



**HAL**  
open science

## Identification de la structure interne des matériaux routiers par analyse d'images

Ferhat Hammoum, Valentine Bertaud, Pierre Bonnet

► **To cite this version:**

Ferhat Hammoum, Valentine Bertaud, Pierre Bonnet. Identification de la structure interne des matériaux routiers par analyse d'images. Journées des Sciences de l'Ingénieur, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Sep 2003, Dourdan, France. hal-04356810

**HAL Id: hal-04356810**

**<https://hal.science/hal-04356810>**

Submitted on 20 Dec 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## IDENTIFICATION DE LA STRUCTURE INTERNE DES MATERIAUX ROUTIERS PAR ANALYSE D'IMAGES

Ferhat HAMMOUM<sup>1</sup>, Valentine BERTAUD<sup>2</sup>, Pierre BONNET<sup>3</sup>

1 LCPC Centre de Nantes – Route de Bouaye – BP 4129 – 44341 Bouguenais Cedex

2 Stagiaire de l'IUP de Poitiers

3 Stagiaire de l'Ecole Polytechnique de Nantes

### Résumé

Les gestionnaires des infrastructures de transport recherchent des techniques fiables et rapides pour s'assurer de la qualité de fabrication et de mise en œuvre des matériaux routiers ou encore pour mener une expertise afin de cerner et de comprendre l'origine des dommages subis par un ouvrage. Parallèlement aux techniques traditionnelles qui présentent quelques inconvénients, un programme de recherche a été lancé au laboratoire des matériaux routiers en 2001 afin d'examiner l'apport d'une technique non destructive comme l'analyse d'image pour identifier et quantifier la structure interne des matériaux routiers. Le programme consiste à mettre en place les méthodes d'acquisition, de traitement et d'analyse d'images à haute résolution afin de mettre à la disposition des ingénieurs et des techniciens un outil d'investigation simple dans son utilisation et capable de fournir des informations intéressantes comme la granulométrie pondérale, la forme et la répartition des pores ou encore l'arrangement granulaire.

### 1 Introduction

Depuis plusieurs années, les techniques de caractérisation des matériaux routiers se sont considérablement développées pour pouvoir identifier et décrire les matériaux en place, pour compléter l'expertise d'un ouvrage ayant subi des dommages ou encore pour contrôler la qualité des travaux effectués. En général, les matériaux utilisés dans le domaine du génie-civil comportent un assemblage granulaire plus ou moins dense avec un liant permettant d'obtenir des propriétés intéressantes de l'ensemble soit à partir d'une matrice organique (bitume, résine époxy, etc.) soit à partir d'une matrice minérale (cas des ciments et des bétons hydrauliques). Cette évolution des techniques d'identification s'est traduite essentiellement en terme de moyens de caractérisation sur les constituants et des tests de performance sur les mélanges compacts. Dans le cas des matériaux bitumineux, ces solutions techniques font appel aux méthodes destructives (chimique: dissolution à l'aide de solvants ou physique: méthode de calcination (Brown Elton,1995) pour déterminer la teneur en liant). Malheureusement, ces méthodes ne permettent pas d'étudier la structure interne des matériaux routiers et d'en déterminer sa composition, sa structure granulaire et son homogénéité par rapport à un corps de chaussée. Nous verrons que l'analyse d'image associé à des méthodes mathématiques robustes permet de déterminer plusieurs quantificateurs de la structure des matériaux hétérogènes (Coster et Chermant, 1985 ; Boitier et al.,1997)

### 2 Matériaux et technique de mesure

Les ingénieurs routiers accordent une importance croissante au rapport performance/coût des structures routiers. Les structures souples largement utilisées en France sont mis en œuvre à partir des granulats locaux et bon marché et d'un liant hydrocarboné. Différents types d'enrobés bitumineux sont fabriqués en faisant varier la proportion et la nature des constituants, dans une gamme restreinte de matériaux généralement normalisés, contenant autour de 5% massique de bitume, proportions qui représentent typiquement 12 % volumique de bitume, 5% de vides et le complément de granulats. Les teneurs en

vide sont en moyenne de 4 à 6 % et parfois augmentées jusqu'à 20% et plus dans des applications particulières telles que les enrobés poreux (drainants) qui permettent un écoulement des eaux pluviales sous la couche de roulement, limitant les risques d'aquaplanage et les projections d'eaux.

