats naturels, phénomènes qui s'expliquent vraisemblablement en partie par la prise différée du ciment non hydraté jusqu'alors. Enfin, une ultime difficulté technique posée par la valorisation des déchets du BTP comme granulats alternatifs provient de la présence de substances nocives (plâtre, bois, plastique, polystyrènes...) qui résultent d'une déconstruction ou d'un tri insuffisamment sélectif. Or, à titre d'exemple, la présence d'une faible quantité de polystyrène suffit à ruiner l'état de surface d'une dalle en béton, de sorte que des exigences sévères ont été introduites dans le texte révisé de la norme européenne EN 12620 en cours d'approbation (granulats pour bétons, proportion d'éléments flottants inférieure à 0,2 cm^3 par kg de granulats alternatifs). De même, la présence de plâtre, substance hydrophile, va limiter les possibilités de réemploi des déchets comme granulats alternatifs pour béton, car un dosage en eau plus élevé sera nécessaire pour maintenir l'ouvrabilité, mais aura pour conséquence de dégrader la résistance mécanique du béton durci.

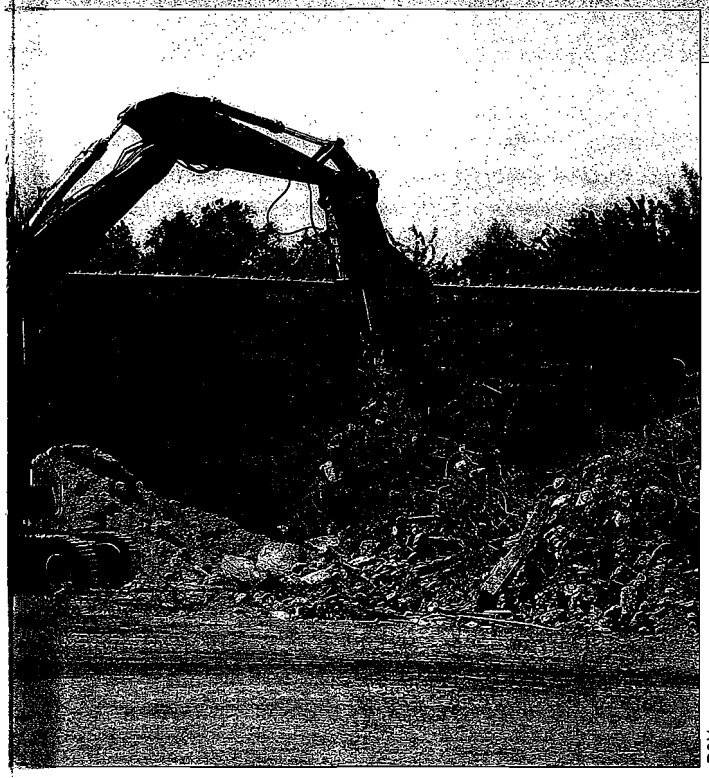
Point de vue économique

Du point de vue économique, un frein majeur à la valorisation des déchets du BTP comme granulats alternatifs vient de la concurrence avec les granulats naturels. Certes, les gisements de granulats naturels situés à proximité des lieux de consommation que constituent les grandes métropoles tendent à se tarir (c'est notamment le cas pour la région parisienne) ce qui avantage les plateformes de recyclage. Pour autant, la France métropolitaine a la chance de disposer d'importants gisements de ressources minérales bien répartis sur tout son territoire, exploités par un



Figure 2 - Des opérations de tri et de fragmentation complémentaires

maillage de 2 700 carrières en activité qui élaborent des granulats de qualité et les commercialisent à un coût relativement raisonnable (de l'ordre de 9 euros la tonne en moyenne, d'après Unicem, 2008). Dès lors, les 350 plateformes de recyclage françaises qui valorisent les déchets du BTP comme granulats alternatifs sont doublement désavantagées : d'une part, le prix de revient des granulats alternatifs élaborés à partir de déchets du BTP est plus élevé que celui des granulats naturels, dans la mesure où des opérations supplémentaires de déconstruction sélective, d'acheminement des déchets jusqu'à la plateforme de recyclage (sauf installation de recyclage mobile sur chantier de démolition de taille respectable), de fragmentation des plus gros blocs à l'aide d'un prise-roche, enfin de tri parfois mécanisé (cisaillage des armatures du béton armé puis déferraillage magnétique) mais le plus souvent manuel pour éliminer la plus grande partie des substances nocives (plâtre, bois, plastique, papier, carton, polystyrènes...) sont indispensables à la valorisation de ces déchets



R&V

comme granulats alternatifs (figure 2).

