



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Batna 2 – Mostefa Ben-Boulaïd

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Sciences en Génie civil

Option : Mécanique des sols et interaction

Sous le Thème :

**Orniérage des chaussées souples étude
expérimentale sur un cas réel**

Présentée par :

DJENANE Mohamed

Devant le jury composé de :

Mr MAALEM Toufik	Professeur	Université Batna 2	Président
Mr DEMAGH Rafik	Professeur	Université Batna 2	Rapporteur
Mr BEZIH Kamel	MCA	Université Batna 2	Examineur
Mr SLIMANI Rachid	MCA	Université Constantine 3	Examineur
Mr REMADNA Med Sadek	MCA	Université de Biskra	Examineur
Mr BOUTRID A/aziz	MCA	Université Khenchela	Examineur
Mr HAMMOUD Farid	Professeur	Université Batna 2	Membre Invité

Juin 2022

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

REMERCIEMENTS

Je remercie tout particulièrement Mr Hamlat Smail, chercheur de l'équipe ERA36 du LRPC d'Angers, pour son accueil au sein du Laboratoire et qui m'a aidé dans la réalisation de la partie expérimentale.

Je remercie vivement les membres du jury de soutenance de cette thèse :

- Monsieur Demagh rafik, Professeur à l'Université Batna 2, qui m'a fait l'honneur d'en être rapporteur en remplacement du Professeur Hammoud Farid, pour le motif de départ en retraite. Je tiens à lui exprimer ma vive reconnaissance et ma sincère gratitude pour son aide et sa bienveillance ;

- Monsieur Hammoud Farid, ex Professeur à l'Université Batna 2, pour ses aides précieuses ;

- Monsieur Maalem toufik, Professeur à l'Université Batna 2, d'avoir accepté, de présider ce jury ;

- Monsieur Remadna Mohamed Saddek, Professeur à l'Université de Biskra, d'avoir accepté d'être examinateur de mon travail, je lui exprime ma plus vive reconnaissance ;

- Monsieur Bezih Kamel, Maitre de conférences A à l'Université Batna 2, d'avoir accepté d'être examinateur de mon travail, je lui exprime ma plus vive reconnaissance ;

- Monsieur Slimani Rachid, Maitre de conférences à l'Université Constantine 3, d'avoir accepté d'être examinateur de mon travail, Je lui exprime ma plus vive reconnaissance ;

- Monsieur Boutrid Abdelaziz, Maitre de conférences à l'Université de Khenchela, d'avoir accepté d'être examinateur de mon travail, Je lui exprime ma plus vive reconnaissance.

Enfin, je tiens à remercier profondément ma femme et mes enfants pour leur soutien et leurs encouragements incessants.

TABLE DES MATIERES

Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Etude bibliographique	3
1.1 Introduction	3
1.2 Définition de l'orniérage	3
1.3 Mécanismes de l'apparition du phénomène d'orniérage	4
1.4 Effet du trafic	6
1.5 L'état de l'art	6
1.6 Interactions véhicules-chaussées	9
1.7 Rotation des contraintes principales	9
1.8 Méthodes de caractérisation des matériaux	11
1.9 Fonctions de transfert	11
1.10 Modèles analytiques	12
1.10.1 Modèle de Lewandowski (M.Lewandowski, 2014)	12
1.10.2 Modélisation de l'essai d'orniérage de Di Benedetto	14
1.11 Conclusion	15
Chapitre 2 : Comportement des matériaux bitumineux	16
2.1 Introduction	16
2.2 Fabrication du bitume	16
2.2.1 Composition chimique et structure des bitumes	17
2.3 Les essais de caractérisation des bitumes	18
2.3.1 Pénétrabilité à l'aiguille PEN 25(NF EN 1426 - T 66-004)	19
2.3.2 Détermination de la température de ramollissement par la méthode Bille et Anneau (EN 1427)	19

2.3.3	Détermination du point de fragilité Fraass (EN 12593).....	20
2.3.4	Détermination de la résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air - Méthode RTFOT ou Rolling Thin Film Oven Test (EN 12607-1)	21
2.4	Les granulats.....	22
2.4.1	Caractéristiques physiques et propriétés des granulats.....	23
2.4.1.1	Résistance à la fragmentation (chocs) (NF EN 1097-2)	23
2.4.1.2	Résistance à l'attrition et à l'usure (NF P 18-572).....	23
2.4.1.3	Résistance au polissage (NF EN 1097-8).....	24
2.5	Les enrobés	24
2.5.1	Définition	24
2.5.1.1	Teneur en liant.....	25
2.5.2	Les essais sur les enrobés.....	26
2.5.2.1	Stabilité Marshall (NF EN 12697-34).....	26
2.5.2.2	L'essai Duriez (NF EN 12697-12).....	27
2.5.2.3	L'essai à la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) (NF EN 12697-31) ...	28
2.6	Les bétons bitumineux.....	29
2.6.1	Les essais sur les bétons bitumineux	30
2.6.1.1	L'essai de compression simple ou cyclique (NF EN 12697-25).....	30
2.6.1.2	L'essai de traction directe (NF EN 12697-24).....	31
2.7	Les lois de comportement des bétons bitumineux.....	31
2.8	Généralités sur les propriétés rhéologiques des liants bitumineux.....	32
2.8.1	Comportement des bitumes.....	32
2.9	Comportement viscoélastique.....	33
2.9.1	Viscoélasticité	33
2.9.1.1	Viscoélasticité linéaire	33
2.10	Le module complexe	34

2.10.1	Mesure de module complexe des matériaux bitumineux.....	36
2.10.1.1	Equipement 3MC (MLPC).....	36
2.11	Le comportement du matériau.....	37
2.11.1	Modèle de Maxwell.....	39
2.11.1.1	Modèle de Maxwell généralisé.....	39
2.11.2	Modèle de Kelvin Voigt.....	40
2.11.2.1	Modèle de Kelvin-Voigt généralisé.....	41
2.11.3	Le modèle de Huet.....	41
2.11.4	Modèle de Huet-Sayegh.....	42
2.11.5	Modèle 2S2P1D (Di Benedetto, ,2004).....	44
2.11.6	Influence de la formulation d'enrobé.....	46
2.11.6.1	Relation d'Ugé et al. (1977).....	48
2.11.6.2	Relation de Francken et al. (1995).....	49
2.11.6.3	Relation de Witczak et al. (1999).....	50
2.11.6.4	Modèle fonction du chargement.....	51
2.11.6.5	Modèles fonction du nombre de cycles N et de la contrainte.....	52
2.12	Conclusion.....	53
Chapitre 3 : Etude expérimentale sur l'essai d'orniérage		54
3.1	Introduction.....	54
3.2	Les différents types de WTT.....	55
3.3	Les essais d'orniérage.....	55
3.3.1	Essai Asphalt Pavement Analyzer (APA).....	55
3.3.2	L'essai Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT).....	56
3.3.3	L'essai Hamburg Wheel Tracking Device (HWDT).....	57
3.3.4	L'essai UK Wheel Tracking Device.....	60
3.3.5	Le manège de fatigue l'Ifsttar (MLPC).....	60

3.3.6	Essais de charge accélérée des chaussées Essais HVS-Nordique (VTI Suède).....	64
3.4	Etude expérimentale sur l'essai d'orniérage français (LRPC Angers).....	66
3.4.1	Caractéristiques du mélange bitumineux	66
3.4.2	Essai d'orniérage français (MLPC)	67
3.4.2.1	Principe de l'essai	68
3.4.2.2	Mise en place des éprouvettes et déroulement de l'essai.....	69
3.4.3	Résultats et discussions.....	72
3.5	Conclusion.....	79
	Chapitre 4 : Modélisation de l'essai d'orniérage français	80
4.1	Introduction	80
4.2	Modélisation de l'essai d'orniérage français	80
4.3	Empreinte de la roue.....	81
4.3.1	Les éléments du maillage du modèle	82
4.3.1.1	Les éléments finis utilisés dans le modèle	82
4.3.1.2	Maillage du modèle.....	83
4.3.1.3	Chargement et conditions aux limites	83
4.3.2	Détermination des caractéristiques du béton bitumineux	84
4.3.2.1	Ajustement de la série de Prony.....	85
4.4	Détermination des contraintes principales et directions principales	88
4.5	Résultats et discussions	90
4.6	Conclusion.....	102
	Conclusion générale	104
	Références bibliographiques	107

Liste des figures

Figure 1.1. Exemple d'une chaussée atteinte d'orniérage (Chen, 2004).....	5
Figure 1.2. Types d'ornières dans les chaussées souples (White et al. 2002).....	5
Figure 1.3. Schématisation des sollicitations induites par le trafic (Di Benedetto, 1998).....	6
Figure 1.4. Evolution des contraintes sous une charge roulante (Lekarp et Dawson, 1998)...	10
Figure 1.5. Sollicitations mécaniques dans un corps de chaussée dues au passage d'une roue de véhicule (Brown, 1974).....	11
Figure 1.6. Modélisation de l'essai d'orniérage français (M.Lewandowski, 2014).....	14
Figure 1.7. Déplacement vertical U_3 au nœud 1887 lors du passage de la roue pour 5 cycles (M.Lewandowski, 2014).....	14
Figure 1.8. Contrainte de Von Mises au centroïde de l'élément 825 lors du passage de la roue pour 5 cycles (M.Lewandowski, 2014).....	15
Figure 1.9. Géométrie du modèle utilisée dans l'essai d'orniérage (Di Benedetto, 2013)....	15
Figure 1.10. Maillage utilisé dans le modèle de l'essai d'orniérage (H. Di Benedetto et al)..	16
Figure 1.11. Etat de contrainte au centre à la surface de l'éprouvette (H. Di Benedetto et al., 2013).....	16
Figure 1.12. Etat de contrainte au centre et à mi- profondeur de l'éprouvette (H. Di Benedetto et al .2013).....	17
Figure 2.1. Procédé de fabrication du bitume (M. Faure, 1998).....	19
Figure 2.2. a) Vue macroscopique des asphaltènes. b) Schématisation de la structure. colloïdale du bitume.....	20
Figure 2.3. Essai de Pénétrabilité à l'aiguille (NF EN 1426 - T 66-004).....	21
Figure 2.4. Dispositif de mesure de la température de ramollissement.....	23
Figure 2.5. Principe de l'essai de ramollissement bille et anneau TBA (EN 1427).....	23
Figure 2.6. Le test du point de rupture de Fraass (EN 12593).....	24
Figure 2.7. Schéma du test de fragilité Fraass (EN 12593).....	24
Figure 2.8. Essai RTFOT Rolling Thin Film Oven (EN 12607-1).....	25
Figure 2.9. Machine d'essai de stabilité Marshall (ASTM D6927).....	30
Figure 2.10. Principe de compactage de la presse à cisaillement giratoire.....	32
Figure 2.11. Domaines de comportement pour les mélanges bitumineux, ((ϵ) amplitude de déformation - N nombre de cycles) (Di Benedetto et Corté, 2005).....	33
Figure 2.12. Différence entre la fatigue et la déformation permanente (orniérage). "T" traction et "C" compression (Di Benedetto et al, 1998).....	33
Figure 2.13. Essai de traction direct (F. Olard, 2000).....	34
Figure 2.14. Classes de comportement des bitumes en fonction de ϵ et T (Olard, 2000).....	36
Figure 2.15. Expérience d'effacement et réponse du matériau en contrainte.....	36
Figure 2.16. Illustration du comportement linéaire des matériaux (William N. Findley, 1976).....	37

Figure 2.17. Représentation du module complexe.....	38
Figure 2.18. Sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé.....	39
Figure 2.19. Essai de mesure du module complexe des bétons bitumineux MLPC (NF EN 12697-26).....	39
Figure 2.20. Cycle de chargement sinusoïdal sur un corps élastique et viscoélastique linéaire. La surface de l'ellipse correspond à l'énergie dissipée du corps viscoélastique (Berthe-Julienne DONGMO-ENGELAND, 2005).....	41
Figure 2.21. Modèle de Maxwell.....	42
Figure 2.22. Modèle de Maxwell généralisé.....	43
Figure 2.23. Modèle de Kelvin Voigt.....	44
Figure 2.24. Modèle de Kelvin-Voigt généralisé.....	44
Figure 2.25. Modèle de Huet (Huet, 1963).....	45
Figure 2.26. Modèle de Huet Sayegh (Huet, Sayegh, 1965).....	46
Figure 2.27. Courbes de module complexe des modèles de Huet et de Huet-Sayegh dans le plan Cole-Cole. (Olard, 2004).....	46
Figure 2.28. Modèle 2S2P1D (Di Benedetto, Olard, 2004).....	47
Figure 2.29. Comparaison entre les résultats expérimentaux de module complexe de (l'enrobé au liant 50/70 et du modèle général "2S2P1D" correspondant (Ts=10°C)(Olard, 2004).....	49
Figure 2.30. Nomographe pour déterminer le module de rigidité du bitume (Van de Poel, 1955).....	51
Figure 2.31. Relation entre l'angle de phase des enrobés et l'angle de phase des liants (Franken, 1996).....	53
Figure 3.1. L'essai Asphalt Pavement Analyzer (APA) (AASHTO 340-10).....	60
Figure 3.2. Essai Georgia Loaded Wheel (GLWT).....	61
Figure 3.3. Equipement du Hamburg Wheel-Tracking Device (HWTD) HWRT (Ludomir Uzarowski,2007).....	62
Figure 3.5. Schéma du modèle d'orniérage de l'essai HWRT utilisé dans ABAQUS (Ludomir Uzarowski, 2007).....	63
Figure 3.6. Empreinte de la roue de l'essai HWRT (Ludomir Uzarowski, 2007).....	63
Figure 3.7. Section déformée de l'éprouvette après 20,000 Passes (Ludomir Uzarowski, 2007).....	63
Figure 3.8. Equipement de UK Wheel Tracking Device.....	64
Figure 3.9. Manège de fatigue de l'Ifsttar (MLPC).....	65
Figure 3.10. Vue aérienne des trois pistes d'essai.....	66
Figure 3.11. Cuvelage pour la reconstitution de la nappe phréatique.....	66
Figure 3.12. Configuration d'essieux tridem à roues simples.....	68
Figure 3.13. Essais de charge accélérée des chaussées Essais HVS-Nordique (VTI Suède)..	69
Figure 3.14. Vue intérieure du chariot d'essai et de la roue de chargement.....	70
Figure 3.15. Courbe granulométrique du mélange granulaire.....	71
Figure 3.16. L'orniéreur MLPC français (LCPC).....	72

Figure 3.17. Positions des points de mesurage et des profils en travers sur l'éprouvette.....	73
Figure 3.18. Variation sinusoïdale de la vitesse de déplacement de la roue.....	74
Figure 3.19. Ornières du profil en travers N°1 de l'éprouvette 41.....	77
Figure 3.20. Ornières du profil en travers N°2 de l'éprouvette 41.....	77
Figure 3.21. Ornières du profil en travers N°3 de l'éprouvette 41.....	78
Figure 3.22. Ornières du profil en travers N°4 de l'éprouvette 41.....	78
Figure 3.23. Ornières du profil en travers N°5 de l'éprouvette 41.....	79
Figure 3.24. Déformations permanentes du profil en long de l'éprouvette 41.....	79
Figure 3.25. Ornières du profil en travers N°1 de l'éprouvette 3.....	80
Figure 3.26. Ornières du profil en travers N°2 de l'éprouvette 3.....	80
Figure 3.27. Ornières du profil en travers N°3 de l'éprouvette 3.....	81
Figure 3.28. Ornières du profil en travers N°4 de l'éprouvette 3.....	81
Figure 3.29. Ornières du profil en travers N°5 de l'éprouvette 3.....	82
Figure 3.30. Déformations permanentes du profil en long de l'éprouvette 3.....	82
Figure 3.31. Courbes de corrélation des profondeurs des ornières.....	83
Figure 4.1. Géométrie de l'essai à l'orniéreur français.....	85
Figure 4.2. Géométrie de l'empreinte de la roue (LRPC Angers France).....	86
Figure 4.3. Maillage du modèle de l'essai d'orniérage.....	87
Figure 4.4. Variation du module de relaxation dans le domaine temporel.....	91
Figure 4.4. Variation du module élastique dans le domaine fréquentiel.....	91
Figure 4.6. Notation des composantes du tenseur S_{ij}	92
Figure 4.7. Angles de rotation des contraintes principales.....	94
Figure 4.8. Variation des composantes du tenseur de contrainte du nœud N9539 lors du déplacement de la roue.....	96
Figure 4.9. Variation des composantes du tenseur de contrainte du nœud N9551 lors du déplacement de la roue.....	97
Figure 4.10. Contrainte verticale S_{22} roue au milieu de l'éprouvette ainsi que le positionnement des nœuds étudiés.....	97
Figure 4.11. Variation des composantes du tenseur de contraintes de 4 cycles de la roue au nœud N9539.....	98
Figure 4.12. Variation de la rotation de l'angle α_{11} en fonction de la contrainte principale S_I	99
Figure 4.13. Variation de la rotation de l'angle α_{22} en fonction de la contrainte principale S_{II}	99
Figure 4.14. Variation de la rotation de l'angle α_{33} en fonction de la contrainte principale S_{III}	100
Figure 4.15. Rotation des contraintes principales en fonction de la direction du mouvement de la roue.....	100
Figure 4.16. Variation de l'angle de rotation du vecteur déplacement et l'angle de rotation de la contrainte principale S_{II} du nœud N9539 lors du déplacement de la roue.....	101
Figure 4.17. Variation des composantes du tenseur de déformation du nœud N9539 lors du	

déplacement de la roue.....	102
Figure 4.18. Variation des composantes du tenseur de déformation du nœud N9551 lors du déplacement de la roue.....	102
Figure 4.19. Variation du déplacement vertical à différentes profondeurs lors du déplacement de la roue.....	103
Figure 4.20. Contrainte verticale S_{22} roue au milieu de l'éprouvette.....	103
Figure 4.21. Déplacement total roue au milieu de l'éprouvette.....	104
Figure 4.22. Contrainte transversale S_{11} roue au milieu de l'éprouvette.....	105
Figure 4.23. Contrainte longitudinale S_{33} roue au milieu de l'éprouvette.....	105
Figure 4.24. Rotation des contraintes principales avant le passage de la roue sur le nœud N9539.....	106
Figure 4.25. Rotation des contraintes principales lors du passage de la roue sur le nœud N9539.....	106
Figure 4.26. Rotation des contraintes principales après le passage de la roue sur le nœud N9539.....	107

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Catégories de bitumes.....	25
Tableau 2.2. Classification des granulats.....	26
Tableau 2.3. Coefficients Los Angeles.....	26
Tableau 2.4. Valeurs Micro-Deval.....	27
Tableau 2.5. Valeurs C.P.A.....	27
Tableau 2.6. Modèles fonction du chargement.....	56
Tableau 2.7. Modèles fonction du nombre de cycles et de la contrainte.....	57
Tableau 3.1. Mesure des ornières de l'éprouvette N°3.....	75
Tableau 3.2. Mesure des ornières de l'éprouvette N°41.....	76
Tableau 4.1. Mesures du module complexe à une température de 20°C.....	89
Tableau 4.2. les paramètres de la série de Prony du béton bitumineux.....	92

Liste des notations et abréviations

Symbole	Définition
ω	Pulsation
$ E^* $	Norme du module complexe
$\dot{\epsilon}$	Vitesse de déformation
\vec{n}	Cosinus directeurs des contraintes principales
Σ	surface spécifique de granulat
2S2P1D	2 ressorts, 2 éléments à fluage parabolique et 1 amortisseur
3MC	Mesure de module complexe de matériau bitumineux
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
APA	Asphalt Pavement Analyzer
ASTM	American Society for Testing and Materials
C.P.A	Coefficient de polissage accéléré
CAE	Computer-aided engineering
CEN	Comité européen de normalisation
E^*	Module complexe d'élasticité
E'	Partie réelle du module complexe
E''	Partie imaginaire du module complexe
E_0	Module élastique d'équilibre
E_∞	Module élastique à l' infini
EN	Norme européenne
f	Pourcentage de filler
FWD	Falling Weight Deflectometer
FWTT	French Wheel Tracking Test
G	Pourcentage de gros gravillons
g	Pourcentage de petits gravillons
$G(t)$	Module de relaxation de cisaillement
G^*	Module complexe de cisaillement
G'	Module élastique de cisaillement
G''	Module de perte de cisaillement
G_0	Module élastique de cisaillement d'équilibre

G_{∞}	Module élastique de cisaillement à l'infini
g_i	Coefficient de Prony
GLWT	Georgia Loaded Wheel Test
h, k	Coefficients du modèle de Huet
HVS	Heavy vehicle simulator
HWTD	Hamburg Wheel-Tracking Device
I_1, I_2, I_3	Invariants du tenseur de contrainte
Ifsttar	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux ex LCPC
$J(t)$	Fonction de fluage parabolique
k	Module de richesse
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées
MLPC	Matériels de laboratoire des ponts et chaussées
N	Nombre de cycles
PCG	Presse à Cisaillement Giratoire
PEN 25	Pénétrabilité de l'aiguille à 25°C
P_N	Profondeur de l'ornièrè après N cycle
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
S	Pourcentage de gros sable
s	Pourcentage de sable fin
S_I, S_{II}, S_{III}	Contraintes principales
S_{ij}	Tenseur des contraintes
TBA	température de ramollissement bille et anneau
TL	Teneur en liant
u_i	Vecteur déplacement
VEL	Viscoélasticité linéaire
W	Travail dissipé par cycle de chargement
WTT	Wheel tracking test
α	Facteur dépendant du type de granulats
α_{ij}	Angles de rotation des contraintes principales
δ	Angle de déphasage
δ_{ij}	Symbole de Kronecker
$\varepsilon(t)$	Déformation en fonction du temps
ε_0	Amplitude de la déformation

ε_{ij}	Tenseur des déformations
ε_p	Déformation permanente
η	viscosité
λ	Scalaire
$\sigma(t)$	Contrainte en fonction du temps
σ_0	Amplitude de la contrainte
τ_i	Temps de relaxation du $i^{\text{ème}}$ élément

ملخص

الوظيفة الرئيسية للطريق المعبد هي توزيع الحمولة الناجمة عن حركة المرور على طبقاته المختلفة. وفي حين أن طرق تصميم الطريق المعبد المرن تقوم على حساب خطي مرن ، فإن السلوك الحقيقي لمختلف الطبقات غير خطي ومرن إلى حد كبير. ويمكن أيضا، في بعض الحالات، أن تكون بلاستيكية ولزجة. ويهدف هذا البحث إلى تطوير نموذج رقمي ثلاثي الأبعاد يماثل إلى حد كبير ظروف الاختبار FWTT وسيكون للنموذج بصمة هندسية حقيقية في العجلة (بدلا من شكل مستطيل). وكبديل للتحميل التدريجي، فإن حركة العجلة أثناء مرورها فوق العينة سوف تحاكي بالازاحة الأفقية. وتمثل هذه الخصائص الهامة للنموذج الجديد والفرق الكبير بين البحوث الحالية والدراسات السابقة. ويستخدم النموذج الحالي، الذي يستند إلى طريقة العناصر المحدودة، برنامج ABAQUS ونموذج تكوين لزجي مرن. وقد وصفت الخصائص الزجية للمواد في سلسلة برونني، التي تسمى أيضا معامل الاسترخاء، وهي دالة زمنية. يمكن تعريف هذا المعامل في معظم برمجيات الهندسة بمساعدة الكمبيوتر (CAE). يتم شرح الإجراء لحساب سلسلة Prony من البيانات التجريبية. تتفق النتائج التي تم الحصول عليها مع سعة إشارة الضغط، ومبدأ تدوير الإجهاد، والتناوب الكلي للإزاحة عندما يقترب الحمل من العقدة التي تم النظر فيها والتي تقع في منتصف العينة.

الكلمات المفتاحية: الطريق المعبد؛ FWTT؛ ABAQUS؛ viscoelastic؛ سلسلة برونني؛ دوران؛ الإجهاد.

Résumé :

La fonction principale d'une chaussée est de diffuser la charge induite par le trafic sur ses différentes couches. Bien que les méthodes de conception des chaussées souples soient basées sur un calcul élastique linéaire, le comportement réel des différentes couches est hautement non linéaire et élastique. Elles peuvent aussi, dans certains cas, être plastiques et visqueuses. Ce travail vise à développer un modèle numérique tridimensionnel très proche des conditions d'essai à l'orniérage français (FWTT). Le modèle sera doté d'une empreinte de roue à géométrie réelle (plutôt qu'une forme rectangulaire). En remplacement du chargement incrémental, le mouvement de la roue lors de son passage sur le l'éprouvette sera simulé par un déplacement horizontal. Ces deux caractéristiques importantes du modèle représentent la nouveauté et la différence majeure entre la recherche actuelle et les études précédentes. Le modèle est basé sur la méthode des éléments finis, utilise le logiciel ABAQUS avec un modèle constitutif viscoélastique. Les propriétés béton bitumineux ont été décrites par la série de Prony, également appelée module de relaxation, qui est une fonction du temps. Ce paramètre peut être défini dans la plupart des logiciels d'ingénierie. La procédure de calcul de la série de Prony à partir de données expérimentales a été détaillée. Les résultats obtenus concordent avec l'amplitude du signal de contrainte, les rotations des contraintes principales et la rotation du déplacement total lorsque la charge s'approche du nœud considéré qui est situé au milieu de l'éprouvette.

Mots-clés : Chaussée, FWTT, ABAQUS, Viscoélastique, Série de Prony, Rotation, Contrainte.

Abstract

The main function of a pavement is to distribute the traffic-induced load over its different layers. While the flexible pavement design methods are based on a linear elastic calculation, the real behavior of the different layers is highly non-linear and elastic. They can also, in some cases, be plastic and viscous. This research aims to develop a three-dimensional numerical model that is closely similar to the test FWTT conditions. The model will have a real geometry wheel footprint (rather than a rectangular shape). As a substitute for incremental loading, the wheel movement during its passage over the specimen will be simulated by a horizontal displacement. These important characteristics of the model represent the novelty and the major difference between the current research and previous studies. The current model, which is based on the finite elements method, uses Abaqus software and a viscoelastic constitutive model. The materials' viscoelastic properties have been described by the Prony series, also called the relaxation modulus, which is a function of time. This parameter can be defined in most computer-aided engineering (CAE) software. The procedure for calculating the Prony series from experimental data is explained. The results obtained agree with the stress signal amplitude, the stress rotation principal, and the total displacement rotation when the load approaches the node considered and located in the middle of the specimen.

Keywords: Pavement, FWTT, ABAQUS, Viscoelastic, Prony Series, Rotation, Stress.

Introduction Générale

Les structures de chaussées routières sont soumises, en service, à des sollicitations très sévères. L'augmentation du trafic, conjuguée avec les conditions climatiques ont une influence importante sur le comportement des matériaux de chaussées. Dans Notre pays, les chaussées subissent de grandes amplitudes thermiques (la zone des hauts plateaux) et sont donc soumises au phénomène de l'orniérage et de fissuration thermique. Ces dernières décennies, ces phénomènes se sont aggravés par l'augmentation des charges supportées par les structures de chaussées, cette augmentation étant due en particulier à l'accroissement du trafic poids lourds, car la majorité de la marchandise est acheminée par voie routière, s'ajoutant à cela le non-respect du poids autorisé par essieu des camionneurs.

Le secteur des Travaux Publics est un secteur stratégique dans le développement économique. L'édification des infrastructures de communications et de transports a permis, en effet, aux nations de se développer et de tisser des liens entre elles. La construction, l'entretien et l'exploitation des routes, font appel à des considérations politiques, économiques, financières et sociales mais aussi à des techniques qui varient en harmonie avec le développement des sociétés. De ce fait, le rôle qui est dévolu au secteur, découle de la volonté de l'Etat de jeter les fondements d'une stratégie nationale de développement qui se veut durable. Actuellement, le patrimoine routier national se compose de plus de 127 000 km de routes dont plus de 96 000 Km revêtues ; 1216 km autoroute Est-Ouest dont 1129 km livrés à la circulation, le tronçon Drean-frontière tunisienne est en voie de parachèvement (source ministère des travaux publics algérien).

Ce travail de thèse a pour but de développer un modèle numérique pour l'essai d'orniérage français afin de mieux comprendre la cinématique de la rotation des contraintes principales et le vecteur déplacement lors du passage de la roue ainsi qu'une étude expérimentale sur une grave bitume Le travail de thèse comporte quatre parties.

La première partie comporte une revue des travaux réalisés sur l'orniérage, et plus particulièrement ceux consacrés aux causes, mécanismes de formation, facteurs d'influence et approches de modélisation.

La seconde partie traite le comportement des matériaux bitumineux, en abordant dans premier lieu les différents essais les caractérisant puis les paramètres nécessaires à notre modèle.

La troisième partie est consacrée à l'étude expérimentale de l'essai d'orniérage français, sur une grave bitume de grade 3 GB3, réalisée au Laboratoire Régionale des Ponts et Chaussées d'Angers (France), précédée d'un rappel détaillé des différents essais d'orniérage utilisés dans le monde, en mettant en évidence les travaux de recherches réalisés par différents auteurs ainsi que les modélisations publiées sur ce thème.

La dernière partie concerne une modélisation de l'essai d'orniérage français, en prenant en considération la forme réelle de l'empreinte roue et un comportement viscoélastique des matériaux bitumineux. Cette simulation a été réalisée avec le code de calcul ABAQUS et a pour objectif la détermination des angles de rotation des trois contraintes principales lors du passage de la roue ainsi que leurs sens.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.1 Introduction

Les chaussées souples sont constituées de matériaux bitumineux et granulaires. La première chaussée en asphalte aux États-Unis a été construite en 1870 à Newark, dans le New Jersey. Le premier revêtement en feuille d'asphalte, qui est un mélange à chaud de béton bitumineux avec du sable propre, anguleux et calibré et un filler minéral, a été posé en 1876 sur Pennsylvania Avenue à Washington, D.C. En 1902, en Europe un ancien médecin colonial suisse, du nom de Ernest Guglielminetti surnommé « Docteur Goudron », testait la première chaussée goudronnée sur une corniche de Monte-Carlo. Au nom du combat contre la poussière, il allait accompagner la révolution de l'automobile.