## 2.1 Matériau utilisé pour l'étude

Pour mener à bien l'étude de la structure interne d'un matériau bitumineux, une formule du type grave-bitume très utilisé en couche de base a été fabriqué au laboratoire selon la norme NF-P 98-138. Le diamètre maximum des granulats est fixé volontairement à 20mm pour couvrir la gamme des matériaux utilisés dans le secteur routier. Les premières recherches présentées dans cette étude sont volontairement simples d'un point de vue contraste des matériaux constitutifs afin de mettre rapidement en évidence l'intérêt de cette technique d'imagerie. Cependant, on peut étendre cette étude sur d'autres matériaux du génie-civil. La nature minéralogique des granulats est du type calcaire et provient de la carrière de Void dans la Meuse. Ce matériau a été choisi volontairement pour obtenir un bon contraste entre les granulats (niveau de gris proche de 255) et la matrice bitumineuse (niveau de gris proche de 0). Un compacteur à pneu a été utilisé pour assurer un serrage uniforme du mélange GB 0/20 à une compacité normalisée. On obtient ainsi une plaque de 600 mm de longueur sur 400 mm de largeur et une hauteur de 100 mm. Cependant, la structure interne d'un matériau bitumineux dépend fortement du mode de serrage utilisé. Les propriétés du matériau vont dépendre de la direction d'observation ou de mesure. Pour prendre en compte cette anisotropie de structure, on procède au sciage des éprouvettes suivant des plans orthogonaux selon la figure ci-dessous.

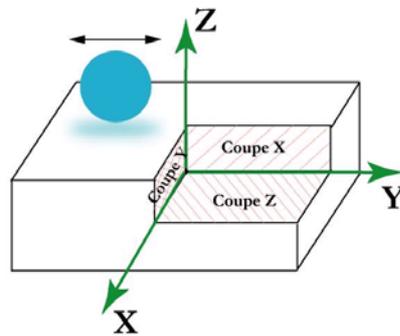


Figure 1 : Plaque GB 0/20 (600X400X100mm) et représentation des différentes coupes obtenues après sciage

L'axe X est l'axe perpendiculaire à la direction de roulement du pneu de compacteur, l'axe Y est l'axe de roulement et l'axe Z la normale à la surface de roulement de la plaque. Nous obtenons ainsi trois coupes selon les trois plans principaux de la plaque. Nous analyserons indépendamment les trois coupes à l'aide de la technique d'imagerie et nous tenterons d'évaluer cette anisotropie à partir de l'orientation des granulats.

## 2.2 Technique de mesure

La technique la plus adaptée pour l'étude des structures granulaires est la tomographie aux rayons X. Elle permet d'effectuer un examen tridimensionnel des échantillons par rotation relative de l'objet entre la source et le détecteur dont le principe est proposée par (Ellington et Berger, 1980). On retrouve dans la littérature des applications concrètes dans le domaine du génie civil (Guinez, 1987) ou plus récemment une utilisation directe de la tomographie pour analyser la structure tridimensionnelle des mélanges bitumineux (Ketcham et Shashidar, 2001) et (Shashidar, 2000). On distingue aussi une autre technique moins onéreuse que la tomographie aux rayons X comme l'imagerie optique. On retrouve de nombreuses applications dans pratiquement tous les domaines d'activité (biologie, biométrie, métallurgie et science des matériaux). Certes, cette technique qui analyse que la surface des échantillons est moins onéreuse que la tomographie aux rayons X mais elle permet d'obtenir des informations rapides et fiables (Masad et al., 2001). L'examen tridimensionnel reste possible avec l'imagerie optique grâce à l'apport de la stéréométrie et des lois probabilistes (Russ et Dehoff, 2001).

Cet outil mathématique permet ainsi de caractériser la structure volumétrique et interne d'un matériau à partir d'un recoupement d'informations recueillies sur une ou plusieurs faces de l'échantillon.

### 2.2.1 Préparation de l'échantillon et acquisition de l'image

Les surfaces obtenues après sciage doivent être propres. Les traces éventuelles laissées par la scie seront supprimées en procédant à un léger polissage de la surface. Avant de passer à l'étape d'acquisition de l'image, vérifier au préalable le calibrage du système d'imagerie afin de pouvoir effectuer ultérieurement des mesures fidèles sur l'image. L'erreur de mesure est minimale si l'on procède à des acquisitions d'images à haute résolution ( $> 20$  pixels/ $\mu\text{m}$ ). La définition d'une telle image permet de distinguer les contours des granulats de petites tailles et les faibles épaisseurs de mastic entre deux granulats très proches (cas typique des assemblages denses). De la même manière, il faut s'assurer de la représentativité des plus gros granulats en couvrant une surface d'acquisition suffisamment grande par rapport à la taille des granulats. A l'aide d'une table XY et d'un éclairage uniforme, on effectue une série d'acquisition d'images élémentaires en 256 niveaux de gris et un codage 8 bits. Les caractéristiques de la surface élémentaire dépendent directement des caractéristiques de la caméra CCD (576X768). Pour obtenir l'image finale de la coupe considérée, on effectue un assemblage de toutes les images élémentaires.