Ce surcoût de production des granulats alternatifs par rapport aux granulats naturels n'étant nullement compensé, ni par des taxes élevées sur la production de granulats naturels (le montant de la taxe générale sur les activités polluantes payée par les carriers s'élève à 0,20 euros/t, source www.unicem.fr), ni par des tarifs suffisamment élevés de réception des déchets sur plateforme de recyclage en raison de la faiblesse des tarifs de mise en décharge de classe III (de 3 à 7 euros/t pour des déchets provenant de la démolition des bâtiments et des couches de chaussées), il est donc répercuté sur le prix de vente et rend les granulats alternatifs peu attractifs du point de vue économique ; d'autre part, le maillage insuffisant du territoire français en installations de recyclage induit des distances (donc des coûts) de transport vers ces installations pour le moins dissuasives. En effet, les coûts de transport des granulats naturels et a fortiori ceux des déchets du BTP peuvent rapidement devenir supérieurs au coût des granulats eux-mêmes (il est généralement admis que le prix départ carrière des granulats double pour un transport de 30 km) de sorte que les entreprises de déconstruction privilégient la proximité des décharges de classe III par rapport au transport des déchets vers la plateforme de recyclage la plus proche. Cette privation des plateformes de recyclage de ressources potentielles en granulats alternatifs contribue à limiter les volumes de matériaux traités et disponibles sur ces installations, leur production annuelle moyenne étant de l'ordre de 45 000 tonnes (UNPG, 2008), de sorte que les quantités de granulats alternatifs disponibles et les cadences possibles pour alimenter un chantier de construction sont souvent insuffisantes en regard des besoins de ce chantier que seuls les granulats naturels peuvent couvrir. Enfin, les niveaux insuffisants de certaines caractéristiques techniques des déchets précédemment évoquées peuvent engendrer des surcoûts économiques importants, c'est par exemple le cas lorsque la porosité élevée des granulats alternatifs engendre une surconsommation de liant pour atteindre les exigences de maniabilité à la mise en œuvre et de stabilité mécanique en place.

Point de vue social et environnemental

Du point de vue social et environnemental, les freins à la valorisation des déchets du BTP comme granulats alternatifs sont principalement de deux ordres : d'une part, les gestionnaires d'ouvrages font souvent preuve d'une certaine méfiance à l'égard des granulats alternatifs qu'ils perçoivent comme des granulats de second choix. Cette perception repose en partie sur une traçabilité insuffisante de l'historique des déchets recyclés comme granulats alternatifs, mais également sur une méconnaissance des pratiques qui se développent depuis plusieurs décennies en France et ailleurs en Europe ; d'autre part, si l'immense majorité des déchets du BTP sont inertes, certains contiennent des substances classées comme dangereuses pour la santé du personnel travaillant sur les chantiers ou pour l'environnement (émissions de composés aromatiques polycycliques = HAP, relargage de polluants par lixiviation...), de sorte qu'il convient de les éliminer selon les dispositions prévues par la réglementation (arrêté du 30 décembre 2002 relatif au stockage de déchets dangereux). C'est notamment le cas des déchets de démolition de bâtiments contenant de l'amiante et des fraisats d'enrobés contenant du goudron.

Travaux de recherche pilotés par le LCPC

Le Laboratoire central des Ponts et chaussées s'efforce avec ses partenaires institutionnels et industriels de mener des travaux scientifiques visant à apporter des solutions à un certain nombre des difficultés qui viennent d'être présentées. Actuellement, ces travaux scientifiques sont en grande partie menés dans le cadre de quatre opérations de recherche et de développement qui s'intéressent aux aspects techniques, économiques, sociaux et environnementaux de la valorisation comme granulats alternatifs de certains déchets du BTP, principalement des bétons de démolition concassés et des déchets routiers résultants du mélange de matériaux non traités, bitumineux et traités aux liants hydraulique.

