



Titlul proiectului: „Racordarea programelor de studii doctorale la studiile doctorale europene”  
POSDRU/6/1.5/S/13; ID proiect 6998

**UNIVERSITE „POLITEHNICA” DE TIMIȘOARA**  
**FACULTE DE GENIE CIVIL**

**THESE DE DOCTORAT**  
*(résumé)*



**Directeurs de thèse**

Professeur **Ion COSTESCU**  
Professeur **Emmanuel ANTCZAK**  
Professeur **Florin BREABĂN**

**Doctorant**

Ingénieur **Paul Teodor MARC**

**2011**

## **Table de matières**

1. GENERALITES .....	6
1.1. Généralités .....	6
1.2. Politique de transport en Roumanie.....	6
1.3. L'état des routes d'intérêt national, départemental et local .....	6
1.4. Intégration de l'infrastructure roumaine dans les réseaux européens de transport .....	7
1.4.1. Géostratégie du développement des voies de transport en Roumanie .....	7
1.4.2. Principes de développement du réseau national de transport .....	7
1.4.3. Stratégie de développement et d'entretien des infrastructures de transport .....	8
1.5. Objectifs de la thèse.....	8
2. PARTICULARITES CONCERNANT L'ETUDE DES CHAUSSEES ROUTIERES FLEXIBLES ET SEMIRIGIDES .....	10
2.1. Structures routières .....	10
2.2. Classification des chaussées routières .....	10
2.3. Composition des chaussées routières souples et mixtes .....	12
2.4. Dimensionnement des structures routières .....	12
2.4.1. Approche empirique .....	12
2.4.2. Approche théorique .....	12
2.4.3. Méthodes pratiques de dimensionnement.....	13
2.4.4. Modèles de la mécanique des chaussées routières .....	13
2.4.4.1. Le modèle de Boussinesq.....	13
2.4.4.2. Les modèles Bicouche .....	13
2.4.4.3. Le modèle de Hogg.....	14
2.4.4.4. Le modèle de Westergaard .....	14
2.4.4.5. Les modèles Multicouche (Burmister).....	14
2.5. Matériaux bitumineux – éléments essentiels dans la composition des chaussées routières souples .....	15
2.5.1. Le module complexe .....	15
2.5.1.1. Le rôle de la température et de la fréquence.....	16
2.5.2. Essai à la fatigue .....	16
2.6. Le rôle des changements climatiques sur le dimensionnement des chaussées .....	17
2.6.1. Etude des variations de température dans la chaussée routière, analyse thermique .....	17
2.6.2. Comportement des structures bitumineuses. Variation du module selon la température .....	18
2.7. Application des modèles de calcul étudiés concernant le fonctionnement mécanique des chaussées routières .....	18
2.8. Conclusions .....	19
3. ETUDE DES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES. METHODES ET MOYENS DE DETERMINATION. ETUDE EXPERIMENTALE .....	21
3.1. Etude bibliographique concernant les propriétés thermo-physiques .....	21

3.1.1. Grandeurs thermo-physique équivalentes.....	21
3.1.1.1. <i>Chaleur spécifique équivalente</i> .....	21
3.1.1.2. <i>Conductivité thermique équivalente</i> .....	22
3.2. Mesurage des paramètres thermo-physiques .....	22
3.2.1. Méthode de mesurage a deux fils. Principe de la méthode.....	22
3.3. Eléments fondamentaux de la radiation thermique. Nature du phénomène .....	23
3.4. Fonction de transfert thermique : transmission de chaleur par conduction .....	23
3.4.1. Relations de base. Loi de Fourier .....	23
3.4.1.1. <i>Equation de chaleur</i> .....	24
3.4.1.2. <i>Cas unidirectionnel</i> .....	24
3.4.1.3. <i>Généralisation d'une structure multicouche</i> .....	25
3.4.2. Impédance thermique. Définition .....	25
3.4.2.1. <i>Calcul de l'impédance thermique</i> .....	25
3.5. Analyse générale du système en vue de déterminer les propriétés thermo-physiques .....	26
3.5.1. Capteur .....	26
3.5.2. Resistance de contact.....	26
3.5.3. Le matériau dans la condition limite de semi-infini .....	27
3.5.4. Impédance globale du système capteur – contact – matériau .....	27
3.5.5. Traitement du signal .....	27
3.6. Lois de la radiation thermique .....	28
3.6.1. Loi de Planck .....	28
3.6.2. Loi de Wien .....	28
3.6.3. Loi de Stefan – Boltzmann .....	29
3.7. Equipements utilisés pour mesurer les paramètres thermo-physiques .....	29
3.7.1. Capteur de température.....	29
3.7.2. Capteur de flux .....	29
3.7.3. Calibration des fluxmètres et influence des conditions expérimentales .....	30
3.8. Etude pratique des propriétés thermo-physique sur les enrobés bitumineux utilisés en France.....	31
3.8.1. Caractéristiques des matériaux .....	31
3.8.1.1. <i>Granulats</i> .....	31
3.8.1.2. <i>Filler</i> .....	31
3.8.1.3. <i>Cendres volantes</i> .....	31
3.8.1.4. <i>Bitume</i> .....	32
3.8.2. Caractéristiques mécaniques des enrobés en France .....	32
3.9. Mesurages au banc de conduction .....	32
3.9.1. Dispositif expérimental .....	33
3.9.2. Détermination de la conductivité thermique.....	33
3.9.2. Détermination de la chaleur spécifique .....	34

# Table de matières

---

3.9.3. Détermination de l'effusivité thermique et de la diffusivité thermique.....	35
3.9.4. Détermination de l'émissivité.....	35
3.10. Résultats expérimentaux obtenus sur les enrobes bitumineux de France.....	35
3.11. Etude de cas. Modélisation de la distribution de température des enrobés bitumineux à l'aide des propriétés thermo-physiques pour les applications de laboratoire .....	36
3.11.1. Programme expérimental.....	36
3.11.2. Equations de génération.....	37
3.11.3. Résultats et interprétation .....	37
3.12. Conclusions .....	38
4. CONCEPTION ET REALISATION D'ENROBES BITUMINEUX, PAR L'ETUDE ET L'UTILISATION DE MATERIAUX COMPOSITES .....	40
4.1. Etude des caractéristiques des matériaux routiers composites .....	40
4.1.1. Utilisation des cendres volantes dans les couches bitumineuses.....	40
4.2. Caractéristiques des matériaux utilisés à la réalisation des échantillons d'enrobé bitumineux.....	41
4.2.1. Granulats.....	41
4.2.2. Filler .....	41
4.2.3. Liants pouzzolaniques. Cendres volantes .....	41
4.2.4. Bitume .....	42
4.3. Détermination des dosages d'enrobé bitumineux en remplaçant totalement ou partiellement le filler par la cendre volante.....	42
4.4. Réalisation des éprouvettes en vue de déterminer les propriétés thermo-physiques et physico-mécaniques.....	43
4.4.1. Préparation des éprouvettes cylindriques en laboratoire .....	43
4.4.2. Préparation des plaquettes .....	44
4.4.3. Résultats concernant les propriétés thermo-physiques sur les dosages réalisés en Roumanie .....	44
4.5. Etudes expérimentales concernant les propriétés physico-mécaniques pour les dosages d'enrobé bitumineux avec cendres volantes .....	46
4.6. Rigidité des enrobés bitumineux réalisés .....	51
4.6.1. Méthode de détermination du module de rigidité en laboratoire.....	51
4.6.2. Mesurage de la rigidité .....	51
4.6.3. Résultats expérimentaux de laboratoire sur le module de rigidité.....	51
4.7. Etude des effets du fluage pour les enrobes bitumineux .....	52
4.7.1. Facteurs qui influencent les déformations permanentes des enrobés bitumineux .....	53
4.7.2. Type d'essai de laboratoire appliqué pour caractériser les enrobés bitumineux concernant les déformations permanentes.....	53
4.7.3. Etude en laboratoire du fluage des enrobés bitumineux réalisés par l'essai de compression cyclique ..54	
4.7.3.1. <i>Influence de la température sur le comportement aux déformations permanentes des couches bitumineuses</i> .....	54
4.7.4. Essai à l'orniérage .....	55
4.8. Essai de fatigue.....	56
4.9. Conclusions finales concernant l'utilisation de la cendre volante dans les mixtures .....	56
5. MODELISATION DE CHAUSSEES REALISEES A BASE DES ETUDES REALISEES .....	61

5.1. Type et composition des chaussées routières étudiées .....	61
5.2. Etudes théoriques concernant le comportement en exploitation des chaussées réalisées.....	62
5.2.1. Principes et hypothèses appliquées dans la modélisation mathématique .....	62
5.2.2. Facteurs d'influence considérés dans la modélisation.....	63
6. CONCLUSIONS FINALES.....	65
6.2. Contributions personnelles de l'auteur et directions pour les recherches futures.....	66
BIBLIOGRAPHIE .....	69

# 1. GENERALITES

## 1.1. Généralités

Le système de transport routier constitue dans notre pays, comme sur le plan international, le principal mode de transport qui supporte 80 % de tous les déplacements de marchandises et plus de 60 % du total des voyageurs. Dans ce contexte, il se prouve obligatoire que les routes assurent les conditions adéquates de déplacement du point de vue de la sécurité routière, du confort et, pas dernièrement, de l'efficacité des transports.

## 1.2. Politique de transport en Roumanie

Le réseau routier est déficitaire en Roumanie, du point de vue de la densité et en ce qui concerne son état technique, situation avec un impact majeur sur les transports routiers, les conditions réelles de circulation menant à des pertes considérables qui se reflètent au niveau des agents économiques et aussi à celui des utilisateurs individuels.

On peut remarquer les efforts particuliers du gouvernement roumain dans la direction de promouvoir d'amples programmes de développement du réseau routier (construction d'autoroutes, contournements des agglomérations urbaines), de modernisation des routes en pierre et en terre, et aussi de réhabilitation des routes à revêtement moderne. On peut y ajouter l'activité de maintenance des chaussées, qui mobilise d'importantes ressources matérielles, financières et humaines, étant bien connu le fait qu'une chaussée doit être entretenue dès son premier jour d'exploitation.

## 1.3. L'état des routes d'intérêt national, départemental et local

La Résolution du Gouvernement Roumain no. 540/2000 a agréé une nouvelle classification des routes publiques en Roumanie. Après l'année 2000, selon certains intérêts politiques, on a modifié le réseau des routes publiques de Roumanie, qui a maintenant, au niveau de l'année 2011, la composition suivante :

Autoroutes	322 km
Routes nationales	16 178 km
Routes départementales	34 668 km
Routes communales	27 781 km
Rues dans les villes	22 328 km
<u>Rues dans les villages</u>	<u>97 660 km</u>
Total	198 937 km

### 1.4. Intégration de l'infrastructure roumaine dans les réseaux européens de transport

L'intégration de l'infrastructure roumaine dans les réseaux européens de transport a en vue la promotion de l'interconnexion et interopération des réseaux existants en concentrant l'attention sur certaines « artères d'infrastructures spécifiques » localisées sur le tracé des 10 corridors paneuropéens de transport qui traversent les zones géographiques de plusieurs pays et lient leurs principaux centres économiques et sociaux.

La Roumanie est traversée par les corridors **IV** (Berlin – Nürnberg – Prague – Budapest – **Arad** – **București** – **Constanța** – Istanbul – Salonique), **VII** (le **Danube**, avec son bras **Sulina** et le **Canal Danube – Mer Noire**) et **IX** (Helsinki – St. Petersburg – Moscou – Pskov – Kiev – Ljubasevka – Chișinău – **București** – Dimitrovgrad – Alexandroupolis).



Figura 1.5. Corridors Paneuropéens

#### 1.4.1. Géostratégie du développement des voies de transport en Roumanie

Par sa position géographique, par ses traditions et l'esprit ouvert de ses politiques de bonne voisinage, la Roumanie, avec une surface de plus de 237,5 milles km<sup>2</sup> et environ 22 millions d'habitants, fait part de la famille des pays européens, et s'engage irréversiblement sur la voie de l'intégration dans les structures européennes et euro-atlantiques. Située dans le corridor de transit entre l'Europe de l'Ouest et Le Moyen Orient, avec une puissance régionale de producteur et de consommateur, la Roumanie, devenue indépendante dans la seconde moitié du XIXème siècle, a commencé à développer ses transports en investissant ses ressources et son travail dans la création des infrastructures au plus haut niveau technologique de l'époque.

#### 1.4.2. Principes de développement du réseau national de transport

Une infrastructure de transport efficace, connectée au réseau européen de transport, contribue à l'augmentation de la compétitivité économique, facilite l'intégration dans l'économie européenne et permet le développement de nouvelles activités sur le marché domestique.

Dans ce contexte, le but de la stratégie prioritaire „Développement et modernisation de l'infrastructure de transport” est de générer un développement équilibré de tous les modes de

# Chapitre 1

---

transport en assurant des infrastructures de transport modernes et durables et une augmentation de la qualité des services et la réalisation d'un système fonctionnel.

### ***1.4.3. Stratégie de développement et d'entretien des infrastructures de transport***

L'objectif général et les objectifs spécifiques de la priorité nationale de développement, entretien et modernisation des infrastructures de transport sont réalisés par les actions suivantes :

➤ travaux d'entretien courant et périodique des routes et des ponts à périodicité prévue dans les réglementations techniques en vigueur, en vue d'assurer la viabilité et le déroulement du trafic dans des conditions de sécurité et de confort ;

➤ modernisation du réseau entier de routes nationales en réalisant des revêtements bitumineux ou en béton de ciment ;

➤ augmentation de la capacité portante en réalisant des tapis et des renforcements en vue de passer de 10 t à 11,5 t charge par essieu ;

➤ amélioration des performances des revêtements bitumineux des routes nationales en utilisant des enrobés bitumineux stabilisés avec des fibres et du bitume modifié, pour les routes de classe technique I, II, III, pour un meilleur comportement sous l'action du trafic lourd.

### **1.5. Objectifs de la thèse**

L'ouvrage se propose d'étudier les facteurs qui influencent les chaussées, particulièrement les couches bitumineuses, en vue de déterminer leurs propriétés thermo-physiques (conductivité thermique, chaleur spécifique) et réaliser des revêtements bitumineux ayant des propriétés physico-mécaniques et thermo-physiques supérieures.

Du point de vue thermique, les conditions d'environnement auxquelles les chaussées routières sont soumises continuellement au long des phases de construction et de réparation, tout aussi que pendant leur durée de vie, peuvent être combattues par une connaissance approfondie de la distribution de la température dans chaque couche composante. Les fluctuations de température de l'air, journalières et saisonnières, l'intensité de la radiation solaire, les matériaux qui composent les couches de la chaussée routière, leur géométrie, les conditions de surface et les précipitations influencent significativement la stabilité de la chaussée.

Par conséquent, le succès à long terme de la conception des couches routières consiste dans une estimation précise du profil de température, ce qui aide beaucoup à l'évaluation des déformations de la structure, à une estimation plus exacte du module de calcul, appréciations des phénomènes de gel-dégel, tout comme l'évaluation journalière et saisonnière des effets du chauffage-refroidissement.



Le cumul d'énergie des surfaces artificielles bitumineuses ou en béton de ciment diffère considérablement de celui du sol naturel grâce aux propriétés différentes de la radiation thermique. Les surfaces bitumineuses, respectivement en ciment, absorbent de larges quantités de radiations pendant la journée, ce qui produit le chauffage à la surface qui se transmet rapidement aux couches inférieures de la chaussée produisant l'augmentation de la température à l'intérieur de celles-ci, figure 1.7.

Une compréhension correcte du comportement du cumul d'énergie et sa détermination correcte aide le processus de prendre les décisions quant aux technologies de construction des routes et à l'étude du phénomène de la chaleur – un problème sérieux de l'environnement. A cette fin on va étudier la méthode d'identification des propriétés thermo-physiques des enrobés bitumineux qui permettent des procès évolutifs complexes pendant leurs expositions à de températures hautes et réduites pendant leur durée de vie et aussi la réduction du temps d'analyse.

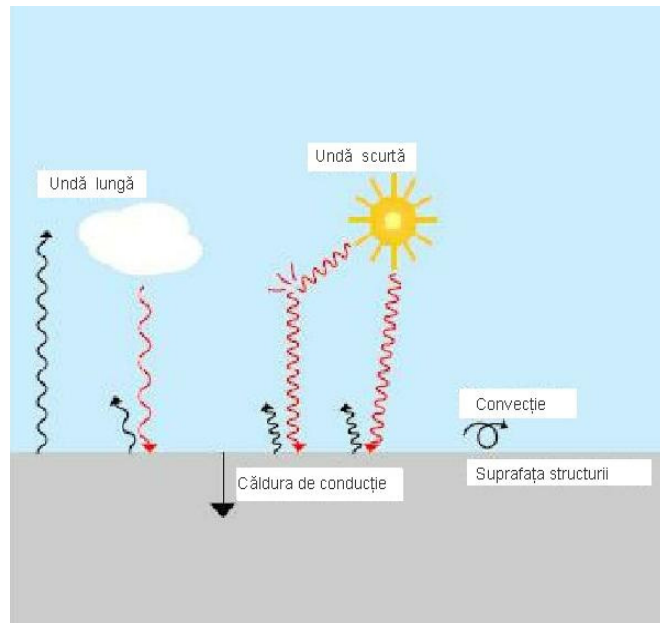


Figure 1.7. Température à la surface bitumineuse influencée par les radiations solaires

En plus de l'identification des propriétés thermo-physiques des enrobés bitumineux, la thèse de doctorat apporte des contributions concernant l'amélioration de ces caractéristiques en réalisant des mixtures dans la composition desquelles on utilise, outre les matériaux de base, des liants pouzzolaniques (cendres volantes), en produisant des enrobés à conductivité thermique, chaleur spécifique et émissivité nettement supérieures, caractéristiques bénéfiques pour l'évolution des propriétés physico-mécaniques.

Finalement, un rôle fondamental est joué par les cycles de vie auxquels les chaussées sont soumises : sollicitations du trafic et conditions d'environnement. Pour trouver des réponses, il est important de développer les mensurations thermo-physiques dans le laboratoire sur des échantillons d'enrobé bitumineux tout en considérant les approches des expérimentations in situ.

## 2. PARTICULARITES CONCERNANT L'ETUDE DES CHAUSSEES ROUTIERES FLEXIBLES ET SEMIRIGIDES

### 2.1. Structures routières

La totalité des couches routières choisies pour la réalisation du corps de la chaussées forme sa structure routière, qui peut être définie comme l'élément de résistance, prévu et réalisé sur le carrossable et les voies d'encadrement, composée d'un ensemble de couches réalisées en granulats stabilisés aux liants, selon des technologies appropriées, et dimensionnée selon les standards, ayant dans leur ensemble une capacité portante déterminée principalement selon l'intensité du trafic lourd [58].

En ce qui concerne le dimensionnement de la chaussée routière, elle se fait en prenant en considération le corps de la chaussée et la zone active du terrassement, c'est-à-dire le sol du corps de la chaussée jusqu'à la profondeur de transmission des sollicitations du trafic. Cette zone active du terrassement dépend de la nature du sol et du poids des véhicules, ayant généralement des valeurs entre 0,50 m et 1,20 m, figure 2.1.

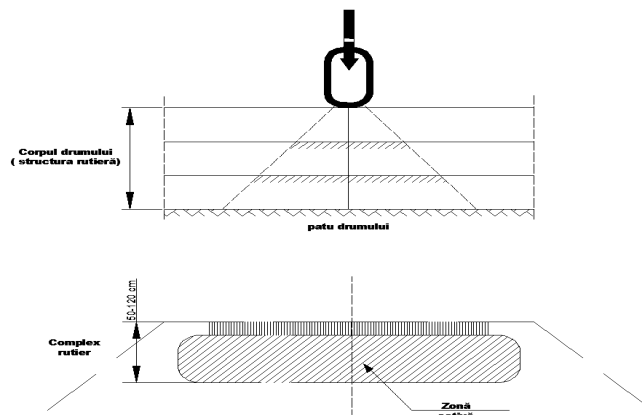


Figure 2.1. Distribution des sollicitations du trafic sur le sol de fondation

### 2.2. Classification des chaussées routières

En vue de faire une classification correcte des chaussées routières, il faut connaître les matériaux qui peuvent être utilisés dans les couches routières par leur caractéristiques intervenant dans les méthodes de dimensionnement adoptées, et leur comportement en exploitation, qui peut conduire, par des études de longue durée malheureusement, à des conclusions intéressantes destinées à influencer les étapes de calcul de dimensionnement, les technologies d'exécution, l'implémentation de nouvelles solutions, etc. [58].

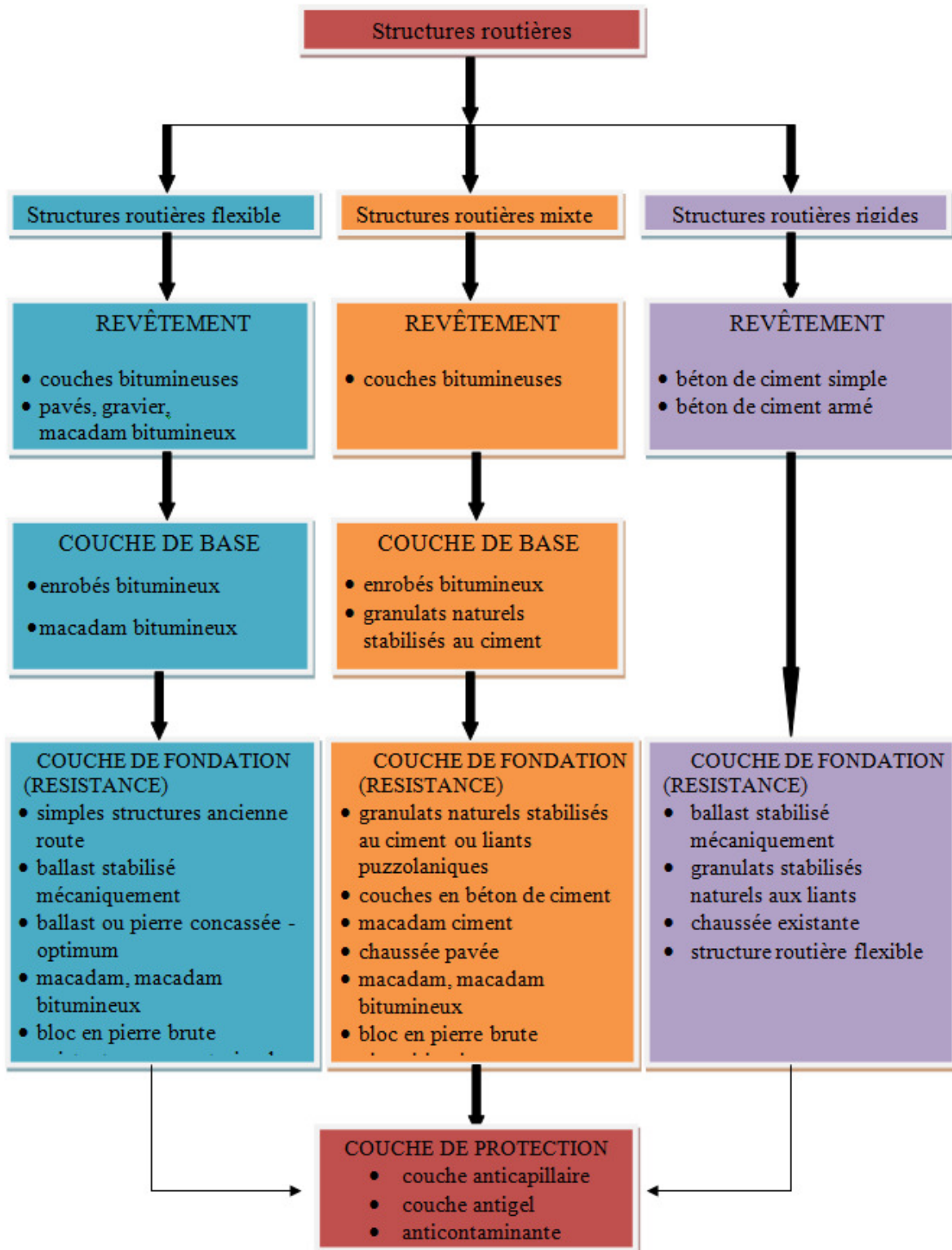


Figure 2.3. Classification des chaussées routières

### **2.3. Composition des chaussées routières souples et mixtes**

Dans le contexte de la technique routière roumaine, ces types de chaussées sont caractérisés comme suit :

- chaussées routières souples, nommées aussi flexibles, comportent un revêtement bitumineux à couches de base et de fondation réalisées généralement en granulats naturels;
- chaussées routières semi-rigides, comportent un revêtement bitumineux et incluent au moins une couche en granulats naturels stabilisés aux liants hydrauliques ou pouzzolaniques.