1.2 Définition de l'orniérage

L'orniérage est défini comme étant un mode de dégradation, il est dû, à l'accumulation des déformations permanentes sous le chargement répété des essieux, dans la structure de la chaussée, il existe deux types d'ornières, à grand rayon qui descend jusqu'au sol support et à petit rayon qui concerne la couche bitumineuse. Les phénomènes de l'orniérage affectent nos routes et mettent en danger la vie des usagers. Il touche même des chaussées récentes et des ornières ont été constatées sur différentes chaussées ; juste avant les ralentisseurs (zones de freinage) ; dans des pentes raides où il y a un trafic de poids lourd important (vitesse faible) ; dans des sections en alignement droit et en courbe avec trafic canalisé. Les effets négatifs des déficiences qui en résultent sur le confort et la sécurité des usagers de la route rendent nécessaire la conception des structures et des couches de la route de manière à ce que les caractéristiques de surface ne descendent pas en dessous de certaines valeurs seuils pendant toute la durée de vie prévue de la chaussée.

Les méthodes de dimensionnement des chaussées souples sont basées sur un calcul élastique linéaire alors que le comportement réel des différentes couches est fortement non linéaire, plusieurs auteurs ont traité ce problème avec des lois de comportement élastoplastique et viscoélastique-viscoplastique, les effets de l'historique des contraintes sont une conséquence de la densification progressive et du réarrangement des particules sous l'application de contraintes répétées. Des essais ont été menés sous le TCR (triaxial à chargements répétés) pour différents chemins de contraintes.

1.3 Mécanismes de l'apparition du phénomène d'orniérage

Il convient de distinguer trois mécanismes de déformation permanente qui conduisent à des irrégularités de surface et notamment à l'orniérage (figure 1.1).

Le premier est le résultat de la déformation de chacune des couches (y compris la couche de fondation) sous-jacentes aux couches bitumineuses, en raison de contraintes induites par la charge qui dépassent la résistance du matériau.

On parle alors d'orniérage structurel, et les ornières qui en résultent sont larges et ne présentent pas de bosses sur les côtés (profil en V).

Le second mécanisme est le résultat de la déformation isolée de la ou des couches bitumineuses en raison de contraintes induites par la charge qui dépassent le seuil de résistance du matériau.

On parle alors d'ornières d'écoulement (ou d'instabilité), et les ornières qui en résultent présentent des bourrelets sur leurs côtés (profil en W sous l'action de pneus jumelés, et asymétrique sous l'action de pneus simples à base large). Les ornières d'écoulement se forment le plus souvent dans les pentes ascendantes, à l'approche des carrefours et dans les virages et les ralentisseurs

Le troisième mécanisme est le résultat de l'usure réelle de la chaussée due à l'utilisation de pneus cloutés en hiver.

On parle alors d'orniérage par usure, et les ornières qui en résultent ont un profil transversal caractérisé par une discontinuité nette.

Ces trois mécanismes peuvent agir indépendamment les uns des autres ou simultanément (figure 1.2).



Figure 1.1. Exemple d'une chaussée atteinte d'orniérage (Chen, 2004)

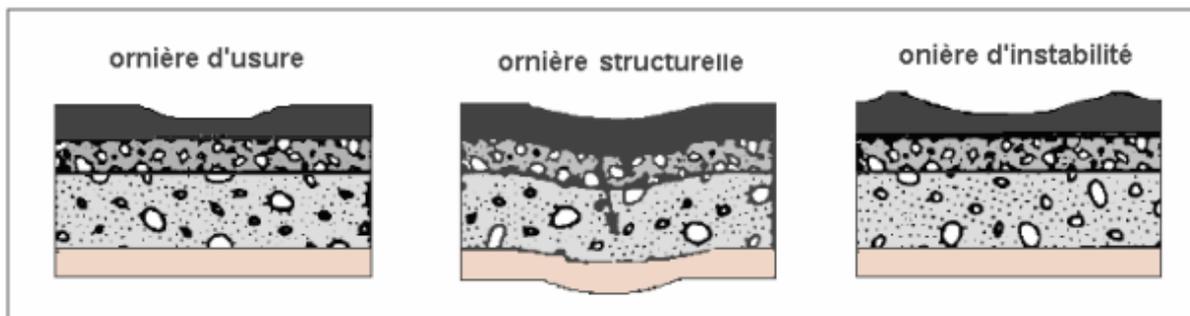


Figure 1.2. Types d'ornières dans les chaussées souples (White et al. 2002)

Les principaux mécanismes de dégradation pouvant affecter les routes revêtues de bitume sont, d'une part, les mécanismes de déformation permanente, dont la présence est révélée par les irrégularités du profil longitudinal et surtout par la déformation du profil transversal dans les trajectoires des roues (ornières), et, d'autre part, les mécanismes de fissuration, qui réduisent la portance de la chaussée ainsi que son imperméabilité (infiltration éventuelle d'eau entraînant une perte supplémentaire de portance).

1.4 Effet du trafic

Chaque couche de chaussée subit des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic Figure 1.3. Le calcul des efforts et des déformations qui s'effectue traditionnellement en considérant des multicouches élastiques linéaires isotropes, nécessite, en premier lieu, la connaissance du module de Young et éventuellement du coefficient de Poisson. C'est précisément à partir de ces deux coefficients, que les logiciels Alizé ou encore Ecoroute basés sur le modèle de (Burmister, 1943) permettent la résolution du problème considéré comme élastique.

Les tractions répétées à la base des couches, sous l'effet du passage des véhicules, créent des micro-dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Il s'agit du phénomène de fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux. Une fissure peut également apparaître et se propager dans la chaussée.

Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent créer des déformations permanentes qui induisent parfois un orniérage à la surface de la chaussée. Cet orniérage peut être dû au tassement des couches de béton bitumineux mais peut aussi être dû éventuellement aux déformations de couches inférieures non traitées.

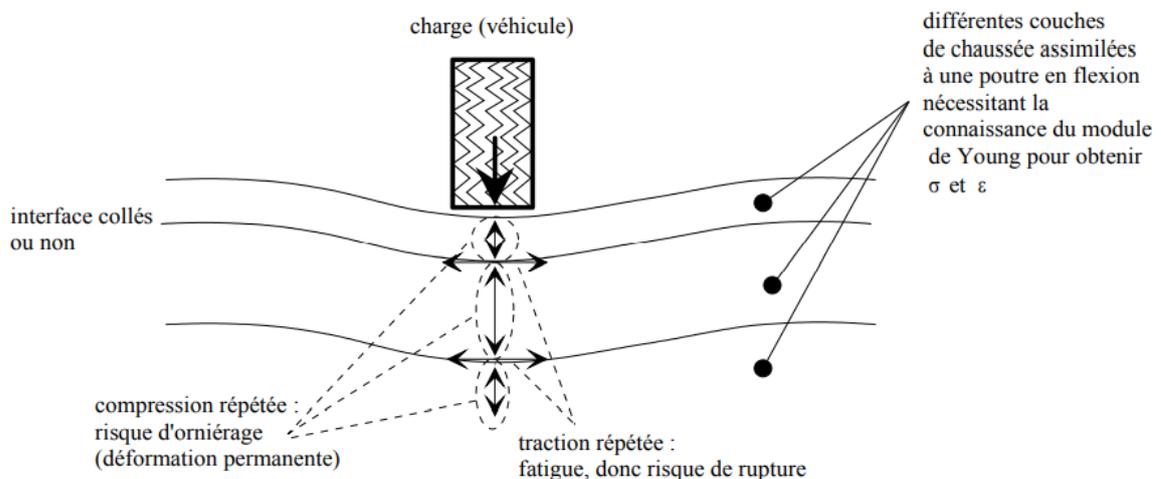


Figure 1.3. Schématisation des sollicitations induites par le trafic (Di Benedetto, 1998)

Nous pouvons également souligner qu'en raison des propriétés particulières apportées par le liant bitumineux, les enrobés possèdent un comportement (donc un module) fortement dépendant de la température et de la vitesse de chargement.

1.5 L'état de l'art

Dans la conception des chaussées flexibles, la limitation de l'orniérage est l'un des phénomènes les plus importants qui est pris en considération. Il peut être facile de mesurer le

développement d'une ornière, mais il est plus complexe de prévoir son développement. Dans la plupart des cas, la connaissance du matériau utilisé seul ne suffit pas, les conditions environnementales et la répartition des contraintes tout au long de la durée de vie de la chaussée sont également prises en considération. Alors que beaucoup de recherches ont été effectuées sur les déformations réversibles et irréversibles, en particulier à cause du temps nécessaire à la mise en œuvre des essais, souvent destructeurs. Cependant, les études réalisées ont permis de mettre en avant un certain nombre de facteurs agissant sur les déformations permanentes. Le résultat de l'essai effectué par (Lekarp, 2000), a montré la présence plus de déformations permanentes avec un cylindre creux à contrainte de cisaillement, qu'avec un cylindre sans contrainte. Une étude de (Bilodeau, 2008) montre également que les déformations permanentes sont doublées lorsqu'une rotation des contraintes est appliquée pendant l'essai triaxial. Cela signifie que l'orniéage ne peut pas être quantifié avec un test triaxial classique. Les essais de charge cyclique effectués en laboratoire ne sont qu'une représentation simplifiée du chargement qui sollicite les couches non consolidées pendant le trafic routier, dont les charges appliquées sont mobiles. Le mouvement de la roue peut provoquer une rotation des directions principales des contraintes, mais l'essai triaxial avec charge répétée, qui est principalement utilisé pour l'étude des déformations permanentes, n'a pas nécessairement. (G. Gidel, 2001) a travaillé à l'amélioration de la caractérisation du comportement des matériaux granulaires à partir de tests TCR. L'étude qui a été réalisée en laboratoire et sur un banc d'essai sur le terrain tient compte de l'état initial du matériau et de son évolution à long terme. (J. Perret, 2004) a souligné le facteur de charge en déterminant les paramètres connexes qui influencent les déformations permanentes. (Habiballah. T, 2004) étude qui s'inspire des travaux de (Zarka et de Casier) ,1979), s'appuie sur la théorie de l'adaptation pour prédire le comportement à long terme d'une structure de chaussée. Son modèle a été implémenté dans un code de calcul d'éléments finis. Cast3M utilisé dans ce cas, a montré la contribution des différentes couches dans l'apparition du phénomène d'orniéage. (B.J. Dongmo-engeland, 2005) a traité ce phénomène dans l'essai de tension/compression cyclique, en mettant le facteur de température et son influence sur l'orniéage avec une proposition de loi d'accumulation de déformations permanentes. (Bassem. A ,2006) a étudié les mécanismes responsables du développement de l'orniéage en proposant un modèle numérique fondé sur le comportement élastoplastique des couches de sièges non traitées et un modèle élastoviscoplastique pour les couches de surface. Un effet semblable a également été observé dans l'étude (Dawson, 1996), où la température a été prise en compte. L'étude a montré l'influence du type de pneus et celle du trafic. (Absamad. E, 2006) a expérimenté l'orniéage au manège de fatigue où il a proposé une méthode simplifiée de prévision de l'orniéage basée sur un modèle à éléments finis (module ORNI du logiciel CESAR-LCPC). Ces mesures ont été calculées sur place. D'une part, ce qui a

été étudié était le comportement mécanique des matériaux granulaires par des tests triaxiaux cycliques en laboratoire. (Quan. L, 2019) a utilisé trois grades de mélange d'asphalte modifié à Hambourg à l'aide du test du dispositif de suivi des roues de Hambourg et du test de récupération de fluage sous contrainte multiple, avec un contenu différent. L'étude a révélé qu'il existe un contenu optimal pour la plupart des additifs. (Tianshu Lin, 2021) a modifié la méthode japonaise de conception des chaussées. L'étude a examiné la modification du modèle MEPDG couramment utilisé ainsi que l'effet de la rotation de l'axe de contrainte principal. Dans une étude de (Wenchang Liu, 2021), les changements microstructuraux dans les mélanges d'asphalte avant et après l'essai de suivi des roues (WTT) ont été étudiés à l'aide de la tomographie (CT). Une méthode de suivi des agrégats basée sur la tomographie est proposée pour observer le mouvement spatial des agrégats grossiers pendant le WTT. (Halil Ibrahim Fedakar, 2021) a étudié le comportement de déformation des mélanges sable-argile consolidés au moyen de tests triaxiaux cycliques (CT) et de cylindres creux (CHC). Les résultats des essais ont clairement montré que l'effet d'une rotation de la contrainte principale doit être pris en compte pour mieux estimer le comportement de déformation des mélanges sable-argile sous des charges de circulation répétitives. L'étude récente (Ali Alnétais, 2019), qui utilise le test triaxial à charge répétée (RLTT), examine l'influence des fréquences de chargement sur l'orniérage des matériaux granulaires non liés. L'essai a montré de façon significative qu'en augmentant la fréquence de chargement, la durée de l'essai RLTT pouvait être considérablement réduite.

Compte tenu de l'interaction entre les différentes couches (y compris la couche de fondation) d'une structure routière soumise à l'action combinée du trafic et des conditions saisonnières, l'analyse des mécanismes de dégradation doit distinguer la part qui peut être attribuée à la structure dans son ensemble et la part qui peut être attribuée aux couches de la chaussée individuellement.

Dans le premier cas, les problèmes sont d'ordre structurel, alors que dans le second, ils sont liés à la composition (caractéristiques et proportions de mélange des constituants) et à la pose.

Les problèmes de composition et de mise en œuvre ne se posent plus autant qu'auparavant pour les couches sous-jacentes aux couches bitumineuses. Par contre, pour ces dernières l'évolution constatée du trafic nécessite plus que jamais une conception et une mise en œuvre soignées afin d'éviter ou de limiter les déficiences évoquées ci-dessus, notamment celles résultant de des déformations permanentes de ces couches

1.6 Interactions véhicules-chaussées

L'interaction entre les véhicules et les chaussées a au cours des dernières années fait l'objet de certaines études qui n'ont toutefois pas influé de façon notable sur le dimensionnement des chaussées souples. Lesdites études ont notamment été consacrées aux incidences de la dynamique de la circulation routière sur la dégradation accélérée des chaussées, due à l'agressivité des essieux ou encore aux effets de la rugosité des chaussées sur la détérioration des camions. Si l'on considère les budgets colossaux consacrés chaque année à l'entretien de l'infrastructure routière et aux activités de transport, on ne saurait douter de l'importance d'en arriver à un juste équilibre entre la charge maximale par essieu qui devrait être autorisée et le coût de restauration de l'infrastructure routière, le tout dans le but d'optimiser les avantages qu'en retirent globalement les contribuables.

1.7 Rotation des contraintes principales

Les essais sous chargement cyclique effectués en laboratoire ne sont qu'une représentation simplifiée du chargement subi par les matériaux lors du trafic routier, ou les charges appliquées sont mobiles. Le déplacement de ces dernières entraîne une rotation des directions principales des contraintes (figure 1.4), or l'essai triaxial à chargement répète est l'essai le plus utilisé pour l'étude des déformations permanentes) ne prend pas en compte cette rotation des contraintes. On ne sait donc aujourd'hui que peu de choses sur ce paramètre affectant les déformations permanentes.

On sait cependant que la réorientation des contraintes principales dans un matériau granulaire sous le passage de roues chargées entraîne de plus fortes déformations permanentes que celles prévues par l'essai triaxial. (Chan, 1990), tiré de (Lekarp, 2000) a effectué des essais sur cylindre creux avec et sans application de contrainte de cisaillement. Les résultats ont démontré que l'on obtenait de plus fortes déformations permanentes avec cette contrainte que sans. Selon (Dawson, 1996), tiré de (Bilodeau, 2008) les déformations permanentes sont multipliées par deux quand une rotation des contraintes est appliquée lors de l'essai triaxial. On ne peut donc pas quantifier l'orniérage avec un essai triaxial conventionnel. (Brown, 1974), par le biais d'essai à chargement répété, a schématisé l'évolution des contraintes dans le corps de chaussée dans le plan du mouvement de la roue (figure 1.5). Ce dernier est surtout utilisé, pour classer les matériaux selon leur proportion à se déformer en termes d'orniérage. Des essais sur des manèges de fatigue peuvent être réalisés afin de mieux comprendre le phénomène, mais ils sont à l'heure actuelle peu nombreux et très coûteux.

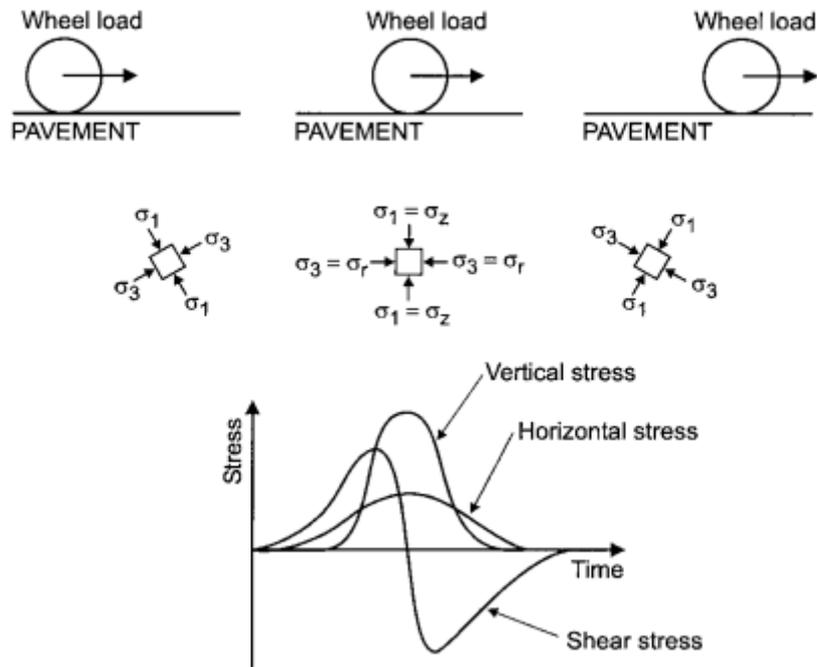


Figure 1.4. Evolution des contraintes sous une charge roulante (Lekarp et Dawson, 1998)

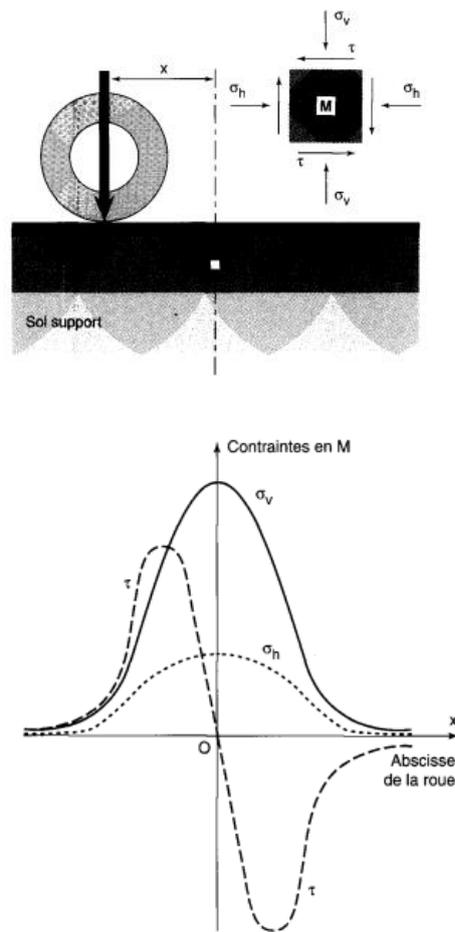


Figure 1.5. Sollicitations mécaniques dans un corps de chaussée dues au passage d'une roue de véhicule (Brown, 1974).

1.8 Méthodes de caractérisation des matériaux

L'un des avantages des méthodes mécaniques empiriques tient au fait que celles-ci se fondent sur une ou plusieurs des propriétés mécaniques fondamentales des revêtements de chaussée et des couches de sol pour déterminer l'état de contrainte et de là, prédire le rendement des chaussées. L'une des propriétés les plus importantes que l'on étudie dans ce contexte est le module d'élasticité. Le module d'élasticité offre de nombreux avantages par rapport à d'autres valeurs-indices comme les coefficients de couche de l'AASHTO, la valeur R et le CBR (indice portant de Californie) du fait qu'il influe directement sur les modèles analytiques employés pour prédire l'état de contrainte. Malgré cet avantage déterminant, il demeure que l'utilisation du module d'élasticité s'accompagne aussi de certains problèmes importants. Tout d'abord, les matériaux constituant des chaussées bitumineuses ne sont pas élastiques. Conséquemment, on utilise plutôt un substitut du module d'élasticité – le module de résilience – pour caractériser la résistance à la flexion que démontrerait un matériau d'une couche donnée soumis à l'état de contrainte auquel il serait exposé in situ. Un autre problème associé à cette méthode a trait à la difficulté de mesurer le module de résilience avec précision en laboratoire. Même si d'aucuns prévoient que des améliorations seront apportées aux méthodes d'essai en laboratoire de ce module, mentionnons par ailleurs qu'une autre méthode faisant appel à des essais non destructifs et à l'analyse de rétro-calcul (ou analyse inverse) semble elle aussi prometteuse. À la faveur de cette dernière méthode, des mesures de la flexion plane sont obtenues de façon non destructive sur le terrain, puis évaluées selon une procédure mécaniste (en l'occurrence un processus informatisé dit de rétro-calcul) afin de déterminer le module de résilience in situ de chaque couche. Ce processus s'avère particulièrement utile dans le cas de la conception des stratégies de réfection et il peut également être appliqué à la conception d'un nouveau revêtement de chaussée à la condition de recueillir des données d'essai non destructif le long du tracé prévu de la route visée.

1.9 Fonctions de transfert

Une multitude de relations mathématiques ont été élaborées aux fins de corréler l'état de contrainte d'une chaussée à son rendement global. Les principales fonctions de transfert auxquelles font appel les méthodes actuelles de conception des chaussées souples ont notamment trait : a) l'allongement maximal en traction des couches de surface d'enrobés à chaud soumises aux contraintes de charge du trafic et leur résistance à la fissuration due à la fatigue, et b) les contraintes de compression causées par les charges du trafic au niveau de la face supérieure des sous-fondations de chaussée et la résistance de ces dernières à l'orniérage. Ces modèles sont couramment dérivés de l'établissement de corrélations statistiques entre les réactions des

chaussées et le rendement observé dans le cadre d'essais de spécimens en laboratoire ou d'expériences exhaustives sur des tronçons routiers, ou des deux. Les fonctions de transfert représentent l'élément le plus important de toute méthode mécaniste, des efforts notables devront encore être consentis aux fins d'élaborer des modèles plus efficaces et plus réalistes de prédiction du rendement de ces dernières.

1.10 Modèles analytiques

Les modèles analytiques sont utilisés pour prédire l'état de contrainte d'une chaussée dans des conditions simulées de trafic routier et de milieu. La plupart de ces modèles sont fondés sur la théorie de l'élasticité des chaussées multicouches ou l'analyse par éléments finis, ou les deux. Les modèles fondés sur l'élasticité des chaussées multicouches sont jugés satisfaisants pour prédire les réactions des chaussées souples exposées aux contraintes de charge transmises par les roues des véhicules et ils sont en outre relativement faciles à appliquer. Ceci dit, ces modèles ne permettent pas de prédire les réactions des chaussées aux contraintes environnementales (c.-à-d. les contraintes associées aux variations quotidiennes de température et d'humidité, aux gradients de température, etc.). Par ailleurs, les modèles fondés sur l'analyse par éléments finis permettent de tenir compte à la fois des contraintes environnementales et de trafic, mais ils sont assez complexes à appliquer et chronophages. Avant que ne soit amorcée l'élaboration du 2002 Guide for Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, mis en œuvre sous les auspices du Programme national coopératif de recherches routières (PNCRR) des États-Unis, l'analyse par éléments finis n'était pas couramment appliquée à la conception des chaussées souples.

1.10.1 Modèle de Lewandowski (M.Lewandowski, 2014)

L'ensemble du modèle se compose de 9000 éléments C3D8R dont les arêtes ont une longueur de 10 mm, sans aucun raffinement sur le trajet de la roue (figure 1.6).

Des simplifications ont été introduites dans le modèle numérique de l'essai d'orniérage, seuls quelques mouvements de roue seront étudiés. Une autre simplification consiste à négliger l'interaction de contact entre un pneu et la plaque de béton bitumineux, au lieu d'une procédure de contact compliquée, il a appliqué une pression constante se déplaçant sur l'éprouvette avec un mouvement sinusoïdal à la manière d'une roue a été modélisée. Dans l'essai d'orniérage, l'éprouvette est une plaque de dimensions 500x180x100 mm³ dans un moule en acier (figure 1.6). Les résultats de cette modélisation sont présentés sur les figures 1.7. et 1.8.

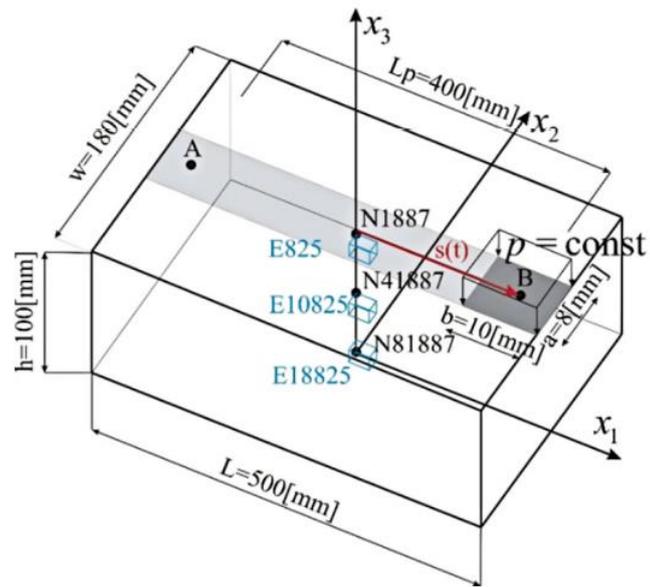


Figure 1.6. Modélisation de l'essai d'orniérage français (M. Lewandowski, 2014)

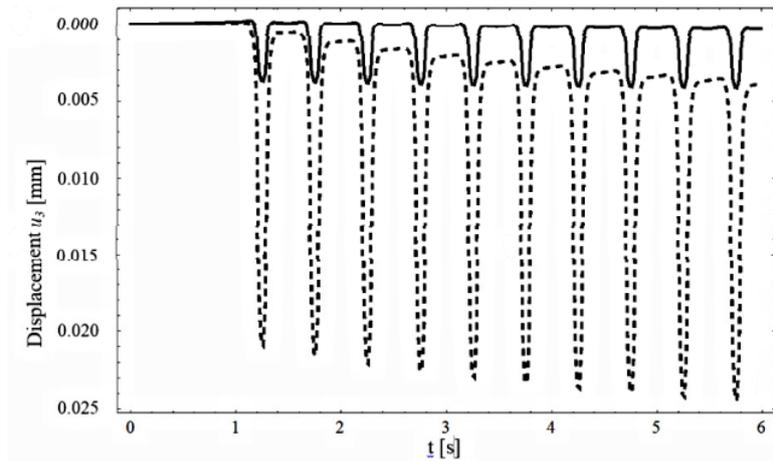


Figure 1.7. Déplacement vertical U_3 au nœud 1887 lors du passage de la roue pour 5 cycles (M. Lewandowski, 2014)

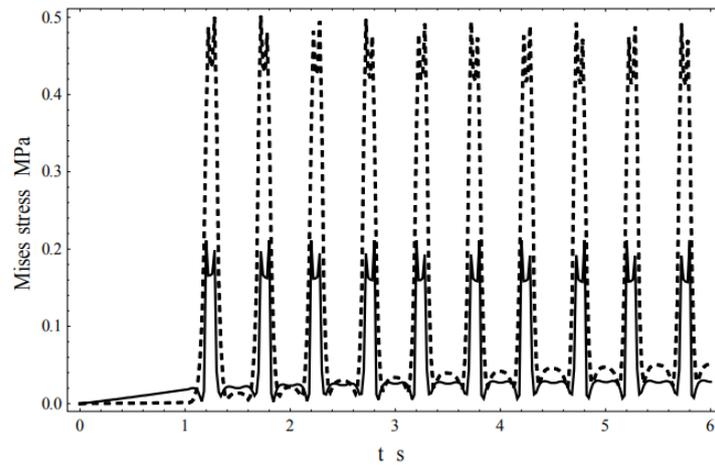


Figure 1.8. Contrainte de Von Mises au centroïde de l'élément 825 lors du passage de la roue pour 5 cycles (M. Lewandowski, 2014)

1.10.2 Modélisation de l'essai d'orniérage de Di Benedetto

L'empreinte du pneu sur l'éprouvette est modélisée par un rectangle de 10 cm (direction x) et 8 cm (direction y). Comme on ne considère que la moitié de la dalle, l'empreinte modélisée n'a que 4 cm de large. La pression de contact est de 1 MPa figure 1.9 et 1.10. Les résultats de cette modélisation sont présentés sur les figures 1.11. et 1.12.