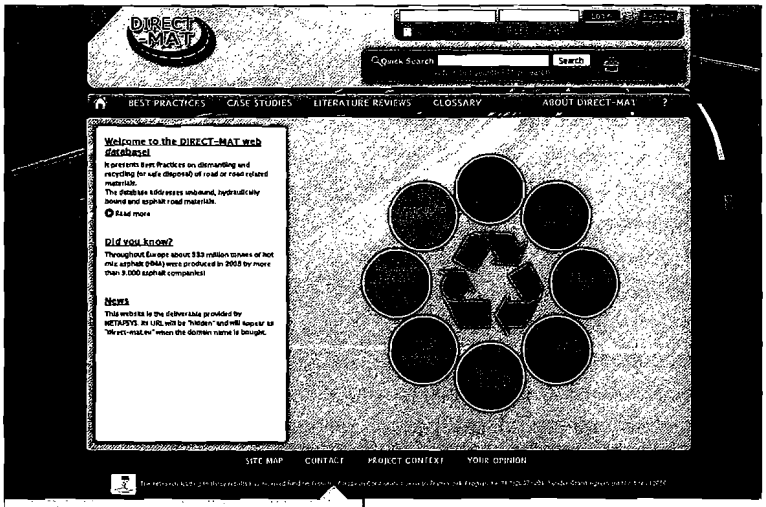
L'opération Agrega

L'opération Matériaux granulaires et granulats alternatifs (Agrega)[2] a été lancée en 2009 pour une durée de quatre ans. Elle a entre autres pour objectifs de produire des connaissances permettant de limiter la mise en décharge de déchets du BTP

potentiellement recyclables comme granulats alternatifs et de réduire le transport des granulats. Ces objectifs sont abordés sous les angles technique, économique, social et environnemental à travers trois sujets couvrant chacun l'ensemble des natures d'emploi potentielles des granulats alternatifs (béton hydraulique d'ouvrage, enrobés hydrocarboné de chaussées...) : le premier sujet vise à compléter le référentiel d'essais de caractérisation des granulats par des méthodes mieux à même de prendre en compte les spécificités des granulats alternatifs ; le second sujet vise à faire évoluer les exigences appliquées aux granulats alternatifs, trop calquées sur celles appliquées aux granulats naturels, vers de nouvelles exigences plus représentatives des performances attendues des matériaux du génie civil pour l'usage envisagé ; le troisième sujet vise à soutenir le développement à l'échelle d'un territoire de filières de valorisation des déchets du BTP comme granulats alternatifs par une approche rationnelle centrée sur l'amélioration du bilan environnemental de ces matériaux et sur l'amélioration de leur qualification.

Bien que l'opération soit récente, différentes actions de recherche sont en cours, dont certaines sont communes à plusieurs sujets :

• **le projet européen Direct-Mat**[3] (Descantes et al., 2009) recoupe les trois sujets précédemment décrits. Il vise le partage des connaissances et des pratiques européennes en matière de déconstruction et de recyclage des matériaux de la route dans la route ou de leur mise en décharge sécurisée (en présence de substances dangereuses). Lancé en 2009 pour une durée de 3 ans et doté d'un financement communautaire de 1,2 millions d'euros, ce projet piloté par le LCPC réunit 20 partenaires de 15 pays, la plupart d'entre eux étant membres du FEHRL[4]. Il consiste à construire une base de données européenne accessible sur Internet et à rédiger des guides de bonnes pratiques traitant de la déconstruction et du recyclage dans la route des matériaux de chaussées. Actuellement, quatre synthèses décrivant les pratiques nationales des pays participants ont été rédigées sur la base des documents disponibles dans chaque pays, qu'il s'agisse de réglementations, de normes, de spécifications, de rapports de recherches ou d'actes de conférences nationales. Chaque synthèse se focalise sur une famille de matériaux de chaussée, matériaux non traités, matériaux traités aux liants hydrauliques, matériaux traités aux liants hydrocarbonés, matériaux indésirables (généralement nocifs ou dangereux), et traite de la déconstruction de cette famille de matériaux ainsi que du recyclage en chaussée des autres matériaux selon les techniques propres à cette famille (ex : recyclage de matériaux bitumineux issus de la déconstruction de chaussées hydrocarbonées dans des chaussées en béton hydraulique). Elle présente des comparaisons techniques, économiques, sociales et environnementales entre les pratiques des différents pays participants, voire avec les pratiques documentées d'autres pays ne participant pas au projet (figure 3). L'étape suivante du projet, déjà lancée depuis plusieurs mois, vise à compléter la connaissance des pratiques européennes en collectant auprès des maîtrises d'œuvrages et des entreprises des données de chantiers routiers de recyclage ainsi que des résultats d'essais en laboratoire sur déchets routiers, puis en rédigeant des études de cas à partir des données ainsi collectées afin de confronter aux pratiques de terrain les règles nationales en matière de déconstruction et de recyclage dans les chaussées.