### **2.4. Dimensionnement des structures routières**

Grace au fait que l'approche générale du dimensionnement d'une chaussée routière n'est pas fondamentalement différente du dimensionnement des structures du génie civil (en ce qui concerne l'examen de la détermination des contraintes de matériaux et leur comparaison avec les déformations admissibles), le dimensionnement des chaussées présente de nombreuses particularités que cette approche pourrait accentuer.

#### ***2.4.1. Approche empirique***

Dans cette approche on peut utiliser les données expérimentales pour observer le comportement réel du carrossable sous trafic. Cette méthode empirique consiste premièrement en déterminer les critères pour définir la fin de la durée de vie de la route et des secteurs suivis.

Cette méthode purement empirique présente un nombre inconnu de désavantages [1], [56] :

- pour connaître pour un tel tracé l'influence de plusieurs paramètres, comme l'épaisseur différente des couches routières et les propriétés mécaniques des matériaux, il faut réaliser un très grand nombre de secteurs expérimentaux, ce qui emmène des coûts élevés;
- le temps de réponse est très long car il n'y a aucun effet d'accélération du trafic, et le risque est grand pendant l'exploitation;
- enfin, les résultats obtenus de cette manière, par analyse de régression statistique, s'appliquent seulement pour un matériau considéré dans le milieu d'expérimentation.

#### ***2.4.2. Approche théorique***

Dans cette méthode il faut établir un modèle qui reproduit le mieux le fonctionnement mécanique de la chaussée. En utilisant ce modèle on détermine les sollicitations supportées par les matériaux de la structure routière et le corps de la chaussée sous le trafic. Ces sollicitations sont puis

comparées avec les sollicitations admissibles. C'est donc une approche qui utilise une certaine branche de la mécanique des milieux continus, nommée aussi mécanique des chaussées.

### ***2.4.3. Méthodes pratiques de dimensionnement***

Les méthodes de dimensionnement de la chaussée routière déterminées ne sont pas seulement de méthodes de vérification. Il y a donc une phase essentielle, c'est-à-dire celle de conception de la structure. Dans cette phase il faut déterminer le meilleur arrangement possible des différentes méthodes disponibles, en prenant en considération leur résistance aux sollicitations du trafic et de l'environnement, tout comme les particularités de leur application.

Pour cette phase préliminaire de conception, les méthodes de dimensionnement ne seront pas très utiles, à l'exception du dégagement de certaines tendances nouvelles, car il est à peu près impossible de vérifier toutes les conceptions ou les méthodes existantes, en plus, certains des problèmes mentionnés peuvent être abordés par calcul et d'autres plus importants peuvent être choisis comme politique de route.

### ***2.4.4. Modèles de la mécanique des chaussées routières***

Le domaine de la mécanique des chaussées routières est limité par deux ambitions : la compréhension du mode de fonctionnement des différents types de chaussées et la définition des règles de dimensionnement. Pour pouvoir rester réalistes, ces modèles ont évolué avec le développement des chaussées routières, leur évolution étant naturelle, car les modèles utilisés doivent être représentatifs pour le fonctionnement des chaussées étudiées.

#### ***2.4.4.1. Le modèle de Boussinesq***

La pression  $q_0$  (d'environ 0.2 – 0.7 MPa), exercée par les pneus ne peut pas être soutenue en totalité par la couche support en sol naturel. Le rôle de la chaussée routière est de répartir cette pression sur une surface adéquate pour que la pression exercée puisse être portée à un niveau compatible à celle soutenue par la couche en terre [15].

On peut assimiler l'épaisseur  $H$  à l'épaisseur de la chaussée routière en faisant une correspondance entre elles  $H' < H$  par un règle simple, en tenant compte du module d'élasticité  $E_1$  pour les couches granulaires et le module  $E_2$  pour la couche support (le corps de la chaussée).

#### ***2.4.4.2. Les modèles Bicouche***

Quand les efforts verticaux sur la couche support (sol) sont limités à une valeur très réduite (1/10 ou 1/20, de la pression exercée sur la surface), il est coûteux de réaliser la distribution de la

## Chapitre 2

---

pression par des couches granulaires (l'épaisseur  $H$  étant trop grande). Pour diminuer cette épaisseur, les sollicitations sur la couche support en terre sont constantes, raison pour augmenter le rapport de module entre la couche de la chaussée routière  $E_1$  et la couche support en terre  $E_2$ . Ce résultat peut être obtenu à l'aide des liants hydrauliques (ciment, laitier de haut fourneau, etc.) ou hydrocarbonés.

### 2.4.4.3. Le modèle de Hogg

La chaussée routière représentée selon l'hypothèse de Navier, est traitée comme une dalle placée sur un solide infini de type Boussinesq ( $E_2, \nu_2$ ). Dans cette situation on ne discute pas la méthode de résoudre les problèmes du point de vue mathématique, qui indique seulement le principe, mais on prend en considération le fait que le problème présente deux inconnues qui sont : le déplacement vertical de la dalle et  $\sigma_z$ , l'effort vertical sur la surface solide. L'équation de Lagrange prévoit une relation entre ces deux inconnues. Il y a aussi un deuxième aspect d'égalisation des déplacements verticaux de l'axe neutre de la dalle avec les mouvements verticaux du solide, liés de la pression sur le solide par les formules de Boussinesq.

### 2.4.4.4. Le modèle de Westergaard

En supposant que l'hypothèse de Boussinesq pour la couche support de la chaussée routière n'a pas été en aucun cas une hypothèse simplifiée (le comportement réel du sol de fondation est infini), Westergaard a adopté pour le sol de fondation une autre hypothèse simplifiant, qui a pour but de faciliter le calcul [78].

En dehors de l'hypothèse de la dalle mince pour la couche routière, le modèle Westergaard inclue les hypothèses suivantes pour la couche support : elle est assimilée à un ensemble ressort dont le déplacement vertical dans un point ( $w$ ) est proportionnel avec la pression verticale  $\nu$  dans ce point.

### 2.4.4.5. Les modèles Multicouche (Burmister)

Burmister a traité le problème général de  $n$  couches, en formulant les hypothèses suivantes :

- toutes les couches sont assimilées aux solides élastique-linéaires, homogènes, isotropes, caractérisés par un module d'élasticité  $E_i$  et un coefficient de Poisson  $\mu_i$ , de dimensions infinis en plan et d'épaisseur  $h_i$ ;
- les interfaces entre les couches sont soit collées, soit glissantes, et la même structure peut avoir des interfaces avec ou sans frottement;
- les cas de charges multiples (couplées, essieux doubles ou triples, remorques) peuvent être traités en supplémentant les effets des charges élémentaires.

A base du modèle de Burmister, qui permet le calcul sous une charge circulaire des tensions, déformations et déplacements dans différents points du massif semi-infini multicouche, on a conçu le programme de dimensionnement des chaussées routières Alizé. La structure peut ainsi être modélisée par des couches élastiques linéaires isotropes et homogènes infinies en plan, d'épaisseur finie, à l'exception du terrain de fondation qui est considéré semi-infini, et les sollicitations données par les pneus sont assimilées aux charges circulaires statiques, exercées comme efforts verticaux (poids du véhicule) ou horizontaux (force de frottement pneu-carrossable).

### **2.5. Matériaux bitumineux – éléments essentiels dans la composition des chaussées routières souples**

On dit que le comportement de ces matériaux est viscoélastique. Cette propriété mène à la dépendance du module de fréquence appliquée à la charge : le module est grand quand le matériau est soumis à une sollicitation rapide (par exemple, le matériau est soumis au passage d'un véhicule à une vitesse normale), et le module est réduit ou très réduit quand le matériau est soumis à une sollicitation lente (le véhicule a une vitesse réduite ou est stationnant) [39].

La deuxième variable qui influence le module d'un revêtement est la température, celle-ci jouant un rôle symétrique à celui de la fréquence : à des températures hautes correspond un module réduit, qui augmente très vite quand la température diminue. A côté de ces facteurs, il y a d'autres qui peuvent influencer le module des revêtements bitumineux : composition du mélange, compacité et nature du bitume [55].

Sans entrer dans les détails dans ce chapitre, il est intéressant d'étudier et de présenter quelques tendances concernant les changements climatiques et leur effet sur le dimensionnement des chaussées routières, après avoir défini la notion de module complexe pour un matériau viscoélastique.

#### **2.5.1. Le module complexe**

Le module complexe est un nombre complexe qui définit la relation entre effort et déformation pour un matériau linéaire viscoélastique soumis à une charge sinusoïdale sous forme d'onde selon le temps  $t$ . Expérimentalement, le module complexe des enrobés bitumineux peut être déterminé par l'essai à la fatigue d'une éprouvette soumise à la flexion dynamique.

Pour les matériaux viscoélastiques, comme les enrobés bitumineux, le module complexe ( $E^*$ ) est utilisé pour représenter la rigidité de ce matériau. Le module complexe a une composante élastique et un composant visqueux. La composante élastique concerne la capacité du matériau de stocker l'énergie, pendant que la composante visqueuse est responsable de la perte d'énergie du système. Les

## Chapitre 2

deux composantes, tout aussi que le module complexe, varie avec la température et le niveau de chargement.

### *2.5.1.1. Le rôle de la température et de la fréquence*

La figure 2.11. représente les courbes isothermes du module complexe montrant que l'influence de la fréquence de chargement est beaucoup plus grande pour les températures hautes que pour les températures basses.

L'influence de la température sur le module est aussi très importante car le module se divise à 10 au cas où la température varie de 10 °C à 40 °C. On note que, pour associer un module à un matériau bitumineux, il faut choisir une température et une fréquence de calcul [39].

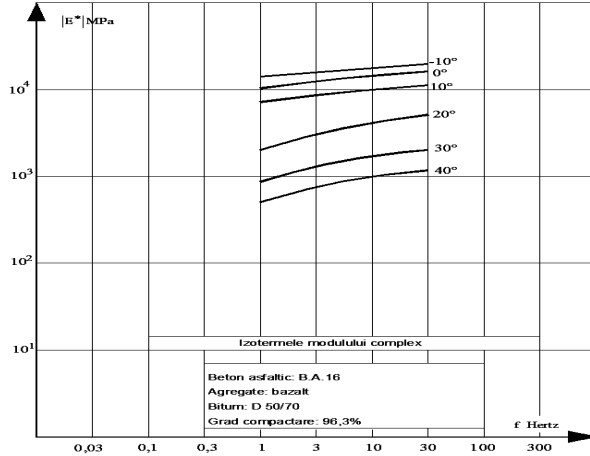


Figura 2.11. Courbes isothermes du module complexe pour un matériau bitumineux

Au choix d'une température de calcul on réalise une analyse des pertes qui peuvent apparaître dans les chaussées pour un cycle annuel de température (en Roumanie la température de calcul est de 15 °C, ce qui ne correspond plus aux changements climatiques).

### *2.5.2. Essai à la fatigue*

Les sollicitations du trafic produisent à la base des revêtements bitumineux des tractions horizontales répétées (figure 2.14.) qui peuvent conduire à leur dégradation par fatigue [33]. En principe, la fatigue se manifeste par la réduction dans le temps du module de rigidité des enrobés bitumineux, grâce aux sollicitations répétées. Ça peut résulter dans l'augmentation des déformations de traction qui, dans les conditions du dépassement des déformations admissibles, conduit premièrement à la fissuration du revêtement bitumineux et puis à des défauts plus graves, du type faïençage.



Dans des conditions réelles d'exploitation, les revêtements bitumineux éprouvent des efforts unitaires et des déformations complexes, à caractère aléatoire, qui sont pratiquement impossible à reconstituer en laboratoire. Dans les conditions de l'hypothèse de rupture de fatigue due aux tractions horizontales répétées à la base des couches bitumineuses, on peut déterminer, par des essais de laboratoire, la durée d'exploitation des enrobés bitumineux.

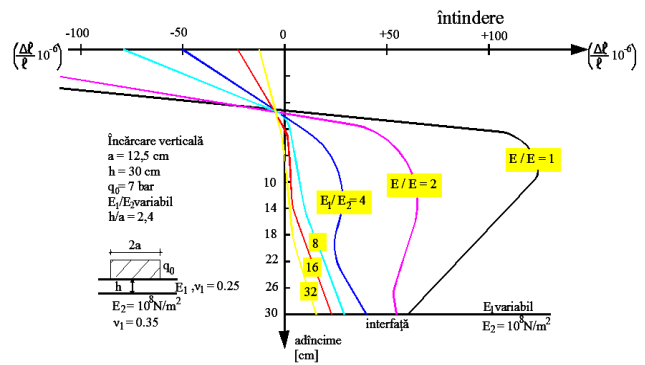


Figure 2.14. Répartition des déformations dans une bicouche, selon la profondeur, pour des rapports différents  $E_1/E_2$

### 2.6. Le rôle des changements climatiques sur le dimensionnement des chaussées

Les conditions climatiques qui peuvent intervenir dans le dimensionnement et le comportement des chaussées sont variées. Elles peuvent être :

- l'abondance des précipitations face au drainage;
- l'effet des cycles saisonniers de température concernant le comportement des chaussées qui ont des couches bitumineuses en composition, sensibles aux variations de température;
- l'action du gel-dégel.

L'étude des deux derniers aspects évoque la nécessité d'un calcul de distribution des températures l'intérieure de la chaussée routière. Cela demande une analyse thermique détaillée.

#### 2.6.1. Etude des variations de température dans la chaussée routière, analyse thermique

Les équations de base de cette analyse sont offertes par les lois de propagation de la chaleur (loi de Fourier):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad (2.27)$$

où:  $\theta(x,t)$  = température à la valeur  $x$  et au temps  $t$ ;

$\lambda$  = conductivité thermique;

$\rho$  = densité;

$c$  = chaleur spécifique.

Dans certains cas particuliers les solutions de l'équation de Fourier sont bien connues, surtout quand on peut faire les simplifications suivantes [41]:

- on considère la présence d'un massif infini;
- la température à la surface du massif est une fonction sinusoïdale de temps.

## Chapitre 2

Dans cette relation  $u$  est égal avec  $\sqrt{\frac{\pi c \rho}{T}}$ , facteur qui gouverne l'amortissement sinusoidal. La figure 2.20 présente à titre d'exemple quelques résultats obtenus à l'aide de cette formule; on peut constater un bon accord entre les valeurs calculées et celles mesurées.

Tout de même on remarque le fait que, si on regarde les changements de température journaliers, les températures à la surface du carrossable sont influencées par beaucoup d'autres paramètres qui n'interviennent pas dans la formule de Fourier (la couleur du carrossable par exemple).

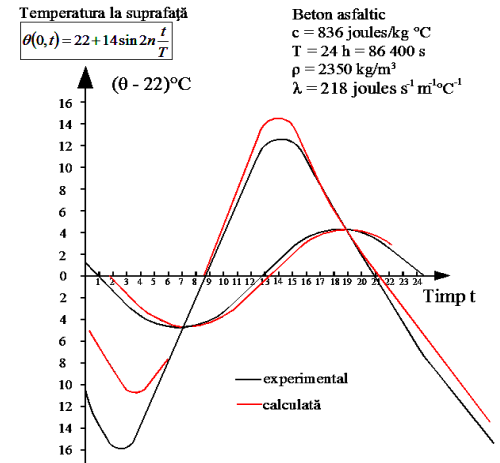


Figure 2.20. Exemple réel

On suppose par exemple que la température à la surface du carrossable a la forme suivante :

$$\theta(0,t) = \theta_m + \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{2} * \sin 2\pi \frac{t}{T} \quad (2.28)$$

à la valeur  $x$ , la température a la forme:

$$\theta(x,t) = \theta_m + \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{2} * \sin \left( 2\pi \frac{t}{T} - ux \right) * e^{-ux} \quad (2.29)$$

### 2.6.2. Comportement des structures bitumineuses. Variation du module selon la température

Comme on a montré, les propriétés des matériaux bitumineux sont largement influencées par la température, cette sensibilité étant reflétée par:

- une réponse élastique à des sollicitations très courtes et températures basses;
- écoulement à des charges légères et températures hautes.

### 2.7. Application des modèles de calcul étudiés concernant le fonctionnement mécanique des chaussées routières

Pour mettre en évidence les différences significatives qui apparaissent entre les critères de dimensionnement adoptés au calcul des chaussées routières souples et mixtes, on va présenter en ce qui suit, à base de modèles bicouche et tricouche, le module de travail des deux types de chaussées routières sous l'action des sollicitations du trafic [58].

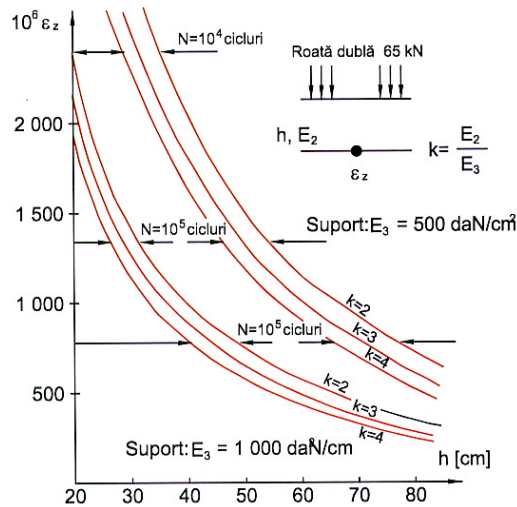


Figure 2.25. Variation de  $\varepsilon_z$  selon le coefficient  $k$  et l'épaisseur de la couche en granulats naturels ( $h$ )

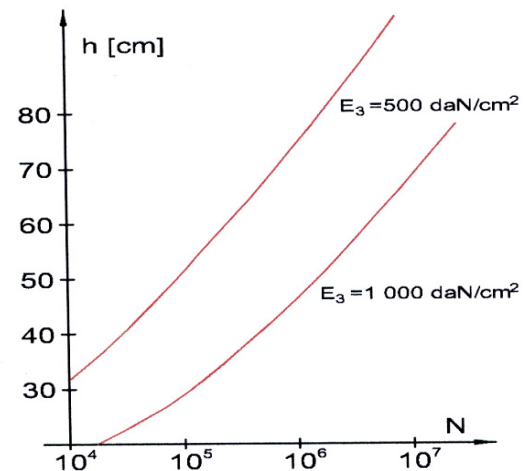


Figure 2.26. Variation de l'épaisseur de la couche en granulats naturels ( $h$ ) selon le nombre de cycles  $N$

La figure 2.25 présente la variation de la déformation relative  $\varepsilon_z$  du terrain de fondation selon la valeur du coefficient  $k$  et l'épaisseur de la couche en granulats naturels  $h$ , pour deux types de terrain de fondation différenciés par les valeurs du module de déformation  $E_3$  et pour une sollicitation correspondant à une roue double de 65 kN (charge sur l'essieu 115 kN).

La figure 2.26 présente la variation de l'épaisseur de la couche en granulats naturels selon le nombre de cycles. On constate l'influence très significative du sol de fondation sur l'épaisseur de la couche routière en granulats naturels et on peut retenir que dans les conditions où le sol de fondation est de bonne qualité ( $E_3 = 1000 \text{ daN/cm}^2$ ), une chaussée avec des couches en granulats naturels avec des épaisseurs significatives peut supporter un trafic très important.

## 2.8. Conclusions

Les chaussées routières flexibles et semi-rigides sont les plus utilisées dans notre pays et au niveau mondial, il est donc nécessaire de faire une étude complexe de ces structures qui peuvent représenter des combinaisons de couches en différents matériaux, avec des propriétés différentes soumis à des sollicitations provenant de divers facteurs (trafic, conditions climatiques).

En ce qui concerne le dimensionnement des chaussées routières, celui-ci connaît une évolution continue, ayant comme point de départ les années 1940 – 1960, fait qui implique l'observation du module d'interaction de la chaussée routière avec le sol de la couche support, les changements climatiques et les différentes classes de trafic. En étudiant la littérature de spécialité concernant le fonctionnement mécanique des chaussées routières, on peut remarquer que, en vue d'estimer le comportement en exploitation d'une chaussée routière, il faut connaître et comprendre les propriétés fondamentales de l'enrobé bitumineux.

## Chapitre 2

---

Quant aux changements climatiques dans le calcul de dimensionnement des chaussées routières, on n'en tient pas compte qu'à la vérification du gel-dégel, une vérification très importante pour déterminer la composition de la chaussée. Grâce à ce fait, quand on réalise le dimensionnement d'une chaussée routière, surtout pour les revêtements bitumineux, il faudrait tenir compte aussi des valeurs positives de ces variations de température. Puisque ces variations de température ont un effet négatif sur le comportement en exploitation des chaussées routières, il faut prendre des mesures pour les réduire, en traitant ou réalisant des revêtements bitumineux qui n'absorbent pas en totalité les variations de température de l'environnement.

Les propriétés des matériaux bitumineux sont étroitement liées à la température, il est donc intéressant d'analyser la variation de la résistance à la fatigue de ces matériaux selon la température. Comme présenté dans ce chapitre, les études réalisées dans ce sens ont montré que la déformation qui détermine la rupture du matériau après un certain nombre de cycles dépend de la température. Cette fonction caractérisant la déformation est linéaire et ascendante, du moins pour les valeurs positives de la température.

### 3. ETUDE DES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES. METHODES ET MOYENS DE DETERMINATION. ETUDE EXPERIMENTALE

#### 3.1. Etude bibliographique concernant les propriétés thermo-physiques

Les caractéristiques thermo-physiques d'un matériau conducteur impliquent d'habitude la détermination de plusieurs paramètres. Pour définir les propriétés thermiques d'un matériau on détermine sa conductivité thermique, la chaleur spécifique, diffusivité, effusivité et émissivité.

Le comportement mécanique du béton bitumineux dépend en grande mesure de la température, il s'étend avec l'augmentation de la température et se contracte avec la baisse de la température, les résultats étant interprétés sous le nom de craquage thermique. A des températures hautes le béton bitumineux est relativement mou et sensible à l'orniérage (déformations permanentes), conformément aux sollicitations répétées du trafic, pendant qu'aux températures basses il est relativement fragile et sensible au craquage thermique. Pour ces raisons de recherche, on a réalisé des mesurages qui prévoient la température de l'asphalte in situ et on a développé différents modèles et applications concernant l'anticipation de la variation de la température du béton bitumineux dans le temps [45].

Les propriétés thermiques des matériaux influencent significativement la distribution et la variation de la température dans un corps. Ces propriétés sont nécessaires à la modélisation de la relation temps – température pour tout solide comme le béton bitumineux.

##### 3.1.1. Grandeurs thermo-physique équivalentes

L'étude du transfert thermique présente des difficultés particulières concernant deux points. Le premier point est la nature, les milieux comprenant plusieurs phases, et les grandeurs thermiques accessibles ne peuvent pas être un représentant de la phase solide du béton bitumineux, qui est prédominante mais intègre aux contributions des autres grandeurs constitutives. Le deuxième point concerne spécialement le phénomène de transport fluide dans le béton bitumineux [42], [53].

##### 3.1.1.1. Chaleur spécifique équivalente

L'expression de la chaleur spécifique d'un milieu poreux peut être déterminée selon les phases constituantes:

$$C_0 = C_{\text{sec}} + \sum_i (d_i \cdot w_i \cdot C_i) \quad (3.1)$$

où  $d_i$  est la masse volumique du matériau  $i$ ,  $w_i$  est le contenu constitutif  $i$  et  $C_i$  est la chaleur spécifique respective.

## Chapitre 3

---

### *3.1.1.2. Conductivité thermique équivalente*

Le problème de la détermination de la conductivité thermique équivalente est complexe. Il peut être abordé de deux façons, l'une est liée aux propriétés physiques du milieu, c'est-à-dire les caractéristiques de ses éléments de base et leur proportions relatives, et l'autre prend en considération la relation avec le transfert de masse grâce à la migration de l'eau qui est évacuée par l'évaporation de la partie chaude pour être récupérée par la condensation de la partie froide.

### **3.2. Mesurage des paramètres thermo-physiques**

L'identification des paramètres thermo-physiques des enrobés bitumineux dans un milieu équivalent aux perturbations minimales d'équilibre de la température est l'objectif essentiel, en parlant de plusieurs contraintes, comme : la température moyenne de l'essai doit rester près de la température de la pièce et le gradient thermique doit être limité.