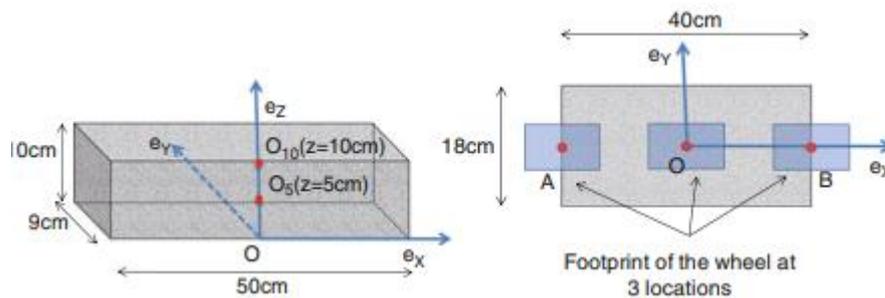


Figure 1.9. Géométrie du modèle utilisée dans l'essai d'orniérage (H. Di Benedetto, 2013)

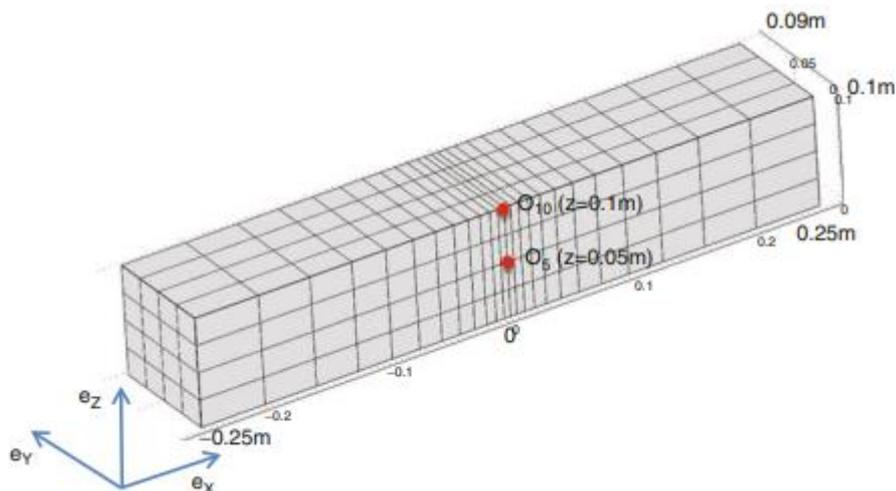


Figure 1.10. Maillage utilisé dans le modèle de l'essai d'orniérage (H. Di Benedetto et al)

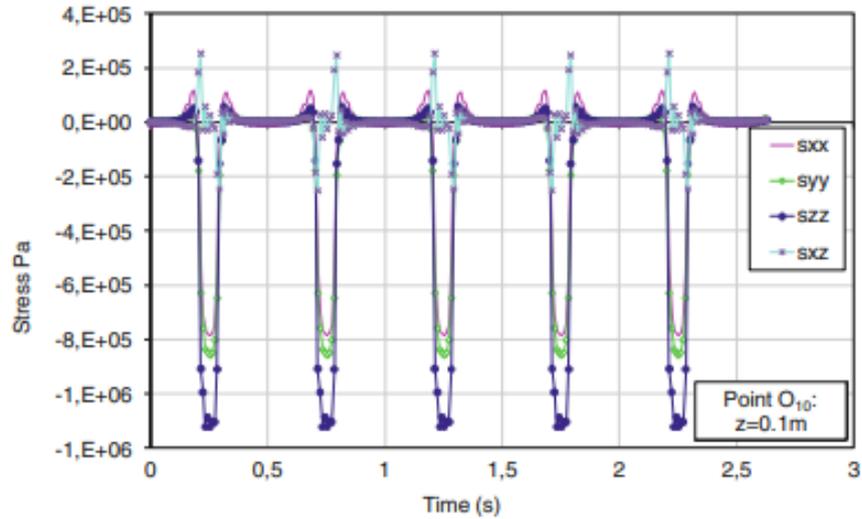


Figure 1.11. Etat de contrainte au centre à la surface de l'éprouvette (H. Di Benedetto et al.2013)

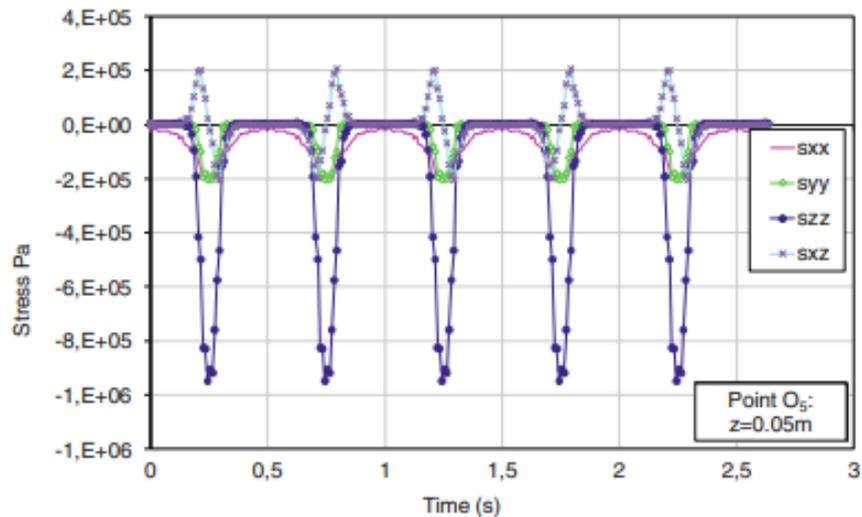


Figure 1.12. Etat de contrainte au centre et à mi-profondeur de l'éprouvette (H. Di Benedetto et al.2013)

1.11 Conclusion

Dans la conception de chaussées souples, la limitation de l'orniérage est l'un des phénomènes les plus importants à prendre en considération. Il est aisé de mesurer le développement d'une ornière, mais il est beaucoup plus complexe de prédire son développement. La seule connaissance du matériau utilisé ne suffit pas. Il faut aussi prendre en compte les conditions environnementales ainsi que la distribution des contraintes tout au long de la durée de vie de la chaussée. Afin de cerner le rôle des matériaux dans la formation de l'orniérage, il est nécessaire de comprendre la nature et l'origine des déformations permanentes dans ces matériaux.

Chapitre 2 : Comportement des matériaux bitumineux

2.1 Introduction

Les enrobés bitumineux doivent donc être conçus pour offrir une résistance élevée à la déformation permanente, sans sacrifier les autres propriétés nécessaires à la résistance à la fatigue et à la durabilité (résistance au vieillissement et aux effets de décapage). Les revêtements bitumineux sont soumis à des charges très sévères induisant des ornières par le trafic moderne sur les routes à fort trafic. Les pressions de contact entre les pneus et la chaussée ont augmenté en raison de la généralisation des super roues simples (au lieu des roues doubles) et de la circulation très lente des véhicules lourds dans les embouteillages sur les artères à fort trafic

Afin de se comporter de manière satisfaisante dans les systèmes de chaussée, les mélanges bitumineux doivent présenter : (a) la capacité de répartir les contraintes ; (b) la résistance à la déformation permanente ; (c) la résistance à la fissuration (surtout la fissuration par fatigue, mais aussi la fissuration thermique, fissuration par réflexion et fissuration de construction) ; (d) résistance aux dommages causés par le gel et le dégel et par l'humidité ; (e) résistance à l'usure et à la corrosion.

2.2 Fabrication du bitume

Concernant les principaux modes de fabrication des bitumes, citons la distillation en raffinerie des pétroles bruts lourds contenant suffisamment de fractions lourdes pour produire du bitume. La première étape de ce processus consiste en une distillation atmosphérique qui permet de séparer les fractions légères du pétrole (essences, kérosène, gaz) des fractions lourdes, ces dernières étant ensuite distillées sous vide pour produire fuels, huiles et bitume (figure 2.1).

Outre la distillation, citons encore les procédés de soufflage et de désasphaltage. Le premier procédé consiste à oxyder les résidus sous vide par soufflage d'air chaud à 250 °C. Le deuxième procédé est, quant à lui, utilisé pour des résidus sous vide ayant une teneur en fractions lubrifiantes trop importante et consiste à traverser le résidu sous vide par un courant ascendant de solvant : la différence de solubilité des fractions bitumineuses vis-à-vis du solvant employé permet alors d'obtenir le bitume souhaité. Dans ce dernier cas, le bitume présente une faible pénétrabilité.

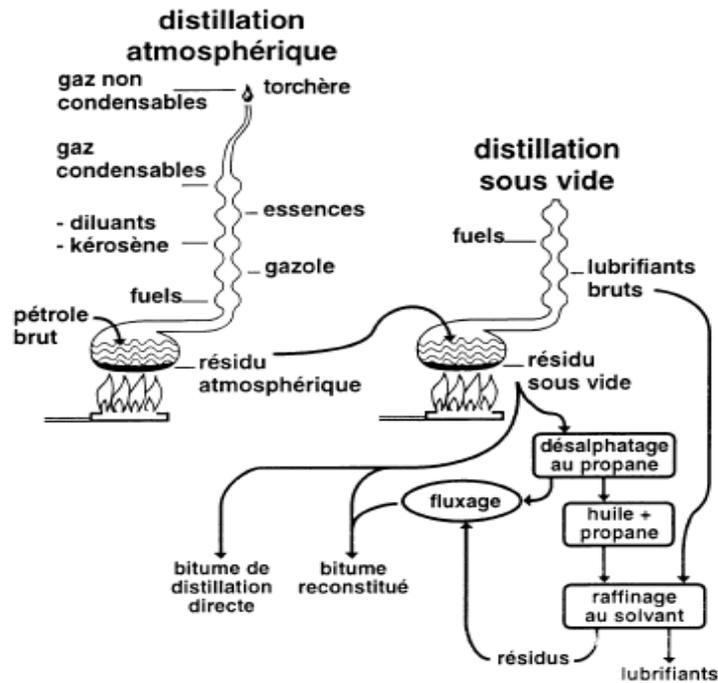


Figure 2.1. Procédé de fabrication du bitume (M. Faure, 1998)

2.2.1 Composition chimique et structure des bitumes

On distingue deux grandes familles de composés du bitume : les asphaltènes et les maltènes.

Les asphaltènes sont composés essentiellement d'hydrogène et de carbone et se présentent sous la forme d'un "solide" friable brun à noir. Généralement, les bitumes comportent 10 à 20% en poids d'asphaltènes. Quant aux maltènes, ils sont constitués principalement d'huiles saturées, d'huiles aromatiques et de résines.

L'ensemble forme un système colloïdal constitué par une suspension de micelles d'asphaltènes peptisés par les résines dans un milieu huileux (figure 2.2). En effet, les résines s'absorbent sur les asphaltènes et permettent leur dispersion dans le mélange huileux (hydrocarbures aromatiques et saturés). On dit qu'il y a peptisation. Les aromatiques assurent le rôle de solvant, tandis que les saturés assurent le rôle de flocculant.

La dispersion des agglomérats d'asphaltènes est plus ou moins forte selon la composition de la phase maltène (huiles + résines) : la structure du bitume est, en effet, différente selon que les asphaltènes forment ou non un réseau flocculé, baignant dans un milieu dispersant faiblement structuré par les résines. Dans ce cas, on parle de structure "gel" (élastoplastique). Dans le cas d'une structure où les asphaltènes forment une suspension diluée et bien stabilisée dans un milieu dispersant fortement structuré par les résines, les asphaltènes ne peuvent interagir. On parle alors

de structure “sol” (visqueuse). Une classe intermédiaire, appelée “sol-gel”, correspond aux bitumes intermédiaires.

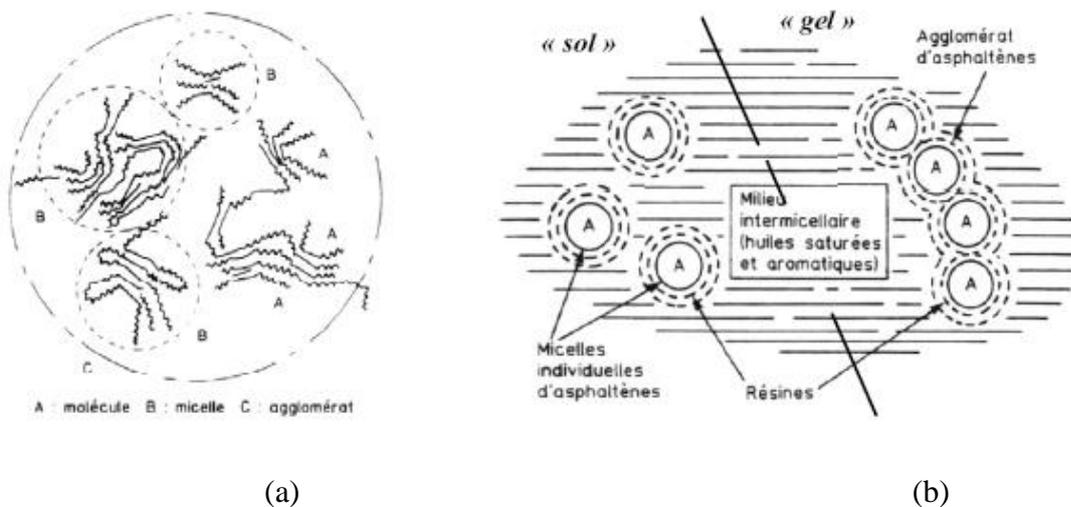


Figure 2.2. a) Vue macroscopique des asphaltènes. b) Schématisation de la structure colloïdale du bitume (Pucci, T., 2000)

Tableau 2.1. composition des constituants du bitume (Hunter,2000)

Caractéristiques	Maltènes			Asphaltènes
	Saturés	Aromatiques	Résines	
% dans le bitume (massique)	5 % - 10 %	40 % - 65%	10% (Lesueur 2002)	5 % - 25 %
Masse moléculaire (g/mol)	300 – 2 000	300 – 2 000	500 – 50 000	1 000 – 100 000
Couleur	incolore - jaunâtre	rouge - brun sombre	noire – brun foncé	noir
Constituant	Carbone, Hydrogène	Carbone, Hydrogène et Soufre	Carbone, Hydrogène Azote, Oxygène et Soufre	Carbone, Hydrogène Azote, Oxygène et Soufre
Propriétés données au bitume	viscosité et fluidité	viscosité et fluidité	adhésivité et ductilité	résistance et rigidité

2.3 Les essais de caractérisation des bitumes

Les bitumes sont des matériaux dits viscoélastiques, c'est-à-dire qu'ils réagissent soit de façon élastique ou visqueuse selon les conditions de sollicitations.

En fait ils sont sensibles :

- à la température

- au temps de charge

Outre l'influence de la température et du temps de charge, le module du bitume dépend également :

- De sa consistance (caractérisée par sa catégorie –voir tableau-). C'est ainsi que pour des mêmes conditions de température et de temps de charge, un bitume dur type 20/30 sera beaucoup plus rigide qu'un bitume mou du type 180/20.
- De sa susceptibilité thermique (c'est-à-dire de sa sensibilité à la température) caractérisée par l'indice de pénétrabilité IP.

2.3.1 Pénétrabilité à l'aiguille PEN 25(NF EN 1426 - T 66-004)

On mesure la profondeur (1/10 mm) à laquelle une aiguille type, chargée, pénètre dans la prise d'essai dans les conditions normalisées (25°C). La valeur retenue est la moyenne de trois déterminations ne sortant pas d'une certaine étendue (figure 2.3).

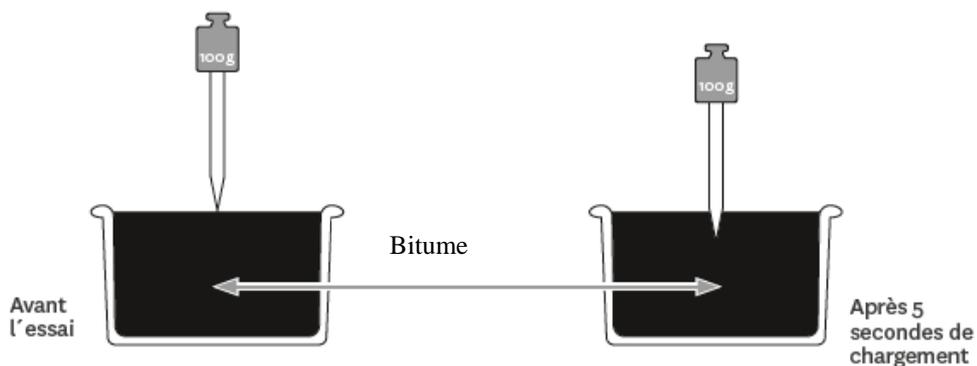


Figure 2.3. Essai de Pénétrabilité à l'aiguille (NF EN 1426 - T 66-004)

2.3.2 Détermination de la température de ramollissement par la méthode Bille et Anneau (EN 1427)

Ce test consiste à déterminer la température à laquelle un bitume atteint une certaine consistance dans les conditions de référence de l'essai. Le principe de l'essai est relativement simple : deux disques horizontaux de bitume, moulés dans des anneaux, sont chauffés dans un bain liquide avec un taux d'élévation de température contrôlé (5 °C/min), alors que chacun soutient une bille d'acier. La température de ramollissement notée doit correspondre à la moyenne des températures auxquelles les deux disques se ramollissent suffisamment pour permettre à chaque bille, enveloppée de liant bitumineux, de descendre d'une hauteur de 25,0 mm ± 0,4 mm. Le liquide de bain est de l'eau, pour les températures de ramollissement comprises entre 30 °C et 80 °C, et du glycérol, pour les points de ramollissements supérieurs à 80 °C et jusqu'à 150 °C. Le

résultat est donné en arrondissant à 0,2 °C près la moyenne des deux températures enregistrées pour les températures de ramollissement inférieures ou égales à 80 °C et en arrondissant à 0,5 °C près pour les températures de ramollissement supérieures à 80 °C (figures 2.4 et 2.5).

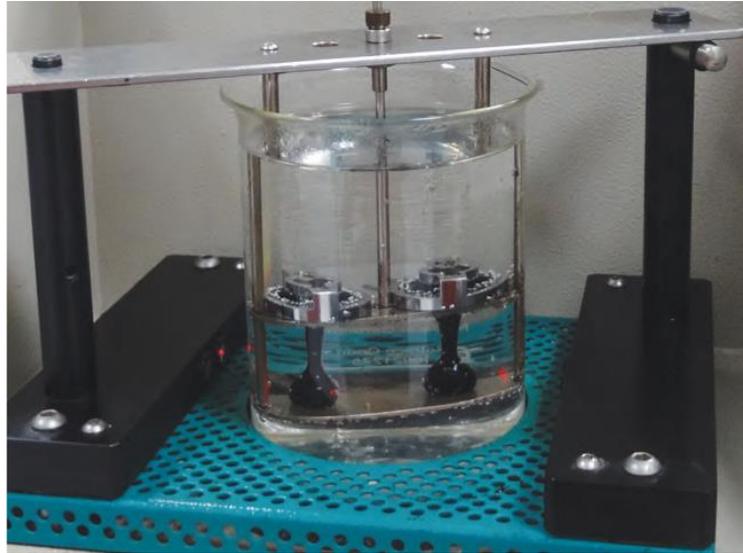


Figure 2.4. Dispositif de mesure de la température de ramollissement

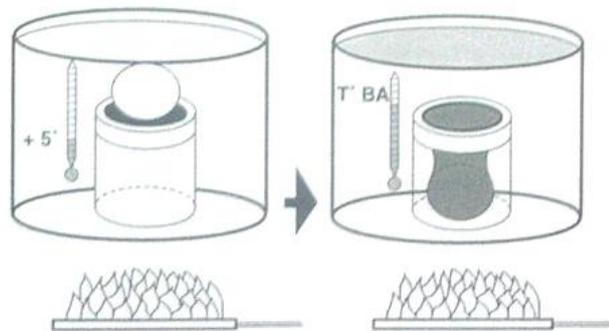


Figure 2.5. Principe de l'essai de ramollissement bille et anneau TBA (EN 1427)

2.3.3 Détermination du point de fragilité Fraass (EN 12593)

Le point de fragilité Fraass représente la température à laquelle un film de liant bitumineux d'une épaisseur donnée et uniforme se fissure sous des conditions de charge définies et répétées, lors du refroidissement de l'échantillon. Ce test permet une mesure de la fragilité des bitumes et des liants bitumineux à basse température. Le point de fragilité Fraass est la température à laquelle la première fissuration apparaît. Elle est exprimée en degrés Celsius et représente la moyenne de deux déterminations pour lesquelles l'écart de température est inférieur ou égal à 2 °C. Le résultat est un nombre entier (figures 2.6 et 2.7) .

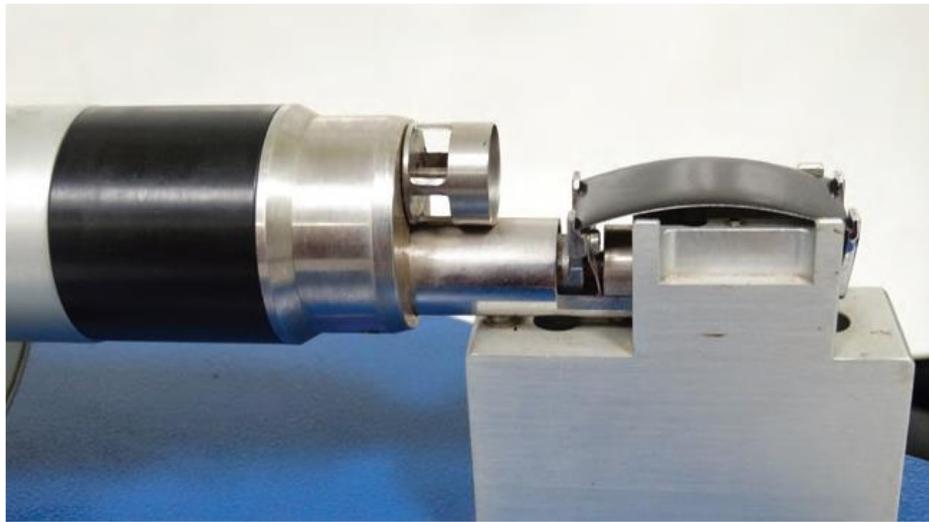


Figure 2.6. Le test du point de rupture de Fraass (EN 12593)

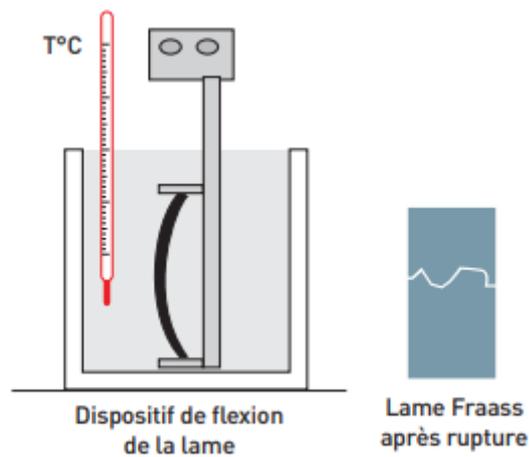


Figure 2.7. Schéma du test de fragilité Fraass (EN 12593)

2.3.4 Détermination de la résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air - Méthode RTFOT ou Rolling Thin Film Oven Test (EN 12607-1)

Cet essai permet de mesurer les effets combinés de la chaleur et de l'air sur un film mince de bitume ou de liant bitumineux en renouvellement permanent. Il simule le durcissement que subit un liant bitumineux au cours du malaxage dans une centrale d'enrobage. En pratique, un film de liant bitumineux en renouvellement permanent est chauffé dans une étuve à une température et pendant un temps donné en subissant un jet d'air chaud toutes les 4 secondes. Les effets de la chaleur et de l'air sont déterminés à partir de la variation de masse de l'échantillon et de l'évolution des caractéristiques du liant bitumineux, comme la pénétrabilité et le point de ramollissement. L'évolution d'autres caractéristiques peut être également mesurée (figure 2.8).

L'essai RTFOT est destiné à simuler en laboratoire le vieillissement du bitume provoqué par l'oxydation subie lors de l'enrobage, en exposant un film de bitume très fin à un courant d'air porté à 163 °C, pendant une durée de 75 min

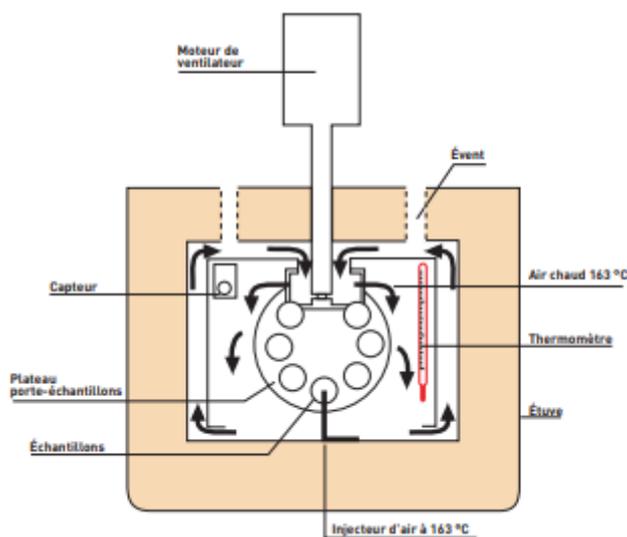


Figure 2.8. Essai RTFOT Rolling Thin Film Oven (EN 12607-1)

Tableau 2.1. Catégories de bitumes

Consistance	Dur					Mou	
	180/220	100/120	80/100	60/70	40/50	20/30	
Appellation							
TBA	34 à 43	39 à 48	41 à 51	43 à 56	47 à 60	52 à 60	
PEN à 25°C	180-220	100-120	80-100	60-70	40-50	20-30	
Densité à 25°C	1-1.007	1-1.07	1-1.07	1-1.1	1-1.1	1-1.1	
Perte à la chaleur pendant 5h à 163 °C	< 2%	< 2%	< 2%	< 1%	< 1%	< 1%	
Point d'inflammabilité	> 230°	> 230°	> 230°	> 230°	> 250°	> 250°	
Ductilité à 25°C	> 100	> 100	> 100	> 80	> 60	> 25	
Solubilité dans CS ²			> 99.5	> 99.5			
Teneur en paraffine			< 4.5%	< 4.5%			

2.4 Les granulats

Les granulats représentent près de 95 % d'un enrobé bitumineux. Il est donc important de bien les caractériser afin de faire un choix optimal lors de la formulation et de la fabrication d'un enrobé performant. Granulat est un matériau granulaire utilisé en construction ou bien est un ensemble des grains de dimensions comprises entre 0 mm et 125 mm, qui participe intimement aux performances et à la durabilité des ouvrages.

Tableau 2.2. Classification des granulats

Classe du produit	Dimension (mm)
Fine	0/D où $D \leq 0,0063$
Sable	0/D où $D \leq 6,30$
Gravillons	d/D où $d \geq 2$ et $D \leq 31,50$
Cailloux	d/D où $d \geq 2$ et $D \leq 820,00$
Graves	0/D où $6,3 < D \leq 31,50$

2.4.1 Caractéristiques physiques et propriétés des granulats

Nous citons quelques essais de laboratoire permettant de déterminer certaines caractéristiques mécaniques des granulats :

2.4.1.1 Résistance à la fragmentation (chocs) (NF EN 1097-2)

Elle est mesurée par le coefficient "Los Angeles". Cette mesure est destinée à évaluer la résistance des granulats à la fragmentation sous l'action du trafic.

Tableau 2.3. Coefficients Los Angeles

VALEURS REPERES	
COEFFICIENT LOS ANGELES	APPRECIATION
< 15	Très bon à bon
15 à 25	Bon à moyen
25 à 40	Moyen à faible
> 40	Médiocre

2.4.1.2 Résistance à l'attrition et à l'usure (NF P 18-572)

L'essai utilisé est le Micro Deval à sec ou en présence d'eau. Cette mesure ayant pour but de chiffrer l'usure qui se produit d'une part entre les gravillons dans une assise et d'autre part entre le pneumatique et le granulat à la surface des revêtements. Comme l'usure est très influencée par la présence d'eau, l'essai le plus représentatif est le Macro Deval en présence d'eau.

Tableau 2.4. Valeurs Micro-Deval

Valeurs repères	
MICRO-DEVAL en présence d'eau	Appréciation
< 10	Très bon à bon
10 à 20	Bon à moyen
20 à 35	Moyen à faible
> 35	Médiocre

2.4.1.3 Résistance au polissage (NF EN 1097-8)

Cet essai permet de chiffrer la résistance au polissage des gravillons utilisés pour les couches de surface. On utilise une machine à tambour sur lequel sont disposées des plaques support de granulat. Cette résistance est évaluée par le coefficient de polissage accéléré noté C.P.A

Tableau 2.5. Valeurs C.P.A

Valeurs repères	
C.P.A	Appréciation
> 0.55	Excellent
0.50 à 0.55	Bon à très bon
0.45 à 0.49	Médiocre à passable
< 0.45	Interdit

2.5 Les enrobés

2.5.1 Définition

On appelle enrobé hydrocarboné tout mélange de granulats et de liant hydrocarboné. Le terme est donc plus général que celui de béton bitumineux puisqu'il inclut les mélanges dont le liant n'est pas forcément un bitume (goudron, liant à base de bitume fluidifié...)

Un enrobé bitumineux est défini comme un mélange de liant bitumineux (5 à 7% en masse), d'agrégats et de fines (passant à 80µm). Les fines étant également appelées « filler ».

L'obtention des enrobés par mélange des granulats et du bitume fait appel à des propriétés bien spécifiques aux liants hydrocarbonés en général et donc au bitume en particulier :

- Un pouvoir d'adhésion aux granulats,
- Une consistance variable avec la température.

On distingue les enrobés à chaud et les enrobés à froid selon que le granulat passe ou non dans un tambour sécheur qui le déshydrate, on notera que cette distinction ne préjuge pas du chauffage du liant.

- Les performances des enrobés sont caractérisés par :
- La qualité de ses granulats (propreté, résistance mécanique)
- La viscosité du liant (généralement un bitume pur)
- Une granularité continue avec tolérances très strictes
- Une forte compacité

Lorsque le calibre maximum du granulat est inférieur à 6 mm on parlera de *sable* enrobé ou de microbéton hydrocarboné

2.5.1.1 Teneur en liant

Les liants bitumineux transfèrent naturellement au mélange un comportement viscoélastique. Par conséquent, la teneur optimale en liant est établie pour assurer la cohésion du mélange et le bon enrobage du film mince de bitume de toutes les particules du mélange, tout en évitant les problèmes de fluage excessif et d'orniérage à haute température.

Pour déterminer cette teneur optimale en liant, la notion de surface spécifique de granulat a été introduite (Fontana et al, 1998) ; notée Σ et exprimée en m^2/kg , Une surface développée qu'aurait l'agrégat assimilé à une sphère.