DR

Figure 3 - Interface du logiciel gestion BDD Direct-Mat

Enfin, l'ultime étape aura pour objectif de rédiger des guides européens de bonnes pratiques en matière de déconstruction et de recyclage des matériaux de chaussées dans la route, visant un recyclage à forte valeur ajoutée. A terme, les synthèses européennes, les études de cas ainsi que les guides de bonnes pratiques viendront alimenter la base de données du projet (figure 3) qui devrait être accessible par internet début 2012. Les retombées attendues de ce projet sont multiples : tout d'abord, il ambitionne de fournir aux décideurs (gestionnaires d'ouvrages, responsables d'entreprises...) des recommandations disponibles en ligne et validées, appuyées sur des études de cas similaires au chantier qu'ils projettent, qui les aideront à s'engager dans la voie d'un

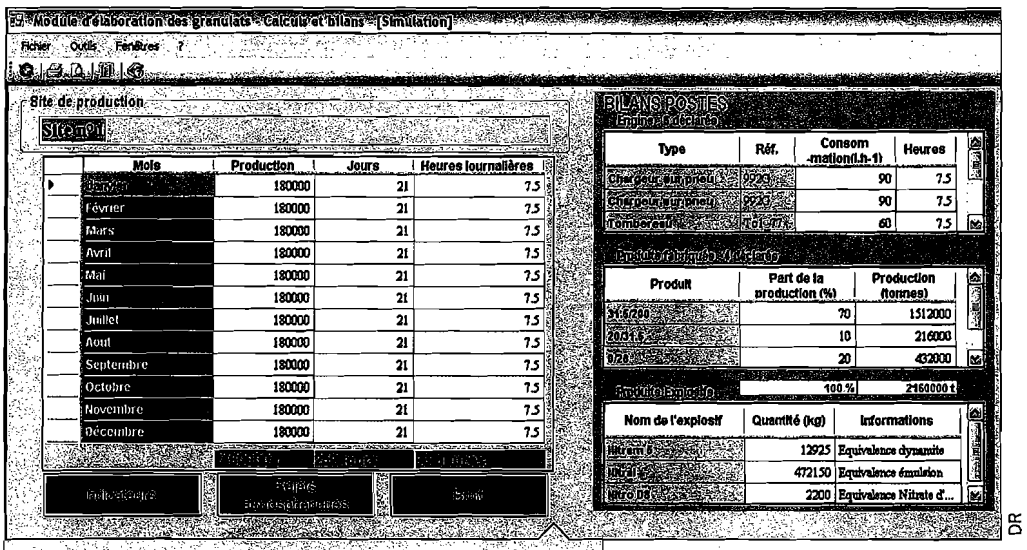
recyclage de qualité au lieu d'éliminer les déchets routiers ; ensuite, l'étape de rédaction des guides de bonnes pratiques amènera immanquablement à identifier des pistes de recherche communes aux pays participants et à proposer une vision européenne intégrée des besoins de recherche en matière de recyclage des déchets routiers dans la route, permettant de coordonner les programmes de recherche nationaux et européen ; enfin, les résultats du projet aideront le Comité européen de Normalisation à fixer des exigences rationnelles spécifiques aux granulats alternatifs issus de la déconstruction des chaussées ;