Les méthodes de mesurage d'équilibre classiques sont utilisées pour caractériser les matériaux [28]. Les méthodes transitoires pour ces problèmes présentent un avantage fondamental. Elles rendent possible de limiter le temps de mesurage et réduisent les perturbations imposées au matériau. Les essais classiques consistent en imposer un système de sollicitations d'impulsions déterministes et en identifier les paramètres à supporter la fonction de réponse mesurée.

La plus fréquente méthode d'exploiter la réponse de la température quand on impose un flux de sollicitation est la méthode "Flash", probablement la plus connue. A base de cette méthode on a développé des études et des applications multiples [30]. Cette méthode repose sur le calcul de conductivité thermique et effusivité thermique, en connaissant la chaleur spécifique et la densité du mesurage de la diffusivité thermique.

$$\lambda = a \cdot \rho \cdot c \quad (3.8)$$

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad (3.9)$$

#### **3.2.1. Méthode de mesurage a deux fils. Principe de la méthode**

Cette méthode repose sur l'étude de l'évolution des températures du milieu quand il est soumis à un niveau de flux thermique.

L'opération consiste en l'élimination d'un courant électrique dans un conducteur métallique (ruban ou directement en fil) dans le matériau étudié, dans une période de temps. L'élément de chauffage produit par effet Joule dans le matériau contourne un champ de température.

L'analyse de la réponse de la température résultant du même conducteur ou d'un point voisin peut être déduite dans le temps comme un cas particulier de propriété thermophysique de l'environnement. L'ensemble de base est présenté dans la figure 3.1.

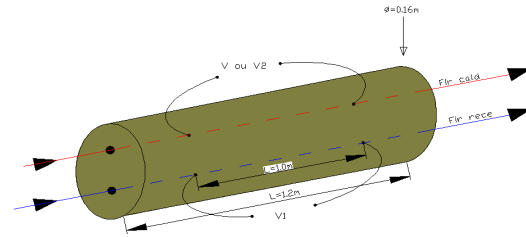


Figure 3.1. Schéma générale

### 3.3. Eléments fondamentaux de la radiation thermique. Nature du phénomène

Les émissions de radiations thermiques d'une surface solide ou liquide dépendent de la température, la longueur d'onde, mais aussi d'un facteur compris entre 0 et 1 nommé *émissivité*.

Le flux radiant  $Q$  tombant sur une surface peut être absorbé par celle-ci ( $QA$ ), reflété ( $QR$ ) ou il passe par la surface ( $QD$ ), figure 3.2, [64].

où:  $A$  - coefficient d'absorption;  
 $R$  - coefficient de réflexion;  
 $D$  - coefficient de diffusion.

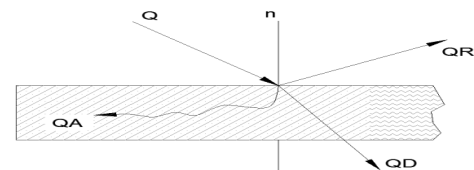


Figure 3.2. Distribution de l'énergie radiante (3.16)

$$Q = QA + QR + QD \quad [W]$$

$$A + R + D = 1 \quad (3.17)$$

Les coefficients  $A$ ,  $R$ ,  $D$  peuvent avoir des valeurs entre 0 et 1, selon la nature du corps, l'état de la surface, le spectre de la radiation incidente et la température.

**Le corps noir** absorbe la radiation incidente entière, ainsi:  $A = 1$ ,  $R=D=0$ .

**Le corps blanc** reflète la radiation incidente en totalité:  $R = 1$ ,  $A=D=0$ .

**Le corps diatherme** est transparent pour la radiation incidente:  $D = 1$ ,  $A=R=0$ .

### 3.4. Fonction de transfert thermique : transmission de chaleur par conduction

#### 3.4.1. Relations de base. Loi de Fourier

Les relations fondamentales qui décrivent le phénomène de transfert thermique sont : la loi de Fourier et l'équation de chaleur. Pour un milieu homogène, isotrope et stationnaire, il y a une relation linéaire entre la densité du flux de chaleur et le gradient de température. Dans tout point du milieu isotrope la densité du flux de chaleur instantanée est proportionnelle à la conductivité thermique  $\lambda$  en  $[W / m \cdot k]$  du milieu et au gradient de température.

$$\bar{\phi}(x, y, z, t) = -\lambda \cdot grad T(x, y, z, t) \quad (3.23)$$

## Chapitre 3

Pour un milieu isotrope, la conductivité thermique  $\lambda$  est une grandeur scalaire positive caractéristique au milieu. Quand les différences de température ne sont pas trop accentuées, on peut considérer, avec une précision suffisante, que la conductivité thermique  $\lambda$  est comme une constante pour le milieu donné.

### 3.4.1.1. Equation de chaleur

L'équation de chaleur décrit la diffusion dans un milieu:

$$\frac{\delta \cdot T(x, y, z, t)}{\delta \cdot t} = a \cdot \Delta T(x, y, z, t) \quad (3.24)$$

La grandeur thermo-physique s'exprime en  $[m^2 / s^2]$ . Il est important de la connaître pour l'étude du transfert de chaleur par conduction d'équilibre.

La caractérisation d'un matériau conducteur implique d'habitude la détermination de ses paramètres. Ceux-ci peuvent être : effusivité, diffusivité, conductivité et chaleur spécifique.

### 3.4.1.2. Cas unidirectionnel

Dans les cas limite de transfert unidirectionnel, les lignes de flux peuvent être illustrées par des lignes parallèles à la direction de propagation et des surfaces isothermes de plans perpendiculaires sur cette direction.

Dans ce cas, la loi de Fourier s'exprime sous la forme suivante:

$$\phi(x, t) = -\lambda \cdot \frac{\delta T(x, t)}{\delta x} \quad (3.25)$$

et l'équation de chaleur se résume à:

$$\frac{\delta T(x, t)}{\delta t} = a \cdot \frac{\delta^2 T(x, t)}{\delta x^2} \quad (3.26)$$

On considère une „couche” passive épaisse  $l$ , (figure 3.6), en régime transitoire sans source interne et équilibre thermique au moment initial. Si on isole deux plans isothermes, notés  $e$  et  $s$  pour l'entrée, respectivement la sortie, chaque plan individuel est caractérisé par un vecteur de statut thermique qui définit la température et le flux le traversant.

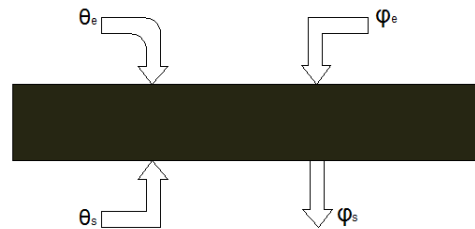


Fig. 3.6. Système conducteur unidirectionnel homogène



3.4.1.3. Généralisation d'une structure multicouche

On prend une structure résultant d'un contact parfait de  $n$  milieux homogènes, figure 3.7.

Pour chacune des  $n$  couches homogènes, on peut écrire une relation similaire avec (3.28). cette opération donne  $n$  relations matriciels de liaison entre les vecteurs de l'interface des milieux. Par exemple pour le milieu 1 et  $n$

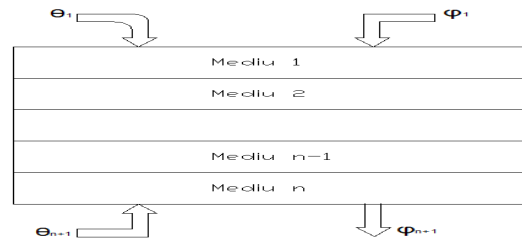


Fig. 3.7. Système conducteur unidirectionnel de n couches composantes

:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \varphi_1 \end{bmatrix} = [Mp_1] \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} \tag{3.30}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_n \\ \varphi_n \end{bmatrix} = [Mp_n] \begin{bmatrix} \theta_{n+1} \\ \varphi_{n+1} \end{bmatrix} \tag{3.31}$$

$[Mp_i]$  représente la matrice élémentaire liée a chaque milieu.

**3.4.2. Impédance thermique. Définition**

Un système conducteur unidirectionnel peut être caractérisé par une matrice de transfert. Celle-ci exprime la dépendance entre le vecteur de statut défini dans le plan d'accès de la couche et la couche même. L'impédance thermique locale a été définie des composantes d'un vecteur de statut comme étant le rapport entre la température et la densité de flux.

3.4.2.1. Calcul de l'impédance thermique

L'objectif de ce paragraphe est de trouver une formule adaptée pour déterminer l'impédance d'entrée d'un système. Comme observé, les vecteurs d'entrée, respectivement de sortie du système conducteur unidirectionnel ont été déterminés à l'aide de la suivante équation matricielle:

$$\begin{bmatrix} \theta_e(\omega) \\ \varphi_e(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & G \\ H & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_s(\omega) \\ \varphi_s(\omega) \end{bmatrix} \tag{3.35}$$

Il en résulte l'expression de l'impédance thermique:

$$Z_e(\omega) = \frac{\theta_e(\omega)}{\varphi_e(\omega)} = \frac{E \cdot Z_s(\omega) + G}{H \cdot Z_s(\omega) + F} \tag{3.37}$$

## Chapitre 3

Ce rapport définit l'impédance thermique d'entrée du système, notée avec  $Z_e(\omega)$ . La dernière relation (3.37) met en évidence le fait que les quantités d'entrée d'un système sont influencées par les conditions limite imposées.

### 3.5. Analyse générale du système en vue de déterminer les propriétés thermo-physiques

#### 3.5.1. Capteur

Le capteur est un milieu complexe compose de couches minces de Kapton, cuivre et conducteurs de chaleur qui permettent la création de gradients tangentiels. Un tel modèle est difficile à modéliser. Une solution serait de traiter le capteur comme couche homogène. Il est intéressant à noter qu'une partie du capteur prise en considération a une épaisseur très réduite, d'environ 130 – 200  $\mu m$ . Pour les fréquences de travail qui sont au-dessous de 0.1 Hz, l'épaisseur peut être traitée comme une résistance thermique à capacité localisée.

#### 3.5.2. Résistance de contact

L'irrégularité entre la surface de contact du capteur et l'échantillon soumis à l'essai peut résulter dans une résistance de contact inadéquate.

Pendant que pour le capteur la condition concernant la surface est d'être de bonne qualité, la rugosité de la surface du matériau peut être plus ou moins importante (figure 3.9). La résistance qui apparait entre le capteur et l'échantillon cause une réduction de la température. En associant la valeur de la résistance de contact  $R_c$ , la matrice de transfert aura la forme:

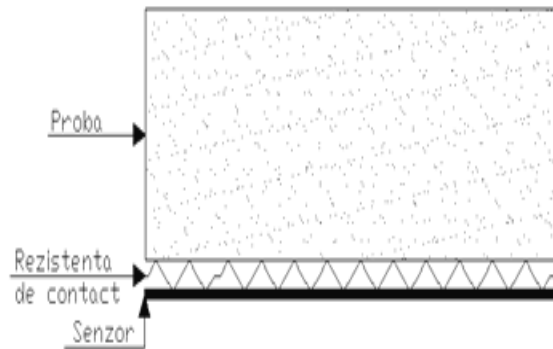


Figure 3.9. Résistance de contact

$$\begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

La valeur de la résistance de contact dépend des matériaux avec lesquels on fait le contact et de la nature du contact. Dans le cas des milieux conducteurs comprimés,  $R_c$  peut avoir des valeurs entre  $10^{-3}$  et  $10^{-5} K/(W/m^2)$ . Dans notre cas, l'asphalte est compacté, mais la surface présente une certaine rugosité de surface, les résistances de contact ont moins de  $10^{-5} K/(W/m^2)$ .

### 3.5.3. Le matériau dans la condition limite de semi-infini

Le matériau étudié sera considéré comme condition limite semi-infini. Il est caractérisé à la surface par l'impédance caractéristique propre:

$$\varphi_m(\omega) = b_m \sqrt{j\omega} \cdot \theta_m(\omega) \quad (3.48)$$

### 3.5.4. Impédance globale du système capteur – contact – matériau

Nous avons ici trois couches homogènes pour lesquelles on peut écrire une relation analogique avec la relation (3.28), obtenant ainsi les relations matricielles qui lient les vecteurs de couche à l'interface des milieux. Le produit en cascade des matrices de transfert élémentaires aide à la connexion directe des vecteurs de base des trois milieux, qui nous permettent avoir une matrice de transfert du système global en matrices élémentaires chacune liée à ces trois milieux. L'ensemble perturbateur capteur et la résistance de contact peuvent être caractérisés par une matrice de transfert global  $M_g$  qui est:

$$M_g = \begin{bmatrix} 1 & R_f \\ jC_f^\omega & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_c + R_f \\ jC_f^\omega & jR_c C_f^{\omega+1} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Il en résulte  $R_t$ , la résistance totale capteur – contact:

$$R_t = R_c + R_f \quad (3.50)$$

### 3.5.5. Traitement du signal

Les méthodologies de caractérisation du système de conduction mènent à la détermination d'une impédance expérimentale des signaux mesurés de flux et de température. L'une des clés du succès de la méthode présentée par cet ouvrage est la qualité d'estimation de l'impédance thermique. Les évolutions significatives de la technologie peuvent être mises en évidence dès le commencement du travail de Defer [27], jusqu'à la thèse de Shen [71].

Les différentes étapes d'interprétation ont conduit d'une procédure d'approche très classique basée sur les transformâtes de Fourier aux procédures d'élaboration basées sur la modélisation du système.

L'estimation d'un signal par le calcul direct de la transformation numérique Fourier présente des problèmes liés à la variation de l'estimateur. Par conséquent, la détermination de la fonction de transfert n'est pas réalisée si facilement par rapport aux transformâtes de Fourier. Cette méthodologie de caractérisation de la conduction utilise des techniques qui impliquent des estimateurs plus stables.

## Chapitre 3

### 3.6. Lois de la radiation thermique

La majorité des lois de la radiation thermique concerne **le corps noir**. Celui-ci est un corps qui accomplit les demandes suivantes:

- il absorbe en totalité la radiation incidente;
- il émet la radiation diffuse indépendamment de la direction;
- pour une température et une longueur d'onde données, il émet plus d'énergie qu'aucun autre corps.

#### 3.6.1. Loi de Planck

La loi de Planck représente la loi de distribution de l'intensité de radiation  $I_{\lambda^*}$  selon la longueur d'onde et la température, qui a la forme [9]:

$$I_{\lambda^*}(\lambda^*, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^{*5} [\exp(hc_0 / \lambda KT) - 1]} \quad [W/(m^2 \cdot \mu m)] \quad (3.64)$$

La représentation graphique de la loi de Planck est présentée dans la figure 3.14.

L'analyse de la distribution spectrale de la puissance d'émission mène aux observations suivantes:

- la puissance d'émission varie continuellement avec la longueur d'onde;
- la puissance d'émission augmente avec la température pour une longueur d'onde donnée;
- une grande partie de la puissance d'émission du soleil qui peut être approximée à un corps noir à la température de 5800 K s'émet dans la zone visible des radiations, mais pour les corps à la température  $T \leq 800$  K, la radiation entière se fait dans le spectre infrarouge.

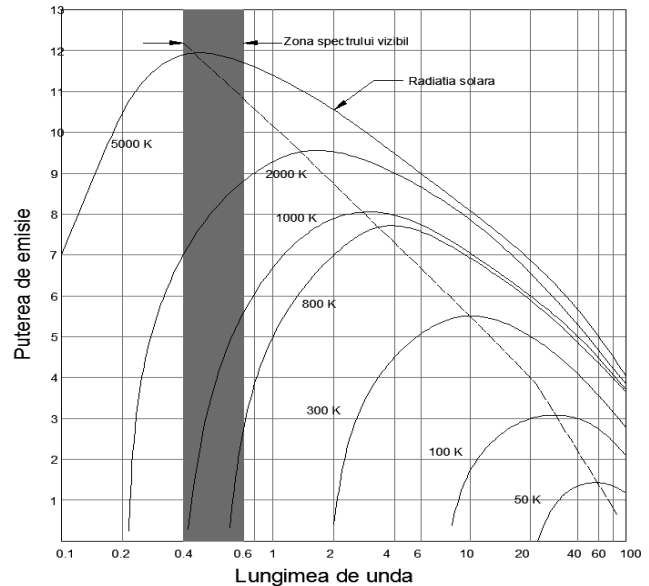


Figure 3.14. Puissance d'émission spectrale du corps noir [63]

#### 3.6.2. Loi de Wien

Il résulte qu'à l'augmentation de la température le maximum de la puissance d'émission se déplace vers des longueurs d'onde plus petites.

### **3.6.3. Loi de Stefan – Boltzmann**

- le facteur d'émission pour les matériaux non-métalliques, auxquels appartient l'enrobé bitumineux, a des valeurs plus élevées, au-dessus de 0.6;
- pour les métaux,  $\varepsilon$  augmente avec la température, et pour les non-métaux on peut avoir des augmentations ou des réductions du facteur d'émission avec la température;
- le facteur d'émission dépend significativement de la nature de la surface, des méthodes de fabrication, des traitements thermiques, des réactions chimiques avec l'environnement.

### **3.7. Equipements utilisés pour mesurer les paramètres thermo-physiques**

Ce sous-chapitre va présenter les caractéristiques principales des équipements utilisés et les procédures de calibration pour mettre en application les capteurs de mesure. On va détailler les opérations qui ont été réalisées pour caractériser les fluxmètres de chaleur, ceux-ci permettant l'évaluation des perturbations des capteurs introduits dans le système étudié. Les différents composants de la chaîne d'acquisition et de contrôle sont sélectionnés selon la particularité de l'étude, et leurs performances seront décrites dans ce sous-chapitre.

#### **3.7.1. Capteur de température**

Les mesures de température peuvent être réalisées en utilisant des thermocouples du type T (cuivre-constant) ou (chrome-aluminium). Les thermocouples sont confectionnés en fils simples couverts en téflon (0.05 mm diamètre). Les thermocouples ont un diamètre fini d'environ 0.1 mm.

Lors du mesurage simultané de flux et température, le thermocouple peut être intégré dans le fluxmètre par la déposition électrolytique du cuivre sur une piste constante. Ceci permet un mesurage de la température dans les termes du mesurage du flux avec une perturbation négligeable.

#### **3.7.2. Capteur de flux**

Du point de vue général, ce capteur a la forme d'une couche mince, dont l'épaisseur est de quelques dizaines de millimètres. Ces capteurs ont été développés suite à des années de travail pour différentes applications de laboratoire. Ils mesurent simultanément le débit et la température dans le même plan.

Le concept est basé sur un couplage thermoélectrique dans une couche bimétallique, en utilisant des circuits imprimés. La déposition des blocks et des coins de cuivre sur une bande continue en cuivre-nickel cause la contraction des lignes de flux, en leur offrant des passages privilégiés tenant compte de la conductivité thermique très élevée du cuivre. La couverture

## Chapitre 3

---

métallique en cuivre, très mince et très conductrice, disposée sur les deux parties du fluxmètre, assure l'uniformité des températures de surface dans le plan de l'entrée et de la sortie du capteur.

L'étranglement (contraction) est la cause de l'institution d'un gradient de température au long du coin en cuivre. Pour l'effet Seebeck, une force électromotrice est générée aux bornes de la cellule. Elle est directement liée à la valeur du flux qui traverse la cellule. La connexion des cellules en série peut être comparée avec une connexion en série de générateurs élémentaires, actionnés par la densité de flux qui traverse le capteur. Les gradients sont déterminés perpendiculairement sur les lignes de flux, à la différence des fluxmètres avec des parois auxiliaires où le gradient est parallèle à la direction du flux.

### 3.7.3. Calibration des fluxmètres et influence des conditions expérimentales

Le mesurage du flux demande la connaissance de la fonction qui lie les deux quantités. Il est donc nécessaire de bien connaître le comportement des capteurs placés.

Un processus de calibration est essentiel pour permettre l'interprétation de la tension fournie par les capteurs et la convertir en flux thermique. Dans ce contexte, il faut déterminer le degré de sensibilité des fluxmètres et, plus généralement, le comportement de ces capteurs vis-à-vis des conditions de mesurage (pression, température, direction de flux, etc.).

Antczak [5] a défini dans sa thèse deux procédures expérimentales pour accéder ces données. Le signal émis par un fluxmètre est relativement un flux thermique qui traverse un plan de mesurage situé au cœur du capteur. La présence du fluxmètre modifie le système étudié en ajoutant deux résistances thermiques sur le tracé suivi par la chaleur.

La première résistance correspond à la résistance propre du capteur, et la deuxième résistance est liée à un contact imparfait entre le fluxmètre et le matériau support, figure 3.24. Cette résistance est puissamment liée au statut de la surface du matériau de contact (rugosité, porosité, etc.).

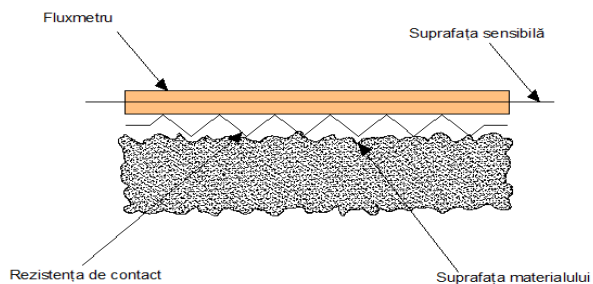


Fig. 3.24. Résistance de contact fluxmètre, matériau

### **3.8. Etude pratique des propriétés thermo-physique sur les enrobés bitumineux utilisés en France**

#### ***3.8.1. Caractéristiques des matériaux***

##### **3.8.1.1. Granulats**

Les données concernant la qualité de granulats utilisés a la réalisation des enrobés bitumineux sur lesquels on a déterminé les propriétés thermo-physiques présentées ont été fournies par la société Eurovia de France et sont conformes aux standards français. Selon la nature des roches de provenance, ils sont utilisés dans les couches routières comme suit:

- porphyre Lessienne CUP (Belgique), ces granulats sont utilisés à la réalisation de la couche de roulement;
- calcaire Dompierre, ces granulats sont utilisés à la réalisation de la couche de liaison et de base.

##### **3.8.1.2. Filler**

Le filler utilisé a les caractéristiques suivantes:

- contenu de fines 0.09 mm ( $\geq 80 \%$ );
- contenu d'argile déterminé par la méthode de la valeur du bleu de méthylène (max. 2 %);
- coefficient de hydrophilidé (max. 1 %);
- minimum de fines au-dessous de 0.02 mm ( $\leq 20 \%$ ).

##### **3.8.1.3. Cendres volantes**

En plus de la détermination des propriétés thermo-physiques sur les enrobés bitumineux réalisés en France, l'un des objectifs était d'améliorer ces propriétés thermo-physiques par l'utilisation des cendres volantes dans la masse de l'enrobé. Il est possible d'utiliser les cendres en remplaçant partiellement ou totalement le filler.

En ce qui concerne l'utilisation des cendres volantes dans les mixtures, il y a peu de recherches qui mettent en évidence leur caractère bénéfique. Dans ce but, suite à une ample recherche sur les enrobés bitumineux déroulée pendant le stage de doctorat à l'Université d'Artois en France, concernant la perte de stabilité des enrobés bitumineux à de températures hautes, j'ai remarqué le fait que sur le plan mondial on essaye de combattre ces températures hautes dues aux changements climatiques en utilisant des composants différents dans les couches bitumineuses, comme la poudre de graphite ou la poudre de mine [81]. L'utilisation de ces composants dans la masse de l'enrobé bitumineux a pour but l'amélioration des propriétés thermo-physiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, etc.).

## Chapitre 3

---

Cette cendre volante a été utilisée en proportion de 10 %, 15 %, dans la masse de l'enrobé bitumineux, en vue d'étudier l'évolution des propriétés thermo-physiques.

### 3.8.1.4. Bitume

Le bitume routier pur existe en France en quatre classes: 35/50, 50/70, 70/100 et 160/220. Ce bitume routier résulte du traitement de la fraction lourde du pétrole. A coté de ces classes de bitume pur il y a aussi des bitumes modifiés de classe: 10/20, 20/30, bitumes avec lesquels on a réalisé des échantillons sur lesquels on a déterminé les propriétés thermo-physiques.

Ces types de bitume sont destinés aux applications routières usuelles pour la réalisation des couches de fondation, de base, de liaison et de roulement des chaussées. Ils sont applicables pour tous les ensembles techniques mis en application.

### **3.8.2. Caractéristiques mécaniques des enrobés en France**

Les enrobés bitumineux utilisés en France sur lesquels on a déterminé des propriétés thermo-physiques sont conformes aux standards de produit.