Pour un mélange de tailles de particules données, l'équation suivante donne une approximation de la surface Σ :

$$100 \Sigma = 0.17 G + 0.33 g + 2.3 S + 12 s + 135 f \quad (2.1)$$

avec:

G : pourcentage de gros gravillons ($\emptyset > 11$)

g : pourcentage de petits gravillons ($6 < \emptyset < 11$)

S : pourcentage de gros sable ($0.3 < \emptyset < 6$)

s : pourcentage de sable fin ($0.08 < \emptyset < 0.3$)

f : pourcentage de filler ($\emptyset < 0.08$)

On voit que le pourcentage de filler est prépondérant en ce qui concerne la surface spécifique et donc la teneur en liant. Dans certain cas, on utilise la formule simplifiée suivante :

$$\Sigma = 2.5 + 1.3 f \quad (2.2)$$

La teneur en liant optimale, fonction de la surface spécifique des granulats, est donnée par la formule expérimentale suivante :

$$TL = \alpha k \sqrt[5]{\Sigma} \quad (2.3)$$

Avec :

TL : teneur en liant (%)

α : facteur dépendant du type de granulats (2.65/masse volumique des granulats)

Σ : surface spécifique des granulats (m^2/kg)

k : module de richesse (k variant de 2.75 pour les enrobés donnant le maximum de résistance à la déformation, à 3.5 pour les enrobés les plus souples)

Plus globalement, la teneur en liant à retenir peut-être définie à partir d'une étude en laboratoire tenant compte du trafic, de l'épaisseur de la couche d'enrobé, des capacités in situ exigées et de l'usage envisagé de la chaussée. En particulier, dans le cas d'un trafic poids lourds important (supérieur à 200 PL/j) la teneur en bitume doit être diminuée.

2.5.2 Les essais sur les enrobés

2.5.2.1 Stabilité Marshall (NF EN 12697-34)

Les essais Marshall de stabilité et d'écoulement, ainsi que les essais volumétriques, ont été développés comme méthode de conception pour les mélanges bitumineux, en particulier la teneur en liant optimale pour une granulométrie particulière. Cependant, la stabilité a été, et est toujours, utilisée comme une mesure de la résistance à la déformation du mélange. Un exemple de son utilisation est que le test selon EN 12697-34 (CEN, 2012h) est le paramètre pour l'utilisation sur les terrains d'aviation dans les normes européennes tandis que la version américaine du test est ASTM D6927 (ASTM, 2015d).

Les éprouvettes pour l'essai sont des cylindres qui sont compactés par un compacteur à impact pendant un nombre déterminé de coups, compacteur à impact pendant un nombre déterminé de coups à une température déterminée. Le nombre de coups est généralement de 50 par côté mais, par exemple, 35 coups peuvent être utilisés pour un trafic léger ou 75 pour des chaussées à usage intensif. Les éprouvettes compactées sont démoulées et laissées refroidir à l'air avant d'être placées dans un bain d'eau à la température d'essai, généralement 60°C. Les éprouvettes d'essai sont ensuite placées entre les deux mâchoires de la machine, qui appliquent une contrainte de compression diamétrale avec une vitesse de 50 mm/min jusqu'à destruction de l'échantillon (figure 2.9.) et les têtes de rupture Les têtes de rupture supérieure et inférieure sont déplacées l'une par rapport à l'autre à un taux de déformation constant. La charge maximale appliquée est la stabilité.

La résistance à la déformation est supposée augmenter avec des valeurs plus importantes de stabilité Marshall. Les classes de stabilité Marshall proposées dans la norme EN 13108-1 (CEN, 2016a) pour le béton bitumineux sur les pistes d'aviation en Europe ont des minima de 2,5 kN jusqu'à 12,5 kN en augmentant par incréments de 2,5 kN plus une classe sans exigence. La précision donnée est une répétabilité de 1,7 kN et une reproductibilité de 2,2 kN pour la stabilité Marshall ; une répétabilité de 0,7 mm et une reproductibilité de 0,8 mm pour l'écoulement.

Les essais Marshall de stabilité et d'écoulement, ainsi que les essais volumétriques, ont été développés comme méthode de conception pour les mélanges bitumineux, en particulier la teneur en liant optimale pour une granulométrie particulière. Cependant, la stabilité a été, et est toujours, utilisée comme une mesure de la résistance à la déformation du mélange. Un exemple de son utilisation est que le test selon EN 12697-34 (CEN, 2012h) est le paramètre pour l'utilisation sur les terrains d'aviation dans les normes européennes tandis que la version américaine du test est ASTM D6927 (ASTM, 2015d).



Figure 2.9. Machine d'essai de stabilité Marshall (ASTM D6927)

2.5.2.2 L'essai Duriez (NF EN 12697-12)

L'essai Duriez est un essai de compression simple, ayant pour but de déterminer, à 18°C et pour un compactage donné, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud à partir des résistances à la compression avec ou sans immersion des éprouvettes.

Les éprouvettes sont fabriquées par compactage statique à double effet.

La masse volumique apparente est ensuite déterminée sur un certain nombre d'éprouvettes pour calculer la teneur en vides.

D'autres éprouvettes sont soumises à un essai de compression après conservation à 18°C dans des conditions définies

- A l'air pour certaines éprouvettes
- En immersion pour d'autres éprouvettes.

La tenue à l'eau est caractérisée par le rapport des résistances avec ou sans immersion.

2.5.2.3 L'essai à la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) (NF EN 12697-31)

L'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) est un essai de formulation. La particularité de l'appareil réside dans le fait que l'échantillon n'est pas densifié par impact comme dans le cas de la méthode Marshall, mais plutôt sous l'action combinée d'un piston exerçant une pression fixée à 600 kPa et d'un moule cylindrique de 150 mm de diamètre incliné de 1,25 degré et décrivant un mouvement giratoire de 30 tours/minute (figure 2.10.) Le compactage est obtenu en effectuant le nombre de girations désiré, qui est généralement de 200. La température de l'échantillon est ajustée en fonction du type de bitume utilisé.

Ce mode de compactage traduit la relation linéaire qui existe entre le nombre de passes d'un rouleau compacteur de chantier et le nombre de girations ; (ce n'était pas le cas avec le nombre d'impacts de la méthode Marshall). Alors que la méthode Marshall ne permet la mesure d'un pourcentage de vides que pour un effort de compactage unique, l'essai à la PCG permet de mesurer l'évolution du pourcentage de vides dans le mélange en fonction du nombre de girations. Cette courbe du pourcentage de vides en fonction du nombre de girations décrit la maniabilité du mélange, qui est utilisée comme critère de formulation des enrobés.

Le critère de maniabilité permet d'exercer une discrimination entre des mélanges trop maniables, qui auront tendance à présenter des ornières, et des mélanges peu maniables, qui seront perméables et peu durables. L'essai à la PCG permet également une appréciation qualitative de l'éprouvette densifiée, de la texture de la surface et des risques de ressuage en service. Un autre critère, fixé à 200 girations, permet d'estimer le compactage ultime subi par le mélange en service : le mélange doit conserver une quantité minimale de vides d'environ 2%, pour éviter l'orniérage ou le ressuage ; à 200 girations, l'évaluation visuelle de l'éprouvette confirme la présence ou l'absence de ressuage d'une quantité excessive de bitume.

Le ressuage est la séparation d'une phase liquide au cours du chauffage d'un alliage, le reste de la masse restant solide.

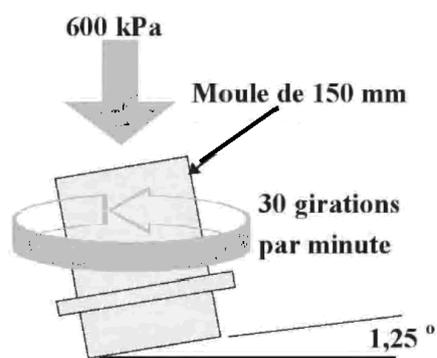


Figure 2.10. Principe de compactage de la presse à cisaillement giratoire

2.6 Les bétons bitumineux

La capacité à répondre à ces exigences est liée aux propriétés mécaniques fondamentales du mélange. Celles-ci sont affectées par de nombreux facteurs liés aux matériaux constitutifs (liants, granulats, additifs et leurs proportions), à la charge (taux de chargement, temps de chargement et de repos, niveau de charge, état de contrainte, etc.), aux conditions environnementales (température, humidité, etc.) et à la mise en œuvre (méthode de compactage, contrôle de la qualité, etc.).

Trois propriétés mécaniques sont particulièrement importantes :

- La rigidité (dans le domaine linéaire)
- Résistance à la fissuration par fatigue
- Résistance à la déformation permanente

Si l'on se réfère au graphique de la figure 2.11., proposé par (H. Di Benedetto, 2005), il est possible d'identifier les domaines correspondant aux différents aspects introduits dans le modèle, il est possible d'identifier les domaines et le type de comportement correspondant pour les bétons bitumineux. Bien entendu, cette figure doit être considérée comme une indication générale. Les limites des différents domaines, représentés sur les axes du logarithme de l'amplitude de la déformation en fonction du logarithme du nombre de cycles, est un indicateur de l'évolution de la déformation, du nombre de cycles, est une illustration de la transition d'un domaine à l'autre, elle se fait d'une manière douce et continue. La figure 2.12., illustre le phénomène de fatigue et celui qui est lié à la déformation permanente des matériaux

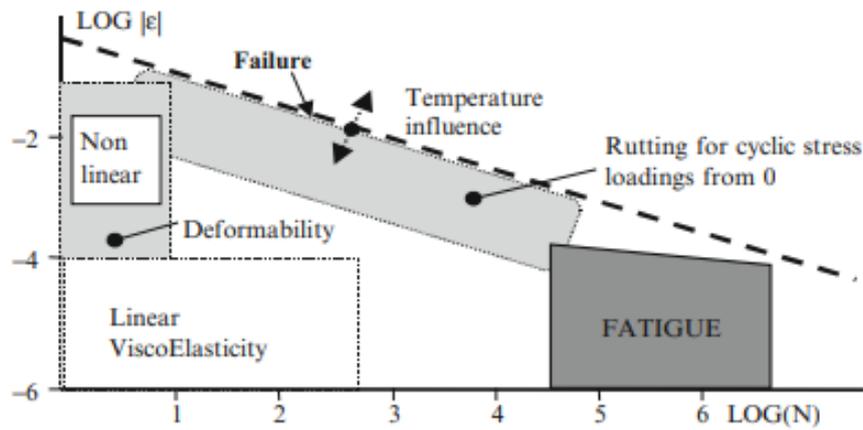


Figure 2.11. Domaines de comportement pour les mélanges bitumineux, ((ϵ) amplitude de déformation - N nombre de cycles) (Di Benedetto et Corté, 2005)

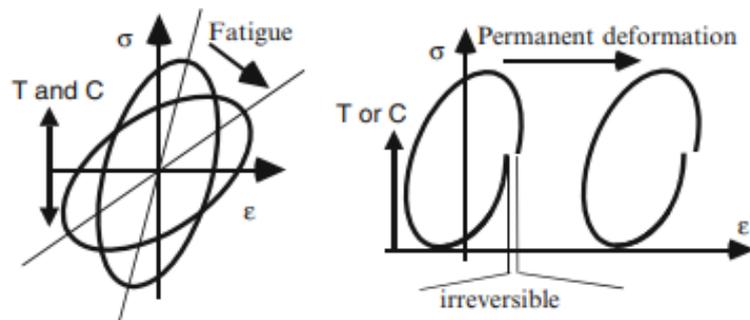


Figure 2.12. Différence entre la fatigue et la déformation permanente (orniéage). "T" traction et "C" compression (Di Benedetto et al, 1998)

De nombreux essais expérimentaux ont été utilisés pour caractériser les propriétés physiques des liants bitumineux. Ils sont réalisés dans des conditions particulières de température et de temps de chargement. Certains de ces essais peuvent être considérés comme mesure directe de la résistance du bitume à la déformation permanente.

2.6.1 Les essais sur les bétons bitumineux

2.6.1.1 L'essai de compression simple ou cyclique (NF EN 12697-25)

Il consiste à appliquer à une éprouvette de forme cylindrique ou prismatique une compression simple ou cyclique, avec ou sans confinement.

La sollicitation en contrainte est en général de forme sinusoïdale non centrée (des fonctions en créneau, avec éventuellement un temps de relaxation à chaque cycle sont également parfois utilisées) et prend la forme suivante:

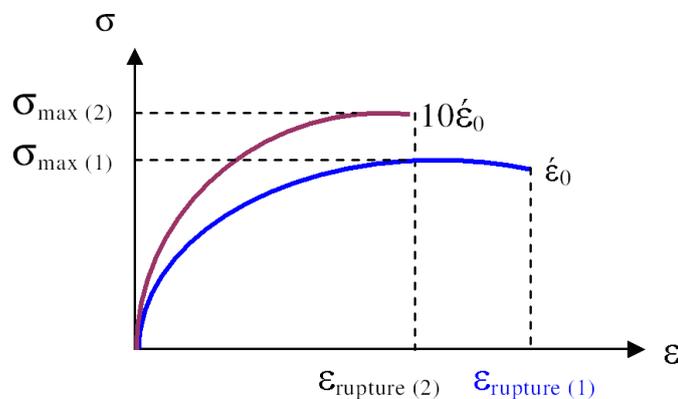
2.6.1.2 L'essai de traction directe (NF EN 12697-24)

Il s'agit d'un essai de traction à température constante et à vitesse de déformation constante. Au cours de l'essai, les paramètres mesurés sont la contrainte, la déformation et la température à l'instant t .

La contrainte maximale, encore appelée contrainte de rupture, et la déformation correspondante, donnent directement accès à la résistance en traction du matériau testé, pour les conditions d'essais (température, vitesse) considérées (figure 2.13).

On observe classiquement que plus la vitesse de déformation imposée est élevée, plus l'enrobé a un comportement rigide (contrainte maximale plus élevée) et plus l'allongement à la rupture est faible.

Le principal avantage de ce dernier essai réside dans le fait que les éprouvettes peuvent être directement prélevées in situ et qu'elles ne doivent pas être collées sur des casques en métal. Cet essai simple dans la pratique présente cependant comme inconvénient que l'état de contraintes dans la partie centrale du disque n'est pas de nature homogène.



1) essai à vitesse de déformation $\dot{\epsilon}_0$

(2) essai à vitesse de déformation $10 \dot{\epsilon}$

Figure 2.13. Essai de traction direct (F. Olard, 2000)

2.7 Les lois de comportement des bétons bitumineux

Lorsqu'une contrainte ou une déformation est appliquée à un corps, des réarrangements se produisent à l'intérieur du matériau qui répond à l'excitation imposée. Dans tout matériau réel, ces réarrangements nécessitent nécessairement un temps fini. Ce temps peut toutefois être très court ou très long. Lorsque les changements se produisent si rapidement que le temps est négligeable

par rapport à l'échelle de temps de l'expérience, nous considérons le matériau comme purement visqueux. Dans un matériau purement visqueux, toute l'énergie requise pour produire la déformation est dissipée, sous forme de chaleur. Lorsque les réarrangements du matériau prennent un temps pratiquement infini, on parle d'un matériau purement élastique. Dans un matériau purement élastique, l'énergie de déformation est stockée et peut être entièrement récupérée lors du relâchement des forces qui agissent sur lui, des forces qui agissent sur lui. L'eau est proche d'être un matériau parfaitement visqueux. L'acier, s'il n'est pas déformé de plus d'un ou deux pour cent, se comporte de façon presque entièrement élastique. En principe, tous les matériaux réels sont viscoélastiques. Une certaine quantité d'énergie peut toujours être stockée pendant la déformation du matériau, dans des conditions appropriées, et le stockage de l'énergie s'accompagne toujours de la perte d'une partie de l'énergie.

2.8 Généralités sur les propriétés rhéologiques des liants bitumineux

2.8.1 Comportement des bitumes

Les bitumes ont un comportement rhéologique complexe, dépendant de la température, de la déformation et du nombre de chargements. La figure 2.14, distingue plusieurs phases de comportement (F. Olard, 2000) :

- domaines fragile et ductile ;
- domaine élastique linéaire, caractérisé par les modules d'élasticité E et G ;
- domaine de viscoélasticité linéaire (VEL) de modules E^* et G^* ;
- la détermination des limites de linéarités ayant fait l'objet de nombre d'études (Peterson 1994, Airey et al. 2002, 2003, 2004) suggérant que les limites de linéarité sont fonctions de la valeur de module complexe, diminuant lorsque le module complexe augmente et, inversement, augmentant (jusqu'à des valeurs de 10%) lorsque la température augmente;
- domaine de viscosité pure, caractérisé par la viscosité η ;
- domaine des non-linéarités; domaine de fatigue.

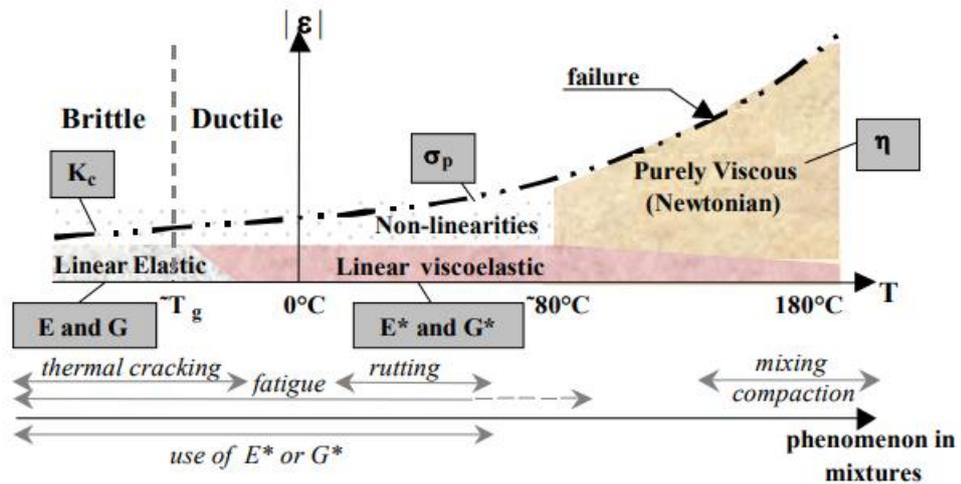


Figure 2.14. Classes de comportement des bitumes en fonction de ε et T (F. Olard, 2000)

2.9 Comportement viscoélastique

2.9.1 Viscoélasticité

Pour définir la viscoélasticité, il est important de préciser d'abord la notion de vieillissement pour les matériaux. En l'absence de toute action extérieure, les propriétés mécaniques de certains matériaux évoluent au cours du temps. Pour ces matériaux dits vieillissants, l'âge du matériau intervient dans son comportement. Un exemple de matériau vieillissant est fourni par le béton hydraulique pour lequel la rigidité et la résistance croissent en fonction de l'âge (sous l'effet d'une cristallisation lente). Un corps monodimensionnel et non vieillissant est dit viscoélastique si l'effacement est total lors d'une expérience d'effacement ($\sigma_\infty \rightarrow 0$). Cette expérience consiste à appliquer un créneau de déformation au matériau (figure 2.15).

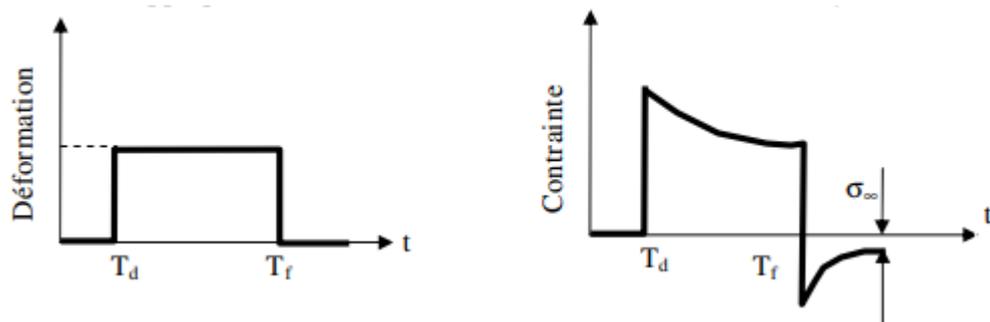


Figure 2.15. Expérience d'effacement et réponse du matériau en contrainte.

2.9.1.1 Viscoélasticité linéaire

Le comportement d'un matériau viscoélastique est dit linéaire (VEL), s'il obéit au principe de Boltzmann (équations 2.4. et 2.5). Pour un tel comportement, la superposition de plusieurs actions a pour réponse la superposition des réponses de toutes les actions. Ainsi en connaissant la

réponse du matériau à des sollicitations différentes on peut déduire sa réponse à leur combinaison linéaire (figure 2.16).

$$\varepsilon[c\sigma(t)] = c\varepsilon[\sigma(t)] \quad (2.4)$$

$$\varepsilon[\sigma_1(t) + \sigma_2(t - t_1)] = \varepsilon[\sigma_1(t)] + \varepsilon[\sigma_2(t - t_1)] \quad (2.5)$$

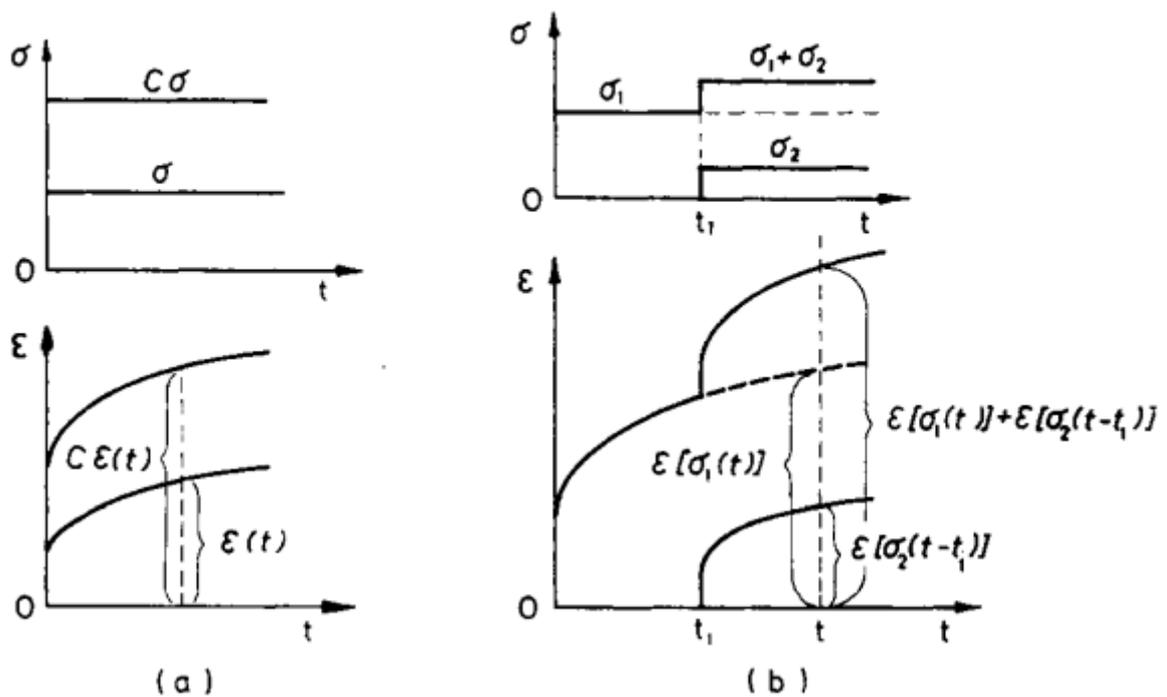


Figure 2.16. Illustration du comportement linéaire des matériaux (William N. Findley, 1976)

2.10 Le module complexe

Le module complexe (E^*) est l'expression de la rigidité d'un matériau viscoélastique sous chargement cyclique, c 'est un indicateur du degré de cohésion de la structure du matériau. Il a été utilisé, en premier, pour l'étude des propriétés rhéologiques des polymères. La déformation d'un matériau viscoélastique dépend du temps de chargement et est différée dans le temps, contrairement à un matériau élastique dont la déformation est instantanée. De plus, l'enrobé est un matériau thermosensible, ce qui signifie que le E^* varie également en fonction de la température. Le E^* permet de généraliser des méthodes de résolution de problèmes mécaniques développées pour les matériaux élastiques aux matériaux viscoélastiques (Di Benedetto, 2005). Le E^* est un nombre complexe composé d'une partie réelle (E') et d'une partie imaginaire (E''), tel que présenté à l'équation 2.6. Le E^* peut également se décomposer en deux paramètres sous sa forme

vectorielle, soit son module ($|E^*|$) (norme du vecteur) l'équation 2.7 et son argument (δ) (angle du vecteur) l'équation 2.8, tel que représenté dans le plan complexe de la figure 2.17.

Le E^* d'un enrobé est déterminé à l'aide d'essais cycliques à petites déformations ($< 100 \mu\text{m/m}$), soit dans le domaine linéaire du comportement mécanique, où la rigidité de l'enrobé est indépendante de l'état de contrainte ou de déformation (Di Benedetto et Corté., 2005). La figure 2.18., montre un cycle de sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé.

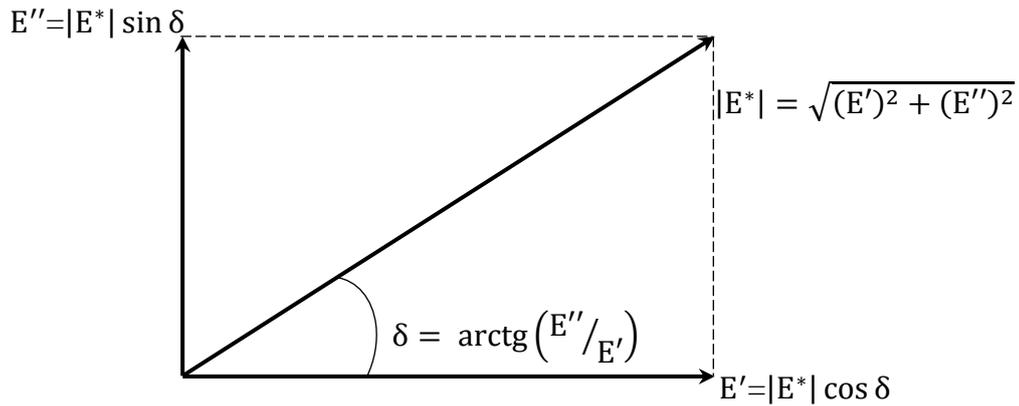


Figure 2.17. Représentation du module complexe

$$E^* = E' + iE'' = |E^*| \cos \delta + i|E^*| \sin \delta \quad (2.6)$$

$$|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2} \quad (2.7)$$

$$\delta = \arctg(E''/E') \quad (2.8)$$

Où

E^* : Module complexe

$|E^*|$: Norme du module complexe

δ : Argument du module complexe

E' : Partie réelle du module complexe ou module élastique

E'' : Partie imaginaire du module complexe ou module de perte

i : Nombre complexe tel que $i^2 = -1$

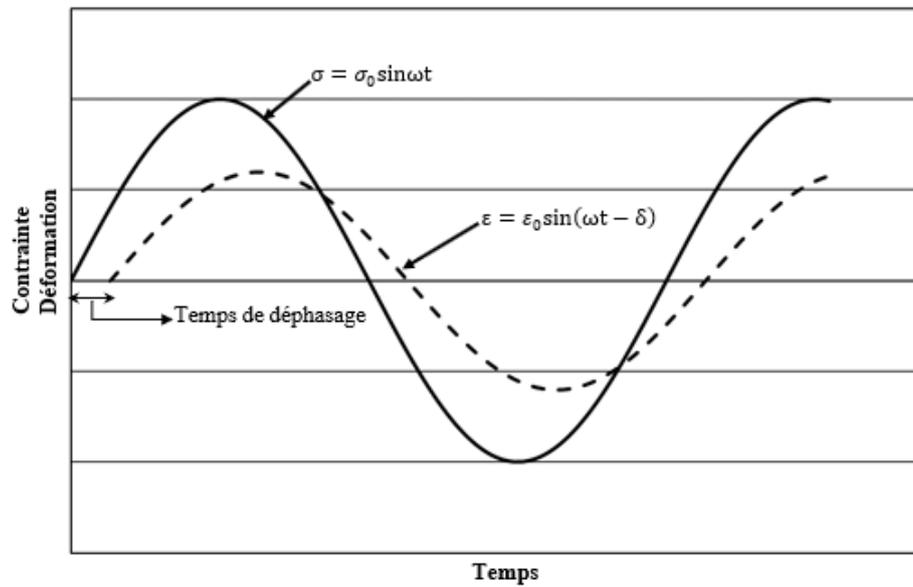


Figure 2.18. Sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé

2.10.1 Mesure de module complexe des matériaux bitumineux

2.10.1.1 Equipement 3MC (MLPC)

Cette machine est destinée à la mesure de module complexe sur éprouvette trapézoïdale de matériau bitumineux et réalise l'essai selon la norme (NF EN 12697-26 Annexe A) (figure 2.19).



Figure 2.19. Essai de mesure du module complexe des bétons bitumineux MLPC (NF EN 12697-26)

L'essai de module complexe sur éprouvettes trapézoïdales constitue l'un des essais de base pour la caractérisation des matériaux bitumineux routiers. Cet essai est systématiquement réalisé pour fournir les données requises dans les normes produit (module à 15 °C, 10 Hz). Il permet d'identifier les propriétés viscoélastiques linéaires des matériaux bitumineux dans leur gamme de fréquence et de température d'utilisation. Les résultats de cet essai permettent ainsi de caler des modèles rhéologiques pour la modélisation des matériaux bitumineux. Cet appareil permet de tester quatre (ou deux) éprouvettes simultanément dans les gammes de températures et de fréquences maximales suivantes -10 °C à 60 °C, 1 à 40 Hz.

2.11 Le comportement du matériau

Pour toute combinaison de temps et de température, le comportement viscoélastique, dans le domaine linéaire, doit être caractérisé par au moins deux propriétés : la résistance totale à la déformation et la répartition relative de cette résistance entre une partie élastique et une partie visqueuse. Bien qu'il existe de nombreuses méthodes pour caractériser les propriétés viscoélastiques, l'essai dynamique (oscillatoire) est l'une des meilleures techniques pour représenter le comportement de cette classe de matériaux. En mode cisaillement, le module dynamique ($|G^*|$, pour plus de simplicité, noté G^* et l'angle de phase (δ) sont mesurés. G^* représente la résistance totale à la déformation sous charge, tandis que δ représente la répartition relative de cette réponse totale entre une composante en phase et une composante en déphasage. La première composante est une composante élastique et peut être reliée à l'énergie stockée dans un échantillon pour chaque cycle de chargement, tandis que la deuxième représente la composante visqueuse de l'échantillon. Elle peut être liée à l'énergie perdue par cycle dans l'écoulement permanent. La distribution relative de ces composantes est une fonction de la composition du matériau, du temps de chargement et de la température.