• **une recherche visant à proposer des exigences spécifiques aux granulats de bétons concassés recyclés** pour confectionner de nouveaux bétons de bâtiment recoupe les deux premiers sujets. Lancée en 2009, l'étude bibliographique réalisée montre que les granulats de bétons concassés recyclés ont une absorption d'eau plus élevée, une masse volumique plus faible et une homogénéité moindre (variable selon le tri et l'homogénéisation pratiquée sur la plateforme de recyclage) par rapport aux granulats naturels. Ces différences engendrent une perte d'ouvrabilité du béton frais, une résistance mécanique plus faible et une vitesse de carbonatation plus élevée des bétons durcis constitués de gravillons de bétons recyclés, phénomènes encore accrus en présence d'une fraction sable de bétons concassés (0/4 mm). Ces inconvénients sont plus ou moins compensés par l'ajout de 10 à 15 % de ciment supplémentaire et d'un fluidifiant. Aussi, un programme d'essais est actuellement en cours au Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Aix-en-Provence, avec pour objectif de formuler un béton de bâtiment incorporant du sable de bétons concassés recyclés de performance B25 sans ajout de ciment supplémentaire, d'ouvrabilité minimale 100 mm, de rapport Eeff/C ≤ 0,60, de porosité inférieure à 16 % et ne présentant pas de risque de réaction sulfatique interne. Trois formules de béton composées des mêmes proportions de gravillons calcaires et de sables sont à l'étude, ces formules différant par la présence de sable 0/4 de bétons concassés recyclés (formules 2 et 3) et d'un filler correcteur (formule 2). Elles diffèrent également par la quantité d'eau totale qu'elles incorporent (de 180 l pour la formule 1 à 222 l pour la formule 2), ainsi que par la quantité d'adjuvant utilisée (de 0,7 % pour la formule 1 à 1,1 % de la masse de ciment pour la formule 3). Un programme d'essais visant à caractériser l'affaissement au cône d'Abrams à l'état frais pour différentes teneurs en eau initiale des granulats de béton concassé, la résistance en compression simple à l'état durci, la porosité des éprouvettes de béton selon la norme NF P 18-459, enfin l'ex-



pansion des éprouvettes selon la méthode LPC n°66 est en cours de réalisation. Les résultats feront l'objet d'une communication ultérieure ;

• **une recherche visant à améliorer le bilan environnemental des granulats alternatifs à l'échelle d'un territoire** a été initiée en 2009 dans le cadre du troisième sujet. La stratégie adoptée pour cette recherche associant le LCPC[5] et le LRPC d'Angers consiste à évaluer le coût environnemental global lié à la production de granulats alternatifs et naturels (coût au départ du site de production), puis à s'appuyer sur les différences de coûts pour déterminer leur transportabilité relative exprimée en termes de rayon de livraison. Les comparaisons sont conduites selon une approche fonctionnelle, c'est-à-dire par type de matériau de construction routière (ex : une grave naturelle par rapport à une grave alternative). Les calculs sont réalisés à l'aide du logiciel MEG (figure 4) mis au point la le LCPC dans le cadre de la thèse de Martaud (2008).



DR

Figure 4 - Interface du logiciel du module MEG

consommations énergétiques des différents postes (concasseurs, cribles...) ainsi que les cadences. Le logiciel permet de calculer différents indicateurs, parmi lesquels les consommations annuelles d'énergie par tonne du granulat étudié, l'effet de serre correspondant (en kg équivalent CO_2) ou encore des indicateurs de toxicité (toxicité chronique, en kg eq. 1,4DCB ; éco-toxicité chronique en kg eq. 1,4DCB). Les comparaisons en cours concernent d'une part deux graves, l'une naturelle et l'autre issue du concassage de bétons de démolition de bâtiments, d'autre part deux fillers, l'un calcaire et l'autre constitué de cendres volantes d'une centrale thermique. Les premières conclusions (François, 2010) sont relatives aux comparaisons entre les données collectées en carrière pour la grave naturelle et celles issues d'une étude bibliographique pour la grave de bétons de démolition concassés. L'éval-uation environnementale de cette dernière, qui n'a pas encore pu intégrer les coûts de déconstruction et de tri des matériaux à la source, repose sur deux scénarios d'acheminement des matériaux de démolition vers une plateforme d'élaboration longs respectivement de 10 et de 20 km. Compte tenu du coût environnemental de ces scénarios, le différentiel de transportabilité semble en faveur des matériaux naturels et cette tendance devrait s'accroître avec la prise en compte de la déconstruction et du tri. Les évaluations relatives aux bétons de démolition devront être affinées avec des données relatives à ces deux opérations. Pour les cendres volantes, les coûts environnementaux semblent beaucoup plus faibles que ceux des fillers naturels fortement impactés par le poste de concassage. Par conséquent, le différentiel de transportabilité apparaît en faveur des fillers alternatifs. Dans chaque cas, la variabilité entre sites de production du même type de matériau impose de relativiser la portée des résultats et va nécessiter de multiplier les cas d'études. De plus, les comparaisons ont été réalisées sur la base des bilans énergétiques, mais une réflexion devra être menée sur le choix de l'indicateur de comparaison le plus approprié (gaz à effet de serre ?...).