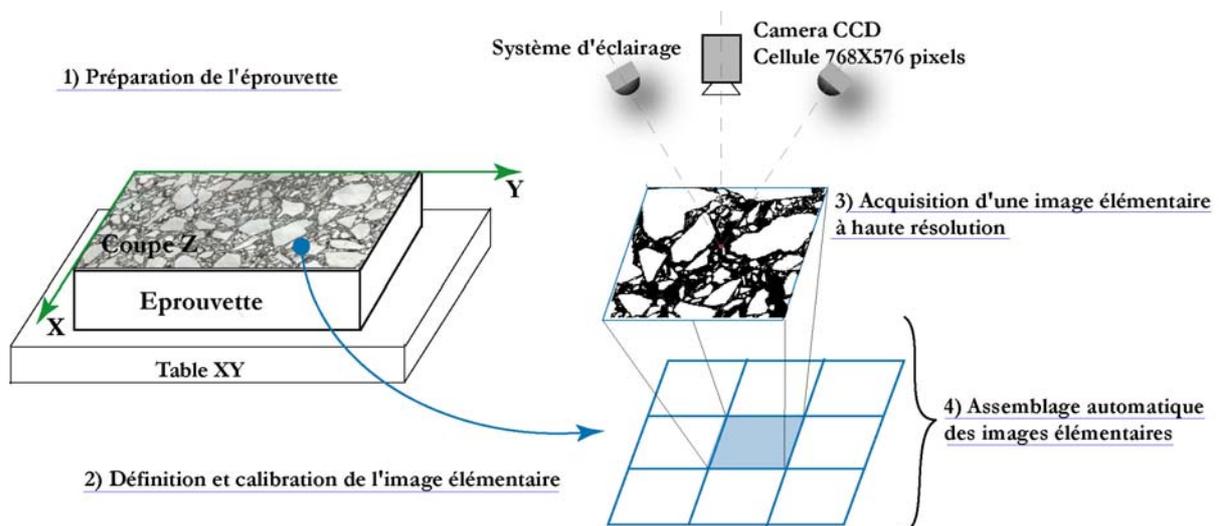


Figure 2 : Principe de l'acquisition des images à haute résolution de la surface d'une éprouvette

### 2.2.2 Traitement et analyse des images

Des opérations de traitement d'images furent utilisés pour optimiser le contraste entre les granulats et la matrice bitumineuse. Ces opérations sont nécessaires si le matériau contient des granulats sombres avec un niveau de gris compris entre 150 et 50. La deuxième étape est le seuillage de l'image. Ce seuillage permet d'éliminer le bruit de fond pour ne prendre en compte que les pixels appartenant aux granulats. L'image obtenue après traitement est une image binaire où l'on distingue nettement tous les granulats de toute les tailles.

## 3 Identification de la structure interne des matériaux

L'identification de la structure interne d'un assemblage dense comme les matériaux routiers passe généralement par une caractérisation pratique pour l'ingénieur routier comme la granulométrie, la teneur en liant et la porosité. Cependant, une identification complète de la structure interne peut être très utile pour la recherche (mise au point de nouveaux matériaux ou de modèles micromécaniques, prise en compte des matériaux recyclés, etc.) ou pour l'expertise (homogénéité du matériau, qualité de fabrication, etc.).

