

RP2-S09005 – AGREGA - Granulats à moindre empreinte écologique pour la construction d'infrastructures de transport (ex RPW2S09005, ex 11W091)

Fiche 11/12/13

Responsable : Yannick Descantes

Durée : 4 ans (2009-2012) + année 2013 de valorisation



Enjeux et objectifs

Le niveau d'activité économique d'un pays repose dans une large mesure sur la qualité de son réseau d'infrastructures de transport, qu'il convient de développer et de préserver à un coût économique et environnemental supportable. En France, ce réseau est constitué principalement de routes et de voies ferrées, dont la construction et l'entretien produisent des déchets, consomment de grandes quantités de granulats extraits à plus de 95% du milieu naturel (lit majeur et estuaire des cours d'eau, sous-sol), enfin génèrent un trafic lourd agressif vis-à-vis des infrastructures de transport et de leur environnement. Dès lors, maîtriser les dépenses ainsi que l'empreinte écologique relatives aux travaux de construction et d'entretien routiers ou ferroviaires impose de limiter le prélèvement de ressources naturelles non renouvelables, la mise en décharge de matériaux potentiellement utilisables comme granulats alternatifs, ainsi que le transport de granulats (consommation d'énergie, émission de CO₂, ...).

A cette fin, la présente opération de recherche avait pour objectifs de développer ou d'améliorer des outils et méthodes permettant de sanctionner au plus juste l'aptitude de granulats à un usage donné, de modéliser l'influence de caractéristiques usuelles des granulats sur les propriétés d'un mélange granulaire, de réévaluer expérimentalement la pertinence de certaines spécifications « granulats » vis-à-vis des performances de matériaux routiers, enfin d'intégrer des critères environnementaux dans le coût de l'approvisionnement en granulats en s'appuyant sur le concept de transportabilité.

Sujets traités et principaux résultats obtenus

Évaluer les caractéristiques propres aux granulats alternatifs de façon pertinente pour l'usage attendu

Accroître le recyclage de certains déchets comme granulats alternatifs impose de compléter le référentiel d'essais pour caractériser de façon pertinente leur aptitude au réemploi. Les travaux de R&D résumés ci-après illustrent différents aspects de cette exigence.

- *Caractérisation et tri du ballast de voie ferrée selon son angularité* : les sollicitations subies par les particules de ballast au fil des années passées dans une voie ferrée tendent à arrondir leurs arêtes initialement vives au détriment de la stabilité de la voie. Un module dédié à la caractérisation de l'angularité résiduelle du ballast a été intégré au logiciel du vidéogranulomètre (fig. 1), permettant de sanctionner l'usure qu'il a subi et son aptitude au réemploi en voie ferrée. *Ifsttar, CECP de Rouen.*

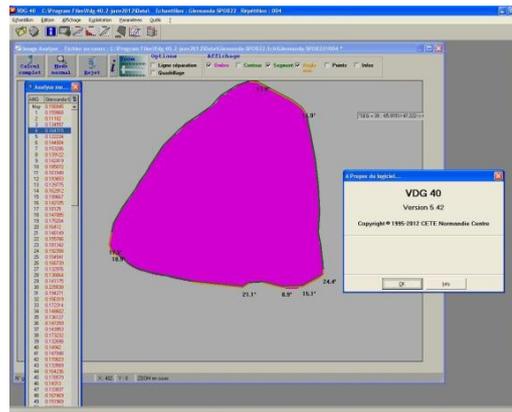


Fig. 1 : Vidéogranulomètre et interface logiciel du module d'angularité

En complément, une démarche expérimentale et numérique a permis de mettre au point un démonstrateur établissant l'aptitude d'un plan incliné muni d'obstacles à trier les particules les plus arrondies d'un ballast (fig. 2). *Ifsttar, SNCF.*