En dehors de ces types d'enrobés bitumineux fournis par la société Eurovia, on a aussi réalisé quatre dosages avec les matériaux disponibles en remplaçant proportionnellement les granulats, respectivement le filler, avec des cendres volantes en quantité de 10 %, 15 %, tableau 3.4. Ces dosages ne sont pas conformes au standard de réalisation des enrobés bitumeux car la cendre ayant la granularité et la densité basses, dans le pourcentage total les fines ne se rangent pas dans les limites prévues par les normes. Ce choix du pourcentage élevé de la cendre est du au but suivi d'augmenter la conductivité thermique et la chaleur spécifique. Après le mesurage et la détermination de ces caractéristiques thermiques qui peuvent résulter selon le but, ces pourcentages de cendre vont diminuer et les enrobés réalisés pourront s'encadrer dans les normes.

### **3.9. Mesurages au banc de conduction**

La caractérisation thermo-physique d'un matériau implique normalement la détermination de plusieurs paramètres. Dans ce cas, les méthodes de mesurage utilisées dans le cadre du laboratoire sont d'actualité mais elles ont besoin de certaines mesures spéciales conformément au cahier de charges des matériaux à mesurer. Elles utilisent la théorie de la quadrupolarité thermique et le fonctionnement de deux modes de base indépendantes comme stockage et transfert mis en évidence par la diagonale de la matrice. Les mesurages permettent l'identification de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique. Les valeurs d'effusivité et de diffusivité sont calculées.



**3.9.1. Dispositif expérimental**

Les méthodes utilisées dans le laboratoire ont été longuement testées [41]. Elles sont basées sur des recherches de mesurage du flux et de la température sur les deux parties d'un échantillon soumis à des conditions limites contrôlées. La figure 3.29 montre le dispositif utilisé.

Les fluxmètres de mesurage ont une surface active de 15 cm x 15 cm et un anneau de garde qui, avec la surface active, a la dimension de 25 cm x 25 cm. Le mesurage de la température est réalisé avec l'aide d'un thermocouple du type K. Chaque thermocouple est connecté à une masse thermique connue, pour atteindre la température des surfaces de l'échantillon. Les sollicitations sont gérées par deux plaques d'échange en aluminium qui sont connectées aux bains thermostat par l'intermède des pompes. Le déplacement de la plaque supérieure est assuré par un cylindre pneumatique qui permet aussi de maintenir la pression du système fluxmètre-échantillon, en maintenant la résistance de contact au minimum.

Les essais ont été réalisés sur des échantillons différents d'enrobé bitumineux. Lors de la mise sur le banc d'essai, l'échantillon d'enrobé bitumineux est entouré par un anneau en polystyrène à l'épaisseur de 1 cm ou par un textile, pour éviter la perte latérale de flux et pour assurer les conditions d'un transfert unidirectionnel

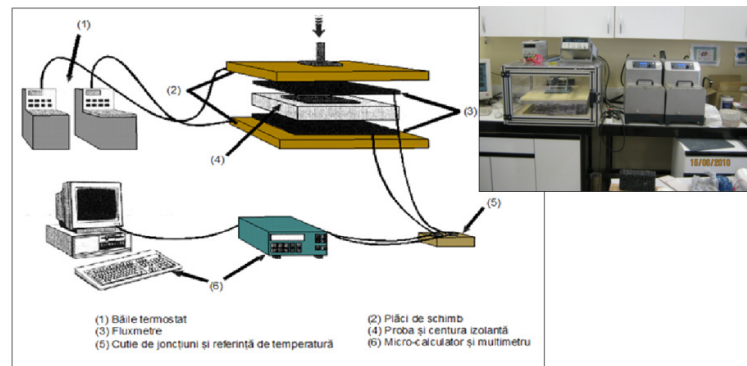


Fig. 3.29. Dispositif expérimental de détermination des caractéristiques thermiques de l'enrobé bitumineux par des méthodes classiques

**3.9.2. Détermination de la conductivité thermique**

La conductivité thermique  $\lambda [W / (K \cdot m)]$  caractérise l'aptitude d'un matériau de conduire la chaleur en régime permanent. Cela reflète, plus ou moins, la tendance du matériau de permettre le „passage” de la chaleur. Ce paramètre s'inscrit donc intuitivement dans la notion de transfert de chaleur autour du milieu.

La méthode prévoit la présentation d'un échantillon d'épaisseur  $l$  soumis à un gradient de température, de sorte qu'un transfert de flux s'impose. La figure 3.30 présente schématiquement la magnitude d'entrée et de

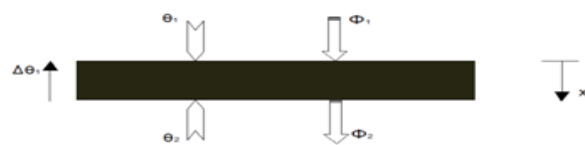


Figure 3.30. Système conducteur unidirectionnel soumis à un gradient de température

## Chapitre 3

---

sortie du système.

La conductivité thermique d'un matériau est directement liée à la résistance thermique qui reflète son opposition au passage de la chaleur. La méthode implique l'imposition de températures différentes  $\theta_1$  et  $\theta_2$  sur les deux faces du système. Le flux et la température sont identifiés à l'entrée et à la sortie. La connaissance de ces deux quantités mène au calcul de la résistance thermique et à la déduction de la conductivité thermique.

La conductivité thermique peut être déterminée seulement après avoir la somme du flux.

$$R = \frac{2\Delta\theta}{\sum \varphi} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad (3.74)$$

$$\text{si } \lambda = \frac{l}{R} \quad [\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}] \quad (3.75)$$

où  $l$  représente l'épaisseur de l'échantillon.

### 3.9.2. Détermination de la chaleur spécifique

La chaleur spécifique  $c [J/(Kg \cdot K)]$  caractérise la capacité d'un matériau de stocker l'énergie thermique (chaleur). Elle mesure la quantité d'énergie nécessaire pour varier de  $1^\circ\text{C}$  la température de la masse d'un kilogramme de matériau.

En partant de l'état initial ( $t_{initial}$ ) stable, nous allons imposer une variation de température en changeant les paramètres des deux bains de température. La température changera et aussi le flux de chaque coté. Nous attendons le redressement jusqu'à l'état final ( $t_{final}$ ) des flux, où le matériau a récupéré un nouvel état d'équilibre, associé à une nouvelle température d'équilibre.

Pendant la phase de déséquilibre, l'échantillon stocke ou relâche une énergie  $Q$  sous forme de chaleur, selon l'augmentation ou la baisse de la température. Cette énergie est liée à la différence de flux par la relation suivante:

$$Q = \int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta\varphi dt \quad [\text{J}/\text{m}^2] \quad (3.76)$$

$$Q = C \cdot \Delta\theta$$

où  $\Delta\theta$  correspond aux variations de température entre l'état initial et l'état final.

Puis on peut calculer la capacité thermique de l'échantillon avec la relation:

$$C = \frac{\int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta\varphi \cdot dt}{\Delta\theta} \quad [\text{J}/\text{K} \cdot \text{m}] \quad (3.77)$$

En connaissant la masse volumique de l'échantillon et son épaisseur, on détermine la chaleur massique avec la relation:

$$c = \frac{C}{\rho \cdot Sl} \quad [\text{J/Kg}\cdot\text{K}] \quad (3.78)$$

où  $\rho$  représente la masse volumique de l'échantillon et  $l$  son épaisseur.

### ***3.9.3. Détermination de l'effusivité thermique et de la diffusivité thermique***

La diffusivité thermique caractérise l'aptitude d'un matériau de recevoir une tension thermique nouvelle. Elle est directement proportionnelle avec la conductivité thermique et inversement proportionnelle avec la chaleur spécifique et la masse volumique

L'effusivité thermique d'un matériau est la propriété thermique caractérisant l'aptitude du matériau d'„arracher” la chaleur.

Il est important de retenir que si  $a$  est élevé la chaleur se propage beaucoup plus rapidement et plus  $b$  est élevé plus le matériau „absorbe” la chaleur.

Les paramètres de la diffusivité et de l'effusivité thermique peuvent être calculés en partant des relations suivantes [42]:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}] \quad (3.79)$$

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (3.80)$$

### ***3.9.4. Détermination de l'émissivité***

L'émissivité représente l'aptitude d'un matériau d'emmètre de la chaleur. L'équipement pour mesurer l'émissivité des matériaux métalliques et non-métalliques est composé d'un générateur de radiation ultraviolette. Une sphère à l'intérieur de laquelle se décompose la radiation émise par le matériau soumis au mesurage, sur les deux directions caractérisées en coordonnées sphériques par l'angle zénithal  $\theta$  et azimutal  $\varphi$ , définissant ainsi l'intensité de radiation à l'aide d'un appareil qui détermine le niveau d'émissivité influencé par la température de l'environnement de mesurage.

## **3.10. Résultats expérimentaux obtenus sur les enrobés bitumineux de France**

L'annexe 1 présente un exemple de mesurages en vue de déterminer les propriétés thermo-physiques pour un type d'enrobé bitumineux.

Comme présenté dans les figures 3.38, 3.39, les caractéristiques thermiques résultant des mesurages pour les dosages qui ont dans leur composition des cendres volantes sont supérieures à celles qui ne contiennent pas de cendres.

**Je considère ces caractéristiques thermo-physiques supérieures strictement pour le domaine que j'étudie, mais leur valeur numérique est réduite.**

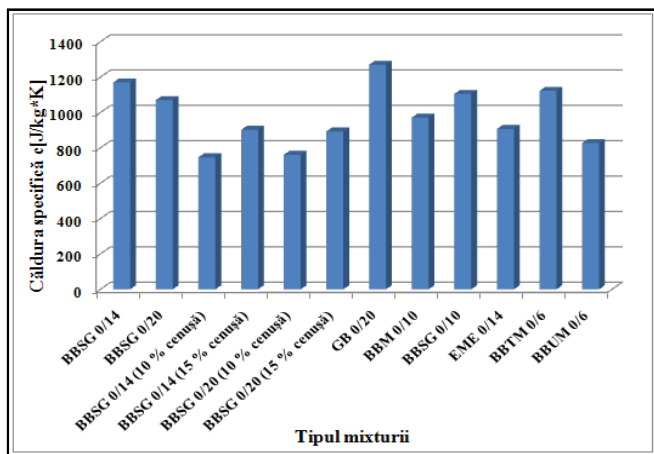


Figure 3.39. Chaleur spécifique résultante

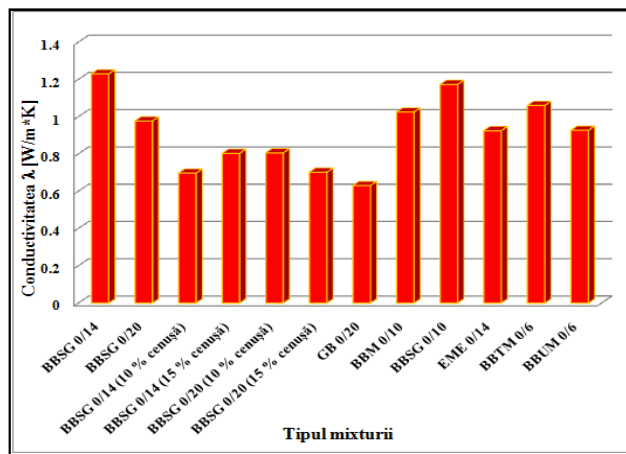


Figure 3.38. Conductivité thermique résultante

### 3.11. Etude de cas. Modélisation de la distribution de température des enrobés bitumineux à l'aide des propriétés thermo-physiques pour les applications de laboratoire

La caractérisation du matériau par des essais de laboratoire réalisés sur les enrobés bitumineux offre des prévisions de performance significatives concernant les revêtements bitumineux seulement dans le cas où la température du matériau est correctement prise en considération. Ce sous-chapitre présente un modèle analytique qui, à base des propriétés thermo-physiques, peut prédire d'une manière correcte la distribution de la température dans l'enrobé bitumineux. On présente aussi la structure organisatrice d'essai en laboratoire, conçue pour valider comme modèle la détermination de la température.

#### 3.11.1. Programme expérimental

On présente une étude de laboratoire sur la distribution de la température dans les enrobés bitumineux, étude qui relève le temps nécessaire aux essais, ainsi que les résultats obtenus à la suite n'aient pas un grand écart de valeur entre la limite inférieure et la limite supérieure prévues par le standard pour le même dosage d'enrobé bitumineux. A l'aide des propriétés thermo-physiques on peut ainsi suivre les processus évolutifs complexes pendant l'exposition des échantillons d'enrobé bitumineux à des températures hautes et à des températures basses pendant le cycle de la durée de vie et on peut réduire le temps de l'analyse dans le laboratoire.

D'habitude en laboratoire, les échantillons cylindriques sont les plus utilisés pour différents essais en vue de déterminer les propriétés physico-mécaniques. Grâce à ce fait, on a étudié la distribution et la validation de la température modèle sur un échantillon cylindrique standard. Après la compaction avec la presse giratoire, l'échantillon a été préparé pour l'emplacement des thermocouples de température, thermocouples placés la surface du cylindre sur la partie supérieure, la surface latérale et à son intérieure en réalisant des rainures 10 mm, 25 mm, 40 mm et 50 mm de profondeur sur les faces latérales. Comme caractéristiques importantes pour la réalisation de ce type d'enrobé bitumineux on peut mentionner le fait que la teneur en bitume a été de 4,9 %, les vides de 5,8 % et la densité de 2440 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.11.2. Equations de génération

Le processus de transfert dans un solide est décrit par l'équation transitoire d'énergie [8]. Dans le système tridimensionnel cartésien l'équation a la forme suivante:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{d^3 u}{dt^3} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.81)$$

où:  $T$  - température;

$k_x, k_y, k_z$  - conductivité thermique;

$x, y, z$  - directions des coordonnées respectives;

$\rho$  - densité de l'échantillon;

$c$  - chaleur spécifique;

$u$  - énergie interne générée par unité de volume;

$t$  - temps.

### 3.11.3. Résultats et interprétation

Les valeurs mesurées, présentées dans la figure 3.49, indiquent le fait que dans l'échantillon bitumineux la température augmente brusquement dans différents points, dès le commencement des mesurages, puis le processus continue avec une augmentation à gradient réduit, ce qui mène à un état d'équilibre thermique dans un délai étendu. La température à la surface supérieure augmente le plus rapidement, mais quand il approche le centre de l'échantillon, le gradient de température reste constant.

Pour mettre en évidence l'influence des propriétés thermo-physiques sur la distribution de la température dans la masse du béton bitumineux, la conductivité thermique a été considérée variable 1.0 W/m·K...2.88 W/m·K, a base des mesurages réalisés. Comme remarqué dans la figure 3.51, la magnitude de la conductivité thermique a un effet significatif sur la distribution de température dans

## Chapitre 3

le béton bitumineux. Pour des valeurs plus élevées de la conductivité thermique, le taux de température augmente le plus rapidement, chose attendue normale.

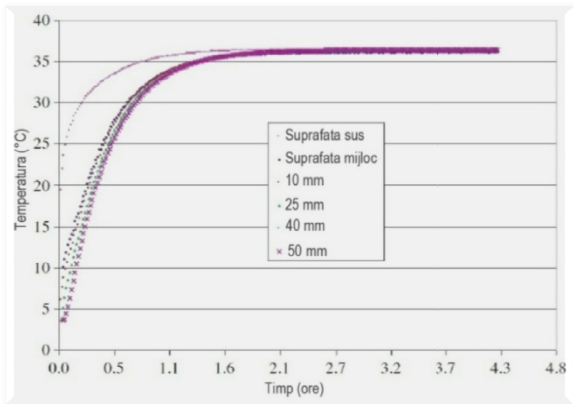


Figure 3.49. Température mesurée

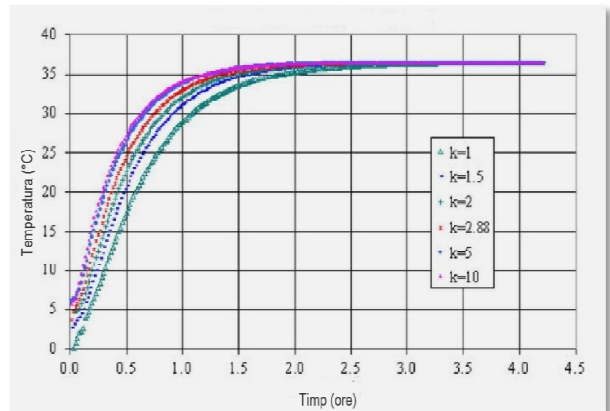


Figure 3.51. Température prédite pour différentes conductivités thermiques

On a constaté que le modèle d'analyse pourrait prédire de manière fiable la variation de température et de distribution. En même temps, la relation temps-température est influencée selon le modèle géométrique des échantillons, les dimensions et les propriétés thermo-physiques.

Cette étude expérimentale a été présentée pour le cas où la température augmente, l'approche peut être appliquée similairement pour des températures très basses ou très hautes.

La validation de la technique proposée pour déterminer la température modèle demande l'utilisation de dosages d'enrobés bitumineux avec des sortes différentes, respectivement différents teneurs en bitume, car toutes ces propriétés thermo-physiques ont un impact significatif sur la chaleur de transfert.

### 3.12. Conclusions

Les enrobés bitumineux utilisés en France, et aussi les enrobés réalisés avec des cendres volantes sur lesquels j'ai réalisé ces mesurages, permettent de formuler les conclusions suivantes:

- l'utilisation de la cendre volante dans les mixtures bitumineuses aide significativement à obtenir des résultats supérieurs concernant les propriétés thermo-physiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité, effusivité, émissivité);

- le bitume, composant essentiel de la masse de l'enrobe, est le facteur décisionnel en ce qui concerne l'absorption de chaleur. Plus la teneur en bitume est haute, plus les propriétés thermo-physiques sont inférieures, ce qui favorise la perte de stabilité de l'enrobé;

- la sensibilité de l'asphalte semble beaucoup plus accentuée à la variation de la capacité volumique de chaleur spécifique du matériau qu'à la variation de la conductivité thermique. La

capacité volumique de chaleur de la masse thermique constituée dans la couche bitumineuse a une influence significative sur le comportement thermique de la couche au cas où le transfert de chaleur se réalise surtout par conduction pure. D'autre part, la température minimale de l'asphalte à la surface de roulement dépend des conditions de flux ambiant (vitesse et direction du vent), car le refroidissement par convection influence le transfert de chaleur à la surface. Théoriquement, la plus grande vitesse du vent détermine le plus grand coefficient de transfert thermique par convection à la surface de l'asphalte, menant à des températures de surface plus basses. Une quantité significative d'énergie reçue par la surface bitumineuse est due à l'incidence de la radiation solaire, bien que certains gains de chaleur convective apparaissent dans des moments où la température de l'air ambiant est plus haute que la température de la surface bitumineuse;

- plus l'enrobé bitumineux présente une densité élevée, plus les propriétés thermiques présentent des valeurs supérieures;

- si le degré de compaction est inadéquat, la conductivité thermique baisse, et la chaleur spécifique augmente;

- plus la conductivité thermique et la chaleur spécifique sont hautes, il résulte que pour des températures hautes l'enrobé bitumineux résiste mieux à des sollicitations du trafic, en prolongeant ainsi la durée de vie de la chaussée.

## **4. CONCEPTION ET REALISATION D'ENROBES BITUMINEUX, PAR L'ETUDE ET L'UTILISATION DE MATERIAUX COMPOSITES**

### **4.1. Etude des caractéristiques des matériaux routiers composites**

De grandes quantités de matériaux sont utilisées à la construction, la réhabilitation et l'entretien des chaussées. Les matériaux principaux utilisés à l'exécution des couches des chaussées routières sont les granulats naturels et les liants. L'enrobé bitumineux est donc un matériau composite, les caractéristiques de chaque composant influençant la réponse finale du mélange.

Les couches routières les plus soumises à l'action de ces facteurs sont la couche de roulement et la couche de liaison, ce qui détermine le fait que ce chapitre présente, d'une part, le mode de connaître plus profondément la distribution de la température dans ces couches, aidant à une spécification plus sophistiquée des liants hydrocarbonés et des granulats en augmentant leur qualité, et d'autre part, on essaie de diminuer cette distribution de la température en concevant et réalisant des enrobés bitumineux avec des caractéristiques thermiques supérieures. Ainsi, suite à des études approfondies concernant ces caractéristiques thermiques, en utilisant des matériaux composites comme la cendre volante, et en remplaçant partiellement ou totalement le filler dans la masse de l'enrobé bitumineux, les variations de température peuvent être diminuées.

En partant des hypothèses mentionnées, dans le cadre du laboratoire de routes de la Faculté de Génie Civil de Timisoara, on a conçu et réalisé une série de dosages d'enrobé bitumineux à différents pourcentages de bitume et de cendre volante. En même temps, on a déterminé les propriétés thermo-physiques de ces enrobés bitumineux dans le laboratoire de l'Université d'Artois en France. Après la détermination et l'interprétation des résultats concernant les propriétés thermo-physiques, on a étudié leur influence sur les enrobés bitumineux conçus par des essais physico-mécaniques réalisés en Roumanie.

#### ***4.1.1. Utilisation des cendres volantes dans les couches bitumineuses***

Les cendres des CETs (Centrale Electrique de Chauffage Central) représentent à présent et en perspective le principal déchet industriel qui, par sa composition chimique et ses propriétés hydrauliques, peut constituer de nouvelles sources de matières premières utilisables dans de différents domaines. Le développement sans précédent des recherches, au niveau mondial et national, a déterminé l'apparition de nouveaux produits et technologies à base de concepts intégrés, de grande efficacité technico-économique et avec implications sur la sphère de connaissance des aspects multiples de ce déchet industriel.



La cendre volante représente un déchet avec grand impact écologique grâce à ses quantités et au fait que pour le déposer il faut retirer de grandes surfaces de terrain du circuit agricole. Il y a de nombreuses recherches concernant la caractérisation et la valorisation des cendres volantes de notre pays en tant qu'ajout aux ciments portland.

### **4.2. Caractéristiques des matériaux utilisés à la réalisation des échantillons d'enrobé bitumineux**

#### **4.2.1. Granulats**

La composition minérale des granulats détermine en grande partie les caractéristiques propres et le mode de comportement d'un enrobé bitumineux. De cette manière, quand on choisit une source de granulats, les recherches sur la nature minéralogique de la roche peuvent fournir des informations importantes sur la possibilité d'utiliser les granulats dans les enrobés bitumineux. Grâce au fait que les granulats présentent une cohésion relativement réduite, la résistance au cisaillement dépend premièrement de la friction interne entre les granulats, leur forme et texture jouent un rôle très important pour atteindre le serrement désiré.

A base des aspects mentionnés, les granulats utilisés pour confectionner les échantillons dans le laboratoire de Voies de Communication Terrestres et Cadastre proviennent de la carrière Lucaret du Département de Timis. Les caractéristiques physico-mécaniques et la granularité de ces granulats sont conformément au standard.

#### **4.2.2. Filler**

Les conditions d'admissibilité pour l'utilisation du filler pour la préparation des enrobés bitumineux ont été les suivantes:

- ne pas avoir de réaction chimique avec les liants;
- assurer une bonne adhésivité du liant;
- les grains ne doivent pas être poreux pour ne pas augmenter la consommation de liant absorption;
- ne pas absorber sélectivement les composants du bitume.

Ainsi, j'ai utilisé un filler calcaire produit par HOLCIM ROMANIA pour confectionner les échantillons d'enrobé bitumineux.

#### **4.2.3. Liants pouzzolaniques. Cendres volantes**

Les liants pouzzolaniques sont des matériaux siliceux ou silice-alumineux contenant des éléments qui combinent avec la chaux ou le ciment dans la présence de l'eau à des températures

## Chapitre 4

---

ambiantes et produisent des formations nouvelles, peu solubles dans l'eau et qui ont des propriétés liantes.

Dans le cadre de cette recherche, en tant qu'essais physico-mécaniques sur la cendre volante, on a pris en considération quelques études propres du collectif de recherche de la Faculté de Génie Civil de Timisoara, le Département de Constructions Industrielles et Civiles [10].

La cendre volante utilisée pour cette recherche provient de la Centrale Electrique de Chauffage Central Timișoara sud.

### **4.2.4. Bitume**

Quant aux enrobés bitumineux, les plus importantes propriétés du bitume sont les suivantes: la susceptibilité à la température, la viscoélasticité et le vieillissement. Ces propriétés sont influencées par la température, de sorte qu'au moment où celle-ci augmente, le bitume devient visqueux et présente une réponse plastique quand il est soumis à des chargements plus grands que sa propre viscosité à une certaine température. Ce comportement à des températures hautes peut être un facteur décisif pour l'apparition d'une des plus fréquentes dégradations de la chaussée routière (l'orniérage) [17].