L'opération Optimirr

L'opération **Opti**misation des **m**atériaux routiers économes et **i**ncorporant des **r**ecyclés de la **r**oute (Optimirr)[6] a été lancée en 2006 pour une durée de six ans. Elle a entre autres pour objectifs de produire des connaissances permettant d'optimiser les mélanges pour matériaux de couches de chaussées contenant des recyclés de la route (sujet 3). Les travaux relatifs à ce sujet portent sur l'étude du potentiel des constituants (granulats et liants) à supporter de multiples recyclages (potentiel de recyclabilité), sur la détection de polluants contenus dans les matériaux à recycler (goudron...), ainsi que sur l'optimisation de la formulation en laboratoire des mélanges incorporant des recyclés de la route. Deux travaux caractéristiques de la diversité des recherches menées sur ce sujet peuvent être mentionnés :

• **le projet européen Re-Road**[7] (Gabet et al., 2009) vise à amener le niveau de recyclage



DR

Figure 5 - Fraisage d'un BBM

à chaud en centrale des chaussées bitumineuses à 99 % dans le cadre d'une approche globale (technique et environnementale), contrainte par la volonté de limiter au maximum l'apport de matériau neuf et de ne pas dégrader l'usage des matériaux recyclés par rapport à leur premier emploi lorsqu'ils étaient neufs. Lancé en 2009 pour une durée de 4 ans et doté d'un budget communautaire de 2,4 millions d'euros, ce projet associe 18 partenaires européens pour la plupart membres du FEHRL sous la responsabilité du VTI (Suède). En dehors des tâches de pilotage et de valorisation (WP 6 et 7), les cinq autres tâches que compte le projet consistent à étudier et à améliorer la fabrication et la gestion des enrobés hydrocarbonés en centrale (WP4), la caractérisation des enrobés et leur aptitude à subir de multiples recyclages (WP1), la compatibilité avec des apports d'enrobés neufs (WP2), la prévision du comportement d'enrobés incorporant des enrobés recyclés (WP5), enfin l'impact environnemental de l'utilisation d'enrobés recyclés pour confectionner de nouveaux enrobés (WP3). Le LCPC et le LRPC d'Aix-en-Provence sont très impliqués dans les tâches 1, 2 et 4 : les travaux en cours dans la tâche 1 portent sur la caractérisation dimensionnelle des agrégats d'enrobés à l'aide du vidéogranulomètre (Descantes et al, 2003) et sur le développement de méthodes d'extraction et de caractérisation des propriétés des bitumes modifiés incorporant des indicateurs de leur potentiel de recyclabilité ; la contribution du LRPC d'Aix-en-Provence à la tâche 2, outre l'animation de cette tâche, porte sur le vieillissement des liants en laboratoire, sur le développement de tests de compatibilité entre liants neuf et usagé, et sur la formulation d'enrobés homogènes à partir d'agrégats d'enrobés en testant notamment différents liants d'apport ; enfin, la contribution relative à la tâche 4 vise à relier les caractéristiques "granulats" des agrégats d'enrobés aux réglages de la fraiseuse, dans le but d'adapter ces réglages aux exigences attendues pour le réemploi des agrégats. Après une phase d'étude bibliographique portant notamment sur l'examen des résultats du projet européen Score, des agrégats d'enrobés fraisés (figure 5) avec différents réglages des fraiseuses (principalement vitesse d'avancement et apport en eau) ont été prélevés sur 2 chantiers, un chantier en béton bitumineux drainant et un chantier en béton bitumineux mince. Simultanément, la température et la profondeur de fraisage ont été mesurées. Un programme d'essais comportant notamment des analyses granulométriques, des essais d'aplatissement et des essais mécaniques est en cours de réalisation sur ces agrégats après désenrobage et sur les granulats issus du désenrobage de carottes prélevées en dehors de la bande de roulement pour comparaison. Des essais d'angularité sont également envisagés ;