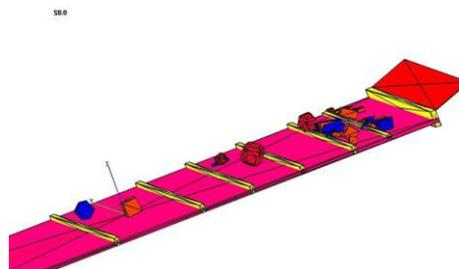


Fig. 2 : Démonstrateur de plan incliné dédié au tri du ballast par angularité

- *Mesure de l'absorption d'eau de sables avec fines* : une étude bibliographique a été réalisée pour recenser les procédés potentiellement aptes à mesurer l'absorption d'eau d'un sable en présence de fines, caractéristique exigée par les producteurs de béton mais ne pouvant être mesurée à l'aide des méthodes normatives européennes. La difficulté principale est inhérente à la détection de l'état saturé surface sèche, particulièrement délicate avec les méthodes existantes lorsque le sable contient des fines. Un démonstrateur (figure 3) a été réalisé selon un des procédés recensés et jugé prometteur, le tambour sécheur, puis des tests ont été réalisés avec un sable naturel et un sable de béton de démolition, de teneurs en fines respectives 13% et 9% environ, et d'absorptions d'eau (WA_{24}) proche de 1% et 7% respectivement. Au stade actuel de son développement, il apparaît que ce démonstrateur permet d'estimer l'état saturé surface sèche avec une précision de $\pm 1\%$. Des améliorations sont à l'étude et un article est en cours de rédaction pour une revue internationale à comité de lecture. *LR d'Aix-en-Provence, LR d'Autun, Ifsttar.*



Fig. 3 : Démonstrateur de tambour sécheur pour la mesure de l'absorption d'eau

- *Rationalisation de la mesure du potentiel de gonflement des laitiers LD* : afin de caractériser de façon plus juste le potentiel de gonflement des laitiers LD, gisement de granulats sous-employé en dépit de bonnes caractéristiques mécaniques, un programme expérimental visant à mesurer leur gonflement sur des fractions granulaires typiques de couches de liaison ou de roulement a été réalisé à l'aide de la machine vapeur (EN 1744- 1). Les résultats des essais (figure 4) suggèrent le rôle important joué par la fraction 5/11 vis-à-vis des gonflements mesurés, l'utilisation de formules discontinues semblant en mesure de mieux encadrer ces gonflements. *LR de Nancy.*

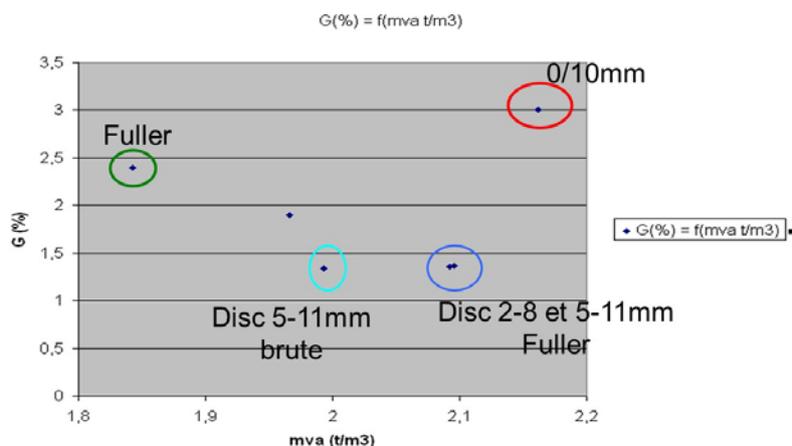


Fig. 4 : Résultats de gonflement à l'essai vapeur pour différentes courbes granulaires

Modéliser les effets de caractéristiques géométriques des granulats sur les propriétés des mélanges granulaires du génie civil

Economiser les ressources naturelles impose d'adapter en permanence la production de granulats aux besoins du marché. Or, le marché s'appuie sur des exigences souvent empiriques, ayant pour conséquence la stérilisation d'une partie de la production. Afin de rationaliser ces exigences, une compréhension qualitative et quantitative de l'effet des caractéristiques des granulats sur les propriétés des mélanges granulaires est nécessaire. Les travaux scientifiques présentés ci-après illustrent l'aptitude d'un outil récent, la simulation numérique discrète, à servir cet objectif.