Lors du chargement d'un matériau élastique celui-ci se déforme et emmagasine toute l'énergie qui lui a été fournie lors de sa déformation. Cette énergie est entièrement libérée si on supprime la charge. Dans le cas des matériaux visqueux une partie de l'énergie appliquée se dissipe puisque la courbe de charge et de décharge ne se confondent pas. Dans le plan contrainte - déformation, l'énergie dissipée correspond à l'aire confinée entre la courbe de charge et de décharge (figure 2.20).

Le travail dissipé par cycle de chargement d'un matériau viscoélastique linéaire est donné par l'expression équation 2.9.

$$W = \int \sigma \cdot d\varepsilon = \pi \sigma_0 \varepsilon_0 \sin \delta \quad (2.9)$$

Ou σ_0 et ε_0 sont les amplitudes respectives de la contrainte et de la déformation et δ l'angle de déphasage entre la contrainte et la déformation .

Pour un matériau élastique, l'énergie stockée pendant le temps de chargement correspond à la surface du triangle OCD, est donnée par l'équation 2.10.

$$W = \frac{1}{2} \sigma_0 \varepsilon_0 \quad (2.10)$$

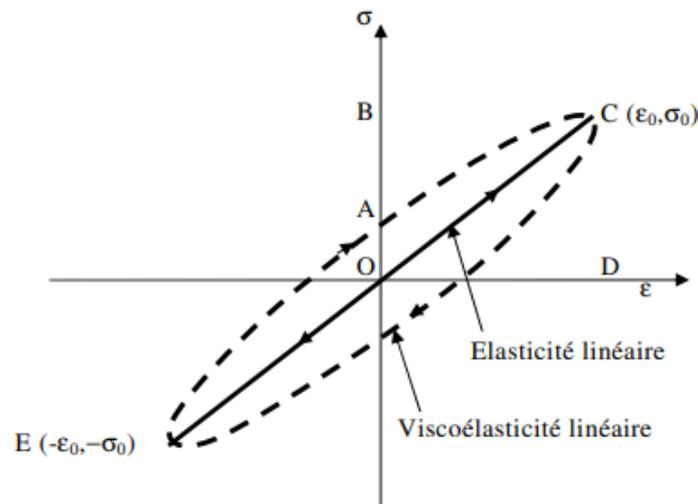


Figure 2.20. Cycle de chargement sinusoïdal sur un corps élastique et viscoélastique linéaire. La surface de l'ellipse correspond à l'énergie dissipée du corps viscoélastique. (Berthe-Julienne DONGMO-ENGELAND, 2005)

(Schapery, 1982) indique que le tenseur de contrainte $S_{ij}(t)$ et de déformation $\varepsilon_{ij}(t)$ dépendants du temps peuvent être exprimés par l'intégrale de superposition de Boltzmann, équation 2.11. Le concept du modèle viscoélastique linéaire décrit dans ce travail est le modèle de Maxwell généralisé représenté par un ensemble d'éléments connectés en parallèle, chaque élément est composé d'un ressort pour le comportement élastique et d'un amortisseur pour le comportement visqueux auquel on ajoute un ressort en parallèle (figure 2.21.). Le matériau de l'éprouvette est supposé être viscoélastique linéaire.

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t - \tau) \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2.11)$$

2.11.1 Modèle de Maxwell

Le modèle mécanique le plus simple, simulant un comportement viscoélastique linéaire, est un ressort combiné en série avec un amortisseur, c'est le modèle de Maxwell. L'équation constitutive de ce modèle est exprimée comme suit :

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.12)$$



Figure 2.21. Modèle de Maxwell

Après avoir résolu l'équation 2.12, l'expression temporelle de la contrainte est la suivante:

$$\sigma(t) = E\varepsilon_0 \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (2.13)$$

où :

E_0 : module d'équilibre

E_∞ : Module de relaxation instantané

E_i : Module du ième élément de Maxwell

τ_i : temps de relaxation

2.11.1.1 Modèle de Maxwell généralisé

Le modèle de Maxwell généralisé est constitué d'un nombre fini n d'éléments de Maxwell, placés en parallèle (figure 2.22), caractérisés par un temps de relaxation ($\tau_i = \eta_i / E_i$). L'expression analytique de ce modèle est donnée par l'équation 2.14

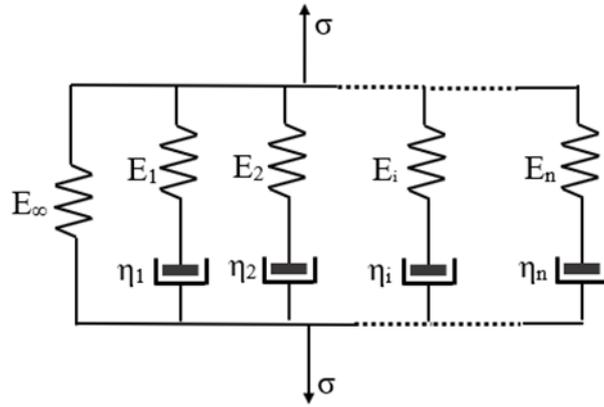


Figure 2.22. Modèle de Maxwell généralisé

$$E(t) = E_0 - \sum_{i=1}^n E_i \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \right] \quad (2.14)$$

$$E_0 = E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i \quad (2.15)$$

Le module de cisaillement s'exprime par la relation suivante

$$G(t) = G_0 - \sum_{i=1}^n G_i \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \right] \quad (2.16)$$

Avec :

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1 + \nu)} \quad (2.17)$$

2.11.2 Modèle de Kelvin Voigt

La figure 2.23 représente le modèle de Kelvin Voigt, il comporte un ressort et un amortisseur monté en parallèle. L'équation constitutive et l'expression temporelle du modèle, sont données par les équations 2.18 et 2.19 respectives.

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} \quad (2.18)$$

$$E(t) = \frac{1}{E} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (2.19)$$

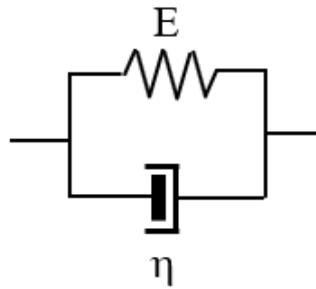


Figure 2.23. Modèle de Kelvin Voigt

2.11.2.1 Modèle de Kelvin-Voigt généralisé

Le modèle de Kelvin-Voigt généralisé peut être utilisé pour décrire le comportement des bétons bitumineux. Il comporte un ressort en série et n éléments de Kelvin-Voigt (figure 2.24). L'expressions analytique de ce modèles est données par l' équation 2.20

$$E(t) = \frac{1}{E_\infty} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \right] \quad (2.20)$$

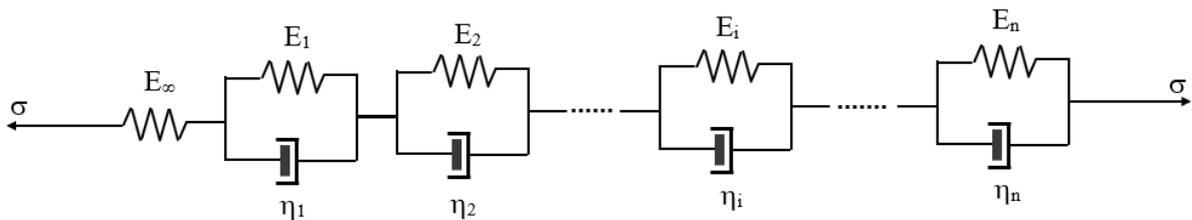


Figure 2.24. Modèle de Kelvin-Voigt généralisé

Certains matériaux viscoélastiques ont des réponses plus complexes et il faut alors utiliser un grand nombre d'éléments pour décrire le comportement du matériau. L'association de ces éléments en série ou en parallèle est considérée comme indispensable, c'est la généralisation des modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt.

2.11.3 Le modèle de Huet

Le modèle de Huet (1963) fut initialement proposé pour modéliser le comportement des liants et des enrobés bitumineux. Il s'agit d'un modèle analogique constitué d'un assemblage d'un ressort de rigidité E_∞ (qui représente le module instantané) et de deux éléments à fluage parabolique ($J1(t)=at^h$ et $J2(t)=bt^k$) montés en série (figure 2.25). Ce modèle a également un spectre continu, i.e. qu'il peut être représenté par une infinité d'éléments de Kelvin-Voigt en série ou d'éléments de Maxwell en parallèle. L' expressions analytique de ce modèles est données par l' équation 2.21

$$E^*(\omega) = \frac{E_\infty}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (2.21)$$

Avec

- i : nombre complexe défini par $i^2 = -1$,
- $\omega = 2\pi \cdot \text{fréquence}$, la pulsation,
- E_∞ : limite du module complexe quand $\omega\tau \rightarrow \infty$,
- h, k : exposants tels que $0 < k < h < 1$,
- δ : constante sans dimension,
- τ : temps caractéristique dont la valeur varie uniquement avec la température ; tient compte du Principe d'Equivalence Temps-Température.

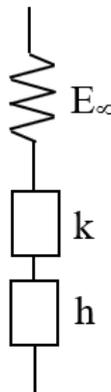


Figure 2.25. Modèle de Huet (Huet, 1963)

2.11.4 Modèle de Huet-Sayegh

Ce modèle diffère de celui de Huet pour le domaine des basses fréquences et des hautes températures. Le modèle de Huet donne, en effet, un comportement fluide aux enrobés dans le domaine des basses fréquences et des hautes températures. En particulier, la norme du module complexe tend vers zéro à haute température et basse fréquence équation 2.22.

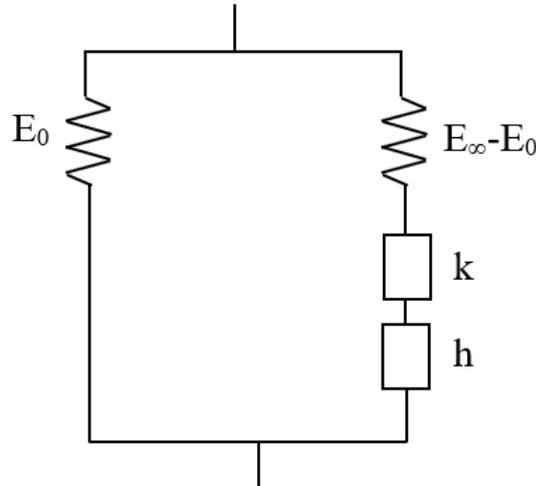


Figure 2.26. Modèle de Huet Sayegh (Huet, Sayegh, 1965)

Pour ce même domaine de fréquence et de température, Sayegh (1965) obtient une courbe du module complexe qui tend vers un module réel non nul, appelé module statique, noté E_0 , qui est très faible par rapport à E_∞ (figure 2.27). Le module statique, E_0 , dépend probablement du squelette granulaire. Le modèle de Huet-Sayegh (1965) est obtenu en associant en parallèle au modèle de Huet un ressort de raideur E_0 représentant le module statique (figure 2.26).

Le module complexe du modèle de Huet-Sayegh est donné par l'expression suivante :

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (2.22)$$

avec les mêmes notations que précédemment et E_0 le module statique quand $\omega\tau \rightarrow 0$.

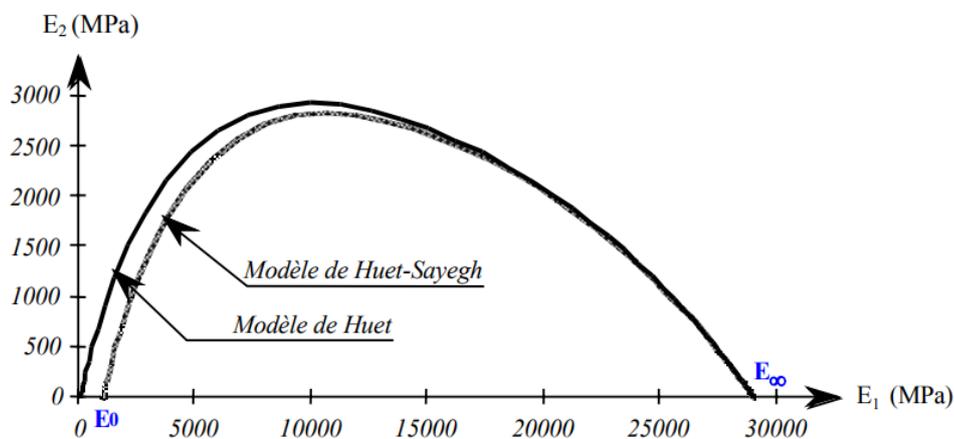


Figure 2.27. Courbes de module complexe des modèles de Huet et de Huet-Sayegh dans le plan Cole-Cole. (Olard, 2004)

2.11.5 Modèle 2S2P1D (Di Benedetto, ,2004)

Le modèle a été développé par (Di Benedetto et Olard ,2004), Il permet notamment d'améliorer le modèle de Huet-Sayegh à hautes températures et basses fréquences (figure 2.28). En effet, dans le cas des bitumes, pour lesquels $E_0 = 0$, le modèle introduit est équivalent à un amortisseur linéaire (corps visqueux) à très basse fréquence. Tout comme le modèle de Huet-Sayegh, le modèle introduit possède un spectre continu (i.e. pouvant être représenté par une infinité d'éléments de Kelvin-Voigt en série ou d'éléments de Maxwell en parallèle).

A une température donnée, ce modèle possède 7 constantes et son module complexe est donné par l'expression suivante :

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (2.23)$$

Avec :

- i : nombre complexe défini par $i^2 = -1$,
- $\omega = 2\pi f$, étant la pulsation, k, h : exposants tels que $0 < k < h$
- k, h : exposants tels que $0 < k < h$
- E_0 ("module statique") le module lorsque $\omega\tau \rightarrow 0$,
- E_∞ ("module vitreux") le module lorsque $\omega\tau \rightarrow \infty$,
- τ : temps caractéristique, dont la valeur dépend uniquement de la température,
- β : constante sans dimension,
- η : viscosité Newtonienne, $\eta = (E_\infty - E_0)\beta\tau$. Lorsque $\omega\tau \rightarrow 0$, alors $E^*(i\omega\tau) \rightarrow E_0 + i\omega(E_\infty - E_0)\beta\tau$.

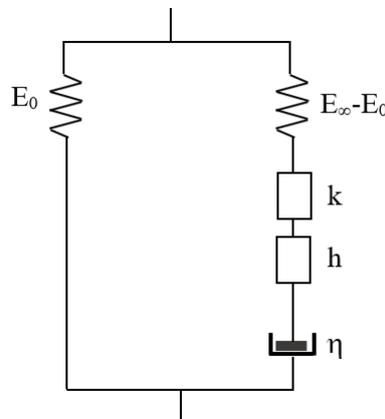


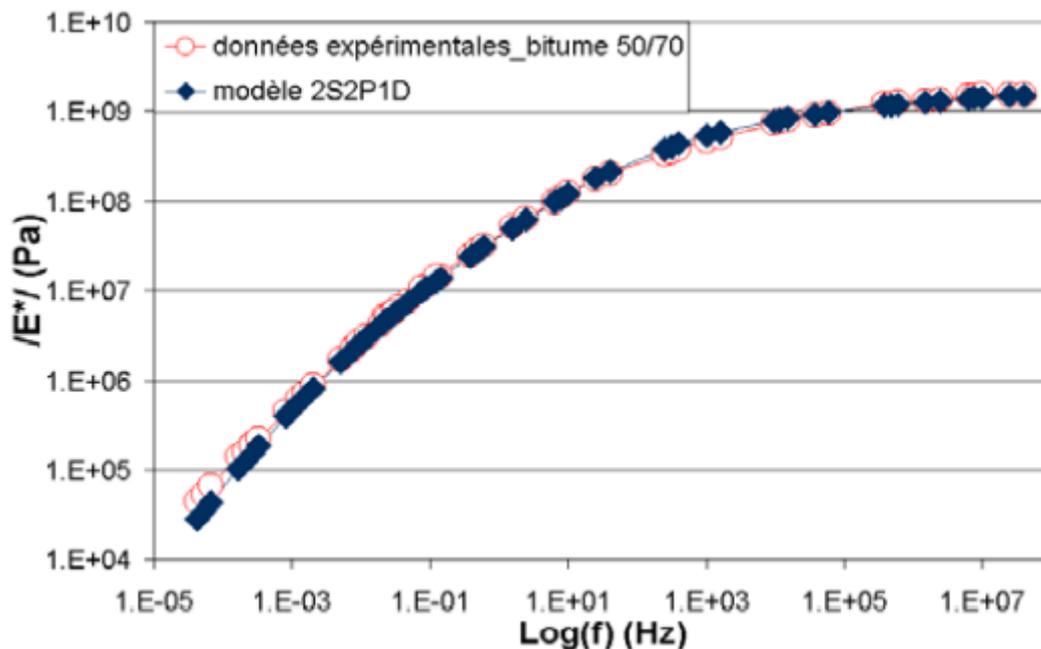
Figure 2.28. Modèle 2S2P1D (Di Benedetto, Olard, 2004)

Seulement 7 constantes (δ , k , h , E_∞ , E_0 , β et τ_0 (équation 2.23.)) sont donc nécessaires pour déterminer entièrement le comportement viscoélastique linéaire du matériau bitumineux considéré, à une température donnée. Pour les liants, le module statique expérimental E_0 est très proche de zéro (voire égal à zéro). Ainsi, dans l'équation 2.20., E_0 peut être considéré nul pour les liants et le nombre de constantes du modèle réduit à six.

La méthode de détermination des constantes du modèle "2S2P1D" (équation 2.24.) consiste à minimiser la somme des distances entre le module complexe expérimental et celui du modèle général introduit en N points de pulsation ω_i (méthode des moindres carrés).

$$\sum_{i=1}^{i=N} \left([E_1^{\text{exp}}(\omega_i) - E_1^{\text{model}}(\omega_i)]^2 + [E_2^{\text{exp}}(\omega_i) - E_2^{\text{model}}(\omega_i)]^2 \right) \quad (2.24)$$

E_1^{exp} et E_2^{exp} sont respectivement la partie réelle et la partie imaginaire du module complexe expérimental ($E^*\text{exp}$). E_1^{model} et E_2^{model} sont respectivement la partie réelle et la partie imaginaire du module complexe du modèle 2S2P1D. Les figures 2.29. présentent une comparaison entre les données expérimentales de l'enrobé au liant 50/70 et du modèle général "2S2P1D" correspondant



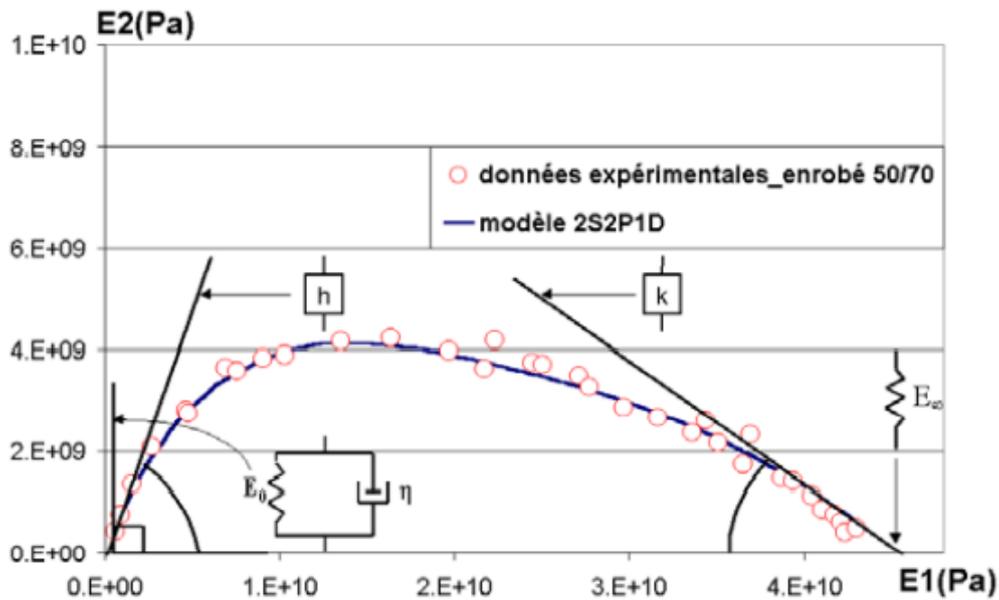
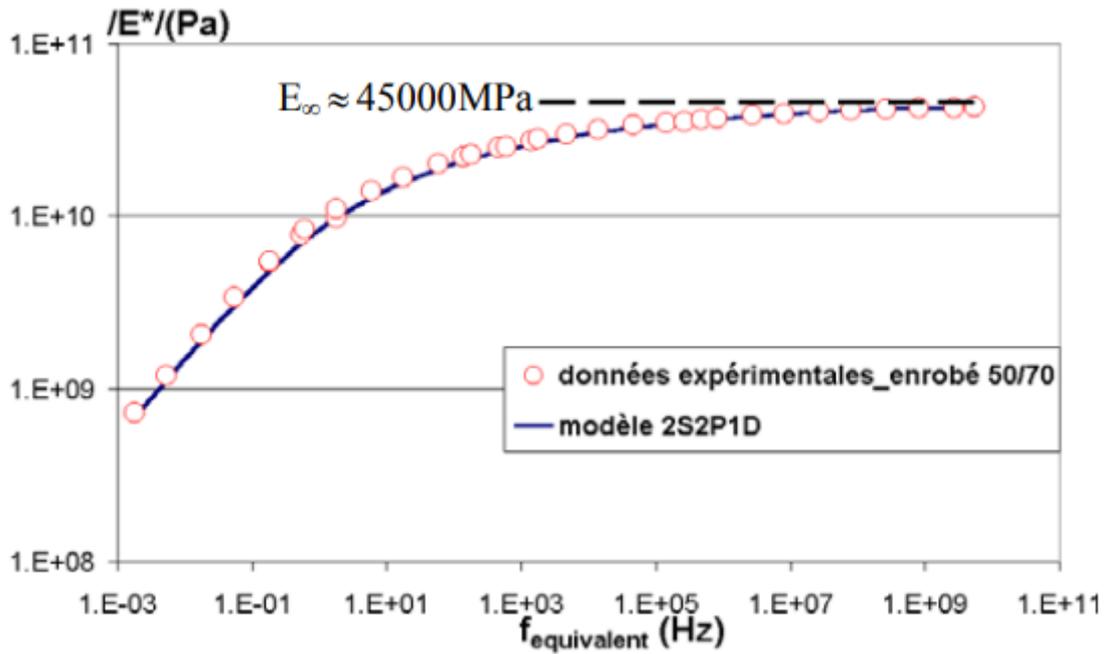


Figure 2.29. Comparaison entre les résultats expérimentaux de module complexe de l'enrobé au liant 50/70 et du modèle général "2S2P1D" correspondant ($T_s=10^\circ\text{C}$) (F. Olard, 2004)

2.11.6 Influence de la formulation d'enrobé

Comme la réalisation des essais de détermination du module complexe des enrobés bitumineux est longue et coûteuse, de nombreux chercheurs se sont intéressés à la possibilité de prédire la valeur de ce module à partir de la composition de l'enrobé bitumineux, cela dans l'optique d'obtenir un ordre de grandeur utilisable dans le dimensionnement des chaussées.

Les relations trouvées sont dérivées de statistiques basées sur la comparaison de résultats d'essais mécaniques sur plusieurs enrobés bitumineux ayant des compositions qui balayent les principaux paramètres de formulation. De plus, parmi les formules empiriques trouvées dans la littérature, la majorité d'entre elles concerne uniquement la norme du module complexe, l'angle de phase étant rarement étudié. A notre connaissance, peu d'auteurs ont établi des relations entre le module complexe du liant et celui de l'enrobé, valables à la fois pour la norme et pour l'angle de phase du module complexe.

Plusieurs types de formules prévisionnelles ont donc été développés pour établir une relation empirique entre le module des enrobés et les propriétés de leur liant, en y introduisant la distribution volumique des différents constituants du mélange. Citons, par exemple, les relations de (Heukelom et Klomp, 1964) (équation 2.25), (Ugé et al, 1977), (Francken et al, 1995) et de (Witczak et al, 1999).

$$|E_{\text{enrobé}}^*| = S_b \left[1 + \frac{2.5}{n} \cdot \frac{C_v}{1 - C_v} \right]^n \quad (2.25)$$

$$\text{Avec } n = 0.83 \cdot \log \frac{4 \cdot 10^4}{S_b} \text{ et } C_v = \frac{g}{g+b}$$

où S_b (Pa) est le module de rigidité du bitume tiré de l'abaque de (Van der Poel, 1954) qui donne le module de rigidité d'un bitume en fonction de la fréquence, de la température et de l'indice de pénétration (IP) du liant. g et b sont respectivement la fraction volumique des granulats et celle du bitume (%).

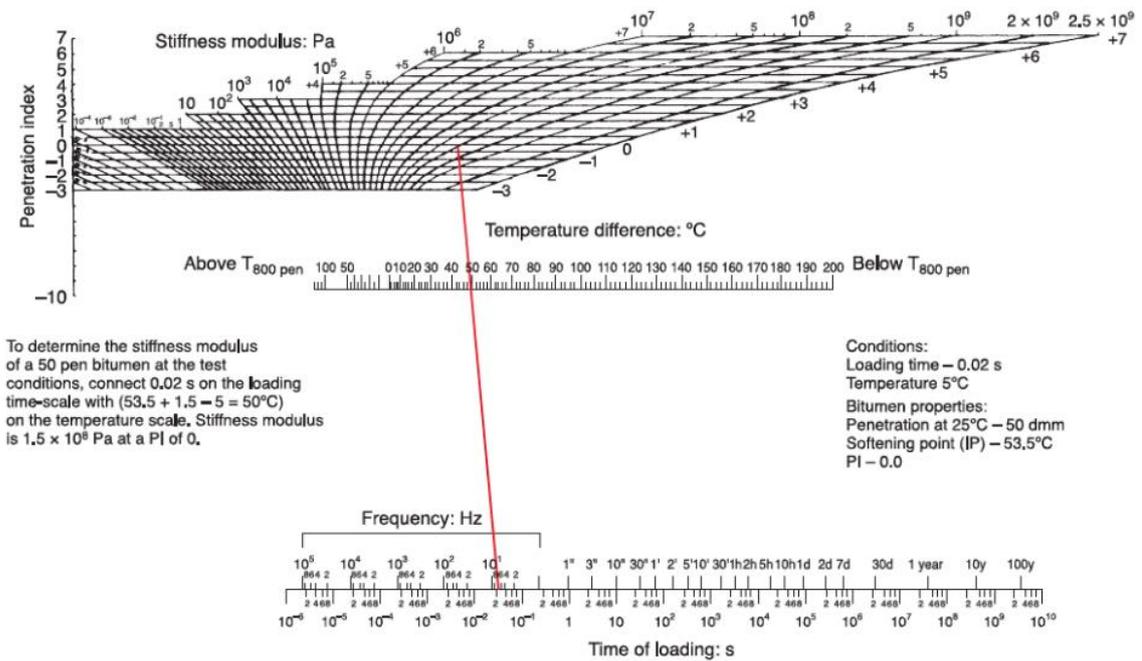


Figure 2.30. Nomographe pour déterminer le module de rigidité du bitume (Van de Poel, 1955)

Cette formule peut être utilisée pour calculer le module d'une grande variété de formulations, mais elle a été établie avec des teneurs en vides toujours proches de 3 %. Les expériences ont montré qu'elle s'applique médiocrement aux enrobés bitumineux moins compactés, ainsi cette relation a été corrigée pour être appliquée aux enrobés bitumineux moins compactés, en utilisant C_v' au lieu de C_v défini comme :

$$C_v = \frac{C_v}{0.97 + (0.01)(100 - (g + b))} \quad (2.26)$$

2.11.6.1 Relation d'Ugé et al. (1977)

Cette relation donne la norme et l'angle de phase du module complexe de l'enrobé à partir des propriétés du liant et de la composition de l'enrobé (équations 2.27, 2.28 et 2.29).

$$\log(E_\infty [Pa]) = 10.82 - (1.342) \left(\frac{100 - g}{g + b} \right) \quad (2.27)$$

Si $10^7 < S_b < 10^9$ Pa

$$\log|E_{enrobé}^*| = M \cdot (\log S_b - 8) + B \quad (2.28)$$

Si $10^9 < S_b < 3 \cdot 10^9$ Pa

$$\log|E_{enrobé}^*| = B + M + (A - B - M) \cdot \frac{(\log S_b - 9)}{\log(3)} \quad (2.29)$$

$$\text{Avec : } B = 8 + (5.68)10^{-3}g + (2.135) \cdot 10^{-4}g^2$$

$$M = \frac{(1.12(A - B))}{\log(30)} \quad (2.30)$$

- g et b : respectivement la fraction volumique des granulats et celle du bitume (%)
- Sb : module de rigidité du bitume tiré de l'abaque de Van der Poel (Pa)
- E_∞ : module asymptotique du matériau bitumineux à basse température et haute fréquence.

Ugé et al. (1977) fournissent également une expression empirique de l'angle de phase du module complexe de l'enrobé en fonction du module de rigidité du liant, Sb, de la teneur en vides, v (%), et de la fraction volumique du bitume, b (%). Pour un module de rigidité du liant compris entre 5 et 2000 MPa, l'angle de phase de l'enrobé peut être prédit en utilisant l'équation suivante dans laquelle Sb est exprimée en MPa :

$$\varphi_{enrobé} = (16.36)b^{0.352} \exp \left[(0.974) \frac{\log(S_b/5)}{\log(S_b/2000)} \cdot v^{-0.172} \right] \quad (2.31)$$

Lorsque Sb est supérieur à 2000 MPa, φ enrobé est supposé nul.