### 3.1 Granulométrie

L'analyse granulométrique est utilisée depuis longtemps dans beaucoup de disciplines. Dans le domaine du génie civil, on utilise couramment l'analyse granulométrique en mesure qui consiste en une pesée « mesure de la masse » du contenu de chaque tamis. Pour sa représentation graphique, cette masse est tracée en fonction de la taille du tamis. Ce type d'analyse est aussi appelé granulométrie pondérale. Dans un premier temps, nous avons examiné les meilleures conditions pour mener à bien l'étude de la granulométrie. Nous avons ainsi évalué les effets de la taille de l'image et de la résolution de celle-ci sur la granulométrie. Pour une résolution donnée, la représentativité de toutes les tailles de granulats est directement liée à la taille de l'image finale. En règle générale, la caractérisation de la granulométrie pondérale par analyse d'image est effectuée en trois étapes : **a)** Après traitement et analyse de l'image de la coupe considérée, on obtient une distribution des aires des granulats interceptés dans la coupe. Les aires placées sur le bord de l'image sont exclues. **b)** on effectue le passage entre la distribution des aires et la distribution en volume à partir d'une méthode basée la stéréométrie. Un système d'équation dont le nombre dépend de la discrétisation en classe de particules permet de relier le nombre de sphères de classe  $i$  au nombre de disque de la même classe. Cet outil mathématique (Russ et Dehoff, 2001) permet ainsi de reconstruire la granulométrie 3D d'un ensemble de sphères à partir de la distribution des aires interceptés dans une coupe donnée. Les granulats utilisés dans le domaine du génie civil sont de forme polyédrique. Cette forme est liée au mode d'élaboration par concassage utilisé dans les carrières. On appliquera une représentation des aires de la coupe à partir du diamètre équivalent des grains (Coster et Chermant, 1985). On assimilera notre coupe de granulats à un ensemble de particules sphériques ayant les mêmes surfaces que les granulats réels. **c)** On détermine la masse des granulats pour chaque classe à partir du volume des sphères puis, on calcule la proportion massique de chaque classe. La connaissance de la densité n'est pas nécessaire si les granulats ont la même densité.

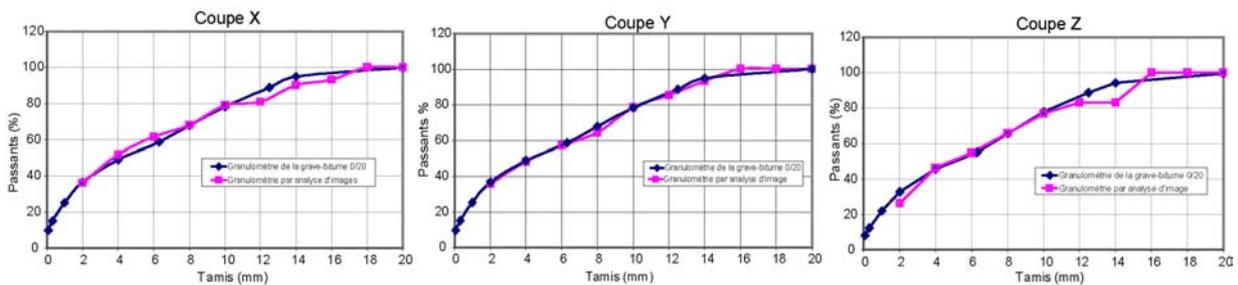


Figure 3 : Obtention de la granulométrie pondérale par analyse d'image selon les 3 coupes

Les résolutions et les tailles des images diffèrent peu d'une acquisition à une autre suivant les trois coupes. Les résultats obtenus sont globalement satisfaisants à partir d'une certaine résolution qui dépend directement du matériel d'acquisition utilisé. En effet, les résultats montrent qu'une résolution de l'ordre de  $35\mu\text{m}/\text{pixel}$  permet de retrouver la granulométrie pondérale de l'échantillon. Sur la coupe Z, on observe des écarts de l'ordre de 8 à 9% pour les tailles de granulats de 2 mm et 14 mm. Les écarts entre la granulométrie par tamisage et la granulométrie par analyse d'image sur les coupes X et Y sont plus faibles. Il semble que les différences qui restent relativement faibles sur les coupes X, Y et Z peuvent s'expliquer à partir des deux facteurs suivants : i) le premier facteur est lié au matériau qui présente un arrangement granulaire avec des fluctuations locales et une forme de grain polyédrique complexe. ii) le deuxième facteur provient de la méthode d'acquisition (représentativité de l'image avec une surface de l'ordre de  $70\text{ cm}^2$  et une résolution de  $26\mu\text{m}/\text{pixel}$ ). Contrairement aux méthodes traditionnelles comme la dissolution par des solvants, cette technique est capable de caractériser rapidement et avec une précision suffisante la granulométrie d'un matériau sans destruction de l'échantillon et sans le recours à aucun solvant.

### 3.2 Orientation des granulats – anisotropie de structure

La caractérisation de la structure interne passe aussi par l'étude de l'orientation des granulats suivant les plans principaux de l'éprouvette. Cette orientation dépendra de la forme géométrique des granulats,

des conditions de mise en œuvre et de compactage. L'analyse des données issues des trois coupes fournira une information sur l'orientation moyenne et tridimensionnelle des granulats dans l'éprouvette.