• **la thèse de D.T. Dao**[8] a été lancée en septembre 2008 dans le cadre d'une convention cifre associant l'Atilh[9], le Specbea[10], Cimbéton[11], le SNBPE[12] et l'UNPG[13]. Cette thèse vise le recyclage à 100 % des granulats de bétons concassés dans du béton hydraulique. Il convient pour cela de mieux comprendre l'influence de ces granulats sur les propriétés des bétons qui les incorporent. L'approche mise en œuvre consiste à identifier la typologie des granulats de bétons concassés en fonction du béton d'origine, à étudier comment l'augmentation de la demande en eau inhérente à l'usage de ces granulats à fort taux peut être compensée par des adjuvants, à s'intéresser au potentiel de recyclabilité des granulats de bétons concassés et à tenir compte de ce potentiel au stade de la formulation d'un béton à base de granulats naturels, enfin à effectuer le bilan environnemental d'un béton à base de 100 % de granulats recyclés par rapport à un béton de performances équivalentes constitué exclusivement de granulats naturels.

Deux opérations supplémentaires

Enfin, deux autres opérations s'intéressent aux granulats alternatifs :

• **L'opération Bétons Environnementaux**[14], lancée en 2006 pour une durée de 5 ans, avait entre autre pour objectif de valoriser des sous-produits industriels ou des déchets, parmi lesquels les granulats issus du recyclage des bétons, dans des bétons hydrauliques (sujet 3). Les travaux réalisés ont notamment porté sur la fabrication de bétons à base de granulats de bétons concassés recyclés élaborés dans des conditions industrielles. Ces tra-

vaux, menés en collaboration avec le LRPC d'Angers, visaient à tester l'influence sur la rhéologie du béton à l'état frais (affaissement au cône d'Abrams) et à l'état durci (résistance en compression à 7 et 28 jours, résistance en traction par fendage à 28 jours, module d'élasticité à 28j) de différentes proportions de sables et de gravillons de bétons concassés incorporées selon différents protocoles de malaxage. Les essais de caractérisation des granulats de bétons concassés ont confirmé les niveaux de résistance mécanique médiocres déjà observés (LA de l'ordre de 30, MDE de l'ordre de 25), ainsi qu'une absorption d'eau variable. Les premiers résultats d'essais semblent indiquer que la résistance en compression ainsi que le module d'élasticité du béton durci décroissent avec la densité du béton, elle-même liée aux variations d'absorption d'eau des granulats de bétons concassés qui facilitent plus ou moins l'auto-compactage. D'autres travaux réalisés dans le cadre du sujet 3 ont porté sur la détermination de l'absorption d'eau des sables à fort taux de fines.

• **L'opération Epees**[15] Évaluation et prévision des effets sur l'environnement des infrastructures de transport a été lancée en 2009 pour une durée de 7 ans. Elle a pour objectif de fournir aux maîtres d'œuvrages des outils d'aide à la décision prenant en compte les impacts environnementaux liés à la construction d'ouvrages à différentes échelles de temps et d'espace. Cette opération très large s'intéresse aux granulats à travers deux outils : la base de données Ofrir[16], qui rassemble des connaissances sur les pratiques françaises en matière de recyclage de déchets dans les routes et devrait évoluer pour incorporer un module d'analyse du cycle de vie des ressources ; le logiciel MEG déjà évoqué, qui devrait évoluer pour mieux prendre en compte les spécificités d'élaboration des granulats recyclés.

Une démarche globale

Les problèmes posés par la valorisation des déchets du BTP comme granulats alternatifs viennent d'être succinctement décrits et les travaux de recherche menés au LCPC pour tenter de les résoudre ont été illustrés. Ces travaux s'inscrivent dans une démarche plus globale, définie dans le contrat quadriennal 2010 – 2013 de l'établissement, visant à favoriser tant le plein emploi et l'utilisation rationnelle des matériaux de carrières dont le génie civil ne peut se passer que le recyclage des déchets inertes pour répondre à ses besoins. La convergence des politiques nationale et européenne en matière de recyclage des déchets du BTP renforcent la détermination du LCPC à consacrer, avec l'ensemble de ses partenaires publics et privés, une part importante de ses moyens de recherche au service de ces objectifs.