- *Influence de la géométrie des particules sur la structure d'empilements granulaires denses* : l'influence de la polydispersité, de l'aplatissement, de l'allongement et de l'angularité de granulats secs modèles sur la compacité maximale d'un empilement a été examinée par simulation numérique discrète à l'aide du code de calcul en dynamique des contacts LMGC90 (université de Montpellier). Les résultats montrent notamment que les particules anguleuses permettent d'atteindre une compacité plus élevée que les particules arrondies, que la présence de particules longues n'a pas d'incidence sur la compacité maximale, enfin que l'empilement devient plus compact et s'ordonne (fig. 5) lorsque la proportion d'éléments plats excède 50% en volume. *Thèse de J.F. Camenen, Ifsttar, Université de Rennes I, SNCF.*

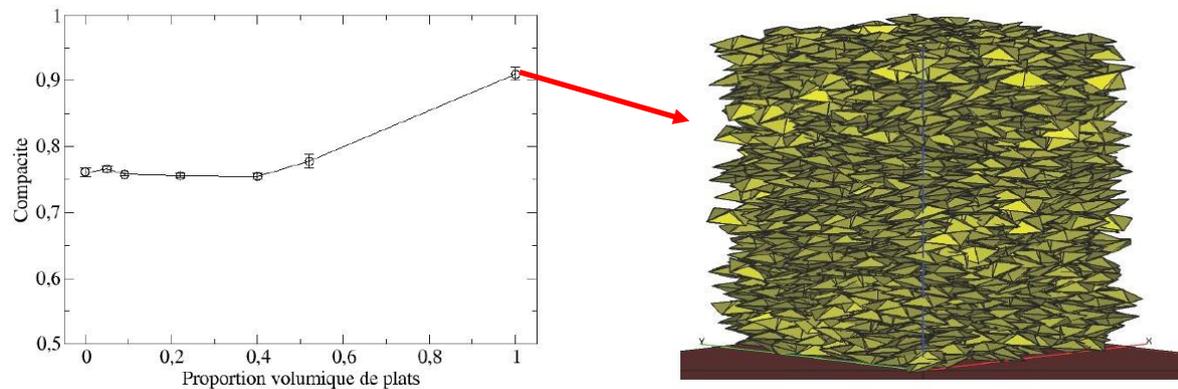


Fig. 5 : Accroissement de densité et de l'ordre d'un empilement au-delà de 50% de plats.

- *Influence de l'angularité des granulats sur les propriétés d'écoulement dense* : la simulation numérique discrète a également permis d'examiner le rôle joué par l'angularité des granulats vis-à-vis des propriétés d'écoulement du squelette granulaire des matériaux du génie civil, celle-ci influençant fortement leur maniabilité à la mise en œuvre. Dans la configuration simple d'un plan rugueux d'inclinaison variable, l'écoulement obéit qualitativement aux lois établies avec d'autres matériaux granulaires modèles. En régime permanent, la compacité diminue linéairement (fig. 6) et l'angle de frottement interne augmente linéairement avec un nombre sans unité (nombre inertiel) caractéristique du régime d'écoulement. L'écoulement permanent se produit pour une inclinaison du plan d'autant plus élevée que les particules sont anguleuses, ce qui fournit au passage un test simple de caractérisation de l'angularité des granulats. Enfin, l'écoulement des grains anguleux fait apparaître une zone statique au contact du plan incliné (fig. 7), dont l'épaisseur décroît avec la rugosité de la paroi. *Post-doctorat d'E. Azéma, Ifsttar.*