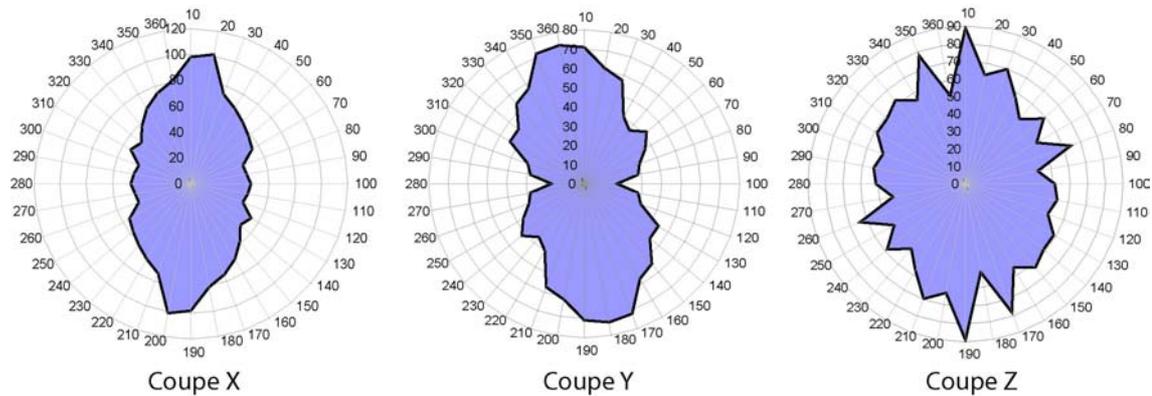


Figure 4 : Rose des orientations des granulats selon les coupes X,Y et Z de la grave-bitume 0/20

L'examen de l'orientation préférentielle des granulats dans la plaque montre que le matériau présente une anisotropie de structure. Les granulats sont bien orientés suivant les plans verticaux (Coupe X et Y). La passage de la charge a tendance à faire coucher les granulats. L'orientation reste aléatoire suivant la coupe Z.

### 3.3 Homogénéité de la structure interne – méthode de Voronoï

Le deuxième niveau d'investigation consiste à décrire la répartition locale et globale de ces particules dans l'espace 2D. On peut ainsi analyser le nombre de voisins de chaque particule, par taille, par forme et par orientation. Ces notions sont très utiles pour décrire un assemblage dense de particules. Pour accéder à ce niveau d'investigation, on utilise la discrétisation de Dirichlet-Voronoi.

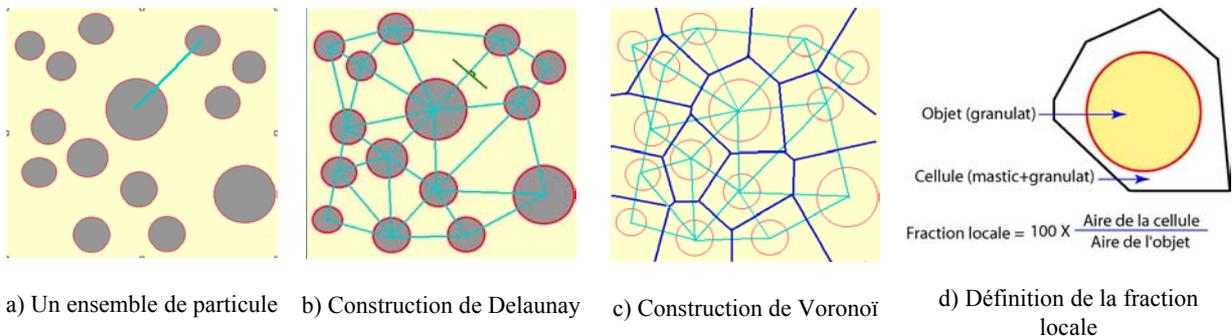


Figure 5 : Schéma de discrétisation bi-dimensionnelle de Dirichlet-Voronoi d'un assemblage granulaire a),b),c) et définition de la fraction locale entre le granulat et le voisinage formé par le mastic.