Yannick Descantes

Bibliographie

J. Aurstad, G. Bernsten, G. Petkovic (2006), Evaluation of unbound crushed concrete as road building material – Mechanical properties vs field performance, Baltic Road Conference, Kuressaare 28-30 August 2006.

J. Balay, A. Gomes Correia, P. Jouve, P. Hornych, J.L. Paute (1998), *Étude expérimentale et modélisation du comportement mécanique des graves non traitées et des sols supports de chaussées – dernières avancées*. BLPC n° 216.

M. Crosnier et F. Leray (2007), Le recyclage des déchets du bâtiment et des travaux publics peut progresser, *Le "4 pages" de l'institut français de l'environnement*, n° 116.

Y. Descantes, G. Blot, J.B. Ducassou (2003), Vidéo-granulomètre VDG 40 : Synthèse des recherches passées et perspectives, *Etudes et Recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées*.

Y. Descantes, C. de La Roche, M. Arm, K.A. Pihl, L. Gaspar, K. Mollenhauer, M. De Lurdes Antunes, L. De Bock, C. McNally (2009), DIRECT-MAT : Partage à l'échelon européen des connaissances et des pratiques en matière de recyclage des matériaux de la route, *Revue générale des Routes RGRA*, n° 877.

Directive 2008/98/CE du Parlement Européen et du Conseil du 19 novembre 2008, relative aux déchets et abrogeant certaines directives, publiée en *JOCE* du 22 novembre 2008.

D. François (2010), Natural and Alternative Materials for Road Construction – Environmental Optimization of Resources Management in a Territory, *ICTI2010*, Août 2010, ISBN 978-972-8692-57-5.

T. Gabet, V. Mouillet, C. de La Roche (2009), Le projet européen Re-Road – Stratégie de fin de vie des routes en enrobés bitumineux, *RGRA* n° 874.

T. Martaud (2008), Évaluation environnementale de la production de granulats naturels en exploitation de carrière - Indicateurs, Modèles et outils. Thèse de doctorat.

J.F. Pasquet (2006), Une seconde vie pour les matériaux de construction, *Recyclage & Valorisation*, n° 12.

F. Sinis, and M. Gonzales, (2006). *Guide on techniques for recycling in pavement structures*.

Rapport technique SAM-06-DE29, projet européen SAMARIS. http://www.fehrl.org/?m=32&id_directory=356

Unicem (2008), Statistiques 2008. http://www.unicem.fr/data/info/79231-VolumesMiniPartner_250_GoO_ODYSSEE_ECSTAT_2008REVUEFLASH_REVUE_14_10_09STAT_2008_RVB_HR.pdf

UNPG (2008), Développer le recyclage des granulats pour construire durablement, plaquette n° 78069. http://www.unpg.fr/data/info/78069-plaquette_Recyclage_def_en_planches.pdf

1 http://www.legrenelle-environnement.gouv.fr/IMG/pdf/07-11-23_GE_engagementsV2.pdf
2 Contact : Yannick.descantes@lcpc.fr
3 Accronyme de "Dismantling and RECycling Techniques for road MATerials- sharing knowledge and practice", Cf. http://direct-mat.fehrl.org
4 Forum des Laboratoires Nationaux Européens de Recherche Routière
5 Contact : denis.francois@lcpc.fr
6 Contact : Chantal.de-la-roche@lcpc.fr
7 Re-Road – End of life strategies of asphalt pavements, Cf. http://re-road.fehrl.org
9 Contacts : thierry.sedran@lcpc.fr (conseiller d'étude) ; francois.de-larrard@lcpc.fr (Directeur de thèse)
10 Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques
11 Syndicat Professionnel des Entrepreneurs de Chaussées en Béton et d'Equipements Annexes
12 Centre d'Information sur le Ciment et ses applications
13 Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi
14 Union Nationale des Professionnels des Granulats
15 Contact : guillaume.habert@lcpc.fr
16 Contact : agnes.jullien@lcpc.fr
17 http://ofrir.lcpc./fr

Remerciements

L'auteur tient à remercier ses collègues du LCPC et des Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées pour les échanges verbaux ou documentaires utiles à la rédaction de cet article. Il remercie en particulier Chantal de La Roche, Agnès Jullien, Thierry Sedran, Denis François, Patrick Gentilini, Bogdan Cazacliu.