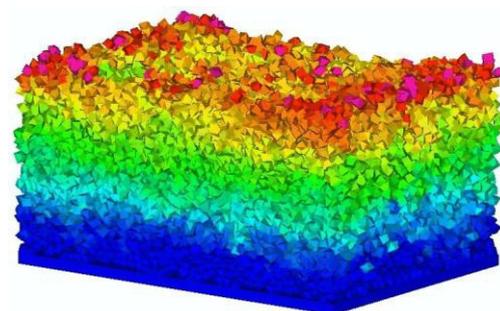
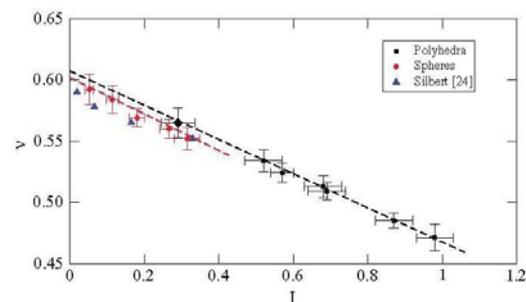


Fig. 6 Compacité en fonction du nombre inertiel Fig. 7 Champ de vitesses d'écoulement et zone statique (en bleu)

Expérimenter la pertinence de certaines spécifications « granulats » vis-à-vis des performances de matériaux routiers

Economiser les ressources naturelles dans un contexte d'évolution des essais de caractérisation devenus européens, de diversification des gisements (mâchefers, bétons de démolition concassés) et d'essor de matériaux routiers innovants (enrobés tièdes) impose de réévaluer la pertinence de certaines spécifications d'usage des granulats vis-à-vis des performances des matériaux routiers, à la fois en laboratoire et in-situ, puis de capitaliser l'expérience acquise. Les travaux de R&D à suivre illustrent cette démarche.

- *Le projet européen DIRECT-MAT* : cette action de coordination et de soutien du 7^{ème} PCRD pilotée par l'IFSTTAR a rassemblé 20 partenaires de 15 pays européens pendant trois ans pour partager leurs connaissances et leurs pratiques de la déconstruction et du recyclage des matériaux d'infrastructure routière. Une base de données décrivant les pratiques nationales illustrées par une centaine de chantiers généralement géolocalisés et des guides de bonnes pratiques sont désormais accessibles en ligne à l'adresse www.direct-mat.eu (fig. 8). Cette capitalisation des chantiers à l'échelon européen va permettre d'alimenter l'évolution des spécifications « granulats » sur la base des performances relevées sur chantiers réalisés ou à venir. *Ifsttar, LR d'Aix-en-Provence, INSA Strasbourg + partenaires d'autres pays (principalement membres du FEHRL).*



Fig. 8 : Interface logiciel de la base de données du projet européen DIRECT-MAT.

- *Influence des caractéristiques de mâchefers et de bétons concassés sur les performances de graves non traitées (GNT)* : une étude bibliographique a permis de rédiger un état de l'art des mécanismes contrôlant l'évolution des performances mécaniques de deux familles de granulats alternatifs utilisables en GNT, les mâchefers et les bétons de démolition. Un programme d'essais triaxiaux à chargements répétés confirme le bon comportement mécanique de GNT à base de ces granulats (fig. 9) en dépit leurs médiocres caractéristiques mécaniques granulats (LA, MDE). L'importance de maîtriser les phases d'élaboration et de murissement des mâchefers et des bétons de démolition pour pouvoir observer en laboratoire des phénomènes d'induration constatés sur des chantiers est soulignée. *LR Saint-Brieuc.*