A partir d'un réseau de point constitué par les centres de gravité de chaque particule, on trace les segments de droite pour relier ces points. On forme ainsi la triangulation de Delaunay. Puis, on définit la médiatrice de chaque segment de droite. L'ensemble de ces médiatrices forme ainsi la discrétisation de Voronoï. Pratiquement, l'image sera décomposée en une sorte de mosaïque de petits pavés qui la recouvrent totalement. Un pavé est une partie de l'image constituée de mastic entourant un granulat. La caractérisation des matériaux hétérogènes en utilisant cette technique de décomposition peut être très utile pour étudier l'incidence de la distribution des inclusions ou des fibres sur les performances vis à vis de la fatigue ou de la fissuration. Pour plus de détails, on peut se reporter aux travaux de l'université de Southampton (Boselli et al. ,1998) ainsi que les travaux de (Ghosh et al ,1997). L'étude menée sur les matériaux bitumineux montre que la fraction locale suit une loi linéaire dans le plan semi-logarithmique.

## 4 Conclusions

Nous avons essayé dans cette communication de montrer les quelques possibilités de l'analyse d'image pour la caractérisation des assemblages granulaires denses comme les matériaux routiers avec notamment la possibilité de décrire la répartition dans l'espace des constituants à partir de la discrétisation de Dirichlet-Voronoi. Les applications qu'elles permettent de traiter, leur souplesse, les rendent attractives. C'est également un champ de recherche intéressant pour la formulation de nouveaux matériaux aux propriétés optimisées, pour la modélisation à l'échelle micromécanique car bon nombre de problèmes théoriques et pratiques comme le recyclage des matériaux ou encore les matériaux intelligents sont encore à débroussailler et peuvent faire l'objet de collaborations fructueuses avec des partenaires industriels.

## 5 Références bibliographiques

- Boitier G., Chermant J.L., Chermant L., Doreau F. et Vicens J. (1997) Morphologie par analyse d'image de composites à fibres longues : principes et résultats. *La revue de Métallurgie CIT / Science et Génie des matériaux*. Décembre 1997, 1517-1536.
- Boselli J. , P.D. Pitcher, P.J. Gregson and I. Sinclair (1998) Quantitative Assessment of Particle Distribution Effects on Short Crack Growth in SiCp Reinforced Al-Alloys, *Scripta Materialia*, 38, 839-844
- Brown Elton R. and al. (1995) Historical development of asphalt content determination by ignition method. NCAT report N° 95-2.
- Chan S.L. (1989) Fractography and failure mechanisms of polymers and composite. Edited by Anne C. Roulin-Moloney, Elsevier Science Publishing Co Inc., 147-162.
- Coster M., Chermant J.L. (1985) Précis d'analyse d'image. Les presses du CNRS, 560 pages.
- Ellington W.A. et Berger H. (1980) Three-dimensional radiographic imaging. Academic Press, London Research Technics Non Destructive Testing, 4, 1-39
- Ghosh S. Nowak Z. and Lee K. (1997) Tessellation-based computational methods for the characterization and analysis of heterogeneous microstructures. *Composite Science and Technology*, 57, 1187-1210.
- Guinez R. (1987) La tomographie analogique aux rayons X et Gamma. Journées Physique : les méthodes d'auscultation et d'imagerie – Les Arcs – 14-17 décembre 1987, 57-60.
- Ketcham R.A. et Shashidar (2001) Quantitative analysis of 3-D images of asphalt concrete, Annual Meeting of Transportation Board, January 2001, Washington DC.
- Kuo C-Y. and Freeman R.B. (2000) Imaging indices for quantification of shape, angularity and surface texture of aggregates, Transportation Research Board, 79<sup>th</sup> annual meeting, Paper N°00-0686.
- Masad E. and Button J.W. (2000) Unified imaging approach for measuring aggregate angularity and texture. *Advanced computer technologies in highway and transportation engineering*, 15, 273-280.
- Masad E. Olcott D. White T. et Tashman L. (2001) Correlation of imaging shape indices of fine aggregate with asphalt mixture performance. Transportation Research Board, 80<sup>th</sup> annual meeting, Paper N° 01-2132.
- Russ J.C. and Dehoff R.T. (2001) Practical stereology. Plenum Press, New-York, 2<sup>nd</sup> edition, 307 pages.
- Shashidar N. (2000) X-Ray tomography of asphalt concrete. *Journal of Transportation Research Board*, 1681, 186-192.
- Woodside A.D., Woodward D. and Perry M. (1997) Assessment of modal analysis and automatic image analysis techniques to predict the PSV of northern Ireland Silurian greywacks. 2<sup>nd</sup> European Symposium Performance and Durability of Bituminous materials, Leeds, 149-160.