Le liant utilisé dans les essais de laboratoire est un bitume D 50/70 fourni par la société SC CONFORT S.A. duquel on a déterminé les caractéristiques principales selon Ind. AND 537 – 2003.

### **4.3. Détermination des dosages d'enrobé bitumineux en remplaçant totalement ou partiellement le filler par la cendre volante**

Après avoir analysé tous les matériaux qui entrent dans la composition de l'enrobé bitumineux, on a décidé d'étudier l'effet du remplacement du filler par la cendre volante. Ce remplacement a été réalisé dans des pourcentages différents pour les suivants types d'enrobe:

- enrobé bitumineux B.A.16 utilisé en couche de roulement;
- enrobé bitumineux B.A.D.25 utilisé en couche de liaison.

Ainsi, selon les pourcentages de cendre volante déterminés pour chaque type d'enrobé bitumineux, on a réalisé les dosages finaux, selon les tableaux 4.8 et 4.9, il en découle la réalisation des échantillons conformément à chaque essai qui s'ensuit.

Grâce au fait que la cendre utilisée dans les mixtures des enrobés bitumineux a une densité sèche de  $\rho=775 \text{ kg/m}^3$ , elle présente une participation plus réduite au mélange que les pourcentages déterminés dans la phase initiale, à cause de son volume plus accentué de fines.

Tableau 4.8

Dosages finales B.A.16

Composants de l'enrobé	Teneur en cendre (%)					
	Dosage 1	Dosage 2	Dosage 3	Dosage 4	Dosage 5	Dosage 6
	0 %	2.5 %	5.0 %	7.5 %	10.0 %	12.5 %
sorte 8/16	25.80	25.70	25.10	25.90	25.20	25.10
sorte 4/8	29.60	29.20	29.80	28.20	28.50	29.10
sorte 0/4	24.30	25.70	25.50	26.30	26.70	25.10
sable naturel	6.20	6.20	6.10	6.80	6.50	5.60
cendre	0.00	1.70	3.30	4.90	6.50	8.10
filler	9.50	6.70	4.70	1.90	0.00	0.00
bitume	4.60	4.90	5.40	6.00	6.50	7.00

Tableau 4.9

Dosages finales B.A.D.25

Composants de l'enrobé	Teneur en cendre (%)				
	Dosage 1	Dosage 2	Dosage 3	Dosage 4	Dosage 5
	0 %	2.5 %	5.0 %	7.5 %	10.0 %
sorte 16/25	22.10	22.50	22.00	21.80	22.20
sorte 8/16	22.60	22.70	22.90	23.30	22.70
sorte 4/8	20.20	19.20	19.20	19.30	21.80
sorte 0/4	16.30	17.30	17.20	17.10	14.20
sable naturel	7.70	8.60	8.60	8.50	7.10
cendre	0.00	1.70	3.20	4.90	6.60
filler	7.20	3.80	2.40	0.00	0.00
bitume	4.00	4.10	4.50	5.00	5.40

#### 4.4. Réalisation des éprouvettes en vue de déterminer les propriétés thermo-physiques et physico-mécaniques

La confection des éprouvettes a eu lieu dans le laboratoire de routes de la Faculté de Génie Civil et le laboratoire de la Direction Régionale de Routes et de Ponts de Timisoara. En vue de déterminer les propriétés thermo-physiques, les éprouvettes ont été réalisés sous forme de plaquettes de 200 x 200 x 50 mm, ayant comme but la détermination de la conductivité thermique de la mixture, la chaleur spécifique et l'émissivité. Pour mettre en évidence le rôle de la cendre volante dans les mixtures de bitume, pour les mêmes types de dosages on a déterminé les propriétés physico-mécaniques selon le standard roumain en vigueur SR 174-1/2009, les éprouvettes réalisés ayant les caractéristiques déterminées sur les cylindres Marshall et les cylindres confectionnés au gyrocompacteur.

##### 4.4.1. Préparation des éprouvettes cylindriques en laboratoire

Les éprouvettes cylindriques utilisées dans la recherche ont été des cylindres Marshall, réalisés à l'aide du marteau Marshall en appliquant 50 coups sur chaque face et des cylindres confectionnés à l'aide du gyrocompacteur [110] [111].

### 4.4.2. Préparation des plaquettes

Pour réaliser les plaquettes en vue de déterminer les propriétés thermo-physiques, on a utilisé le rouleau compacteur pour plaques avec les dimensions 405 x 405 x 50 mm, figure 4.6, et on a coupé des plaquettes avec les dimensions 200 x 200 x 50 mm.

### 4.4.3. Résultats concernant les propriétés thermo-physiques sur les dosages réalisés en Roumanie

Le chapitre 3 a montré, suite à des recherches laborieuses déroulées en France, le mode de détermination des propriétés thermo-physiques sur les enrobés bitumineux. Dans ce sous-chapitre je vais présenter les résultats obtenus concernant ces propriétés thermo-physiques sur les types d'enrobés bitumineux réalisés dans le laboratoire de Roumanie, en respectant leur composition selon les standards roumains. Grâce au fait que dans notre pays nous devons faire face de plus en plus souvent aux problèmes concernant les changements climatiques, ces changements ont un effet négatif sur les couches bitumineuses en déterminant la perte de stabilité. L'une des solutions de combattre cet aspect pourrait être l'amélioration des propriétés thermo-physiques des enrobés bitumineux (conductivité thermique, chaleur spécifique et émissivité), en utilisant des matériaux qui n'absorbent pas la chaleur en totalité. En remplaçant partiellement ou totalement le filler de la masse de l'enrobé bitumineux avec la cendre volante selon les recherches des propriétés thermo-physiques réalisées en France sur des échantillons produits en Roumanie, ces propriétés deviennent supérieures. Ainsi la couche bitumineuse ne présente plus une conductivité thermique élevée et ne stocke plus une grande quantité de chaleur.

Bien que le bitume est l'un des plus importants composants de l'enrobé bitumineux, son pourcentage peut influencer négativement les propriétés thermo-physiques, de sorte que pour mieux mettre en évidence ces propriétés thermiques, on a réalisé aussi un dosage avec une grande teneur en bitume.

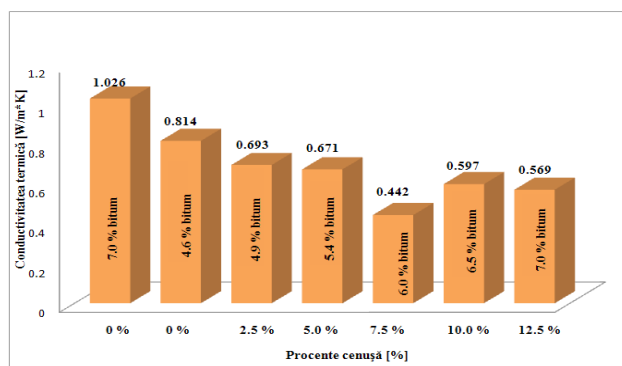


Figure 4.7. Conductivité thermique résultant selon les teneurs en bitume et en cendres volantes, pour un béton bitumineux B.A.16

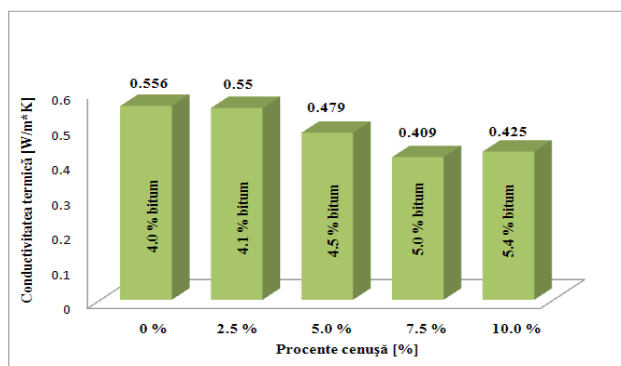


Figure 4.8. Conductivité thermique résultant selon les teneurs en bitume et en cendres volantes, pour un béton bitumineux B.A.D.25

Comme vu dans les figures plus haut, la cendre présente un effet bénéfique dans les enrobés bitumineux en ce qui concerne la conductivité thermique. Pratiquement, par les résultats supérieurs obtenus, la couche bitumineuse ne conduit pas aussi bien la chaleur, aspect du au contenu de silices dans la cendre, ce qui lui confère un facteur d'émissivité élevé.

Comme présenté dans le chapitre 3, le flux thermique est la quantité de chaleur qui passe par une surface isotherme dans un intervalle de temps. En utilisant la cendre volante dans les mixtures d'asphalte, la conductivité thermique baisse pour la même teneur en bitume, figure 4.11.

Dans la figure 4.14, on peut noter l'évolution du flux pour la détermination des propriétés thermo-physiques selon les températures choisies selon chaque mesurage. Le flux pour déterminer la conductivité thermique est plus élevé à cause de l'écart de température auquel l'éprouvette bitumineuse est soumise. Dans cette situation il est dirigé de haut en bas, donc la somme des deux flux résultant est plus grande. En ce qui concerne le flux pour déterminer la chaleur spécifique, celui-là décroît à cause de l'égalisation des températures. Une fois la température égalée pour les deux faces de l'éprouvette bitumineuse, les flux qui apparaissent sont de sens contraire, et leur somme est près de 0, ainsi l'éprouvette emmagasine la chaleur.

La chaleur spécifique représente la quantité d'énergie thermique demandée pour la variation de 1 °C sur l'unité de masse du matériau. En faisant une comparaison entre les valeurs obtenues sur les dosages réalisés B.A.16, en fonction du filler et les pourcentages plus significatifs de cendre (5.0 %, 7.5 %, 10.0 %, 12.5 %) qui entrent dans le mélange, on peut remarquer que pour atteindre la chaleur spécifique obtenue sur les échantillons bitumineux qui contiennent seulement du filler et une teneur élevée en bitume, la température à laquelle il faut soumettre les échantillons bitumineux

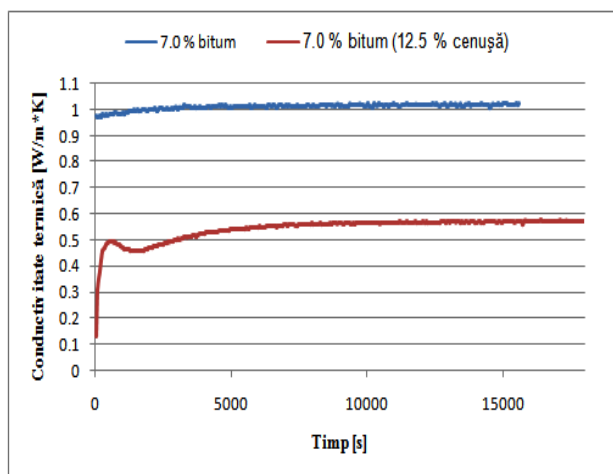


Figure 4.11. Influence de la cendre sur l'évolution de la conductivité thermique pour la même teneur en bitume

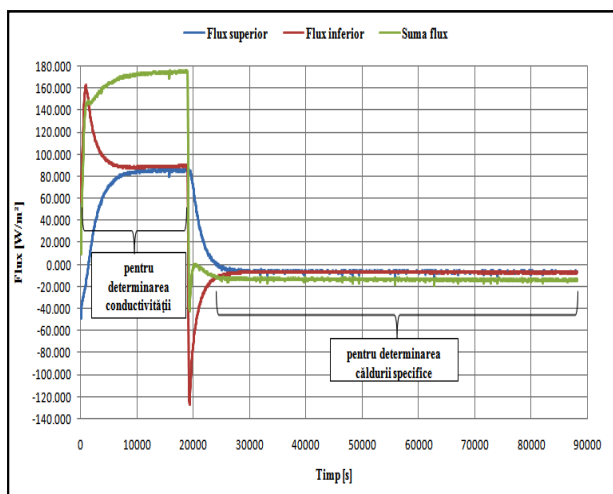


Figure 4.14. Evolution du flux pour déterminer la conductivité thermique et la chaleur spécifique pour l'enrobé bitumineux

## Chapitre 4

qui contiennent de la cendre est de 10 °C ... 15 °C plus haute que la température de 25 °C à laquelle ils ont été essayés.

L'émissivité représente la propriété des matériaux d'émettre la chaleur. Elle est fortement liée de la réflectivité en considérant que si l'émissivité décroît la réflectivité augmente. Selon le facteur d'émission, l'enrobé bitumineux se trouve entre 0.90 ... 0.98. Le mesurage de l'émissivité sur les éprouvettes réalisées a été possible seulement en France grâce à l'équipement présenté dans le chapitre 3.

Pratiquement on peut dire que la radiation solaire qui tombe sur la surface bitumineuse est moins absorbée (émissivité réduite), moins propagée (diffusivité réduite) et plus rejetée (réflectivité augmentée).

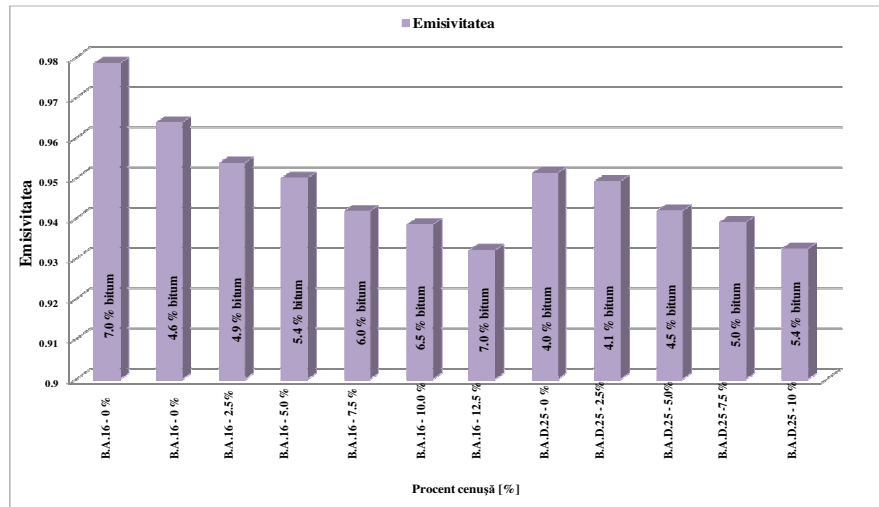


Figure 4.20. Résultats concernant l'émissivité des enrobés bitumineux réalisés

### 4.5. Etudes expérimentales concernant les propriétés physico-mécaniques pour les dosages d'enrobé bitumineux avec cendres volantes

Par conséquent, pour mettre en évidence la recherche traitée dans la thèse concernant le comportement des enrobés bitumineux qui contiennent des cendres volantes et pour avoir un contrôle le plus réaliste possible concernant son effet sur les dosages réalisés, il faut prendre en considération les propriétés volumétriques du mélange de granulats et bitume. Ces résultats ont été comparés aux résultats conformes aux critères SUPERPAVE.

Les propriétés volumétriques, figure 4.21, de l'enrobé compacte sont: les vides dans l'enrobé, les vides dans le mélange et les vides remplis par le bitume. Elles offrent des indications sur la performance probable de l'enrobé pendant la durée de vie de la chaussée [67].

Le granulat minéral est poreux et peut absorber de l'eau et du bitume dans des degrés différents. De plus, le rapport eau/bitume absorbé varie selon le type de granulat.

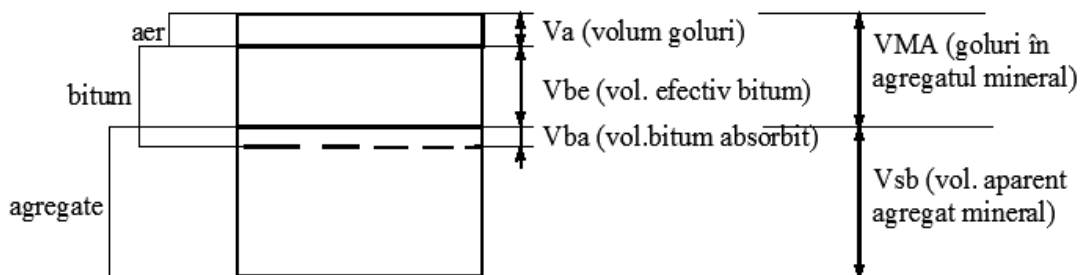


Figure 4.21. Propriétés volumétriques de l'enrobé bitumineux

Selon la teneur en bitume, on a réalisé en laboratoire une série de dosages pour lesquels on a déterminé les caractéristiques physico-mécaniques sur les cylindres Marshall, selon le STAS SR 174-1:2009. Ainsi, par la réalisation de plusieurs dosages à teneur en bitume élevée (selon le STAS), l'enrobé bitumineux résulté n'a pas été conforme au standards, tableau 4.14. Cet aspect a déterminé l'étude plus profonde d'une teneur en liant plus petit, pour laquelle les essais physico-mécaniques ordinaires correspondent au standard. Puis, pour faire une différence entre l'utilisation du filler et l'utilisation de la cendre volante dans les mixtures, on a réalisé une série d'essais dynamiques sur les dosages déterminés.

Tableau 4.14

Caractéristiques physico-mécaniques réalisées pour une teneur en bitume élevée

	Bitume (%)	Cendre (%)	Stabilité corrigée KN	Indice de fluage mm	Rapport SI, KN/mm	Densité Kg/m <sup>3</sup>	Absorption d'eau (%)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)
B.A.16	7.0 %	0 %	7.70	8.0	0.96	2440	0.40	0.00	18.96	100.00
	7.0 %	2.5 %	8.80	7.0	1.26	2420	0.65	0.00	19.62	100.00
	7.0 %	5.0 %	10.50	6.50	1.62	2400	0.75	2.01	20.29	96.97
	7.2 %	7.5 %	12.50	4.50	2.78	2330	1.92	4.75	22.78	79.14
	7.2 %	10.0 %	11.00	4.50	2.44	2340	1.00	3.84	22.45	82.91
	7.5 %	12.5 %	10.89	4.50	2.42	2300	0.90	3.51	24.02	85.38
B.A.D.25	4.4 %	0 %	8.90	4.50	1.98	2350	4.30	9.24	19.76	53.27
	4.6 %	2.5 %	13.20	4.50	2.93	2350	4.30	7.71	19.93	61.34
	5.2 %	5.0 %	12.99	4.30	3.02	2330	2.93	9.00	21.11	57.39
	5.5 %	7.5 %	11.50	4.00	2.88	2330	3.05	7.10	21.36	66.74
	5.5 %	10.0 %	11.50	4.25	2.71	2300	2.25	6.67	22.38	70.17

Comme on peut noter, les caractéristiques physico-mécaniques obtenues surtout pour les dosages en béton bitumineux B.A.16 réalisés ne rangent pas selon STAS SR 174-1/2009, la cause principale étant d'une part la teneur élevée en bitume, qui bien que correspondant aux limites prévues par le standard, ne mène pas à obtenir des résultats adéquats, et de l'autre part sa qualité. En ce qui concerne l'effet de la cendre volante dans les mixtures d'asphalte, les données montrent que celle-ci n'influence pas les caractéristiques physico-mécaniques mais, au contraire, a la même teneur en bitume mais avec remplacement partiel ou total du filler, elle les améliore significativement.

## Chapitre 4

Ainsi, suite à plusieurs essais de détermination de la teneur en bitume, tenant compte aussi de la propriété plus absorbante de la cendre, 0.20 % ... 0.30 % plus élevée de celle du filler, on a déterminé les dosages du tableau 4.8, et respectivement 4.9, présentés plus haut, des dosages pour lesquels on a déterminé les propriétés thermo-physiques et les caractéristiques physico-mécaniques. Le tableau 4.15 présente les résultats des essais sur l'enrobé bitumineux B.A.16 et B.A.D.25.

La vérification de la qualité des enrobés bitumineux conçus a été réalisée en comparaison avec les valeurs prévues par le standard roumain SR 174-1/2009, pour les enrobes B.A.16 et B.A.D.25. Les résultats obtenus pour les dosages réalisés sont conformes au normatif [105].

Tableau 4.15

Caractéristiques physico-mécaniques réalisées pour une teneur en bitume réduite

	Bitume (%)	Cendre (%)	Stabilité corrigée KN	Indice de fluage mm	Rapport S/I, KN/mm	Densité Kg/m <sup>3</sup>	Absorption d'eau (%)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)
B.A.16	4.6 %	0 %	12.10	4.70	2.57	2450	1.80	1.38	16.53	91.66
	4.9 %	2.5 %	12.20	4.40	2.77	2420	3.25	3.26	17.81	81.70
	5.4 %	5.0 %	12.50	4.00	3.13	2400	2.20	3.75	18.91	80.19
	6.0 %	7.5 %	12.50	3.30	3.79	2350	1.90	6.28	21.11	70.24
	6.5 %	10.0 %	13.00	3.50	3.71	2300	2.75	8.01	23.20	65.47
	7.0 %	12.5 %	13.60	3.80	3.58	2290	2.55	6.97	23.94	70.90
B.A.D.25	4.0 %	0 %	10.90	4.00	2.73	2400	3.70	5.60	17.71	68.39
	4.1 %	2.5 %	8.50	3.20	2.66	2360	3.50	8.05	19.17	58.02
	4.5 %	5.0 %	11.60	3.70	3.14	2330	3.95	9.14	20.53	55.49
	5.0 %	7.5 %	12.10	3.80	3.18	2330	3.20	8.96	20.95	57.23
	5.4 %	10.0 %	13.80	3.80	3.63	2330	4.00	7.55	21.28	64.53

Concernant l'utilisation de la cendre volante dans les mélanges bitumineux au lieu du filler, on peut observer des figures 4.22 – 4.28, que celle-ci présente un effet inverse, mais favorable aux caractéristiques mécaniques.

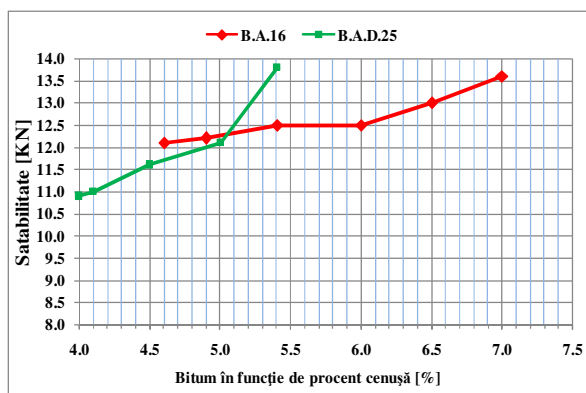


Figure 4.22. Stabilité Marshall selon les pourcentages de bitume et de cendre pour les enrobes B.A.16 et B.A.D.25

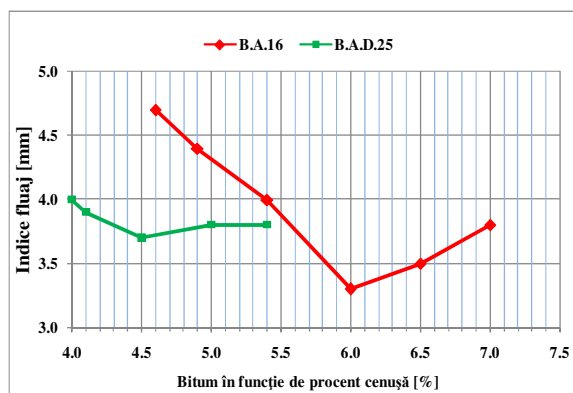


Figure 4.23. Indice de fluage Marshall selon les pourcentages de bitume et de cendre pour les enrobes B.A.16 et B.A.D.25



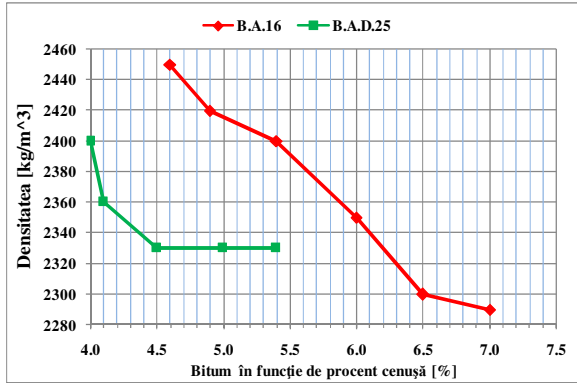


Figure 4.24. Densité des éprouvettes Marshall selon les pourcentages de bitume et de cendre pour les enrobes B.A.16 et B.A.D.25

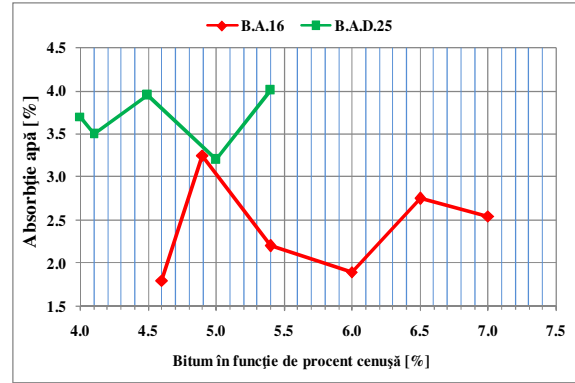


Figure 4.25. Absorption d'eau selon les pourcentages de bitume et de cendre pour les enrobes B.A.16 et B.A.D.25

En ce qui concerne les vides des enrobes réalisés, on peut dire que pour les dosages qui contiennent des cendres, ils augmentent, ce qui est normal grâce à la diminution de leur densité. Normalement, pour un contenu identique de liant, mais ayant comme matériau de remplissage le filler, le volume des vides diminue significativement et l'enrobe résultant présente une susceptibilité diminuée à l'humidité. Cet aspect peut être considéré aussi pour les dosages aux cendres grâce au caractère hydrophobe de celle-ci. Concernant les résultats obtenus, figure 4.26, pour les vides de l'enrobé et les vides du mélange de granulats, les recherches sur leur détermination ont montré que selon le mode de compaction avec le gyrocompacteur ou le compacteurs Marshall, un pourcentage de 1.7 % ... 1.6 % plus réduit du volume des vides déterminé sur des cylindres confectionnés à la presse Marshall en comparaison avec les cylindres Marshall [85], [89].