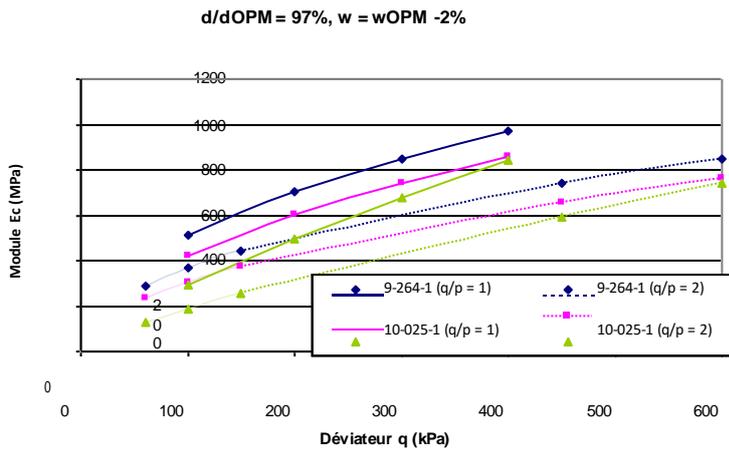


Fig. 9 : Module d'Young d'une GNT de mâchefers en fonction du chargement.

- *Influence de l'angularité des granulats sur l'orniérage des enrobés hydrocarbonés* : un programme expérimental réalisé sur des BBSG formulés à partir de différentes quantités de sables d'angularité variable a mis en évidence l'influence couplée de la granularité et de l'angularité de la fraction sable sur l'aptitude au compactage et à l'orniérage de l'enrobé. Il a notamment été observé que l'angularité de la fraction sable contrôle l'orniérage de l'enrobé seulement au-delà de 30% de sable, celle-ci n'ayant pas d'incidence notable en-deçà de ce seuil (fig. 10). Ce résultat est en contradiction avec la note n°24 de l'IDRRIM définissant les spécifications d'usage pour bétons bitumineux, qui prescrit une angularité minimale de $E_c = 35$ s (exprimée par un temps d'écoulement à l'angulomètre à sable mesuré selon la norme EN 933-6) pour tout sable alluvionnaire entrant dans la fabrication de la plupart des enrobés hydrocarbonés de couche de roulement. *LR Angers*.

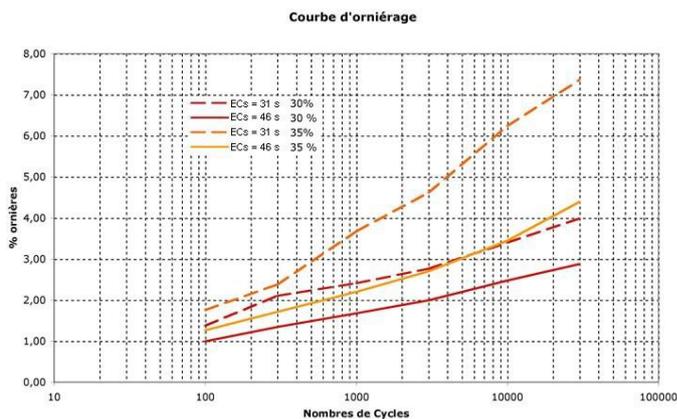


Fig. 10 : Effet couplé de l'angularité et de la granularité du sable sur l'orniérage de l'enrobé.

- *Effet de la nocivité des fines de sable sur le comportement d'enrobés hydrocarbonés* : une réévaluation de la pertinence des spécifications françaises relatives à la nocivité des fines de sables pour enrobés a été menée dans le cadre de deux programmes expérimentaux distincts, l'un comportant des essais de laboratoire sur BBSG avec réalisation de planches expérimentales, l'autre

comportant seulement des essais de laboratoire mais portant sur des BBSG et des enrobés tièdes. Les résultats suggèrent un possible ajustement des spécifications selon le type d'argile, avec une sensibilité accrue des enrobés tièdes à la nocivité des fines. *LR Aix-en-Provence; LR d'Autun, CG 71, CG 58, SETRA, IFSTTAR.*

Intégrer des critères environnementaux dans le coût de l'approvisionnement en granulats en s'appuyant sur le concept de transportabilité

Les politiques publiques d'économie des ressources naturelles et de réduction des volumes de déchets incitent au recyclage dans le domaine du BTP. Toutefois, l'essor du recyclage repose sur l'organisation des filières de façon à répondre aux besoins du marché à un coût compétitif. En intégrant des critères environnementaux dans ce coût, une implantation judicieuse des plateformes de recyclage pourrait accroître la compétitivité de l'offre de granulats alternatifs par rapport aux granulats naturels, dans la mesure où elle permettrait de réduire les flux de granulats, les consommations d'énergie et les émissions à l'échelle d'un territoire. Deux contributions illustrent la mise en place d'une telle stratégie, l'une examinant les consommations d'énergie inhérentes à la production de granulats, l'autre illustrant par un gain de transportabilité l'accroissement de compétitivité d'un gisement découlant d'une moindre consommation d'énergie.