2.11.6.2 Relation de Francken et al. (1995)

Tout comme Ugé et al. (1977), Francken et al., ont montré que le module maximum asymptotique de l'enrobé à basse température et à haute fréquence, E_∞, ne dépend que de la composition de l'enrobé (équation 2.32) :

$$E_{\infty}[\text{MPa}] = 14360 \left(\frac{g}{b} \right)^{0.55} \exp(-0.584v) \quad (2.32)$$

La norme du module complexe de l'enrobé est ensuite décomposée comme suit :

$$R^*(T, f) = E_{enrobé}^*(T, f)/E_{\infty}$$

$$\log R^* = \log B^* \left[1 - 1.35 \left(1 - \exp \left(-0.13 \frac{g}{b} \right) \right) (1 + 1.11 \log B^*) \right] \quad (2.33)$$

avec : R* (T,f): le module réduit de l'enrobé à une température T et à une fréquence f

B*: le module réduit du bitume, défini à partir du module en cisaillement du bitume

g et b : respectivement la fraction volumique des granulats et celle du bitume (%)

v: la teneur en vides de l'enrobé (%)

Francken et Vanelstraete (1995) ont également mis en évidence expérimentalement une relation entre l'angle de déphasage de l'enrobé et celui du liant. Cette relation, présentée dans figure 2.31, a été vérifiée pour différents bitumes purs et modifiés.

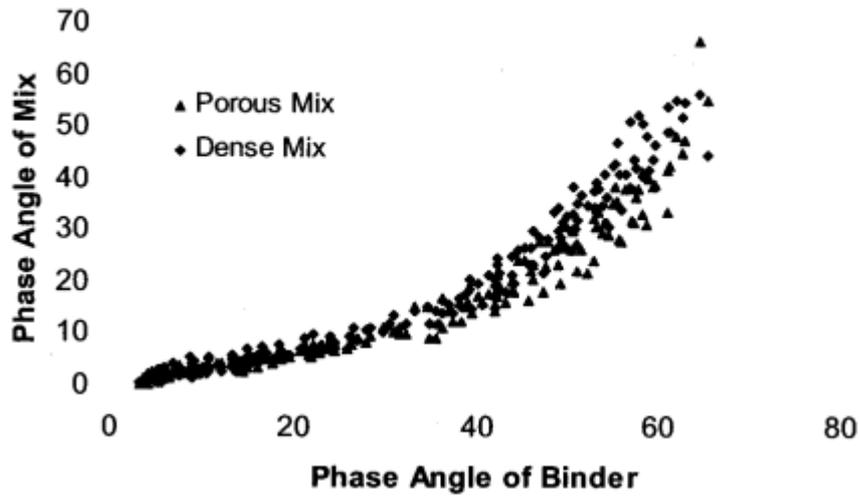


Figure 2.31. Relation entre l'angle de phase des enrobés et l'angle de phase des liants
(Franken, 1996)

2.11.6.3 Relation de Witczak et al. (1999)

La relation de Witczak et al. (1999 et 2000) permet de prédire la norme du module complexe de l'enrobé à partir des propriétés du liant et de la composition de l'enrobé. Plus de 2800 mesures de module complexe, sur environ 200 formulations d'enrobé différentes, ont permis d'établir cette relation empirique (équation 2.34) :

$$\log|E_{\text{enrobé}}^*| = -1.249937 - 0.001767(\rho_{200})^2 + 0.029232(\rho_{200}) - 0.00284(\rho_4) - 0.058097(V_s) - \frac{0.802208(V_{\text{beff}})}{V_{\text{beff}} + V_s} + \frac{3.871977 - 0.0021(\rho_4) + 0.003958(\rho_{38}) - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.00547(\rho_{34})}{1 + e^{(-0.603313 - (0.313351)\log(f) - (0.393532)\log(\eta))}} \quad (2.34)$$

Avec :

$|E_{\text{enrobé}}^*|$: norme du module complexe (10^5 psi),

η : viscosité du bitume (10^6 Poise),

f : fréquence (Hz),

V_a : teneur en vides (%),

V_{beff} : fraction volumique du bitume (%),

ρ_{34} : pourcentage cumulé retenu avec une maille de 19mm (%),

ρ_{38} : pourcentage cumulé retenu avec une maille de 9.5mm (%),

ρ_4 : pourcentage cumulé retenu avec une maille de 4.76mm (%),

ρ_{200} : pourcentage de tamisât passant avec une maille de $75\mu\text{m}$ (%).

La relation suivante permet ensuite de déterminer l'angle de déphasage du béton bitumineux connaissant son module et la fréquence :

$$\varphi_{\text{enrobé}} = -464.568 + 186.6469(\log|E_{\text{enrobé}}^*|) - 17.5259(\log|E_{\text{enrobé}}^*|)^2 + (0.326268)f \quad (2.35)$$

2.11.6.4 Modèle fonction du chargement

Des modèles calculatoires ont aussi été basé sur l'un des éléments ayant une grande influence sur la déformation permanente à savoir, le chargement appliqué. Les modèles présentés dans le tableau 2.6, sont majoritairement basé sur des essais de rupture statique en assimilant des paramètres de l'essai statique afin de prédire l'essai à chargement répété

Tableau 2.6. Modèles fonction du chargement

Auteur	Loi et Nombre de paramètres de régression	Commentaires
Lentz & Baladi (1981)	$\varepsilon_{1,p} = \varepsilon_{0,955} \ln\left(1 - \frac{q}{S}\right)^{-0,15} + \left[\frac{n\left(\frac{q}{S}\right)}{1 - m\left(\frac{q}{S}\right)} \right] \ln(N)$	1 n : coefficient de régression $\varepsilon_{0,955}$: déformation à 95 % de la contrainte statique maximale S : contrainte statique
Barksdale (1972)	$\varepsilon_{1,p} = \frac{\frac{q}{a\sigma_3^n}}{1 - \left[\frac{(R.q)(1 - \sin \varphi)}{2(C \cos \varphi + \sigma_3 \sin \varphi)} \right]}$	2 a, n : coefficients de régression C : cohésion apparente φ : angle de frottement interne
Pappin (1979)	$\varepsilon_{s,p} = f_n(N) L \left(\frac{q^0}{p^0} \right)_{\max}^{2.8}$	0 $\varepsilon_{s,p}$: déformation permanente en cisaillement $f_n(N)$: facteur de la forme fonction de N p^0 : contrainte moyenne modifiée $\sqrt{3} \cdot p$ q^0 : contrainte déviatorique modifiée $\sqrt{2/3} \cdot q$
Lashine et coll. (1971)	$\varepsilon_{1,p} = a \left(\frac{q}{\sigma_3} \right)$	1 a : coefficient de régression
Nishi (1994)	$\varepsilon_{1,ult}^p = k \frac{q^a}{p^b}$	3 a, b, k : coefficients de régression $\varepsilon_{1,ult}^p$: déformation permanente axiale ultime
Shenton (1974)	$\varepsilon_{1,p} = K \left(\frac{q_{\max}}{p} \right)^a$	2 a, K : coefficients de régression
Arnold et coll. (2008)	$\varepsilon_p = e^{(a)} e^{(bp)} (e^{(cq)} - 1)$	3 a, b, c : coefficients de régression ε_p : déformation permanente en magnitude ou ratio de déformation permanente

2.11.6.5 Modèles fonction du nombre de cycles N et de la contrainte

Les approches reliant la déformation permanente uniquement à la contrainte ne sont pas forcément les plus appropriées selon (Lekarp et coll., 2000). La raison est que le comportement complexe des matériaux granulaires n'est pas toujours prévisible à cause des différentes réponses structurelles du matériau en fonction de la contrainte. Le tableau 2.7 présente une synthèse des principaux modèles répertoriés

Tableau 2.7. Modèles fonction du nombre de cycles et de la contrainte

Auteur	Loi et Nombre de paramètres	Commentaires
Gidel et coll. (2001)	$\varepsilon_{1,p}(N) = \varepsilon^0 \left[1 - \left(\frac{N}{1000} \right)^{-B} \right] \left(\frac{L_{\max}}{p_a} \right)^n \left(m + \frac{s}{p_{\max}} - \frac{q_{\max}}{p_{\max}} \right)^{-1}$	3 <i>B, n, ε⁰</i> : paramètres dépendants du matériau <i>p_a</i> : pression atmosphérique <i>s</i> : contrainte statique maximale
Korkiala-Tanttu (2005)	$\varepsilon_{1,p}(N) = CN^B \frac{R}{A-R}$	3 <i>A</i> : coefficients de régression <i>B, C</i> : paramètres dépendants du matériau
Tseng & Lytton (2004)	$\varepsilon_{1,p}(N) = \beta_1 \left(\frac{\varepsilon^0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)} \varepsilon_v h$	3 <i>β₁, ε⁰, ρ</i> : paramètres dépendants du matériau <i>ε_v</i> : déformation verticale moyenne obtenue d'un premier modèle <i>ε_r</i> : déformation résiliente imposée pour obtenir <i>β₁, ε⁰, ρ</i> <i>h</i> : épaisseur de la couche/éprouvette
Lekarp & Dawson (1998)	$\frac{\varepsilon_{1,p}(N_{ref})}{L/p_0} = a \left(\frac{q}{p} \right)_{\max}^b$	2 <i>a, b</i> : coefficients de régression <i>ε_{1,p}(N_{ref})</i> déformation permanente axiale accumulée à partir des <i>N_{ref}</i> cycles <i>p₀</i> pression de référence (ex = 1kPa)

2.12 Conclusion

Les caractéristiques mécaniques du béton bitumineux dans le domaine de la viscoélastique linéaire montrent une forte dépendance par rapport à

- la formulation du mélange ;
- paramètres environnementaux tels que (température, vieillissement,...) ;
- paramètres de chargement mécanique (taux de chargement, fréquence,...).

Dans ce chapitre, les principales propriétés des liants hydrocarbonés et des bétons bitumineux ont été présentées. Elles constituent le cadre général de cette étude et permettent une bonne compréhension des différents éléments introduits dans les chapitres qui suivent, consacrés à la présentation des résultats obtenus au cours de cette étude de modélisation de l'essai d'orniérage français. L'accent est mis sur la complexité du comportement des bétons bitumineux. Ce comportement, de nature visqueuse, est étroitement lié aux deux paramètres qui sont la température et la fréquence de chargement.

Chapitre 3 : Etude expérimentale sur l'essai d'orniérage

3.1 Introduction

De nombreux essais expérimentaux ont été utilisés pour caractériser les propriétés physiques des liants bitumineux. Ils sont réalisés dans des conditions particulières de température et de temps de chargement. Certains de ces essais peuvent être considérés comme mesure directe de la résistance du bitume à la déformation permanente.

Dans la catégorie des tests de simulation, on cite l'essai d'orniérage, le principe de cet essai est de soumettre une dalle du mélange d'asphalte à l'essai au mouvement aller et retour, d'une roue chargée en surface. Pendant l'essai, la brame est maintenue aussi constante que possible dans la température. Le changement de profondeur de l'ornière est enregistré en fonction du nombre de passages de la charge. L'acceptation ou non du matériau testé est basée sur la profondeur de l'ornière obtenue après un certain nombre de cycles. En particulier, la fraiseuse LCPC développée en France, standardisée [NF EN 12697-22] est utilisée dans l'étude de la formulation des matériaux pour la conception des chaussées.

Le succès de l'approche réside dans la bonne représentativité de l'essai d'orniérage par rapport à la situation in situ. Elle permet notamment de soumettre le matériau à des contraintes mécaniques relativement similaires à celles rencontrées sur les chaussées (niveau de contrainte, rotations, etc.) et de détecter de manière adéquate la capacité du matériau à résister ou non à des déformations permanentes. Toutefois, l'essai seul, effectué selon ces normes, ne permet pas de prévoir en détail l'évolution de l'orniérage dans une chaussée, dans la mesure où elle ne permet pas de prendre en compte les bonnes conditions limites ainsi que la variabilité des conditions réelles rencontrées sur les chaussées, c'est-à-dire les variations de température, de charge des roues, de balayage des chaussées, empilement réel des couches bitumineuses avec leurs épaisseurs, ... etc. Nous ne nous intéresserons donc plus aux tests de simulation, mais aux tests rhéologiques dans des conditions de contrainte et de déformation homogènes.

L'essai d'orniérage est l'essai de simulation le plus évident pour caractériser la résistance à la déformation en faisant rouler une roue de façon répétée sur la plaque de béton bitumineux. Cependant, il y a un certain nombre d'aspects qui doivent être normalisés, notamment

- Le diamètre et la largeur de la roue
- Le type de pneu (pneumatique, caoutchouc plein ou acier)
- La charge sur la roue
- La fréquence de la charge
- Le nombre total d'applications de la charge
- La température de l'essai
- Le résultat de l'essai (profondeur de l'ornière, pourcentage de l'ornière par rapport à l'épaisseur de la plaque à la fin de l'essai).

3.2 Les différents types de WTT

Dans cette section, les dispositifs de suivi des roues seront traités tels qu'ils apparaissent dans la norme BS EN 12697-22 :2003. Cette norme classe les dispositifs en quatre catégories.

Il s'agit des dispositifs extra-larges, des dispositifs larges, des dispositifs petits et des dispositifs de petite taille.

3.3 Les essais d'orniérage

3.3.1 Essai Asphalt Pavement Analyzer (APA)

L'APA (Asphalt Pavement Analyzer) est un appareil d'essai d'orniérage et multifonctionnel à trois roues (figure 3.1). Il est utilisé pour évaluer la déformation permanente, la fissuration par fatigue et la sensibilité à l'humidité des enrobés à chaud et à froid. L'APA répond aux dispositions de l'essai d'orniérage AASHTO 340-10 et de l'essai de Hambourg AASHTO-324-14. Il peut tester les mélanges à plusieurs vitesses et à plusieurs types de charge. Il est doté d'une " fonction haute pression " qui permet à l'utilisateur d'effectuer des essais d'ornières à des pressions de contact élevées, pour les enrobés utilisés sur les pistes d'aéroport et les voies de circulation. L'APA peut également être équipé d'une plaque froide, qui permet à l'utilisateur d'effectuer des essais de fatigue à basse température sur des éprouvettes de poutre et des essais de résistance à l'abrasion, et des essais de roue cloutée à basse température sur des éprouvettes cylindriques. L'APA peut également être équipé pour effectuer des essais de micro-revêtement et de joints d'étanchéité. Des roues en caoutchouc plein et roues pneumatiques peuvent également être utilisées. L'APA fonctionne à l'aide d'un système de commande PLC basé sur PC, système de contrôle. Le système d'exploitation permet à l'utilisateur d'effectuer tous les étalonnages et toutes les fonctions directement sur ordinateur portable.

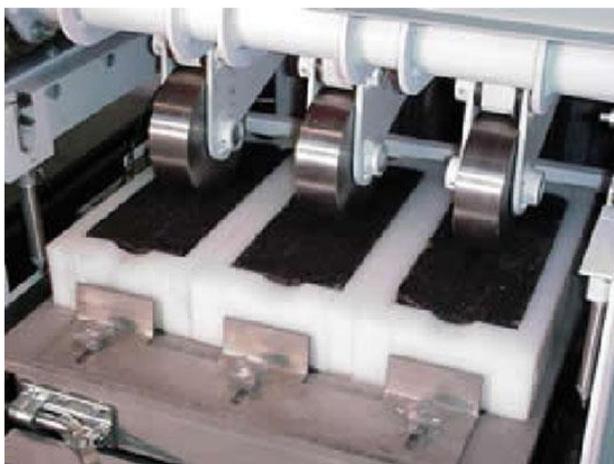


Figure 3.1. L'essai Asphalt Pavement Analyzer (APA) (AASHTO 340-10)

3.3.2 L'essai Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT)

L'essai Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT), a été développé par le Georgia Department of Transportation, il est utilisé depuis 1985 au cours de la phase de conception pour évaluer l'état des chaussées de Géorgie est utilisé depuis 1985 au stade de la conception et dans le but d'évaluer la susceptibilité à l'orniérage des mélanges de béton bitumineux (figure 3.2). Dans l'essai GLWT le béton bitumineux est soumis à une température élevée dans un système de roues chargées dans des conditions de charge répétitives, la déformation permanente induite sous la trajectoire de la roue est mesurée. Cette approche qui permet d'estimer la résistance à l'orniérage, a été jugée beaucoup plus représentative que les méthodes d'essai actuelles. Elle peut également fournir un moyen rapide et plus précis de la déformation de l'orniérage du béton bitumineux dans des conditions réelles de terrain. Les échantillons de poutres du matériau utilisés pour l'essai GLWT sont préparés par un compacteur à rouleaux. Pour promouvoir le concept d'utilisation de l'essai GLWT comme complément à la procédure de conception Superpave de niveau 1 pour évaluer la déformation permanente de l'asphalte chaud (HMA), une méthode d'essai utilisant les échantillons préparés par le compacteur giratoire Superpave afin d'évaluer la résistance à l'orniérage de l'HMA. Les échantillons peuvent être testés à 40, 50 et 60 °C pendant 8 000 cycles selon la procédure d'essai GLWT standard.



Figure 3.2. Essai Georgia Loaded Wheel (GLWT)

3.3.3 L'essai Hamburg Wheel Tracking Device (HWDT)

Le Hamburg Wheel-Tracking Device (HWTD) mesure les effets combinés de l'orniérage et de l'humidité en faisant rouler une roue en acier sur la surface d'une dalle de béton bitumineux immergée dans l'eau chaude. L'appareil a été développé dans les années 1970 par Esso A.G. de Hambourg, en Allemagne, sur la base d'un appareil britannique similaire qui était équipé d'un pneu en caoutchouc. La machine s'appelait à l'origine "Esso Wheel-Tracking Device". La ville de Hambourg a finalisé la méthode d'essai et a développé un critère de réussite/échec pour garantir que les mélanges qui réussissent l'essai sont très peu sensibles à l'orniérage. Ce dispositif est illustré dans (figure 3.3.). Ludomir Uzarowski en 2007 a réalisé une étude sur l'essai sus-cité et ses résultats sont représentés sur les figures 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7.



Figure 3.3. Equipement du Hamburg Wheel-Tracking Device (HWTD)

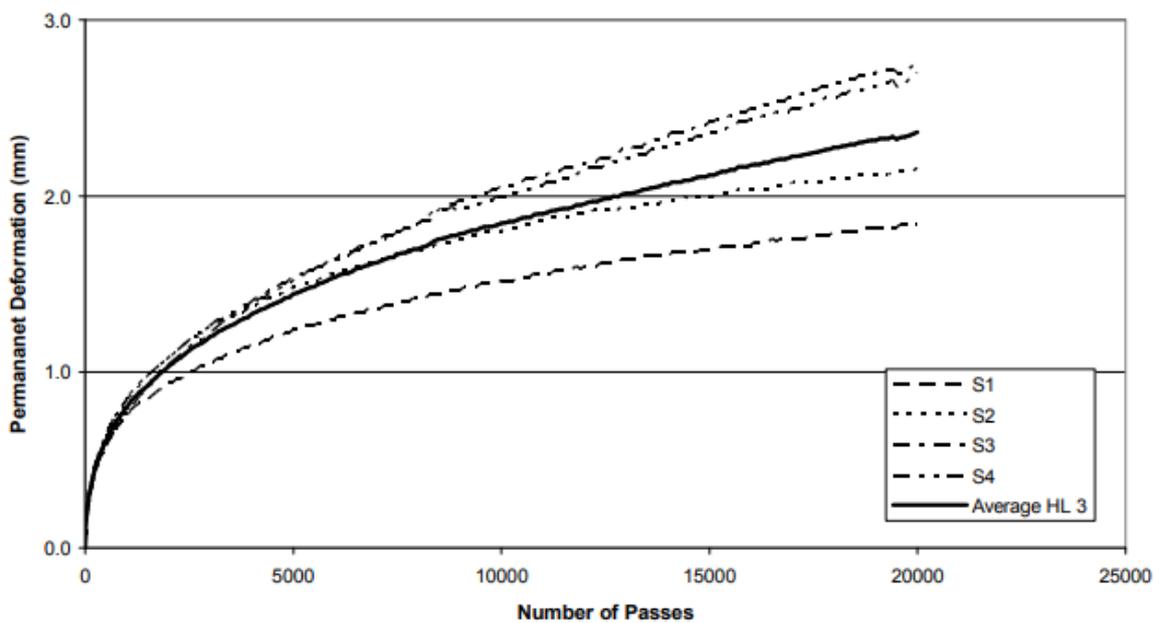


Figure 3.4. Déformation permanente en fonction du nombre de passes dans l'essai HWRT
(Ludomir . U, 2006)

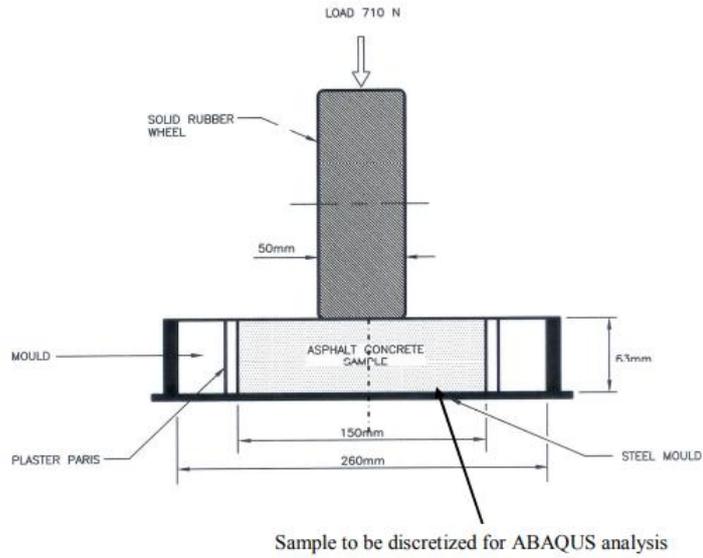


Figure 3.5. Schéma du modèle d'ornièrage de l'essai HWRT utilisé dans ABAQUS (Ludomir. U,2006)

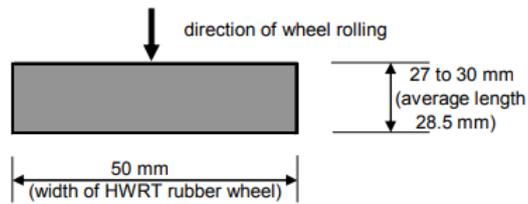


Figure 3.6. Empreinte de la roue de l'essai HWRT (Ludomir. U, 2006)

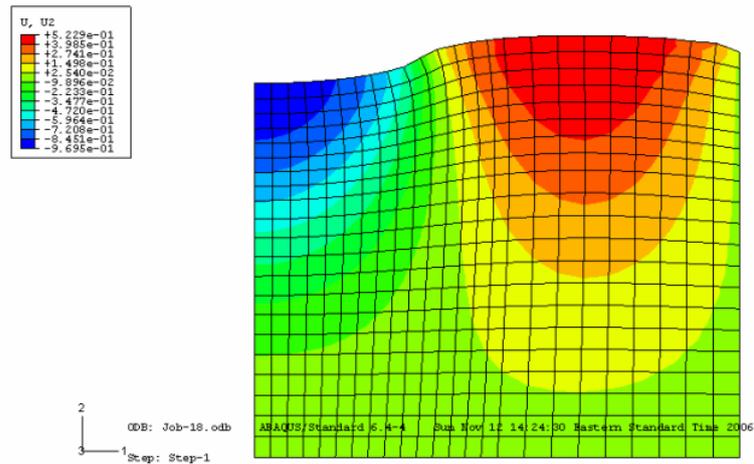


Figure 3.7. Section déformée de l'éprouvette après 20,000 Passes (Ludomir. U, 2007)

3.3.4 L'essai UK Wheel Tracking Device

Il a été conçu au Nottingham Transportation Engineering Centre, au Royaume-Uni, il présente quelques différences fondamentales. Tout d'abord, la charge sur le dispositif peut être modifiée. Un système de suspension à l'extrémité du bras de chargement permet de faire varier le poids en fonction des besoins de l'essai. En second lieu, la taille des moules est différente, les dimensions des éprouvettes qu'on peut utiliser ont généralement 305, 280 et 100 mm de longueur, la hauteur peut varier entre 50 et 100 mm. La température à laquelle les tests peuvent être effectués est limitée par la pièce à température contrôlée dans laquelle se trouve l'équipement. Elle peut varier de 0 à 40°C, mais l'utilisation de chauffages inductifs permet d'obtenir une température plus élevée, il est possible d'élever la température des essais jusqu'à 50°C. Enfin, il est possible de faire varier la vitesse du dispositif, car le mécanisme a été équipé d'un variateur qui peut faire varier la vitesse de zéro à 45 passages par minute (figure 3.8).

Cet équipement a été utilisé pour de nombreuses recherches fondamentales au fil des ans, notamment pour appliquer des forces de flexion à des poutres en béton bitumineux et pour simuler des fissures de réflexion à travers des revêtements.

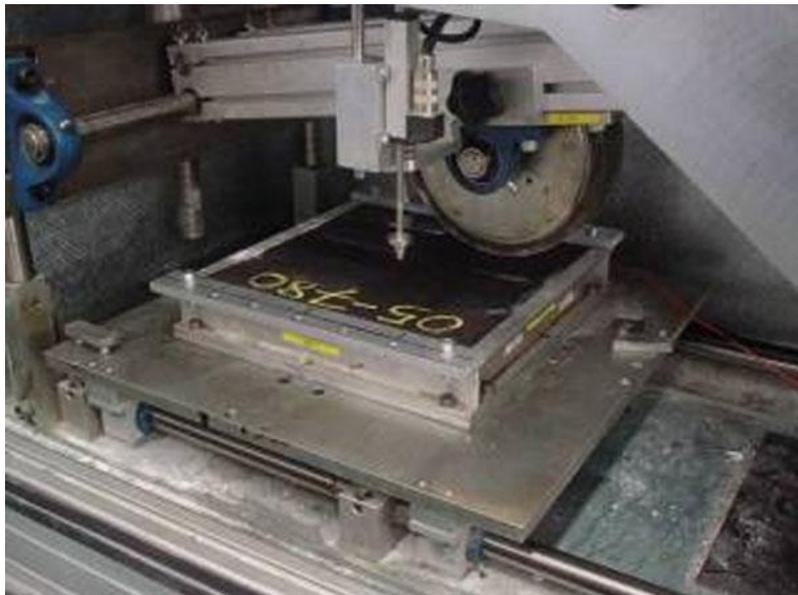


Figure 3.8. Equipement de UK Wheel Tracking Device

3.3.5 Le manège de fatigue l'Ifsttar (MLPC)

Un accélérateur de trafic exceptionnel dans le monde. Le manège de fatigue de l'Ifsttar est un simulateur de trafic permettant d'étudier le comportement en vraie grandeur des chaussées sous trafic lourd accéléré. Entré en service en 1984, plus de 100 structures ont été testées à ce jour, doté d'un diamètre de 40 m, sa puissance permet d'entraîner jusqu'à 100 km/h des charges de plus de

130 kN placées en bout de bras. Deux mois de rotation peuvent représenter jusqu'à 20 ans de trafic poids lourd subi par une chaussée de moyen trafic (T3 : 150 PL/jour). Les essais peuvent concerner les structures de chaussées neuves, leurs techniques d'entretien et de renforcement, ainsi que tout élément de voirie. Les dimensions du manège permettent de construire les sections avec du matériel courant de chantier (figure 3.9).

Le manège est formé d'une tourelle centrale et de quatre bras à l'extrémité desquels peuvent être fixées des charges roulantes reproduisant les configurations d'essieux des poids lourds courants (roues simples ou jumelées montées sur essieux simples, tandem ou tridem (figure 3.12) Au milieu du bras un appui intermédiaire roulant sur un anneau en béton armé permet de stabiliser les bras et d'éviter les surcharges dynamiques. Les trains de roulement circulant en bout de bras possèdent un système original de suspension à faible raideur permettant le contrôle des charges appliquées aux chaussées expérimentales, quel que soit leur degré de dégradation. Les charges peuvent se déplacer latéralement pendant la rotation du manège, afin de simuler le balayage transversal du trafic routier.



Figure 3.9. Manège de fatigue de l'Ifsttar (MLPC)

Le site dispose de trois anneaux d'essais permettant au manège d'être déplacé d'un site à l'autre en une semaine (figure 3.10). Les pistes ont un rayon moyen de 17,5 m, la largeur de chaussée est de 6 m. Il est possible de brocher les trains de roulement à différents rayons moyens de rotation le long des bras (de $R = 15,50$ m à $R = 19,50$ m). Un anneau présente un périmètre moyen de 110 m, qu'il est possible de subdiviser en plusieurs secteurs d'essais dévolus ou non à une même problématique.



Figure 3.10. Vue aérienne des trois pistes d'essai

L'un des anneaux est doté d'un cuvelage en béton de 3 m de profondeur et 10,40 m de large, rempli d'un sable argileux et muni de systèmes de pompage permettant de piloter le niveau de la nappe phréatique dans le sol support des chaussées expérimentales. Il est possible de faire varier ce niveau en cours d'expérience pour reproduire les cycles hydriques saisonniers (figure 3.11).



Figure 3.11. Cuvelage pour la reconstitution de la nappe phréatique

Les structures de chaussées sont instrumentées à la construction afin de pouvoir suivre leur évolution. Les paramètres généralement mesurés sont : la déflexion de la chaussée, les déformations longitudinales et transversales dans les couches traitées, les déformations et contraintes verticales dans les couches non liées, les températures. D'autres capteurs peuvent être utilisés pour des applications spécifiques : accéléromètres, géophones, sondes de teneur en eau, tensiomètres. Le système d'acquisition de données permet de recueillir jusqu'à 256 voies de mesure. Les chaussées sont également suivies par des relevés visuels et des essais d'auscultation de surface. Les mesures réalisées de manière courante sont les mesures de déflexion à la poutre Benkelmann, de profil transversal (mesure de profondeur d'ornièrre), les relevés de fissuration les essais FWD (déflectomètre à masse tombante), les mesures radar. Les dimensions du manège

permettent d'accueillir la plupart des matériels d'auscultation routière. Jauge de déformation pour matériaux bitumineux Signal de déformation longitudinale mesurée sous le passage d'une roue du jumelage Jauge de déformation pour matériaux non liés FWD (Falling Weight Deflectometer)

- Puissance machine : 1000 ch
- Charge roue simple large : 45 kN
- Charges roues jumelées : 65 kN
- Charges tandem roues simples/jumelées : 90 kN/130 kN
- Charges tridem roues simples : 135 kN
- Vitesse maximale à R = 19 m : 100 km/h
- Trafic journalier maximal : 55 000 chargements à 70 km/h
- Balayage transversal : +/- 52 cm

Les essais accélérés sur manège permettent de tester en temps réduit la durabilité de solutions constructives, en général destinées sur chaussées à des durées de vie de l'ordre de 20 à 30 ans. Les applications sont nombreuses :

- Évaluation de matériaux et structures de chaussées innovants (fatigue, orniérage, fissuration...).
- Évaluation de méthodes de construction, d'entretien et de renforcement des structures de chaussées.
- Étude de l'agressivité des charges routières et des systèmes de transport urbains sur pneus.
- Influence de l'état hydrique sur le comportement des matériaux non traités et des sols.
- Validation de modèles de comportement et de dimensionnement de chaussées.
- Évolution avec le trafic des propriétés d'usage des chaussées (uni, adhérence).
- Étude du comportement et de dimensionnement d'éléments de voirie : revêtements pour traversées de voies de tramways, caniveaux, tampons de canalisation, canalisations sous voirie, tranchées...
- Tests et évaluation de matériels d'auscultation et d'instrumentation des chaussées.