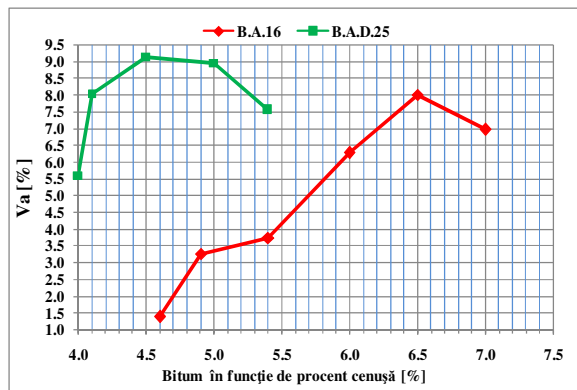


Figure 4.26. Vides de l'enrobe selon les pourcentages de bitume et de cendre pour les enrobes B.A.16 et B.A.D.25

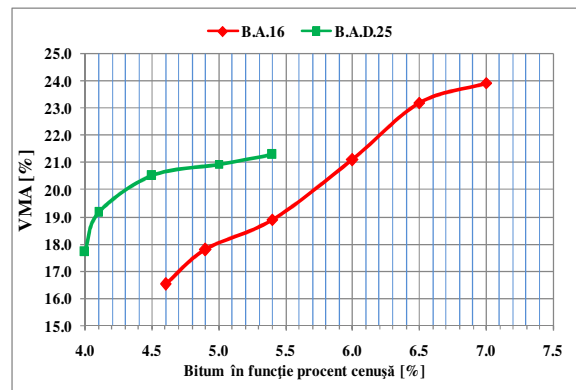


Figure 4.27. Vides du mélange de granulats selon les pourcentages de bitume et de cendre pour les enrobes B.A.16 et B.A.D.25

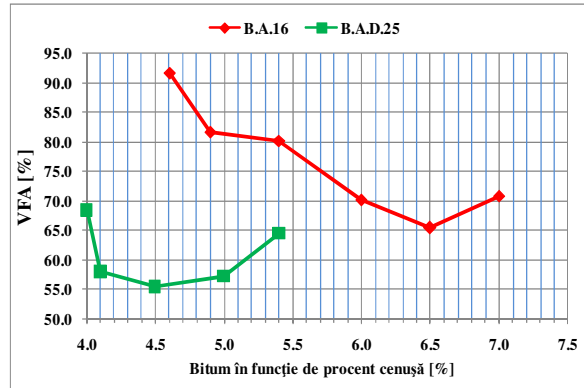


Figure 4.28. Vides remplis de bitume selon les pourcentages de bitume et de cendre pour les enrobés B.A.16 et B.A.D.25

L'un des objectifs essentiels de l'étude de laboratoire est de suivre l'effet des propriétés thermo-physiques qu'on a déterminé sur les essais physico-mécaniques. Pour mettre en évidence cet aspect, les mesurages réalisés concernant la conductivité thermique et la chaleur spécifique sur les dosages ont montré que celles-là sont supérieures quand la teneur en cendre volante augmente.

A base de ce considérant, on a déterminé en laboratoire sur les enrobés bitumineux la stabilité Marshall à des températures de 10 °C, respectivement 20 °C, plus hautes que la température d'essai selon le standard SR 174-1/2009. Les figures 4.29 et 4.30, montrent l'évolution de la stabilité Marshall et de l'indice de fluage pour l'enrobé B.A.16, selon le pourcentage de bitume et de cendre volante aux températures d'essai établies (60 °C, 70 °C et 80 °C). Ainsi, les dosages à teneur plus élevée de cendre à la température d'essai de 70 °C et 80 °C comparée à la température standard de 60 °C, perdent leur stabilité avec environ 5.0 %, pendant que les dosages à teneur plus réduite en cendres perdent leur stabilité avec 30 %.

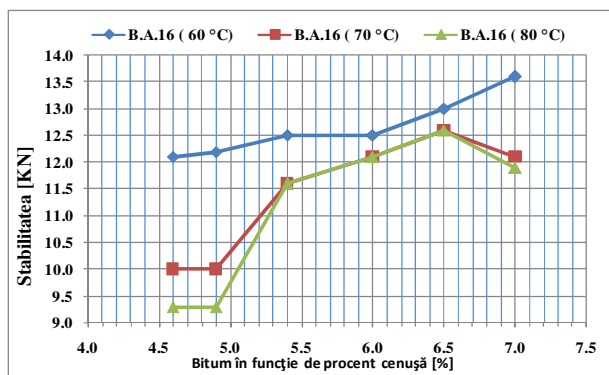


Figure 4.29. Stabilité Marshall selon les pourcentages de bitume et de cendre pour l'enrobé B.A.16 à des températures différentes

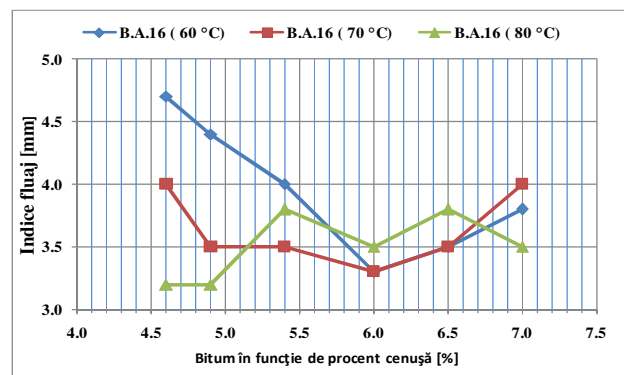


Figure 4.30. Indice de fluage selon les pourcentages de bitume et de cendre pour l'enrobé B.A.16 à des températures différentes

### **4.6. Rigidité des enrobés bitumineux réalisés**

La rigidité des enrobés bitumineux est l'une des plus importantes caractéristiques qui influencent significativement le comportement en exploitation d'une couche bitumineuse d'une chaussée routière. Cette propriété est influencée significativement par la température, et aussi par l'effet du vieillissement du liant bitumineux.

#### ***4.6.1. Méthode de détermination du module de rigidité en laboratoire***

La méthode de détermination du module de rigidité utilisée a été „L'essai par l'application d'une tension indirecte sur des éprouvettes cylindriques (IT-CY)”, selon SR EN 12697-26/2004 [109].

#### ***4.6.2. Mesurage de la rigidité***

En vue de mesurer la rigidité on applique au moins 10 impulsions de conditionnement, en vue de rendre l'équipement apte à adopter l'amplitude et la durée de chargement, qui donne la déformation horizontale spécifiée du diamètre et le temps. S'il est nécessaire, les dispositifs de mesurage de la déformation doivent être apportés au milieu approximatif de la partie des domaines de travail. On applique ultérieurement à l'éprouvette cinq impulsions de chargement et, pour chaque application de l'impulsion de chargement, on mesure et on enregistre la variation du chargement appliqué et de la déformation diamétrale horizontale avec le temps, et on détermine le facteur de surface du chargement.

#### ***4.6.3. Résultats expérimentaux de laboratoire sur le module de rigidité***

Pour le module de rigidité à 15 °C, selon la teneur en bitume et en cendre qui entre dans le mélange pour des échantillons cylindriques confectionnés avec le gyrocompacteur, selon la méthode d'essai à extension indirecte (IT-CY), figure 4.38, on constate les aspects suivants:

– pour la même teneur en bitume, mais en utilisant comme matériau de remplissage le filler, la valeur du module de rigidité est plus réduite que dans le cas de l'utilisation de la cendre;

– quand la teneur en bitume reste la même mais le filler est graduellement remplacé par la cendre, la valeur du module de rigidité augmente;

– si la teneur en bitume diminue le module de rigidité augmente, mais dans cette situation l'enrobé bitumineux est susceptible à la fatigue et vieillissement accélérés.

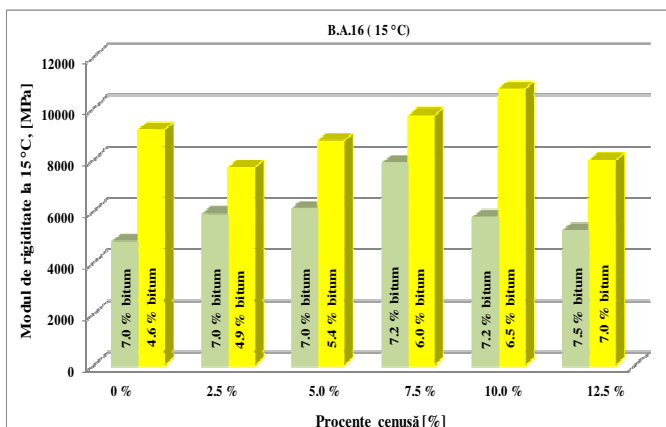


Figure 4.38. Modul de rigiditate a IT-CY selon le pourcentage de bitume et de cendre pour l'enrobé B.A.16

En ce qui concerne l'essence de cette recherche, pour déterminer le module de rigidité on suit la perte de valeur de celui-ci selon l'augmentation de la température d'essai, en tenant compte des propriétés thermo-physiques étudiées sur ces enrobés bitumineux. La figure 4.39 montre que pour une teneur plus élevée en bitume, à des températures de détermination de 5 °C respectivement 10 °C plus hautes que la température de 15 °C selon STAS SR 174-1/2009, pour la mixture avec du filler seulement, la valeur du module de rigidité diminue de jusqu'à 50 ... 60 %, figure 4.40, face aux mélanges qui contiennent aussi de la cendre volante où la valeur du module de rigidité diminue de 30 ... 40 % seulement.

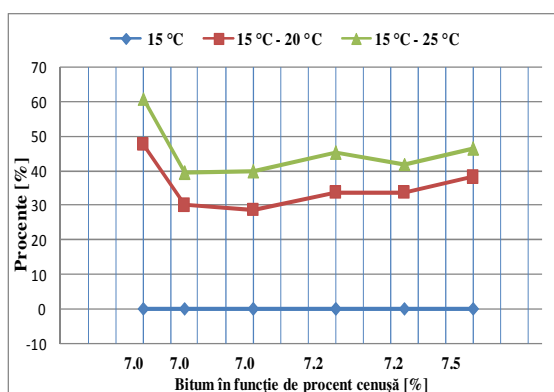


Figure 4.40. Pourcentages d'évolution du module de rigidité selon la température pour l'enrobé B.A.16 avec teneur en bitume élevée

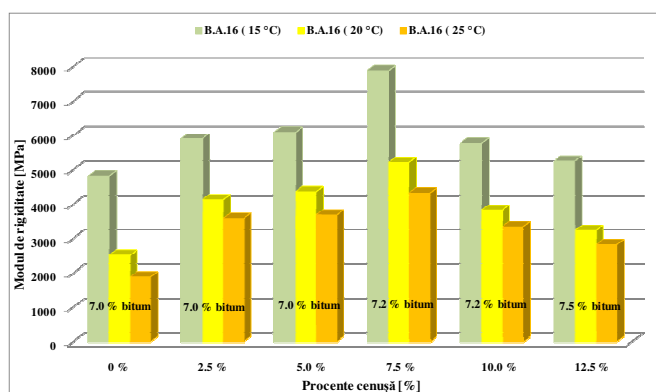


Figure 4.39. Evolution du module de rigidité à IT-CY selon le contenu élevé en bitume et en cendre pour l'enrobé B.A.16 soumis à des températures plus élevées

### 4.7. Etude des effets du fluage pour les enrobés bitumineux

L'une des dégradations principales qui apparaissent dans les chaussées souples est représentée par les déformations permanentes qui se manifestent sous forme d'irrégularités en profil longitudinal et surtout transversal, par des déformations produites par le trafic et les conditions climatiques [98], [100], [103].

Car l'orniérage est produit à cause des tensions tangentielles importantes et de courte durée, le phénomène de fluage et de détente apparaît dans l'enrobé bitumineux, avec des conséquences significatives. Ainsi, les facteurs intervenant décisivement dans l'analyse de cet état de tension très complexe sont la vitesse de déformation et la température. En pratique, le phénomène peut avoir deux aspects:

- la variation des déformations avec le temps sous chargement constant constitue un côté de ce phénomène qui s'appelle fluage;
- la variation des tensions avec le temps sous déformation constante constitue l'autre côté, nommé détente.

### ***4.7.1. Facteurs qui influencent les déformations permanentes des enrobés bitumineux***

Les déformations permanentes se développent avec l'augmentation du nombre de chargements appliqués en corrélation étroite avec les propriétés de l'enrobé bitumineux et avec l'évolution des caractéristiques de l'environnement.

Une partie des facteurs qui influencent les déformations permanentes peuvent être contrôlés ou modifiés, pendant que les autres, comme les variations saisonnières de température et d'autres facteurs externes, ne peuvent pas être contrôlés. Ainsi, l'enrobé bitumineux est soumis à une série de facteurs qui influencent l'évolution des déformations permanentes. Nous allons présenter brièvement les facteurs qui caractérisent le comportement des enrobés bitumineux de l'extérieur (trafic et conditions climatiques) [34], [104].

### ***4.7.2. Type d'essai de laboratoire appliqué pour caractériser les enrobés bitumineux concernant les déformations permanentes***

Le type d'essai utilisé pour caractériser les déformations pour les enrobés bitumineux B.A.16 et B.A.D.25 confectionnés dans le laboratoire de routes avec des teneurs différentes en cendre volante a été l'essai de compression cyclique triaxiale [108].

Selon ce type d'essai, l'échantillon est soumis à un chargement triaxial et à une pression de frottement en même temps. Ainsi l'échantillon est fermé dans une membrane étanche sur le plateau inférieur. Le plateau inférieur est perforé et conçu à permettre l'application de vacuum qui va produire une pression différenciée entre l'extérieur et l'intérieur de la membrane, ce qui apparaît de plus quant à l'essai triaxial conventionnel.

### 4.7.3. Etude en laboratoire du fluage des enrobés bitumineux réalisés par l'essai de compression cyclique

Pour les enrobés bitumineux B.A.16 l'effort de chargement a été de 300 KPa, le niveau de frètement de 0.5 *bari* et le nombre d'impulses de 1800  $\mu\text{m}/\text{m}/\text{ciclu}$ , et pour les enrobés bitumineux B.A.D.25 l'effort de chargement a été de 200 KPa, le niveau de frètement de 0.5 *bari* et le nombre d'impulses de 1800  $\mu\text{m}/\text{m}/\text{ciclu}$ , toutes les conditions étant conformes au standard SR 174-1/2009.

#### 4.7.3.1. Influence de la température sur le comportement aux déformations permanentes des couches bitumineuses

Suite aux essais à la température de 50 °C, sur l'enrobé bitumineux B.A.16 qui contient différentes teneurs en cendre, on a obtenu les résultats suivants, selon la figure 4.50. On peut ainsi mentionner le fait qu'en respectant les conditions de chargement, respectivement de température, prévues par le standard, le comportement de l'enrobé au fluage dynamique est influencé positivement par la teneur en cendre volante du mélange, à l'exception de l'enrobé bitumineux B.A.16 à 12.5 % cendre qui, grâce au contenu de 0.5 % plus élevé de bitume compare à l'enrobé B.A.16 à 0 % cendre, présente une déformation axiale d'environ 10 % plus accentuée. En vue de faire une différenciation visible du résultat concernant la déformation permanente pour la même teneur en bitume, la déformation axiale résultante pour B.A.16 avec 7.0 % bitume et 0 % cendre et de 70 % plus grande que la déformation résultante pour l'enrobé bitumineux B.A.16 à 7.0 % bitume et 12.5 % cendre. De plus, pour l'enrobé bitumineux B.A.16 à 7.0 % bitume et 0 % cendre, la déformation résultante n'a pas atteint le nombre de cycles imposé.

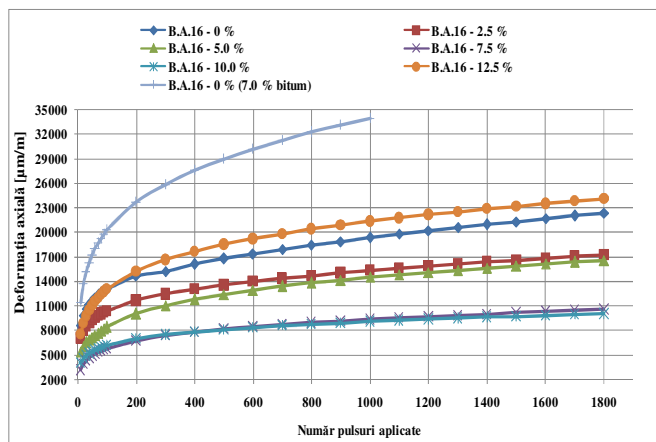


Figure 4.50. Courbes de fluage pour l'enrobe bitumineux B.A.16 à la température de 50 °C

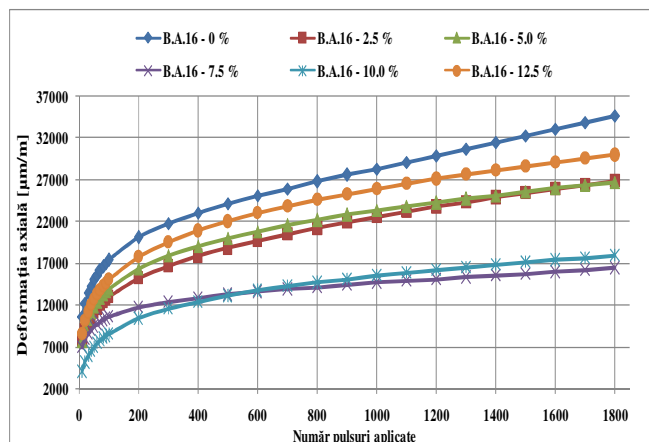


Figure 4.51. Courbes de fluage pour l'enrobe bitumineux B.A.16 à la température de 60 °C

En réalisant l'essai pour les mêmes conditions de chargement mais à une température de 60 °C, figure 4.51, on peut noter une meilleure évolution des déformations de l'enrobé bitumineux

qui contient de la cendre en comparaison avec la mixture avec du filler seulement. En faisant dans ce cas aussi une corrélation entre les caractéristiques thermiques et les déformations permanentes résultant sur cet enrobé, on remarque le fait que plus la chaleur spécifique est supérieure, plus les déformations permanentes sont réduites.

La déformation permanente (déformation spécifique résultant après 1000 cycles) à la température de 60 °C augmente en comparaison avec la température de 50 °C, pour l'enrobé bitumineux B.A.16 à différentes teneurs en bitume et en cendre, comme suit:

- 68 % pour l'enrobé B.A.16 à 0 % et 2.5 % cendre;
- 58 % pour l'enrobé B.A.16 à 7.5 % et 10.0 % cendre.

#### 4.7.4. Essai à l'orniérage

Suite à l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus par les méthodes standardisées d'essai des enrobés bitumineux, pour les dosages réalisés dans la présente recherche, étant limité par le temps passé en laboratoire pour l'essai à l'orniérage de toutes les éprouvettes, grâce aux résultats favorables obtenus sur l'enrobé B.A.16 à 7.5 % cendre, on a décidé que la recherche était assez concluante. Ainsi, pour mettre en évidence l'effet de la cendre volante du mélange, cet essai a été réalisé aussi pour un enrobé bitumineux B.A.16 à 0 % cendre. A remarquer le fait que dans ce cas la teneur en bitume a été de 6.0 % pour les deux dosages.

En laboratoire, à l'échelle réduite, l'essai consiste dans le passage d'une roue sur une plaque en enrobe bitumineux aux dimensions de 30 x 30 x 5 cm, figure 4.58. Les variables de cet essai sont la durée de chargement (nombre de cycles) et la température à laquelle l'essai a été réalisé (60 °C) [106].

La figure 4.59, montre le fait que l'enrobé bitumineux avec cendres présente une profondeur d'orniérage plus réduite que l'enrobé avec du filler seulement. Selon STAS SR 174-1/2009 la vitesse de déformation (taux d'orniérage) à l'orniérage à 1000 cycles s'encadre dans les limites données, mais la profondeur d'orniérage pour B.A.16 à 7.5 % cendre est à la limite.

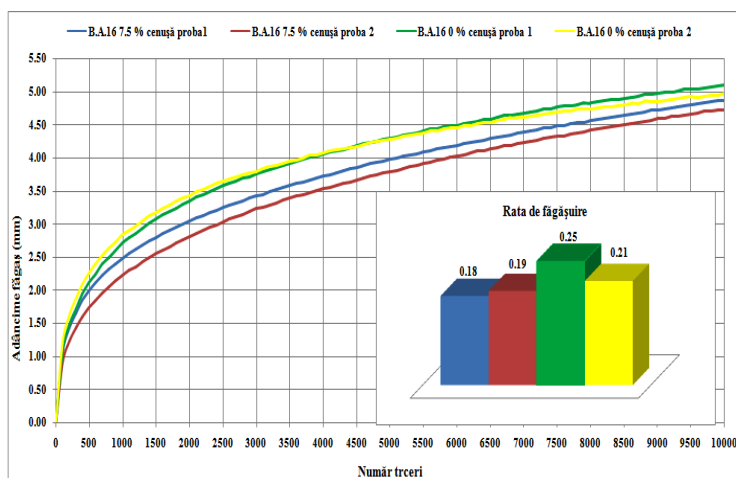


Figure 4.59. Résultats concernant la profondeur et le taux d'orniérage

### 4.8. Essai de fatigue

La fatigue peut être définie comme phénomène de rupture sous effort répété ou fluctuant, ayant une valeur maximale en général plus réduite que la résistance à la traction du matériau [49], [51].

Quant à la recherche propre, on a appliqué la méthode de détermination de la résistance à la fatigue, à la traction indirecte appliquée selon SR EN 12697 – 24/2005 [107]. Grace au fait que cet essai est conditionné par le temps, on n'a pas pu le réaliser pour tous les enrobés bitumineux conçus. Grâce aux résultats positifs obtenus suite aux essais auxquels on a soumis les enrobés bitumineux B.A.16 et B.A.D.25 à 7.5 % cendre, on a décidé que la détermination de l'évolution à la fatigue soit réalisée seulement pour ceux-ci, mais pour pouvoir mettre en évidence le résultat obtenu suite à l'essai, l'essai de fatigue a été appliqué aussi pour l'enrobé B.A.16 et B.A.D.25 à 0 % cendre.

La figure 4.60 montre que la déformation verticale apparue sur l'enrobé B.A.16 à 0 % cendre à 3600 cycles est d'environ 25 % plus accentuée. L'allure du diagramme montre une pente plus grande pour l'enrobé avec du filler face à l'enrobé avec cendre. Dans le cas de l'enrobé bitumineux B.A.16 à 0 % cendre, la pente étant plus prononcée, la rupture par fissure a lieu plus vite.