- *Bilan énergétique de la production de granulats* : 8 carrières de granulats naturels et 11 plateformes de granulats alternatifs ont fait l'objet d'analyses des consommations d'énergie nécessaires à l'élaboration des granulats en s'appuyant sur le logiciel MEG. Ces analyses distinguent les consommations d'énergies selon leurs origines (fossile ou nucléaire). Les émissions de gaz à effets de serre inhérentes à l'élaboration de ces granulats ont également été estimées à l'aide du même logiciel. Ces travaux ont alimenté l'approche fondée sur le concept de transportabilité des granulats. *CETE IdF/LEM, ERA 36 (Angers), Ifsttar.*
- *Illustration de l'influence des réseaux sur la transportabilité des granulats* : avec le concours d'un spécialiste SIG du CETE de l'ouest, un département virtuel de 10000 km², doté de différents réseaux (routes, rivières, voies ferrées, ...) a été simulé, sur lequel ont été représentées les zones d'influence de 5 sites de production de granulats. L'étendue de ces zones d'influence est calculée à partir de différentiels de consommations d'énergie traduits en différentiels de transportabilité (fig. 11). Selon ce concept, l'influence d'un site donné est prépondérante en un lieu donné lorsque l'énergie consommée pour élaborer et transporter les produits de ce site en ce lieu est plus faible que celle calculées dans le cas des autres sites. *CETE de l'ouest, Ifsttar.*

site	Diff. MJ/T	Mode	Surface (km ²)
site_1	3,77	/ROUTE	44
site_4	0	/ROUTE/Mer	0
site_5	6,2	/Rail/Rail	278
site_6	17,31	/Fleuv/ROUTE	3078
site_7	9,6	/Fleuv/Mer	362

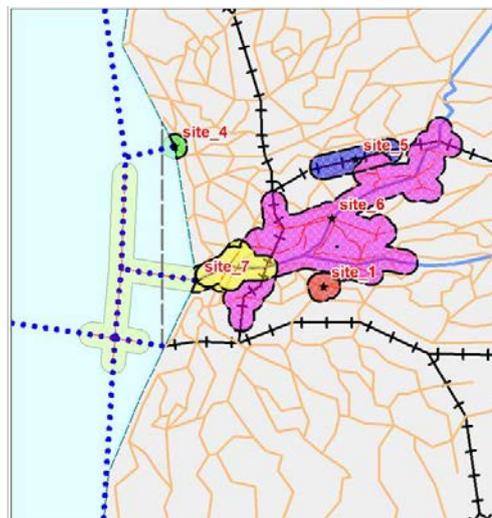


Fig. 11 : illustration du concept de transportabilité des granulats de 5 sites sur un territoire virtuel (approche SIG)

Partenariats

- Commission européenne (projet européen DIRECT-MAT, 2009-2011)
- SNCF (contrat « Impact du bourrage sur les caractéristiques géométriques du ballast » en 2010 ; contrat « étude de faisabilité du tri du ballast selon son angularité à l'aide d'un plan incliné » 2009-2013) ;
- Union Nationale des Producteurs de Granulats – UNPG (2 conventions de recherche partenariale en cours, voir « perspectives » ci-après) ;
- Organismes de recherche : Institut de physique de Rennes (UMR CNRS 6251), INSA de Strasbourg, 18 organismes européens impliqués dans le projet européen DIRECT-MAT, ECN, LMGC Montpellier ;
- Réseau scientifique et technique : CECP de Rouen, CER de Rouen, CETE IdF/LEM, ERA 36, LR d'Aix-en-Provence, LR d'Angers, LR d'Autun, LR de Clermont-Ferrand, LR de Nancy, LR de Rouen, LR de Saint-Brieuc.