Figure 3.12. Configuration d'essieux tridem à roues simples

3.3.6 Essais de charge accélérée des chaussées Essais HVS-Nordique (VTI Suède)

La Finlande et la Suède ont investi conjointement dans le simulateur de véhicules lourds (HVS-Nordic) en 1997 (figures 3.13 et 3.14). Depuis lors, le HVS-Nordic est utilisé en Finlande et en Suède presque tous les deux ans. La première période en Finlande est rapportée par Huhtala et Pihlajamäki, 2000, et la première période en Suède par Wiman, 2001. De 2000 à 2002, il a été localisé en Finlande. La Suède et la Finlande ont exploité conjointement la machine, effectué des mesures de réponse et procédé à l'acquisition de données.

En 2003 et 2004, deux essais de charge accélérée ont été réalisés au centre d'essai de VTI en Suède (SE05 et SE06). L'objectif de SE05 était d'étudier le comportement de déformation de deux matériaux de base non liés différents, la moitié de la zone d'essai a été construite avec une couche de base en matériau granulaire naturel et l'autre moitié avec une couche de base en granulats de roche concassée. Cela signifie que les deux structures ont été testées simultanément. L'objectif de SE06 était d'être le troisième test d'une série de tests de conception structurelle avec une capacité de charge progressivement plus élevée, avec une augmentation progressive de la capacité de charge. Les deux tests précédents cette série sont SE01 et SE02. Avant l'essai de chargement accéléré, un préchargement et un programme complet de mesure de la réponse ont été réalisés.

Le préchargement a été effectué afin d'éliminer les éventuelles contraintes résiduelles et de provoquer un certain post-compaction. Cela a été fait par 20 000 passages pendant une journée avec une charge de roue plus faible (30 kN de charge de roue unique), avec une distribution latérale uniforme, la taille de roue unique était de 425/65R22.5.

Le programme de mesure de la réponse comprenait des mesures considérables des contraintes, des déformations et des déflexions à différents endroits dans les structures d'essai et à

différentes charges d'essai, positions latérales, ainsi qu'avec différentes vitesses, températures, roues d'essai et pressions de pneus.

L'ensemble standard suivant de paramètres d'essai a été utilisé :

- Charge sur les roues jumelées 60 kN
- Pression du pneu 800 kPa
- Taille de la roue 295/80R22.5
- Vitesse de la roue 12 km/h
- Chargement bidirectionnel
- Température de la chaussée +10°C
- Distribution latérale.



Figure 3.13. Essais de charge accélérée des chaussées Essais HVS-Nordique (VTI Suède)



Figure 3.14. Vue intérieure du chariot d'essai et de la roue de chargement

3.4 Etude expérimentale sur l'essai d'orniérage français (LRPC Angers)

3.4.1 Caractéristiques du mélange bitumineux

Le matériau testé est un grave bitume de grade 3 GB3, le squelette granulaire est composé d'un mélange de classe granulaire 0/14 discontinuité 6/10, il est composé de trois fractions granulaires, la fraction 8/16 a un pourcentage de 36%, la fraction 4/6.3 a un pourcentage de 20% quant à la fraction 0/4 elle est représentée par 44%, la courbe granulométrique est représentée sur la (figure 3.15).

- La classe du bitume est 35/50,
- le module de richesse $k = 2.82$,
- La teneur en liant $TL = 3.900\%$
- Masse volumique réelle de l'enrobé est 2.935g/cm^3

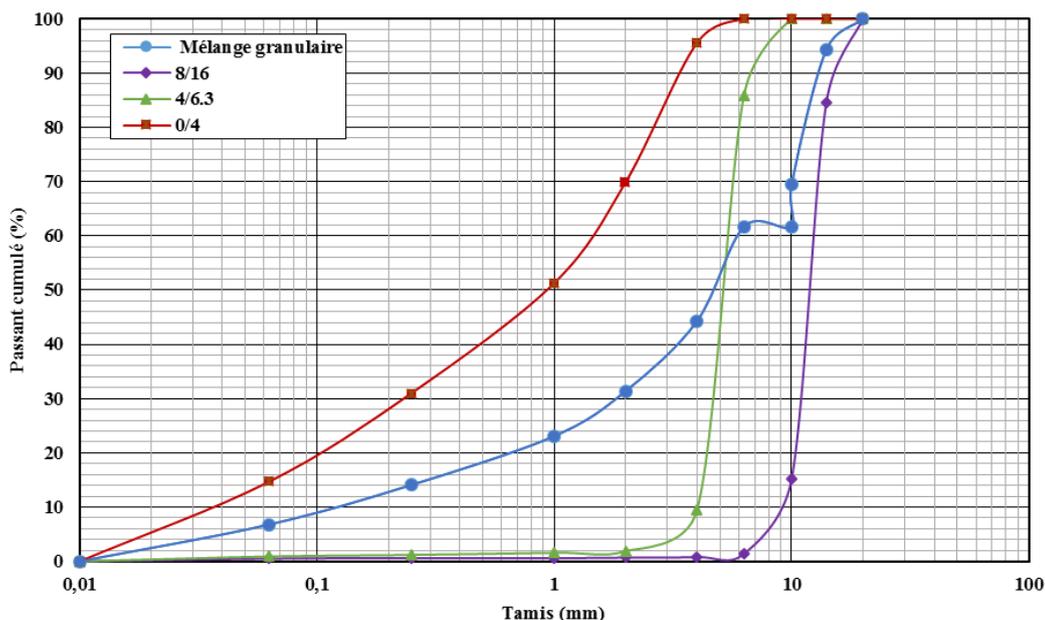


Figure 3.15. Courbe granulométrique du mélange granulaire

3.4.2 Essai d'orniérage français (MLPC)

Le simulateur de trafic LCPC ou orniéreur exige que les échantillons d'essai soient compactés dans le compacteur de plaques du LCPC. Pour ce faire, il faut suivre la norme NF P 98-250-2, novembre 1991. Préparation des mélanges hydrocarbonés. Partie 2: compactage de plaques. Cette norme est à l'origine de la norme européenne 5 (EN12697-33) (Mélanges bitumineux. Méthodes d'essai pour mélanges hydrocarbonés à chaud - Partie 33 : Préparation d'éprouvette et compacteur de plaques).

Des éprouvettes parallélépipèdes ($L=500$ mm, $l=180$ mm, $h=100$) d'enrobés fabriquées en laboratoire sont soumises aux passages répétés d'une roue équipée d'un pneumatique. La roue exerce une charge constante de 5000 ± 5 N. Elle est gonflée à $6 \pm 0,3$ bar et est animée d'un mouvement alternatif sinusoïdal à la fréquence de 1 Hz. Pendant l'essai, les plaques d'enrobés sont maintenues à température constante de $50 \pm 2^\circ\text{C}$, $58 \pm 2^\circ\text{C}$ ou $60 \pm 2^\circ\text{C}$ selon le PG du bitume. Un enregistrement de l'évolution des profondeurs des ornières en fonction du nombre de passages de la charge a été fait (figure 3.16)

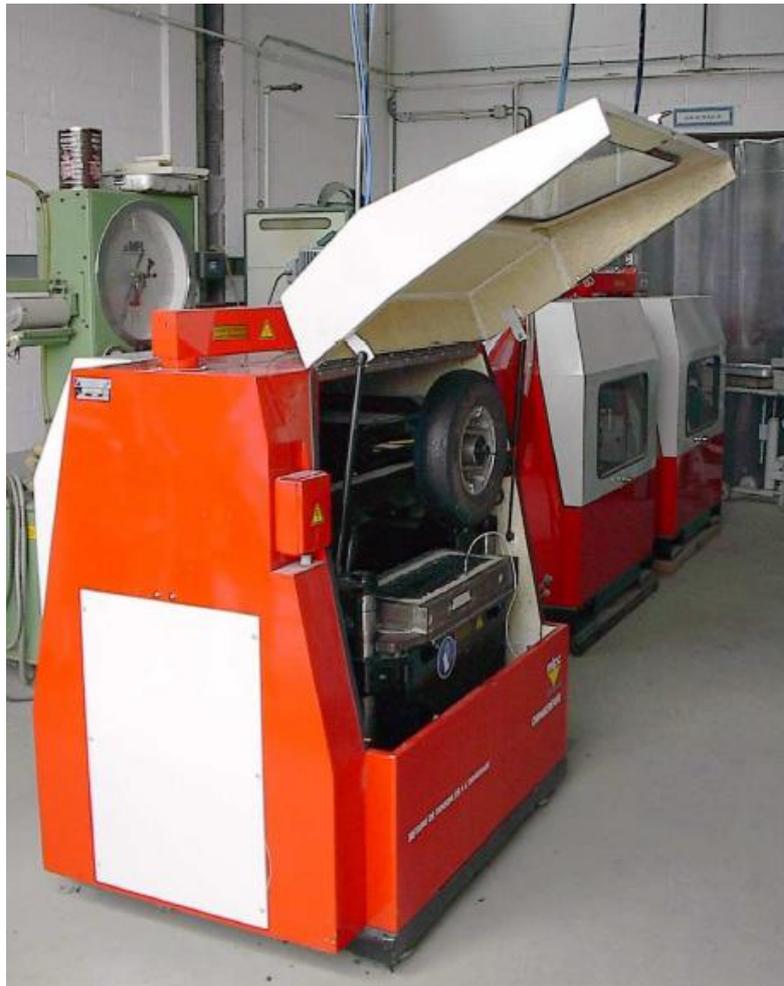


Figure 3.16. L'orniéreur MLPC français (LCPC)

3.4.2.1 *Principe de l'essai*

Les éprouvettes fabriquées selon les spécifications de l'enrobé qui est utilisé sur la route sont soumises au passage d'un pneumatique dans des conditions de charge et de pression analogues à celles qui sont engendrées par les véhicules lourds produisant des ornières. La mesure de la profondeur moyenne de l'orniérage en fonction du nombre de passages du pneumatique caractérise la résistance à l'orniérage de l'enrobé.

Après le compactage des éprouvettes, une période de cure de 48 heures, à la température de la pièce, est effectuée pour les mélanges en laboratoire avant le début de l'essai à l'orniéreur et de 24 heures pour les échantillons prélevés en chantier. L'essai commence en soumettant les éprouvettes au passage de 1 000 cycles effectués par les pneumatiques de l'orniéreur à la température de la pièce. Ensuite, l'orniéreur est chauffé à la température de l'essai. On relève l'ornière à plusieurs reprises (100, 300, 1000, 3000, 10 000, 30 000, 60 000 et 100 000 cycles) en cours d'essai sur cinq profils transversaux (figure 3.17). On en déduit la courbe de l'évolution de la profondeur moyenne de l'ornière en fonction du nombre de cycles.

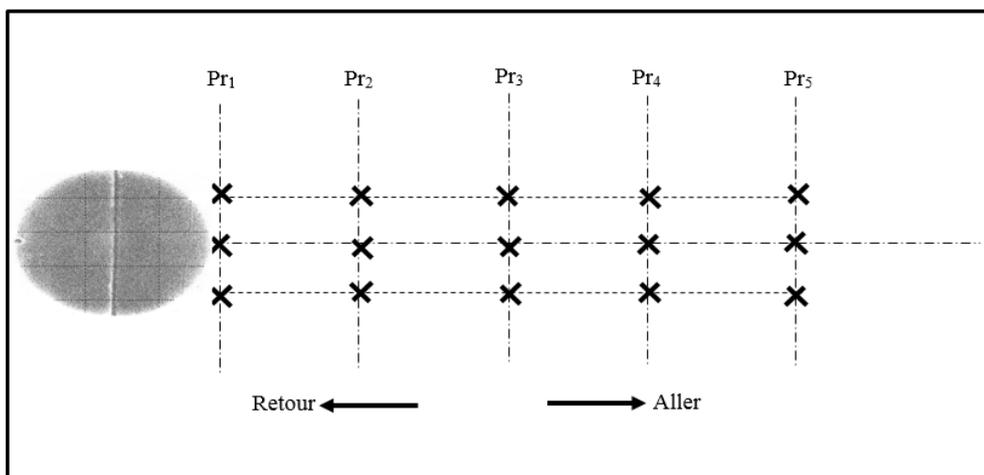


Figure 3.17. Positions des points de mesure et des profils en travers sur l'éprouvette

L'essai est réalisé suivant les conditions suivantes :

- course du pneumatique : 410 mm ± 5 mm,
- fréquence du mouvement relatif : 1 Hz ± 0,1 Hz,
- pression du pneumatique : 6 bars ± 0,1 bar en début d'essai,
- charge roulante appliquée : 5000 N ± 50 N relevée statiquement au centre de l'éprouvette.

3.4.2.2 Mise en place des éprouvettes et déroulement de l'essai

Chaque éprouvette est testée dans le moule ayant servi à sa confection, l'éprouvette subit 1000 cycles de la charge roulante à une température comprise entre 15 et 25 °C. Après cette phase préalable, les mesures initiales m_{0j} (j variant de 1 à 15) du profil de l'éprouvette sont relevées conformément à la figure 3.17. L'enceinte est réglée à la température de l'essai soit 60°C, l'éprouvette est ensuite conservée au moins 12 h dans ces conditions avant le début de l'essai.

La charge roulante est appliquée. Les profondeurs d'ornière sont mesurées à 1 000, 3 000, 10 000 et éventuellement à 30, 100, 300, 30 000, 60 000 et 100 000 cycles. Avant chaque mesure, on relève la température de l'éprouvette. A chacun des arrêts d'ordre i, les mesures m_{ij} (j variant de 1 à 15) sont faites. la profondeur de l'ornière est calculée en mm, suivant l'expression suivante :

$$P_{j,N} = m_{ij,N} - m_{0j} \quad (3.1)$$

$$h_{j,N} = h_0 + m_{ij,N} - m_{0j} \quad (3.2)$$

Pour j = 1 à 15

$P_{j,N}$: profondeur de l'ornière en mm après N cycles,

$m_{ij,N}$: les mesures relevées après N cycles

$h_{j,N}$: épaisseur de l'éprouvette au point j après N cycles

h_0 : épaisseur initiale de l'éprouvette

L'essai a été réalisé au Laboratoire Régionale des Ponts et Chaussées d'Angers(France)

Les mesures effectuées sur les éprouvettes N°3 et N°41 sont récapitulées dans les tableaux 3.1. et 3.2.

Le profil de la vitesse de la roue est représenté sur la figure 3.18.

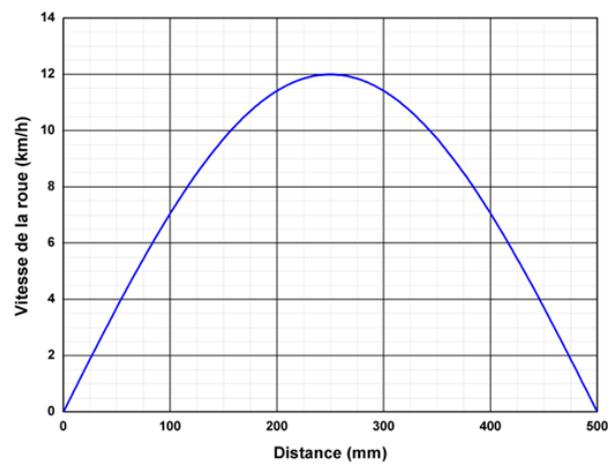


Figure 3.18. Variation sinusoidale de la vitesse de déplacement de la roue

Table 3.1. Mesure des ornières de l'éprouvette N°3

EPROUVETTE GAUCHE MOULE N°: 3									
Température		60°C							
Epaisseur initiale de l'éprouvette h_0 (mm)		104,37							
		$m_{ij,N}$							
Nombre de cycles N	1000 à froid (m_{0j})	100	300	1000	3000	10 000	30 000	60 000	100 000
1	35,37	36,02	36,35	36,61	36,91	37,41	39,58	40,15	40,38
2	34,67	35,45	36,34	36,46	36,8	37,48	40,2	40,6	40,14
3	34,49	35,23	35,44	35,96	36,35	36,99	38,59	39,2	38,70
4	37,45	38,62	39	39,61	39,99	40,74	41,52	42,15	42,68
5	34,8	36,25	36,76	37,39	38,05	38,89	39,83	40,67	41,23
6	34,73	35,87	36,23	36,9	37,46	38,08	38,71	39,48	39,99
7	36,81	37,82	38,21	38,68	39,55	40,48	40,62	42,9	43,37
8	35,48	36,77	37,36	38,38	39,08	39,88	40,47	41,75	42,28
9	35,67	36,55	36,94	37,44	37,83	38,45	39,62	40,16	40,77
10	37,33	38,77	39,24	39,85	40,4	41,31	41,89	42,52	43,01
11	35,79	37,02	37,47	38,15	38,89	40,09	40,69	41,49	42,00
12	35,85	37,14	37,65	38,31	39	39,92	40,49	41,22	41,72
13	38,66	39,84	40,17	40,56	40,82	41,77	42,05	42,7	43,11
14	37,65	38,3	38,68	39,21	40,62	40,8	41,61	41,89	42,77
15	37,26	37,67	38,1	38,65	39,03	39,81	40,83	41,5	41,69
Moyenne	36,13	37,15	37,6	38,14	38,72	39,47	40,45	41,23	41,59
Ornière (mm)		1,02	1,46	2,01	2,58	3,34	4,31	5,09	5,46
% d'ornière		0,98	1,4	1,93	2,48	3,2	4,13	4,88	5,23

Table 3.2. Mesure des ornières de l'éprouvette N°41

EPROUVETTE DROITE MOULE N°: 41									
Température		60°C							
Epaisseur initiale de l'éprouvette h_0 (mm)		103,84							
		$m_{ij,N}$							
Nombre de cycles N	1000 à froid (m_{0j})	100	300	1000	3000	10 000	30 000	60 000	100 000
1	36,53	37,34	37,7	38,13	38,55	39,03	39,88	40,15	40,59
2	36,22	36,87	37,46	38,03	38,57	39,35	39,93	40,53	41,09
3	36,9	37,59	37,89	38,28	38,7	39,23	40,99	41,03	41,54
4	36,12	37,32	37,75	38,2	39	39,57	40,17	40,82	41,25
5	36,07	36,88	37,4	37,68	38,52	39,08	39,29	40,89	41,23
6	36,06	36,64	36,89	37,25	37,66	38,23	38,9	39,62	40,10
7	37,37	38,88	39,41	39,98	40,35	41,17	41,84	42,12	42,16
8	37,2	38,32	38,72	39,23	39,87	40,31	41,25	42,13	42,41
9	36,94	38	38,27	38,72	39,17	39,37	40,33	41,3	41,79
10	36,09	37,23	38,35	38,96	39,06	39,96	41,28	41,2	41,54
11	36,24	37,14	37,77	38,36	38,84	39,28	40,14	41,63	41,74
12	37,38	38,46	39,07	39,56	40,07	40,76	41,49	41,9	42,64
13	37,56	38,22	38,55	39,06	39,27	39,8	40,69	40,81	41,21
14	36,71	37,6	37,77	38,43	38,81	39,57	40,08	40,73	41,17
15	36,58	37,23	37,38	37,89	38,21	38,86	39,36	39,9	40,38
Moyenne	36,66	37,58	38,03	38,52	38,98	39,57	40,37	40,98	41,39
Ornière (mm)		0,92	1,36	2,31	2,31	2,91	3,71	4,32	4,73
% d'ornière		0,88	1,31	2,23	2,23	2,8	3,57	4,16	4,55

3.4.3 Résultats et discussions

Après avoir calculer les épaisseurs de l'éprouvette dans les différents points de mesure, les profils en travers et en long ont été tracés. Les figures 3.19. à 3.30., montrent les déformations permanentes dues à l'orniérage de la grave bitume de la présente étude. On remarque, que dans la

quasi-totalité des profils en travers, la forme courbe circulaire apparaissent à partir du 30 000 cycles