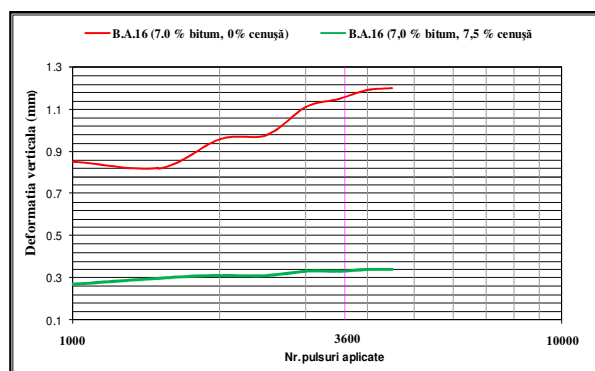


Figure 4.60. Courbes de déformation verticale résultées sur l'enrobé B.A.16 avec 0 % et 7.5 % cendre à 3600 cycles

### 4.9. Conclusions finales concernant l'utilisation de la cendre volante dans les mixtures

Les résultats expérimentaux mènent aux conclusions suivantes:

- Les propriétés thermo-physiques déterminées pour les enrobés bitumineux réalisés dans le laboratoire C.C.T.F.C présentent des aspects qui influencent leurs caractéristiques physico-mécaniques:
  - Quand ces caractéristiques thermo-physiques (conductivité thermique, chaleur spécifique) présentent une valeur inférieure, l'enrobé bitumineux conduit, respectivement emmagasine, une quantité significative de chaleur, ce qui mène à la perte plus rapide de la stabilité;
  - Quand on intervient sur ces caractéristiques thermo-physiques en introduisant dans la mixture de la cendre volante au lieu du filler, l'enrobé présente des valeurs supérieures, résultant un comportement meilleur en concordance avec la teneur en cendre;



- La comparaison de la conductivité thermique pour des enrobés qui contiennent seulement de la cendre volante ou seulement du filler comme matériau de remplissage, avec la même teneur en bitume, mène à un résultat positif en faveur du mélange à la cendre. Cela montre que, bien que du point de vue de l'absorption de chaleur, l'enrobé se trouve dans la catégorie du corps noir (il absorbe en totalité la chaleur radiée sur la surface), en utilisant de la cendre dans la mixture, cette absorption de chaleur peut être diminuée par une conductivité thermique réduite. Ainsi, en réduisant une partie de l'absorption de chaleur, pendant l'exploitation à des températures hautes, l'enrobé bitumineux ne perd plus si facilement sa stabilité;
  - La chaleur spécifique déterminée pour les enrobés bitumineux réalisés avec cendres volantes comme matériau de remplissage est supérieure. On a démontré en même temps que selon les recherches pratiques réalisées en laboratoire sur ces types d'enrobés, en fonction de la teneur en cendre et en liant, l'enrobé n'emmagasine pas tant de chaleur dans sa masse. Pratiquement, l'enrobé bitumineux qui contient des pourcentages différents de cendre, pour pouvoir emmagasiner la même quantité de chaleur que l'enrobé qui contient du filler seulement, doit être soumis à une température d'essai avec environ 10 °C ... 15 °C plus haute que la température de 25 °C à laquelle il a été soumis préalablement;
  - Du point de vue de la diffusivité et l'effusivité obtenues pour les mixtures réalisées, on observe encore une fois que, selon les pourcentages de cendre déterminés, ces propriétés thermiques attestent positivement les résultats obtenus concernant la conductivité thermique, respectivement la chaleur spécifique. De cette manière, la diffusivité montre que la chaleur se propage plus difficilement dans la masse de l'enrobé bitumineux, et l'effusivité montre une plus grande absorption de chaleur;
  - L'émissivité mesurée pour ces enrobés réalisés avec différentes teneurs en bitume, respectivement cendre volante, montre la manière correcte de détermination des propriétés thermiques. Ainsi, selon le pourcentage croissant de cendre utilisé dans la mixture, l'émissivité décroît et la réflexivité augmente. Pratiquement, l'enrobé bitumineux n'émet plus tant de chaleur. La différence entre l'émissivité de l'enrobé qui contient dans le mélange seulement du filler comme matériau de remplissage et l'enrobé qui contient de la cendre est dictée par la réflexivité;
- Les caractéristiques thermiques peuvent fournir une image claire, selon leur valeur, sur l'essai auquel l'échantillon bitumineux sera soumis. Ainsi, pour mettre en évidence l'influence

## Chapitre 4

---

de ces caractéristiques thermo-physiques par l'évolution sur les caractéristiques physico-mécaniques, les essais réalisés ont montré les résultats suivants:

- La stabilité Marshall déterminée pour des températures de 10 °C, respectivement 20 °C plus hautes que la température d'essai, grâce à la conductivité et chaleur spécifique supérieures pour l'enrobé bitumineux qui contient une teneur significative en cendre (7.5 %, 10.0 %), décroît d'environ 5.0 % comparée à 30 % pour l'enrobé avec du filler;
  - Le module de rigidité déterminé aux températures plus hautes que la température d'essai (15 °C) avec 5 °C, respectivement 10 °C, pour l'enrobé qui contient comme matériau de remplissage la cendre, décroît de 30 % comparé à 60 % pour l'enrobé qui contient du filler, à la même teneur de bitume;
  - Le fluage déterminé pour des températures avec 10 °C, respectivement 20 °C plus hautes que la température standard 50 °C, montre une augmentation de la déformation permanente d'environ 58 % pour l'enrobé bitumineux avec de la cendre et présente des caractéristiques thermiques supérieures, comparé à 68 % pour l'enrobé avec du filler et présente des caractéristiques thermique inférieures. En ce qui concerne la vitesse de fluage et la déformation permanente, en faisant une analogie entre les températures auxquelles elles ont été déterminées, on peut mettre en évidence le fait que pour des caractéristiques thermiques supérieures, la différence entre les valeurs associées à la vitesse de fluage, respectivement à la déformation permanente, est de plus en plus réduite;
  - Concernant la résistance à la fatigue, on peut tirer la conclusion que grâce à la chaleur spécifique supérieure de l'échantillon avec de la cendre, la valeur de la déformation verticale, respectivement horizontale, est plus réduite que dans le cas de l'enrobé bitumineux avec du filler.
- L'effet de la cendre volante dans les enrobés bitumineux:

Les essais réalisés sur les enrobés bitumineux dans cette recherche mettent en évidence le fait que l'utilisation de la cendre volante comme matériau de remplissage dans les enrobés bitumineux peut remplacer le filler avec succès.

Grâce à la propriété d'environ 0.2 % ... 0.3 % plus absorbante de bitume de la cendre comparée au filler, l'enrobé bitumineux résulté présente une durabilité et une résistance à la plasticité plus grandes, même si la teneur en bitume est élevée. Ainsi, en utilisant la cendre dans la mixture, on peut confirmer le fait qu'on a assuré un compromis entre la durabilité et la résistance à la déformation plastique. Toutefois, en tenant compte de la nature des sollicitations sur la chaussée

routière (conditions climatiques, trafic), selon les caractéristiques thermiques de l'enrobé avec de la cendre, on a démontré que pour une variation limite de la température les sollicitations peuvent être réduites.

Les caractéristiques physico-mécaniques déterminées par des essais ordinaires selon le STAS SR 174-1/2009 présentent une bonne évolution des enrobés bitumineux selon la teneur en cendre du mélange, les conclusions suivantes étant correctes:

- La stabilité Marshall plus grande comparée à la stabilité obtenue sur l'enrobé avec du filler;
- L'indice de fluage plus petit; quand la teneur en cendre augmente l'indice de fluage décroît;
- La densité plus réduite (grâce à la densité réduite de la cendre comparée au filler), mais selon le standard, sans distinction de la teneur en cendre déterminée, de la masse de l'enrobé bitumineux;
- Le volume de vides plus significatif grâce à la densité réduite, mais correspondant à la limite donnée par le standard, même si la teneur en bitume est plus grande;
- L'absorption d'eau dans les limites normales, même si le volume des vides est plus grand. Cette caractéristique est due à l'hydrophobie de l'eau.

En ce qui concerne les propriétés volumétriques, les vides du mélange de granulats et les vides remplis de bitume déterminés sur les enrobés bitumineux réalisés et comparés aux critères SUPERPAVE, on a constaté que seulement les enrobés avec une teneur significative en cendre et en bitume correspondent à ces critères.

- Les caractéristiques physico-mécaniques déterminées par des essais dynamiques selon les standards pour chaque essai, ont mis en évidence le caractère bénéfique de l'utilisation de la cendre volante en comparaison avec le filler:
  - Le module de rigidité déterminé pour deux enrobés à la même teneur en bitume, mais qui utilisent comme matériau de remplissage la cendre ou le filler, est 40 % plus élevé dans le cas de l'enrobé à la cendre;
  - La stabilité au fluage, déterminée aussi pour deux types d'enrobé bitumineux, l'un à la cendre et l'autre au filler, avec la même teneur en bitume, est caractérisée par une déformation permanente plus réduite pour la mixture avec cendre que pour celle au filler. Quant à la vitesse de fluage, celle-ci a atteint le maximum pour l'enrobé bitumineux au filler dès les premiers 1000 cycles de l'essai, signe que l'enrobé a perdu très rapidement sa stabilité;

## Chapitre 4

---

- L'essai d'orniérage pour l'enrobé bitumineux qui contient de la cendre en comparaison avec l'enrobé avec du filler se trouve dans les limites données par le STAS SR 174-1/2009 tant du point de vue de la vitesse de déformation à l'orniérage, que de la profondeur de l'ornière;
- L'essai de fatigue à 3600 cycles, selon les données obtenues, montre que les deux mixtures essayées correspondent de ce point de vue, mais tout de même on remarque une déformation horizontale et verticale plus petite pour l'enrobé qui contient de la cendre comme matériau de remplissage.

La totalité des essais de laboratoire réalisés et les résultats obtenus sur les enrobés bitumineux B.A.16 et B.A.D.25 conçus montre que la cendre volante peut remplacer très bien le filler dans les mixtures.

Du point de vue de l'utilisation de ces enrobés bitumineux, selon la classe technique à laquelle ils correspondent, on recommande la réalisation de secteurs expérimentaux, créant ainsi la possibilité de suivre dans le temps leur comportement à l'action du trafic et des changements climatiques. Les secteurs expérimentaux une fois surveillés, on peut soutenir avec succès l'utilisation de la cendre volante dans les enrobés bitumineux.

L'utilisation de la cendre volante dans les enrobés bitumineux présente une série d'avantages, dont on peut mentionner:

- La protection de l'environnement, car les cendres volantes représentent un déchet avec un fort impact écologique grâce aux grandes quantités résultantes pour le dépôt desquelles de larges surfaces de terrain sont retirées du circuit agricole;
- Dans les mixtures elle aide à réduire la quantité d'enrobé prévue à assurer l'épaisseur nécessaire de la couche, pendant l'exécution. Cet aspect est dû à la densité plus réduite de la cendre en comparaison avec le filler;
- Des coûts plus réduits de l'enrobé bitumineux qui contient de la cendre, grâce au fait que la cendre est un déchet qui ne peut pas être valorisé autrement.

## 5. MODELISATION DE CHAUSSEES REALISEES A BASE DES ETUDES REALISEES

### 5.1. Type et composition des chaussées routières étudiées

Les chaussées routières étudiées ont été analysées du point de vue des variations de température, pratiquement elles ont été modélisées selon les propriétés thermo-physiques en résultant, des propriétés qui présentent une influence importante sur le module d'élasticité déterminé pour les températures de 15 °C, 20 °C et 25 °C.

Le tableau 5.1 présente les chaussées routières proposées pour modélisation numérique, respectivement les températures auxquelles elles vont être étudiées.

Tableau 5.1

Nr.crt.	15°C	20°C	25°C
1. Enrobé bitumineux standard qui contient du filler. Bitume 7 % [MSF 7]	B.A.16: E=4825 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2450 \text{ kg/m}^3$ , $\lambda=1.026 \text{ W/m}^*\text{K}$ , $c=833 \text{ J/kg}^*\text{K}$	<div style="text-align: center;"> <p>Structure routière proposée pour modélisation</p> </div>	
	B.A.D.25: E=5202 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$ , $\lambda=0.556 \text{ W/m}^*\text{K}$ , $c=353 \text{ J/kg}^*\text{K}$		
2. Enrobé bitumineux conçu qui contient des cendres. Bitume 7 % [MCC 7]	B.A.16: E=7882 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2365 \text{ kg/m}^3$ , $\lambda=0.442 \text{ W/m}^*\text{K}$ , $c=306 \text{ J/kg}^*\text{K}$		
	B.A.D.25: E=8671 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2330 \text{ kg/m}^3$ , $\lambda=0.409 \text{ W/m}^*\text{K}$ , $c=267 \text{ J/kg}^*\text{K}$		
3. Enrobé bitumineux standard selon dosages déterminés (filler). Bitume 4.6 % [MSF 4.6]	B.A.16: E=9167 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2450 \text{ kg/m}^3$	B.A.16: E=5230 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2450 \text{ kg/m}^3$	B.A.16: E=4180 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2450 \text{ kg/m}^3$
	B.A.D.25: E=9708 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$	B.A.D.25: E=8420 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$	B.A.D.25: E=5601 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$
4. 3. Enrobé bitumineux conçu selon dosages déterminés (cendre). Bitume 6 % [MCC 6]	B.A.16: E=9727 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2365 \text{ kg/m}^3$	B.A.16: E=6620 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2365 \text{ kg/m}^3$	B.A.16: E=5455 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2365 \text{ kg/m}^3$
	B.A.D.25: E=8671 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2330 \text{ kg/m}^3$	B.A.D.25: E=8002 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2330 \text{ kg/m}^3$	B.A.D.25: E=4867 MPa, $\mu=0.35$ , $\rho=2330 \text{ kg/m}^3$

Pour toutes les autres couches on considère:

A.B.2: E=5000 MPa,  $\mu=0.35$ ,  $\rho=2300 \text{ kg/m}^3$

Pierre concassée: E=400 MPa,  $\mu=0.25$

Ballast: E=152 MPa,  $\mu=0.27$

Sol: E= 70 MPa,  $\mu=0.30$

## Chapitre 5

### 5.2. Etudes théoriques concernant le comportement en exploitation des chaussées réalisées

Les études sur l'impact des variations de température sur le comportement en exploitation des complexes routières et les couches bitumineuses qui les composent sont présentées dans le chapitre 2 de la thèse de doctorat et sont complétées avec la modélisation mathématique des chaussées soumises à des recherches expérimentales à base de la méthode de l'élément fini.

#### 5.2.1. Principes et hypothèses appliquées dans la modélisation mathématique

L'essieu standard de 115 kN (o.s. 115) utilisé dans le calcul de dimensionnement des chaussées routières en Roumanie présentes les caractéristiques suivantes:

- chargement sur les roues doubles: 57,5 kN;
- pression de contact: 0,625 MPa.

Ainsi on peut considérer la situation présentée dans la figure 5.1, quand le chargement est uniformément distribué, ayant la valeur de  $6,25 \text{ daN/cm}^2$ , sur une surface circulaire ayant le rayon de  $17,1 \text{ cm}$ . La distribution des chargements dans la chaussée routière se fait sous un angle de  $45^\circ$ , et au niveau supérieur du terrain de fondation (la plate-forme) on a calculé les charges uniformément distribuées et les surfaces équivalentes pour la chaussée analysée.

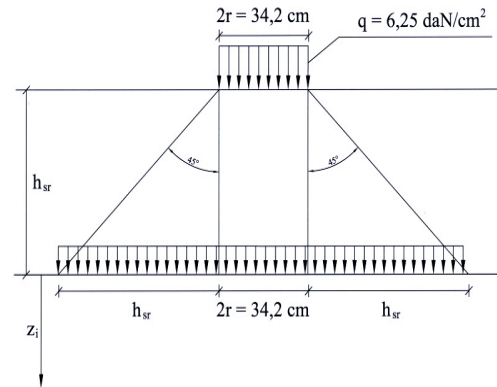


Figure 5.1. Détermination de la charge uniformément distribuée au niveau du terrain de fondation

Dans la thèse on a utilisé le programme ABAQUS 6.8-3, qui est un programme commercial de modélisation basé sur la méthode des éléments finis et qui a été appliqué largement à l'analyse des chaussées routières. En vue de valider le programme on a réalisé de nombreuses études paramétriques, disponibles dans la littérature de spécialité, qui ont compris une large gamme de chaussées en utilisant différents programmes de calcul. Les résultats obtenus à base des analyses utilisant le programme ABAQUS ont montré qu'ils sont compatibles avec ceux obtenus à base des analyses avec des programmes dédiés et des résultats expérimentaux.

ABAQUS contient aussi une série de modèles de matériaux comme celui classique, viscoélastique, elasto-plastique, introduisant différents critères de cession selon le type de matériaux.

ABAQUS fournit beaucoup de types d'éléments finis. Pour la modélisation du demi-plan infini il y a des éléments infinis utilisés à la définition des conditions de limite dans les directions

horizontale et verticale dans le terrain de fondation. La modélisation des chaussées routières a été faite en utilisant de éléments CAXA paraboliques (éléments „shell” avec huit nœuds ou la variation du champ des inconnues est du IIe ordre, ou des éléments “shell” avec quatre nœuds ou la variation du champ des inconnues est du Ier ordre).

Les éléments CAXA ont été utilisés a l’analyse parce qu’ils donnent des résultats très bons pour les modèles chargés axialement symétriquement. Ce type d’éléments est utilisé pour simuler la réponse tridimensionnelle pour résoudre une surface bidimensionnelle générée autour un axe central de symétrie. L’utilisation des éléments CAXA augmente l’efficacité des modèles en comparaison avec un modèle tridimensionnel et maintient la précision des résultats. La discrétisation du domaine en éléments finis utilisés dans l’analyse est présentée dans la figure 5.3.

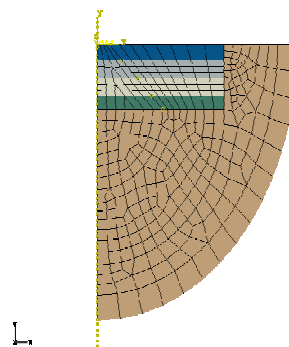


Figure 5.3. Discretisation des domaines en éléments finis

La réponse tridimensionnelle a été simulée en utilisant les éléments “axisymétrique déformables” du type CAXA, qui font partie du programme ABAQUS.

Le modèle numérique se définit simplement, en utilisant une axe de révolution, l’axe y-y, et l’introduction des conditions de symétrie (c'est-à-dire  $U1=UR2=UR3=0$ ) (ABAQUS Documentation) [2].

### 5.2.2. Facteurs d’influence considérés dans la modélisation

Les facteurs d’influence sur le comportement en exploitation des chaussées routières réalisées pris en considération dans la recherche de la modélisation des chaussées proposées dans le tableau 5.1, en plus des conditions climatiques, ont été le trafic routier (charge maximale) et les hypothèses des liaisons entre les couches routières. Dans ce sens on a étudié le comportement des chaussées routières proposées, à des sollicitations standard, dans des conditions normales d’exploitation et par des variations de température.

L’un des problèmes actuels concernant l’analyse des chaussées routières quant a leur comportement en exploitation sous l’action des sollicitations du trafic, est la coopération entre les couches. Dans la majorité des méthodes de dimensionnement, y compris les roumaines, la liaison entre les couches routières est considérée parfaite. Il est difficile a qualifier le degré de vérité de ce desideratum, mais on apprécie que cette liaison est peu probablement „parfaite” pendant toute la durée d’exploitation de la chaussée.

## Chapitre 5

De plus il y a le risque de glissement des couches l'une sur l'autre sous l'action des sollicitations du trafic. Les couches non-liées résultent dans la nécessité d'accepter une chaussée routière moins durable ou des activités d'entretien supplémentaires.

L'apparition des défections dues à une mauvaise liaison entre les couches conduira à la nécessité d'un entretien coûteux, car il faudra appliquer une couche de renforcement ou fraiser et remplacer les couches malheureusement liées. A base des aspects présentés on peut constater l'importance particulière technique et économique de la liaison des interfaces

En partant de ces observations, l'étude réalisée à l'aide de la modélisation des chaussées routières par la méthode de l'élément fini a été élaboré dans l'hypothèse de la liaison parfaite entre les couches (chaussée routière avec coopération) et à base de l'hypothèse de la non-liaison entre les interfaces (chaussée sans coopération). La figure 5.4 présente l'état de déformation dans la chaussée routière souple soumise à la modélisation dans l'hypothèse de la liaison parfaite entre les couches routières et la figure 5.5 dans l'hypothèse des couches non-liées.

Les couches routières ont été modélées à l'aide des propriétés des matériaux composant de chaque couche, présentées dans le tableau 5.1.

La figure 5.4 montre selon les résultats obtenus, que les déformations dans la chaussée routière souple sont environ trois fois plus accentuées dans le cas des interfaces libres que dans l'hypothèse des couches parfaitement liées. Au niveau supérieur des couches bitumineuses les déplacements sont 65 % plus grandes et au niveau de la plate-forme ils sont environ 57 % plus grands. Ce rapport commence à diminuer sensiblement du niveau de la plate-forme, et à la profondeur de 2.00...2.50 m les déplacements sont sensiblement égaux dans les deux hypothèses simplifiées.

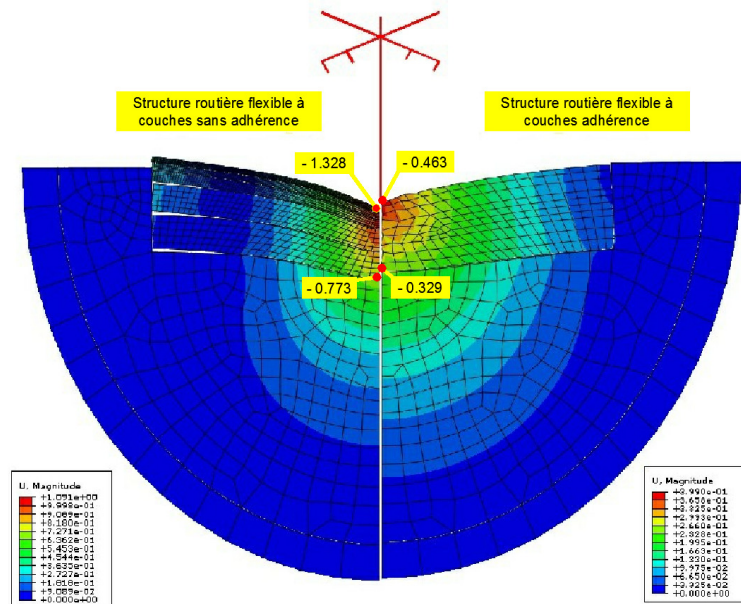


Figure 5.4. Hypothèse des couches routières parfaitement liées et des couches sans liaison (couche routière souple no. 1, selon tableau 5.1)



## 6. CONCLUSIONS FINALES

La thèse de doctorat analyse l'étude des facteurs d'influence qui, par l'intermédiaire des variations de température, mettent fréquemment en danger les chaussées routières, particulièrement les couches bitumineuses, en vue de déterminer les propriétés thermo-physiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité, effusivité et émissivité) et de concevoir et réaliser des couches bitumineuses avec des caractéristiques thermo-physiques et physico-mécaniques supérieures.

L'étude de ces facteurs qui influencent le comportement de la chaussée en exploitation a en vue de l'améliorer et le maintenir à des performances supérieures pour des périodes longues de temps. Comme connu dans la construction des routes, les couches bitumineuses de la chaussée routière souple et mixte sont les plus soumises aux sollicitations déterminées d'une part du trafic lourd et de l'autre part des conditions climatiques. Connaître l'influence de ces facteurs sur les complexes routiers et combattre cette influence par différentes méthodes peut conduire à l'élimination de certains de leurs effets négatifs durant l'exploitation.

Pratiquement, les recherches mises en évidence dans la thèse s'orientent en grande partie vers la détermination des caractéristiques thermiques de l'enrobé bitumineux, caractéristiques à l'aide desquelles on peut combattre les facteurs d'influence résultant des conditions de l'environnement auxquels les chaussées routières sont soumises continuellement dans les phases de construction, réparation, et durée de service. Grâce à la connaissance de la distribution de température dans chaque couche bitumineuse de la chaussée, les sollicitations causées par les variations de température peuvent être combattues. Les fluctuations de température de l'air journalières et saisonnières, l'intensité de la radiation solaire, les matériaux qui composent les couches de la chaussée routière, par leur géométrie et les conditions de surface, représentent les plus importants facteurs qui mettent en danger significativement la stabilité de la chaussée routière.

En ce qui concerne le succès à long terme de la conception des couches routières, il consiste dans une estimation précise du profil de température, ce qui aide beaucoup particulièrement à l'évaluation des déformations de la chaussée, à une estimation correcte du mode de calcul, et à l'évaluation journalière et saisonnière des effets de chauffage-refroidissement.