Principaux produits (valorisation)

- Nouveau logiciel du vidéogranulomètre intégrant un module de caractérisation de l'angularité du ballast (prochainement commercialisé) ;
- Base de données européenne DIRECT-MAT (présentée aux JTR 2011 et en ligne à l'adresse www.direct-mat.eu) ;
- Publications (voir ci-après), 1 manuscrit de thèse et nombreux rapports.

Quelques perspectives (travaux lancés)

- Étude physico-chimique des possibilités de valorisation des sables argileux de carrière non conformes dans des mélanges bitumineux routiers (thèse de C.W. Chen, 2012 – 2015, bourse Ifsttar).
- Identification et caractérisation de différentes natures d'argiles présentes dans des sables de carrière en vue du développement de relations entre natures d'argiles et valeurs de bleu correspondantes (contrat de recherche partenariale UNPG/Ifsttar, 2012-2015)
- Étude expérimentale des effets de différents facteurs potentiellement responsables de l'incertitude entachant la méthode de mesure du coefficient PSV selon la norme européenne EN 1097-8 (convention de recherche partenariale UNPG/Ifsttar « Modes opératoires d'essai PSV », 2013-2014)
- Modélisation physique et optimisation du concassage de granulats (thèse d'A. Neveu, 2013-2016, bourse Ifsttar)

Quelques publications

La liste de publications ci-dessous n'est pas exhaustive, mais donne une idée de quelques travaux marquants de l'opération.

Camenen J.F., Descantes Y. and Richard P. (2013), *Confined packings of frictionless spheres and polyhedral*, AIP Conference Proceedings, Volume 1542 / 3. GRANULAR SOLIDS / 3.1. Packing, Jamming and Related Properties (http://proceedings.aip.org/resource/2/apcpcs/1542/1/321_1).

Thogersen F., Grégoire C., Stryk J., Horny P., Descantes Y., Chazallon P., Blasl A., Broere P., Bizjak K., Hellman F., Arm M. (2013), *Recycling of road materials into new*

unbound road layers – Main practice in selected European countries, Road Materials and Pavement Design, Volume 14, Issue 2.

Arm M., Descantes Y., Thogersen F., Gaspar L., Mollenhauer K., De Bock L., Gobert J.B., Lumière L. (2012), *The DIRECT-MAT Web Database – A Source of Knowledge in Road Recycling*, Procedia - Social and Behavioral Sciences 48, 1785 – 1793.

Azéma E.; Descantes Y., Roquet N.; Roux J.N. et Chevoir F. (2012), *Discrete simulation of dense flows of polyhedral grains down a rough inclined plane*, Phys. Rev. E. 86, 3.

Camenen J.F., Descantes Y. and Richard P. (2012), *Effect of confinement on dense packings of rigid frictionless spheres and polyhedra*, Phys. Rev. E. 86, 6.

Péralès R., Saussine G., Milési N., Descantes Y. (2011), *On the damaging effects of the ballast tamping operation*, Actes du congrès WCRR2011, 23-26 mai 2011, Lille.

Coulon N., Yazoghli-Marzouk O, Badrouillet C., Descantes Y., Hammoum F., Duc M., Dupont P., Sainte P., Dey P., Afchain B., Boyer N. (2011), *Valorization of sand with high methylen blue value into bituminous mixtures for wearing courses*, Actes du XXiVe congrès mondial de la route, 26-30 septembre 2011, Mexico (Mexique) (Prix 2011 du comité français de l'Association mondiale de la Route)

François D., Martaud T., Ropert T., Rayssac E., Jullien A. and Proust C. (2010), *Natural and alternative Materials for Road Construction – Environmental Optimization of Resources Management in a Territory*, 2nd International Conference on Transport Infrastructures (ICTI), p. 309-316.