En plus de l'étude et la détermination des propriétés thermo-physiques réalisées durant le stage de doctorat réalisé en France, j'ai eu des contributions favorables à l'amélioration des caractéristiques thermiques par la conception et la réalisation des enrobés bitumineux dans la composition desquels on a utilisé, en plus des matériaux de base, de la cendre volante, en remplaçant partiellement ou totalement le filler. Cela aide à l'obtention des propriétés thermo-

physiques supérieures, des propriétés qui ont un effet favorable sur les caractéristiques physico-mécaniques. Donc, pour pouvoir suivre tous ces processus évolutifs des caractéristiques thermiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité, effusivité et émissivité) sur les caractéristiques physico-mécaniques, dans la thèse on présente une série de dosages B.A.16 et B.A.D.25 conçus et réalisés à différents teneurs en cendre volante.

Les caractéristiques physico-mécaniques des enrobés bitumineux réalisés ont été déterminées selon les standards en vigueur pour chaque essai. De plus, à l'aide des enrobés bitumineux résulté on a conçu une série de chaussées routières qui ont été modélisées mathématiquement et étudiées à des variations différentes de température, mettant ainsi en évidence l'effet bénéfique des propriétés thermo-physiques de l'utilisation de la cendre volante.

A base des études théoriques et expérimentales on a tiré une série de conclusions très intéressantes et valieuses pour le domaine de l'infrastructure routière, des conclusions qui peuvent ouvrir une série d'opportunités pour les futures recherches dans le domaine.

La thèse de doctorat est structurée sur six chapitres et la bibliographie. Les études réalisées sont mises en évidence sur les 270 pages qui contiennent 142 relations de calcul, 44 tableaux et 156 figures. L'étude bibliographique comprend un nombre de 109 titres incluant des traités de spécialité de la littérature nationale et internationale, les standards et les normes en vigueur, des revues, des publications et des ouvrages scientifiques.

## **6.2. Contributions personnelles de l'auteur et directions pour les recherches futures**

Les contributions personnelles de l'auteur dans le domaine de l'infrastructure routière par la conception et la réalisation des chaussées routières à hautes performances sont les suivantes:

- l'inventaire du réseau de routes publiques en Roumanie, selon leur degré de modernisation;
- l'élaboration d'une stratégie de développement et d'entretien des infrastructures de transport qui prend en considération le comportement et la caractérisation des enrobés bitumineux grâce aux changements climatiques;
- la réalisation d'une étude des modèles de la mécanique des chaussées routières à base desquels on a développé les méthodes de dimensionnement appliquées mondialement, en exemplifiant le mode de fonctionnement de chacun selon les sollicitations;
- la réalisation d'une étude concernant le rôle des changements climatiques sur le dimensionnement des chaussées routières en déterminant la variation de température dans les couches composantes à l'aide de l'analyse thermique;

- la détermination en première nationale des propriétés thermo-physiques des enrobés bitumineux (conductivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité, effusivité et émissivité);
- la présentation de la méthode de détermination et des relations mathématiques qui sont à la base du développement de l'équipement nécessaire à la détermination des propriétés thermo-physiques;
- l'élaboration d'une étude de détermination des caractéristiques thermiques sur des enrobés utilisés en France;
- l'amélioration des propriétés thermo-physiques en utilisant la cendre volante au lieu du filler comme matériau de remplissage dans les enrobés bitumineux;
- le développement d'un modèle analytique qui, à base des propriétés thermo-physiques, peut prédire correctement en laboratoire la distribution de la température dans les échantillons d'enrobé bitumineux;
- la proposition concernant l'utilisation du programme GEL, pour calculer la distribution de température dans une chaussée routière composée de plusieurs couches, grâce à la connaissance des propriétés thermo-physiques;
- la conception et la réalisation de certains enrobés bitumineux en utilisant comme matériau de remplissage la cendre volante de CET Timisoara au lieu du filler, par remplacement total ou partiel;
- la détermination des propriétés thermo-physiques sur les enrobés bitumineux réalisés, à l'aide de l'équipement mis à disposition par l'Université d'Artois de France;
- la mise en évidence de l'influence des propriétés thermo-physiques sur les enrobés conçus, en soulignant l'effet bénéfique de l'utilisation de la cendre volante dans les mixtures, par les caractéristiques physico-mécaniques supérieures obtenues même pour des températures plus hautes que la température d'essai;
- la réalisation de chaussées routières à hautes performances dans la lutte contre l'effet des changements climatiques et leur exploitation dans des conditions normales de trafic, en utilisant les enrobés bitumineux conçus en couche de liaison et de roulement;
- la modélisation numérique d'un complexe routier, conçu à base des recherches réalisées par l'utilisation de différents types d'enrobés bitumineux comme couche de liaison et de roulement, avec la Méthode de l'Elément Fini en deux hypothèses concernant la coopération des couches routières;

- la prise en considération de la modélisation numérique pour les chaussées routières proposées, des valeurs des modules d'élasticité dynamiques, de la densité et des caractéristiques thermiques, obtenus pour les enrobés bitumineux de la couche de roulement, la couche de liaison et recommandés pour le reste des couches composantes.

***Les directions pour des recherches futures, concernant l'influence des propriétés thermo-physiques sur les chaussées routières et l'utilisation de la cendre volante à la conception de chaussées routières à hautes performances, proposées par l'auteur, sont les suivantes:***

- la réalisation de secteurs expérimentaux en utilisant les enrobés bitumineux réalisés pour lesquels on a obtenu les meilleures caractéristiques physico-mécaniques, thermo-physiques, et la surveillance de leur comportement dans le temps;
- l'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques pour ces enrobés bitumineux étudiés par l'utilisation de bitumes spéciaux, respectivement des additifs;
- la modélisation mathématique de la chaussée routière du point de vue thermique à l'aide des propriétés thermo-physiques;
- la surveillance en laboratoire de la distribution de température à l'aide du modèle analytique constitué à base des propriétés thermo-physiques, pour une série plus large d'échantillons qui doivent être soumis à des essais différents;
- l'utilisation dans les mixtures d'autres matériaux composites qui présentent un facteur d'émission élevé et qui contribuent à l'obtention de caractéristiques physico-mécaniques supérieures;
- la continuation des recherches concernant l'utilisation de la cendre volante dans les enrobés bitumineux en combinaison avec les matériaux nouveaux qui apparaissent dans le domaine.

## BIBLIOGRAFIE

1. AASHO Road test Report 5. – Pavement Research-HRB Special Report, 1962.
2. ABAQUS Version 6.8 Documentation, 2008.
3. Abdul Rahman, S.A., Egon, T.T. – Properties of Fly Ash – Extended – Asphalt Concrete Mixes. University of Michigan, June 1983.
4. Anandakumar, K. - A study on the partition of net radiation into heat fluxes on a dry asphalt surface. Institut fur Meteorologie und Physik, Universitat fur Bodenkultur, Turkenschanzstrasse-18, A-1180 Wien, Austria.
5. Antczak, E. - Identification par impédance thermique : Application à la caractérisation des géomatériaux Thèse de doctorat à la Faculté des Sciences Appliquées de Béthune, Université d'Artois, 1996.
6. Antczak, E., Chauchois, A., Defer, D., Duthoit, B. – Characterization of the thermal effusivity of partially saturated soil by the inverse method in the frequency domain Laboratoire d'Artois Mécanique et Habitat, Faculté des Sciences Appliquées, Béthune, France Applied Thermal Engineering vol.23 pp.1525-1536 2003
7. Antczak, E., Defer, D., Elaoami, M., Duthoit, B. – Mesures fluxométriques appliquées à l'étude des caractéristiques thermophysiques d'un mortier en cours de prise XXII<sup>èmes</sup> rencontres universitaires de Génie Civil, Marne la Vallée, France 2004.
8. Arpaci, S.V., Kao, S.H. Selamet, A. – Introduction to heat transfer. NJ; 1999.
9. Badea, A.A. – Inițiere în transferul de căldură și masă, curs 2004.
10. Badea, C. – Contribuții referitoare la utilizarea deșeurilor refolosibile pentru producerea unor noi tipuri de materiale de construcții. Teză de doctorat, Timișoara, 2004.
11. Barber, E.S. – Charges de cisaillement sur les Chaussées. Extrait de la publication américaine. Publics Road, vol 32, 6 février 1963 (traduction LCPC 63.81).
12. Belc, F., Lucaci, G., Lucaci, S. – Avantaje ale aplicării de soluții tehnice radicale la lucrările de reabilitare ale drumurilor publice. Al XII-lea Congres Național de Drumuri și Poduri, CD, poziția 1.4.1., București, 2006.
13. Bota, L. – Contribuții la îmbunătățirea capacității portante la drumurile de interes județean și local utilizând tehnologia de reciclare în situ, Teză de doctorat, Cluj – Napoca 2008.
14. Bota, L. – Prezentare drumuri locale, Poiana Brașov, 2010.
15. Boussinesq, J. – Application des potentiels à l'étude de reequilibre et du mouvement des corps élastiques – Paris, Gauthier Villars, 1885.
16. Boutonnet, M., Livet, J., Deschassot, B. – Conductivité thermique apparente des matériaux d'assises traitées – Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, septembre-octobre 1974.
17. Burlacu, A. – Contribuții privind influența modului de încercare asupra aprecierii comportării mixturilor asfaltice în exploatare. Teză de doctorat, București 2011.
18. Burmister, D.M. – The theory of stresses and displacements in layered systems and applications of the design of airport runways – Proceedings of the Highway Research Board, vol 23, novembre 1943.
19. Caniard, L., Peyronne, C. – The consideration of frost in the design of asphalt pavements – Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements – Michigan, Ann Arbor, août 1977.
20. Carpenter, C.A. – A comparative study of fillers in asphaltic concrete. Public Roads, 27, 101 – 110, 1952.
21. Cerny, R., Madera, J., Podebradska, J., Toman, J., Drchalova, J., Klecka, T., Jurek, K., Rovaniokova, P. – The effect of compressive stress on thermal and hygric properties of Portland cement mortar in wide temperature and moisture ranges. Department of Structural

- Mechanics and Department of Physics of Czech Technical University, Institute of Physics of The Academy of Sciences, Czech Republic. Cement and Concrete Research vol. 30 pp. 1267 ± 1276 2000.
22. Chrisp, T., M. McCarter, W. J., Starrs, Basheer, G. P., Blewett, J. – Depth-related variation in conductivity to study cover-zone concrete during wetting and drying. Department of Civil and offshore Engineering of Heriot Watt University, and School of Civil Engineering, The Queen's University of Belfast, UK. Cement & Concrete Composites vol. 24 pp. 415-426, 2002.
  23. Christensen, D.W. Anderson, D.A. – Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data for Paving Grade Asphalt Cements, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 61, Charleston, SC, 1992.
  24. Costescu, C. – Contribuții la studiul unor factori de influență asupra stării tehnice a drumurilor din zona Banatului, Teză de doctorat, Timișoara, 2010.
  25. Costescu, I. Belc, F. – Agregate natural stabilizate în tehnica rutieră. Editura orizonturi universitare Timișoara, 1998.
  26. Çengel, Y.A. – Heat transfer-a practical approach. 2nd ed. McGraw-Hill Companies, 2002.
  27. Defer, D. – Théorie du signal appliqué à la caractérisation thermique et au contrôle non destructif des ouvrages in situ sous sollicitations aléatoires. Thèse de doctorat, Lille, 1994.
  28. Defer, D., Antczak, E., Oter-Duthoit L. – Caractérisation thermophysique d'une paroi in situ sous sollicitations naturelles. XXI<sup>èmes</sup> Rencontres Universitaire de Génie Civil, France 2003.
  29. Delacre, E. – Caractérisation thermique de matériaux poreux humides par analyse inverse dans le domaine fréquentiel. Thèse de doctorat à la Faculté des Sciences Appliquées de Béthune, Université d'Artois, 2000.
  30. Demange, D. – New applications of the flash method. Proceedings of the 15<sup>th</sup> ECTP, 5-9 september 1999, wurzburg, High Temperatures – High pressures, vol. 32, 1999.
  31. Diaconu, E., Dicu, M., Răcănel, C. – Căi de comunicații rutiere. Principii de proiectare. Editura Conspress, București, 2006.
  32. Doan, T.H. – Contribution a l'étude du comportement à la fatigue des enrobés bitumineux – Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Paris VI, 1970.
  33. Doan, T.H. – Les études de fatigue des enrobés bitumineux au LCPC – Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, decembre 1977.
  34. Dorobanțiu, S. – Influența sarcinilor pe osie asupra drumului. Revista de drumuri și poduri 47, 1998.
  35. Dubois, D., Prade, H. – Théorie des possibilités: applications à la représentation des connaissances en informatique, Masson, 1990.
  36. Elaoami, M. – Etat de l'art des techniques d'auscultation et d'instrumentation appliquées aux ouvrages. DEA en Génie Civil à l'Université d'Artois, 2001.
  37. Ferne, B. – Private Communication. Transport Research Laboratory, 1996.
  38. Fodor, G., Popescu, N. – Structuri rutiere suplă și semirigide, Dimensionare și alcătuire. Ghid Tehnic.
  39. Francken, L. – Module complexe des mélanges bitumineux. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, speciel V, decembre 1977.
  40. Francken, L., Verstraeten, J. – Methods for predicting module and fatigue laws of bituminous road mixes under repeated bending – 53 rd ann., Meet. Highw. Res. Board., Transp. Res. Rec. 1974.
  41. Fremond, M. – Mathématiques et problèmes routiers – Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, janvier-février, 1976.
  42. Han Kim, K., Jeon, S. E., Kim, J. K., Yang, S. – An experimental study on thermal conductivity of concrete. Korea Highway Corporation of Seoul, Department of Civil and Environmental Engineering, Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, South Korea, Department of Architectural Engineering, Hongik University, Chungnam, South Korea. Cement and Concrete Research vol. 33 pp. 363-371, 2003.

43. Haida, V., Marin, M., Mirea, M. – Mecanica pământurilor. Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2004.
44. Harvey, J., Eriksen, K., Sousa, S., Monismith, C. L. – Effects of laboratory specimen preparation on aggregate-asphalt structure, airvoid content measurement, and repetitive simple shear test results. Transp. Res. Rec. 1454, Transportation Research Board, Washington, D.C. 113 – 122, 1994.
45. Hermansson, A. – Mathematical model for paved surface summer and winter temperature: comparison of calculated and measured temperatures. Highway Engineering, Swedish National Road and Transport Research Institute, VTI, SE-581 95 Sweden Received 2 September 2001; accepted 7 March 2004
46. Highter, W.H., Wall, D.J. – Thermal properties of some asphaltic concrete mixes. Transp. Res Rec 1984;968:38-45.
47. Himeno, K., Watanabe, T., Maruyama, T. – Temperature distributions in asphalt pavements. In : Proceeding of the 3rd paving in cold areas, Canada/Japan science and technology agreement mini workshop, Ottawa; 1987. p. 283-54.
48. Hogg, A.H.A. – Equilibrium of a thin plate symmetrically loaded, resting on an elastic foundation of infinite depth – The London, Edimburg and Dublin Magazine and Journal of Sciences, mars 1938
49. Huang, Y.H. – Pavements Analysis and Design. Ed Prentice-Hall, Inc, 1993.
50. Incropera, F.P., Dewitt, D.P. – Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Willy & Sans, New York, 1996.
51. Jercan, S., Romanescu, C., Dicu, M. – Construcția drumurilor - Încercări de laborator. Ed. I.C.B.-Eurohot, 1992.
52. Kwang, W. K., Hussein M. E. - Variation of fracture toughness of asphalt concrete under low temperatures. Department of Agricultural Engineering, Kangwon National University, Chun Chon 200-701, South Korea.
53. Lataste, J. F. – Mesure de résistivités électriques pour l’auscultation non destructive des ouvrages en béton et béton armé. CDGA Centre de Développement des Géosciences Appliquées, Talence, France, 2003.
54. Laurențiu, N. – Îndrumător pentru laboratoarele de drumuri. A.P.D.P. România 1998.
55. LCPC – Journées d’information. Bitumes et enrobés bitumineux – Paris, LCPC, 1971.
56. LCPC – L’essai AASHO – Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1966.
57. Luca, J., Mrawia, D. – New measurement of thermal properties of Superpave asphalt concrete. J Mater Civ Eng 2005; 17:72-9.
58. Lucaci, G., Costescu, I., Belc, F. – Construcția drumurilor. Editura Tehnică, București, 2000.
59. Lucaci, G., Marc. P., Baera. C., Tirtea. A., Gruin. A., Pavlou, D. – Optimization of Design Parametres for Pipe-Lines, Vol. II, July 22-24, 2009, pp. 251-255. Proc. Recent Advances in Engineering Mechanics, Structures and Engineering Geology, EMESEG '09, Rodos (Rhodes) Island, Greece.
60. Mătăsaru, Tr., Craus, I., Dorobanțiu, St. – Drumuri, Editura Tehnică, București, 1966.
61. Marc, P., Costescu, C. – Modelarea distribuției de temperatura a mixturilor asfaltice cu ajutorul proprietăților termo-fizice pentru aplicațiile de testare in laborator. Zilele Academice Timișene, Mai 2011.
62. Marc, P., Costescu. I., – Industrial wastes used in pavement layers, Vol. II, November 26-28, 2010, pp. 220-224. Enivromental Protection”, B.EN.A, Timișoara, Romania.
63. Marc, P., Lucaci, G. – Studii experimentale privind proprietățile termo-fizice ale mixturilor asfaltice, al XIII Congres Național de Drumuri și Poduri, ISSN 1583-820X, Media Drumuri și Poduri, Poiana Brașov, Romania, Vol II, Septembrie 15 – 17, 2010, pp. 86 – 93.
64. Masumoto, M., Hoko, S., Yamamoto, M. – On the steady state method of the thermal measurement of wet material. Thermophysical properties, pp. 25-28.

65. Max, J. – Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. Masson, 1985.
66. Phukan, A. – Frozen ground engineering. Engle-Wood Cliffs (NJ): Prentice-Hall; 1985.
67. Răcănel, C. – Efectele din fluaj și oboseală asupra comportării mixturilor asfaltice. Teză de doctorat, București 2002.
68. Renken, P. – Influence of Specimen Preparation on to the Mechanical Behaviour of Asphalt Aggregate Mixtures, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona 2000.
69. Spalding, D.B. Pun, W.M. – A review of methods for predicting heat transfer coefficients for laminar uniform property boundary layer flow. Int J Heat Mass Transfer 1999; 5:239–49.
70. Sergan, T. – Mechanical evaluation of asphalt-aggregate mixtures prepared with fly ash a filler replacement. Faculty of Engineering and Architecture, Iki Eylul Campus, Anadolu University, Turkey, 2008.
71. Shen, J. – Notion d'impédance thermique appliqué au contrôle non destructif des matériaux. Thèse de doctorat à la Faculté des Sciences Appliquées de Béthune, Université d'Artois, 2003.
72. Soliman, S. – Influence des paramètres de formulation sur le comportement à la fatigue d'un enrobé bitumineux – Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Paris VI, 1975.
73. Sorohan, S. – Metoda elementelor finite în ingineria mecanică. Programe și aplicații, UPB, 1996.
74. Tan, S., Fwa, T., Chuai, C. – Determination of thermal properties of pavement materials and unbound aggregates by transient heat conduction. Test Evalu 1997; 25:15-22.
75. Verstraeten, J. – Loi de fatigue en flexion répétée des mélanges bitumineux – Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, mars-avril 1974.
76. Verstraeten, J. – Stresses and displacements in elastic layered systems – Second International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, – Michigan, Ann Arbor, août 1967.
77. Warden, W.B., Hudson, S.B. and Howell, H.C. – Evaluation of mineral filler in terms of practical pavements performance. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists 101 – 110, 1952.
78. Westergaard, H.M. – Theory of concrete pavement design – Proceedings of the Highway Research Board, 1927.
79. Wolfe, R.K., Heath, G.L., Colony, D.C. – University of Toledo time-temperature model laboratory field validation. Report No. FHWA/OH-80/006. Department of Industrial Engineering, University of Toledo, Toledo, Ohio; 1980.
80. Xiaoming, L., Shaopeng, W., Qunshan, Y., Jian, Q. – Properties evaluation of asphalt-based composites with graphite and mine powders. Key Laboratory of Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China Received 31 December 2005.
81. Xu, Q. Solaimanian, M. – Measurement and evaluation of asphalt concrete thermal expansion and contraction. J Test Evalu, ASTM 2008:36.
82. Yoder, E.J., Witcyak, M.W. – Principles of pavements design, 1975.
83. Zimmer, F.V. – Fly ash as bituminous filler. In Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Ash Utilization Symposium Pittsburgh, Pa. 10-11, March 1970, United States.
84. Zhao, J. Ai, X. Li, Y.Z. – Transient temperature fields in functionally graded materials with different shapes under convective boundary conditions. Heat Mass Transfer 2007; 43:1227–32.
85. \*\*\* – Asphalt pavements surfaces and asphalt mixtures. Transportation Research Record, No 1545, 1996.
86. \*\*\* – Comunicarea Comisiei pentru Consiliul și Parlamentul European cu privire la Strategia de Dezvoltare Durabilă, Bruxelles, decembrie 2005.
87. \*\*\* - COST 333 – Development of New Bituminous Pavement Design Method. Final Report of the Action. Office for Official Publications of the European Commission, Luxembourg, 1999.



88. \*\*\* – Cours de routes, Dimensionnement des chaussées. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1991.
89. \*\*\* – Design and Construction of Asphalt Overlays and Hot-Mix Asphalt Construction Practics. Transportation Research Record, No 1543, 1996.
90. \*\*\* – Fișă de informare nr 32 privind schimbările climatice și provocările politicii de transport durabil – [http:// www.cdep.ro](http://www.cdep.ro).
91. \*\*\* – Instrucțiuni tehnice departamentale pentru determinarea prin deflectografie și deflectometrie a capacității portante a drumurilor cu sisteme rutiere supl. Indicativ CD 31 – 2002.
92. \*\*\* – Instrucțiuni tehnice privind starea tehnică a drumurilor moderne. Indicativ CD 155 – 2001.
93. \*\*\* – Ministerul Transporturilor și Infrastructurii – <http://www.mt.ro>.
94. \*\*\* – Normativ pentru evaluarea stării de degradare a îmbrăcăminților rutiere pentru structuri supl și semirigide. Indicativ AND 540 – 1998.
95. \*\*\* – Normativ pentru prevenirea și remedierea defecțiunilor la îmbrăcămințile rutiere moderne. Indicativ AND 547 – 1998.
96. \*\*\* – Normativ privind administrarea, exploatarea, întreținerea și repararea drumurilor publice. Indicativ AND 554 – 1999.
97. \*\*\* - Note pour l'utilisation du programme Alize III. Division Structures et Caractéristiques des Chaussées, Division Matériaux Des Chaussées, Division Chaussées et Terrassements, Janvier 1987.
98. \*\*\* – Nottingham Asphalt Tester – NAT Manual, 1994
99. \*\*\* – Planul Național de Dezvoltare 2007 – 2013, <http://eufinanțare.info>.
100. \*\*\* – Shell Pavements Design Manual Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic, Ed. Shell International Petroleum Company, Limited, London, 1978.
101. \*\*\* – Strategia de întreținere și administrare a drumurilor naționale, <http://cnadnr.ro>.
102. \*\*\* – SUPERPAVE – Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing. Asphalt Institute. SUPERPAVE Series No. 1 (Sp - 1) Lexington, Kentucky, SUA, 1995.
103. \*\*\* – The Shell Bitumen Handbook, Ed. Shell Limited Co, 1990.
104. \*\*\* – XXI st World Road Congress, Kuala Lumpur, 3-9 october, 1999.
105. \*\*\* - SR 174-1/2009 – Lucrări de drumuri. Îmbrăcămiți bituminoase cilindrate executate la cald. Partea 1: Condiții tehnice pentru mixturi asfaltice.
106. \*\*\* - SR EN 12697-22. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 22: Încercarea la orneraj.
107. \*\*\* - SR EN 12697-24. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 24: Încercarea la oboseală.
108. \*\*\* - SR EN 12697-25. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 25: Încercarea la compresiune ciclică.
109. \*\*\* - SR EN 12697-26/2004. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 26: Rigiditate.
110. \*\*\* - SR EN 12697-30. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 30: Confecționarea epruvetelor cu compactorul cu impact.
111. \*\*\* - SR EN 12697-31. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 31: Confecționarea epruvetelor cu presa de compactare giratorie.
112. \*\*\* - SR EN 12697-33. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 33: Confecționarea epruvetelor cu compactorul cu placă.
113. \*\*\* - SR EN 12697-8. – Mixturi asfaltice. Metode de încercare pentru mixturi asfaltice preparate la cald. Partea 8: Determinarea caracteristicilor volumetrice ale epruvetelor bituminoase.