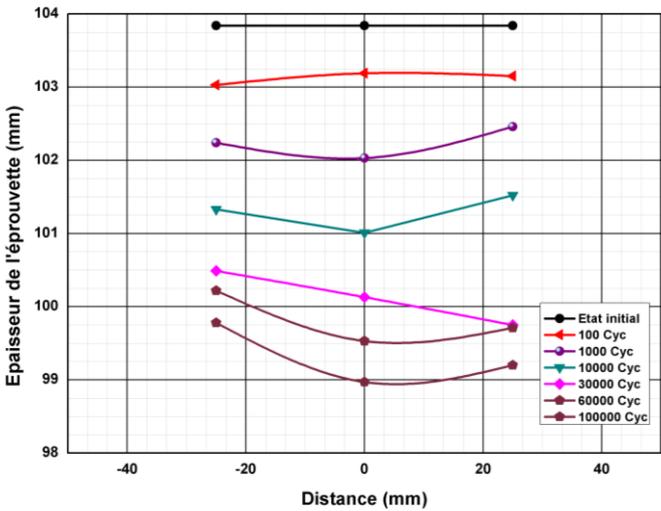


Figure 3.19. Ornières du profil en travers N°1 de l'éprouvette 41

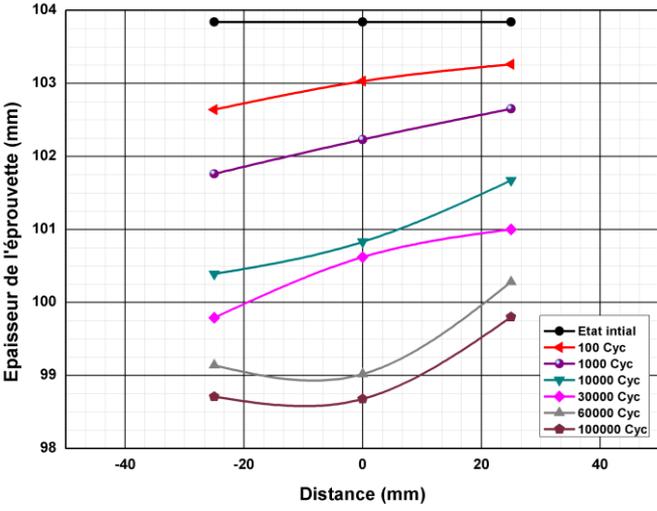


Figure 3.20. Ornières du profil en travers N°2 de l'éprouvette 41

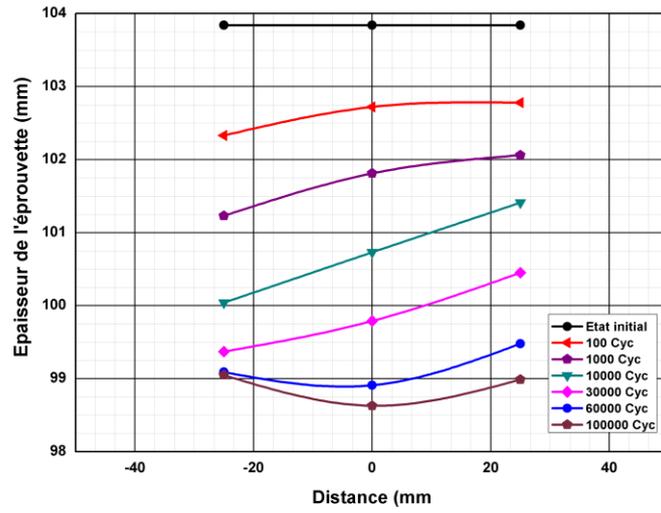


Figure 3.21. Ornières du profil en travers N°3 de l'éprouvette 41

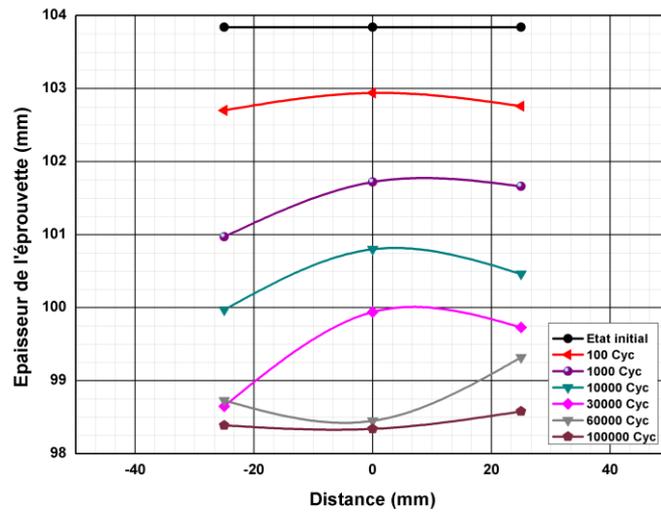


Figure 3.22. Ornières du profil en travers N°4 de l'éprouvette 41

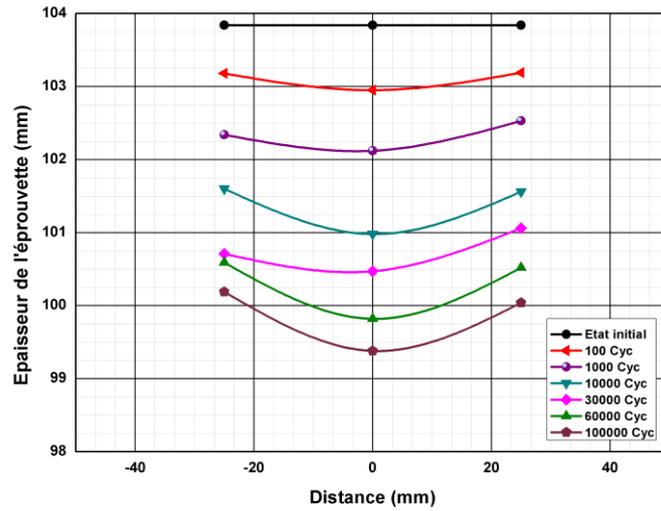


Figure 3.23. Ornières du profil en travers N°5 de l'éprouvette 41

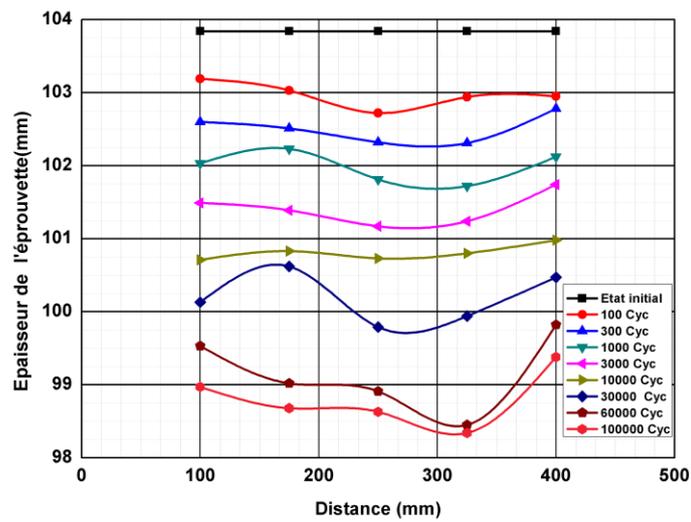


Figure 3.24. Déformations permanentes du profil en long de l'éprouvette 41

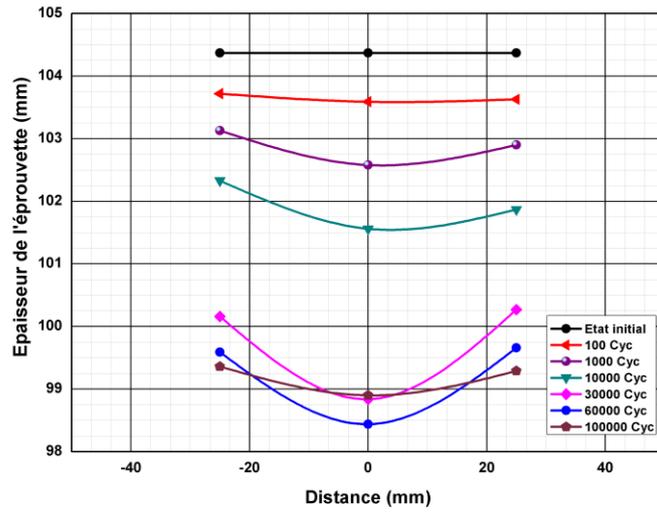


Figure 3.25. Ornières du profil en travers N°1 de l'éprouvette 3

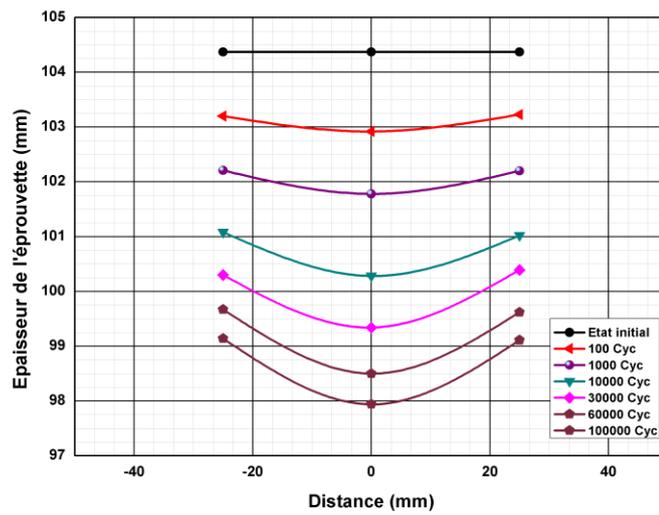


Figure 3.26. Ornières du profil en travers N°2 de l'éprouvette 3

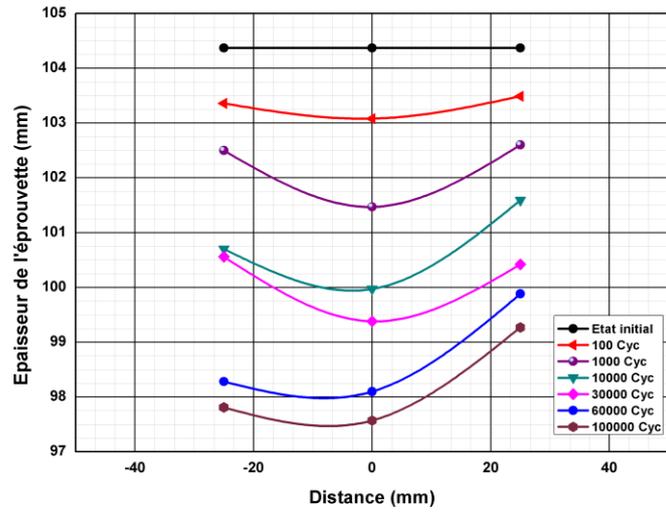


Figure 3.27. Ornières du profil en travers N°3 de l'éprouvette 3

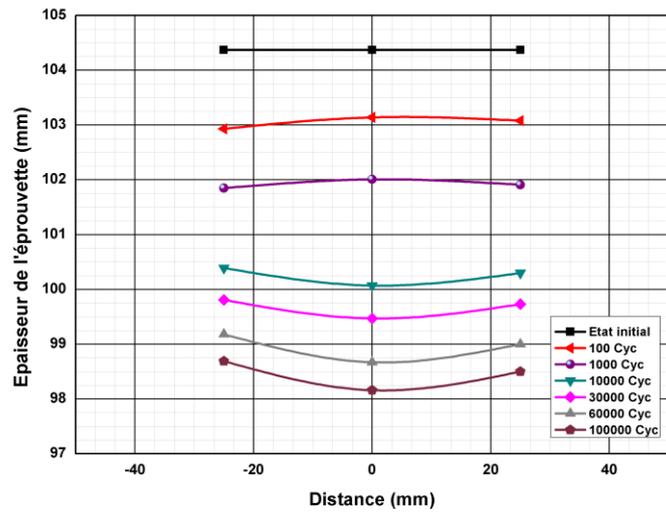


Figure 3.28. Ornières du profil en travers N°4 de l'éprouvette 3

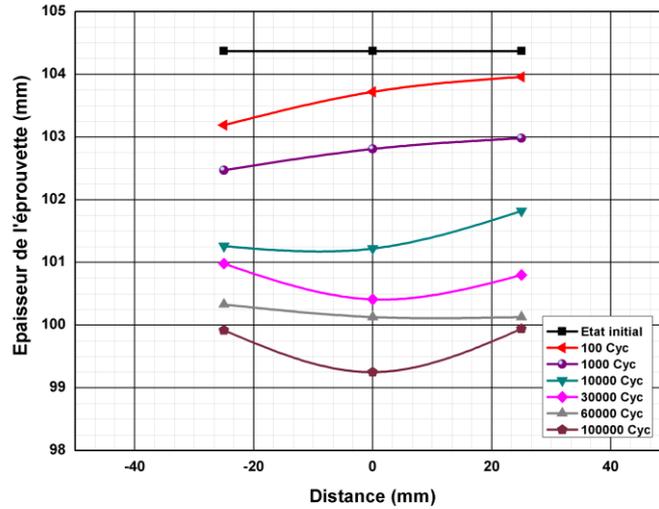


Figure 3.29. Ornières du profil en travers N°5 de l'éprouvette 3

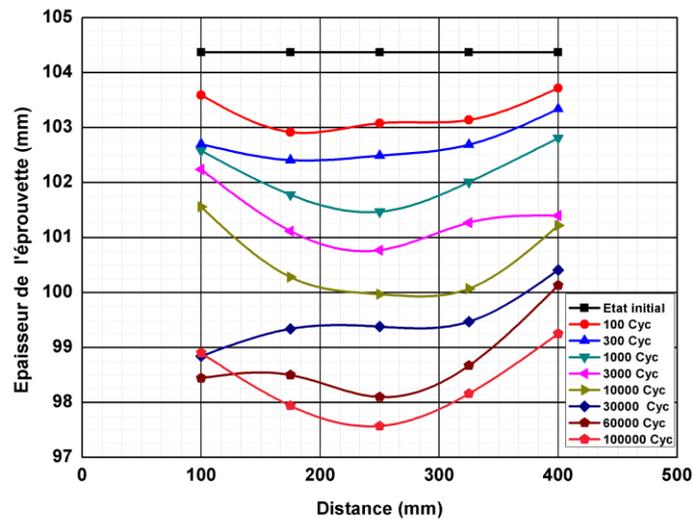


Figure 3.30. Déformations permanentes du profil en long de l'éprouvette 3

La figure 3.31. récapitule tous les résultats de l'essai d'orniérage, on a obtenu des courbes de corrélation ainsi que leurs équations, les paramètres des courbes d'ajustement suivent une loi puissance de type :

$$P_N = aN^b \quad (3.3)$$

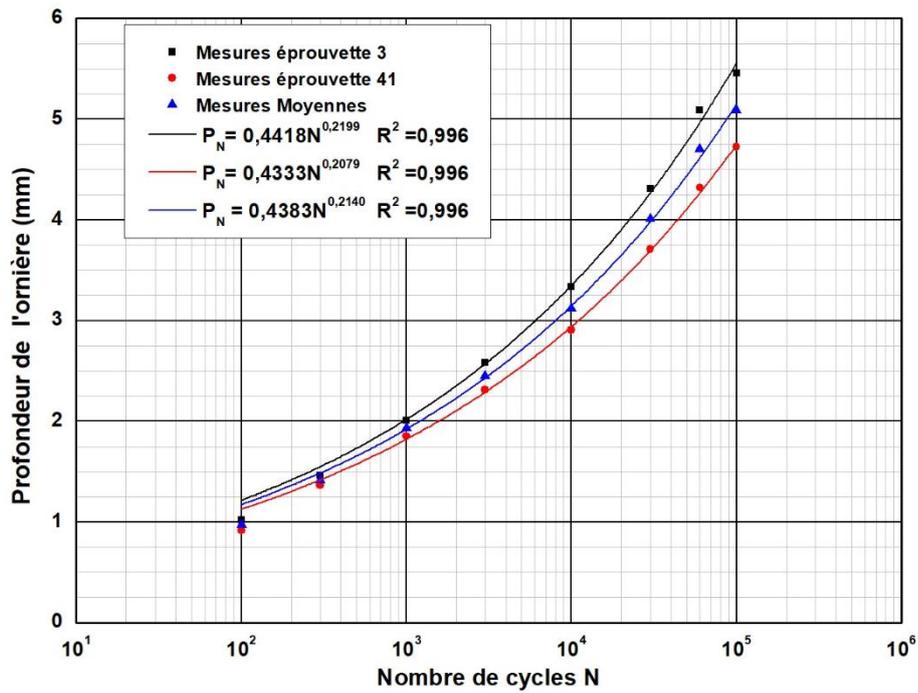


Figure 3.31. Courbes de corrélation des profondeurs des ornières

3.5 Conclusion

L'étude expérimentale a été réalisée au LRPC d'Angers sur une GB3 (grave bitume de grade 3). 100000 cycles ont été atteints au lieu des 60000 cycles de la norme (norme NF P 98-250-2). La loi de corrélation puissance a donné un très résultats identique pour les 2 éprouvettes que l'on peut extrapoler 10^6 voire $2 \cdot 10^6$. L'essai a duré 12 jours.

Dans la quasi-totalité des profils en travers, la forme courbe circulaire apparaissent à partir des 30 000 cycles, tout en sachant que le nombre de points par profils en travers est de 3, insuffisant pour avoir une ornière réelle

Chapitre 4 : Modélisation de l'essai d'orniérage français

4.1 Introduction

Cette recherche vise à développer un modèle numérique tridimensionnel qui se rapproche le plus étroitement possible aux conditions réelles de l'essai FWTT. Le modèle aura une empreinte de roue à géométrie réelle (plutôt qu'une forme rectangulaire). Le mouvement de la roue lors de son passage sur le spécimen sera simulé par un déplacement horizontal, en remplacement d'une charge incrémentale. Ces caractéristiques importantes du modèle représentent l'originalité et la nouveauté du modèle proposé, ce qui représente la différence majeure entre la recherche actuelle et les études précédentes. Le modèle actuel, basé sur la méthode des éléments finis, utilise le code de calcul ABAQUS avec un modèle constitutif viscoélastique. Les propriétés viscoélastiques des matériaux ont été décrites par la série de Prony, également appelée module de relaxation en fonction du temps. La procédure de calcul de la série de Prony à partir de données expérimentales est expliquée. Les résultats obtenus sont en bon accord avec l'amplitude des signaux de contraintes, les rotations des contraintes principales ainsi que la rotation du déplacement total, lorsque la charge s'approche du nœud considéré, situé au milieu du modèle de l'éprouvette.

4.2 Modélisation de l'essai d'orniérage français

Soucieux d'être le plus fidèle possible dans la reproduction des états de contraintes dans nos essais de laboratoire, nous avons également cherché à modéliser les états de contraintes dus au passage d'une charge dans des structures de chaussées en prenant en considération l'empreinte réelle de la roue, la pression sur l'éprouvette et sa vitesse de déplacement (figure 4.1).

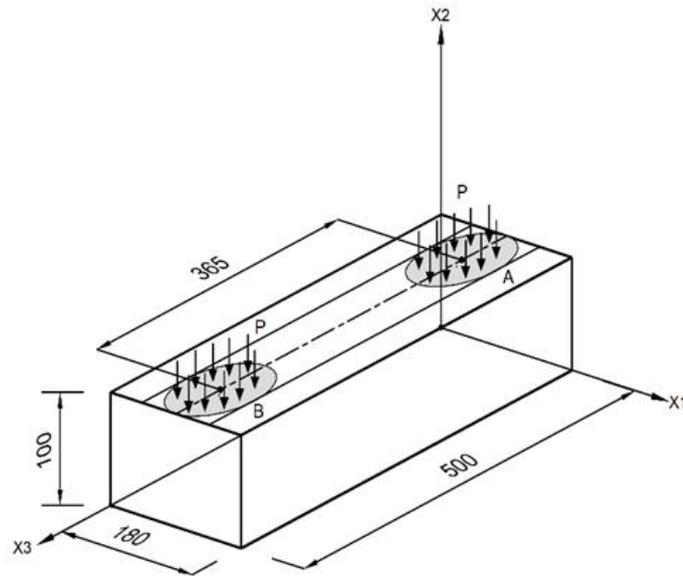
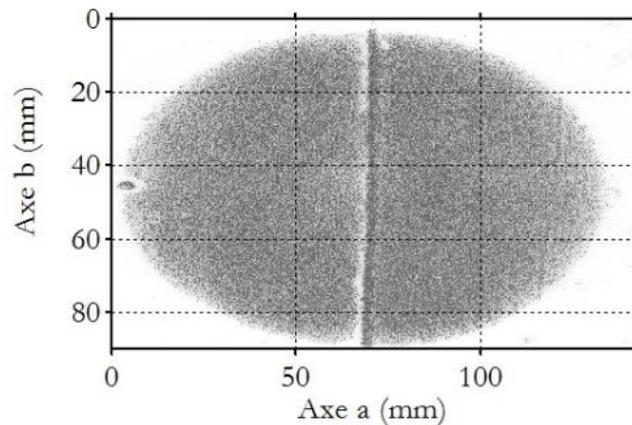


Figure 4.1. Géométrie de l'essai à l'ornièreur français

4.3 Empreinte de la roue

Les charges peuvent se présenter sous forme de forces concentrées, de pressions ou de déplacements, les forces sont appliquées aux nœuds, les charges de pression quant à elles sont transformées en forces nodales et appliquées directement aux nœuds dans la zone chargée. Les recherches qui ont été menées dans ce contexte simulent la roue en mouvement en déplaçant l'empreinte du pneu représentée par une surface rectangulaire ou circulaire.

Des essais ont permis de déterminer la géométrie de l'empreinte du pneu chargé sur l'échantillon du matériau bitumineux, en l'occurrence c'est le LRPC d'Angers où on a mesuré les dimensions de cette empreinte (Figure 4.2).



Axe a = 135,2 mm Axe b = 80,3 mm Surface = 8523,3 mm²

Figure 4.2. Géométrie de l'empreinte de la roue (LRPC Angers France)

4.3.1 Les éléments du maillage du modèle

4.3.1.1 Les éléments finis utilisés dans le modèle

Il existe beaucoup d'éléments solides en trois dimensions convenant à différentes applications. Pour une application telle que l'analyse linéaire de déplacements-contraintes, comme dans le cas présent, un élément recommandé est l'élément brique C3D8R.

4.3.1.1.1 Élément brique à huit nœuds avec intégration réduite (C3D8R)

L'élément C3D8R est un élément brique linéaire d'usage général, avec intégration réduite (1 point d'intégration). Les fonctions de forme sont les mêmes que pour l'élément C3D8, en raison de l'intégration réduite, les phénomènes de blocage observés dans l'élément C3D8 n'apparaissent pas. L'élément C3D8R est doté des avantages suivants :

- Le phénomène d'autoblocage en cisaillement n'est pas facile à produire sous une charge de flexion.
- La solution au déplacement est plus précise.
- Lorsque la grille est déformée, la précision de l'analyse ne sera pas grandement affectée.

4.3.1.1.2 Les éléments S4R et S3

Il est nécessaire de raffiner le maillage pour surmonter le problème du temps de calcul.

S4R est un élément quadrilatéral robuste et polyvalent qui convient à un large éventail d'applications.

S4R est un élément coque de type quadrilatère polyvalent à 4 nœuds avec intégration réduite, contrôle du sablier et contraintes de membrane finies. C'est le choix par défaut et il convient à la plupart des problèmes. Cet élément peut être combiné avec S3, mais le nombre d'éléments TRI doit être réduit au minimum.

4.3.1.2 Maillage du modèle

L'essai d'orniérage français est modélisé en 3D à l'aide du code en éléments finis Abaqus. L'éprouvette est généralement parallélépipédique et ses dimensions sont de 500x180x100 mm³. Pendant l'essai, la roue se déplace d'un côté à l'autre. L'empreinte de la roue est simulée par une surface elliptique de type coque, considérée comme support de la charge mobile avec des dimensions de 135 mm pour le grand axe et de 80 mm pour le petit axe (voir figure 4.1). Comme le problème est symétrique le long de la trajectoire de la roue, seule la moitié de la plaque est simulée, le maillage de cette dernière est composé de 57 600 éléments cubiques C3D8R et 64 923 nœuds, l'empreinte de la roue qui portera la charge est discrétisée en 890 éléments coques de types S3 et S4R (figure 4.3).

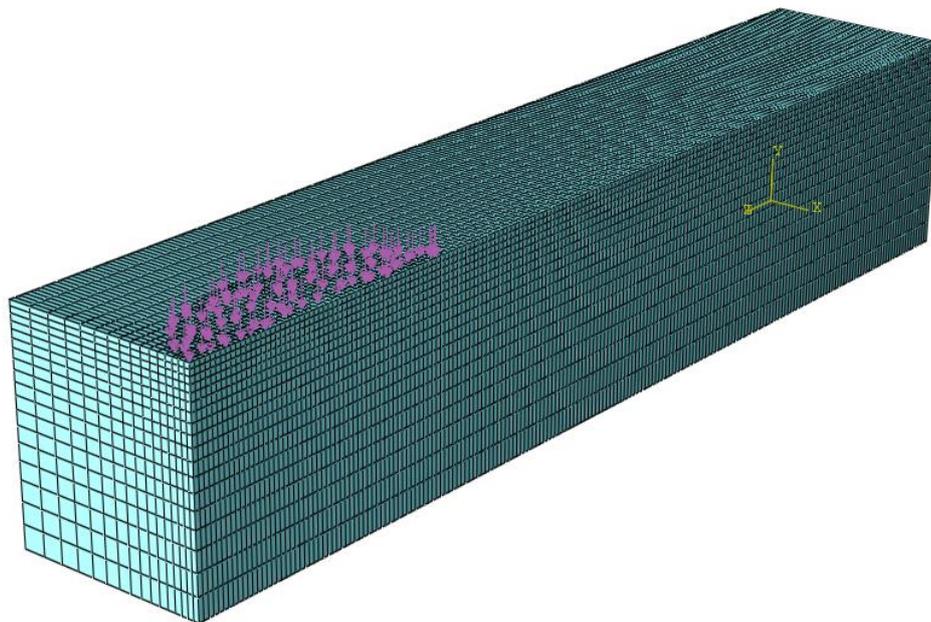


Figure 4.3. Maillage du modèle de l'essai d'orniérage

4.3.1.3 Chargement et conditions aux limites

Les charges peuvent se présenter sous forme de forces concentrées, de pressions ou de déplacements, les forces sont appliquées aux nœuds, les charges de pression quant à elles sont transformées en forces nodales et appliquées directement aux nœuds dans la zone chargée. Les recherches qui ont été menées dans ce contexte simulent la roue en mouvement en déplaçant l'empreinte du pneu représentée par une surface rectangulaire ou circulaire, le déplacement de la

roue sur la chaussée se fait de façon incrémentielle en chargeant un ensemble d'éléments et à chaque incrément on ajoute une nouvelle ligne d'éléments chargés à l'extrémité avant du pneu et en déchargeant une ligne d'éléments à l'extrémité arrière. A mon avis ce processus de faire ne peut modéliser les sollicitations réelles induites par la pression du pneu, dans notre étude le mouvement de la roue est simulée par un déplacement horizontal U_3 de la surface elliptique entre les deux extrémités de l'éprouvette de béton bitumineux, à une vitesse de 10 km/h, on a limitée la course à 365 mm correspondant à la position de la roue sur l'extrémité de l'éprouvette pour une durée de 0,123 s. L'empreinte du pneu a été modélisée comme une charge de pression de 0,58 MPa, correspondant à une charge totale de 5 kN sur une aire elliptique de 135 mm de grand axe et 80 mm de petit axe correspondant à une surface de 8523 mm².

Sur les surface latérales de l'éprouvette, les déplacements normaux sont bloqués ($U_1 = 0$ à $x = 0$ et $x = 90$ mm, $U_3 = 0$ à $z = 0$ et $z = 500$ mm). La face inférieure de l'éprouvette est totalement bloquée ($U = 0$ à $y = 0$).

4.3.2 Détermination des caractéristiques du béton bitumineux

Le matériau est considéré comme étant viscoélastique linéaire isotrope. Pour l'éprouvette, le coefficient de Poisson est considéré comme une constante, égale à 0,35. Les valeurs du module complexe ont été choisies pour un mélange bitumineux. Elles sont données dans le tableau 1. à une température de 20°C. Pour la surface elliptique, elle est élastique, son module d'Young est E est égal à 3500 MPa, et son coefficient de poisson est égal à 0,3.

Tableau 4.1. Mesures du module complexe à une température de 20°C

Fréquence (Hz)	Module élastique G'(MPa)	Module de perte G''(MPa)	Module complexe G*(MPa)	Angle de phase δ (°)
0.1	323	196	378	31.2
0.5	501	359	616	35.6
1	917	741	1179	38.9
3	1505	991	1802	33.4
5	1831	1142	2158	32
10	2455	1265	2762	27.3
15	2812	1331	3111	25.3
20	3078	1422	3391	24.8
25	3085	1437	3403	25.0
30	3279	1558	3630	25.4
40	3288	1563	3641	25.4
50	3506	1616	3861	24.7
60	3441	1552	3775	24.3
70	3555	1639	3915	24.8
80	3506	1621	3863	24.8
90	3736	1767	4133	25.3
100	3601	1654	3963	24.7

4.3.2.1 Ajustement de la série de Prony

La série de Prony est utilisée dans ce travail pour décrire le comportement de relaxation du béton bitumineux, qui est soumis à la charge de roulement. Le $i^{\text{ème}}$ élément de Maxwell a le module de relaxation en cisaillement G_i , la viscosité η_i et le temps de relaxation $\tau_i = \eta_i / G_i$. Tandis que le ressort unique qui joue le rôle du comportement élastique du matériau après déchargement, il a une rigidité G_∞ . L'équation 4.7., montre la relation entre le module de relaxation du modèle et celui de chaque terme du modèle, où n est le nombre d'éléments du modèle. Plus le nombre de chaînes est élevé, plus le modèle décrit le matériau avec précision. Ajuster le comportement expérimental du bitume par la série de Prony signifie minimiser l'erreur entre les valeurs prédites et expérimentales en ajustant le nombre n et les coefficients. Au lieu de cela, la série de Prony peut également être définie par G_0 , g_i et τ_i

Les chaussées souples étant soumises à des températures et des fréquences dépendant du temps, les propriétés rhéologiques du béton bitumineux sont fortement affectées par son module complexe. Dans le cas d'un matériau viscoélastique, la détermination du module complexe G^* (module dynamique) équation 4.1, des enrobés bitumineux est obtenue par des essais dynamiques dans lesquels une charge sinusoïdale de fréquence f est généralement appliquée en cisaillement, flexion ou traction-compression. Il est caractérisé par sa norme $|G^*|$ et l'angle de

déphasage, ces deux paramètres dépendant à la fois de la température et de la fréquence de chargement. Ce module est composé d'une partie réelle G' , également appelée module d'élasticité, qui quantifie l'énergie élastique stockée, et d'une partie imaginaire G'' , appelée module de perte, qui quantifie l'énergie dissipée par le frottement interne du matériau. Les expressions de G' et G'' dans le domaine fréquentiel sont données par les équations 4.2., 4.3.

$$G^* = G' + iG'' \quad (4.1)$$

$$G'(\omega) = G_0 \left[1 - \sum_{i=1}^n g_i \right] + G_0 \sum_{i=1}^n \frac{g_i \tau_i^2 \omega^2}{1 + \tau_i^2 \omega^2} \quad (4.2)$$

$$G''(\omega) = G_0 \sum_{i=1}^n \frac{g_i \tau_i \omega}{1 + \tau_i^2 \omega^2} \quad (4.3)$$

$$G_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} G(t) \quad (4.4)$$

$$G_0 = G(0) \quad (4.5)$$

$$G'(\omega) = G_\infty + \frac{g_1 \tau_1^2 \omega^2}{1 + \tau_1^2 \omega^2} + \frac{g_2 \tau_2^2 \omega^2}{1 + \tau_2^2 \omega^2} + \frac{g_3 \tau_3^2 \omega^2}{1 + \tau_3^2 \omega^2} \quad (4.6)$$

$$G''(\omega) = G_0 \left(\frac{g_1 \tau_1 \omega}{1 + \tau_1^2 \omega^2} + \frac{g_2 \tau_2 \omega}{1 + \tau_2^2 \omega^2} + \frac{g_3 \tau_3 \omega}{1 + \tau_3^2 \omega^2} \right) \quad (4.7)$$

On a utilisé trois termes et sept paramètres ($g_1, g_2, g_3, \tau_1, \tau_2, \tau_3$ et G_∞) de la série de Prony, l'ajustement du modèle pour $G'(\omega)$ aux données expérimentales est donné par l'équation 4.9 dans le domaine fréquentiel et l'équation 4.8 donne l'expression du module de relaxation dans le domaine temporel. Les figures 4.4 et 4.5 montrent les courbes d'ajustement du module de relaxation et du module d'élasticité, respectivement.

$$G(t) = 297 + 553 \exp\left(\frac{-t}{0.01189}\right) + 1152 \exp\left(\frac{-t}{1.00185}\right) + 1896 \exp\left(\frac{-t}{0.10718}\right) \quad (4.8)$$

$$G'(\omega) = 297 + \frac{553 \cdot (0.01189)^2 \omega^2}{1 + (0.01189)^2 \omega^2} + \frac{1152 \cdot (1.00185)^2 \omega^2}{1 + (1.00185)^2 \omega^2} + \frac{1896 \cdot (0.10718)^2 \omega^2}{1 + (0.10718)^2 \omega^2} \quad (4.9)$$

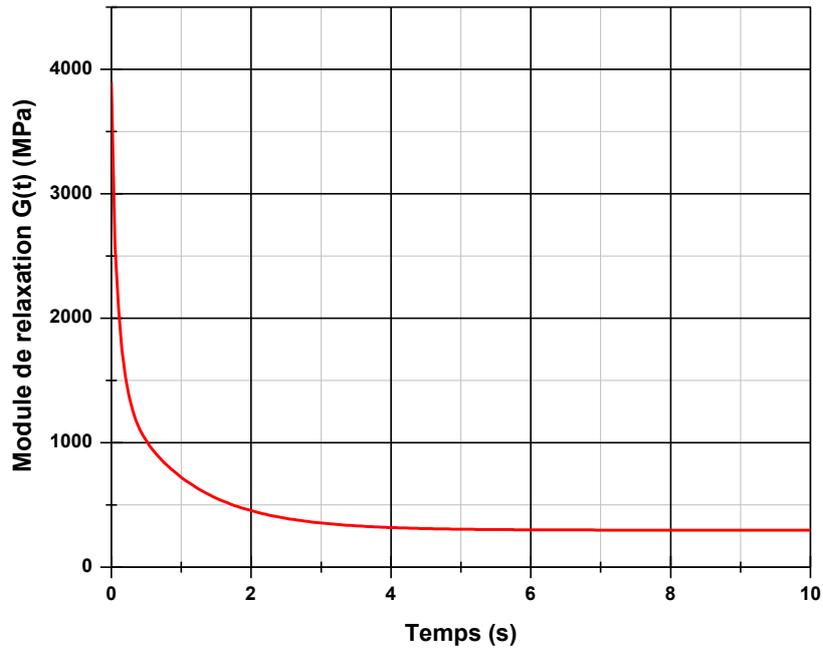


Figure 4.4. Variation du module de relaxation dans le domaine temporel

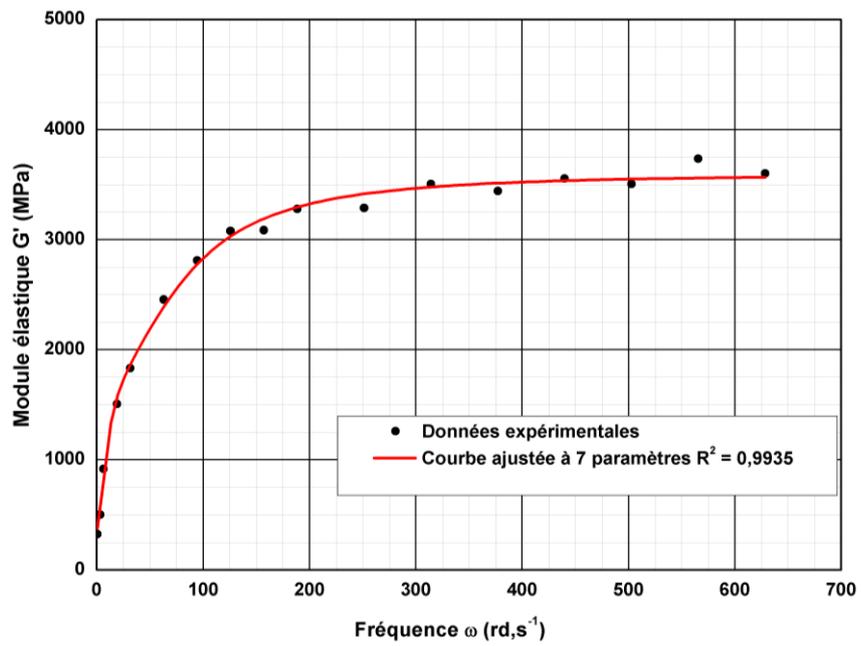


Figure 4.5. Variation du module élastique dans le domaine fréquentiel

Les paramètres de la série de Prony du béton bitumineux utilisé dans cette étude sont énumérés dans le tableau 4.2.

Table 4.2. Paramètres de la série de Prony du béton bitumineux

Terme	τ_i (s)	g_i	G_i (MPa)
1	0.01189	0.14187	553
2	1.00185	0.29553	1152
3	0.10718	0.48640	1896

4.4 Détermination des contraintes principales et directions principales

Soit S_{ij} l'état de contrainte en un point quelconque d'un solide (figure 4.6), il existe en ce point certaines facettes auxquelles le vecteur contrainte serait normal, pour répondre à cette situation il suffit d'exprimer que le vecteur en question est égal à \vec{n} multiplié par un scalaire λ équation 4.9. (Frey. F, 1998).

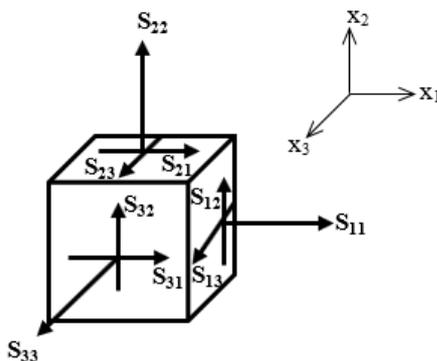


Figure 4.6. Notation des composantes du tenseur S_{ij}

$$S_{ij}n_i - \lambda n_j = 0 \quad (4.9)$$

$$S_{ij}n_i - \lambda n_j = S_{ij}n_i - \lambda \delta_{ij}n_i \quad (4.10)$$

avec δ_{ij} symbole de Kronecker $\delta_{ij} = 1$ pour $i = j$ et 0 pour $i \neq j$

Soit :

$$(S_{ij} - \lambda \delta_{ij})n_i = 0 \quad (4.11)$$

Les solutions de ce système linéaire s'obtiennent en annulant le déterminant

$$\det[S_{ij} - \lambda \delta_{ij}] = 0 \quad (4.12)$$

Soit explicitement

$$\begin{vmatrix} S_{11} - \lambda & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} - \lambda & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (4.13)$$

On est donc ramené au problème de la recherche des valeurs propres et vecteurs propres de la matrice du tenseur des contraintes, étant donné la symétrie, il existe trois valeurs propres réelles auxquelles correspondent trois vecteurs propres orthogonaux.

Les plans de ces facettes sont les plans principaux et les axes perpendiculaires à ces plans sont les (ou directions principales). Les contraintes orthogonales à ces plans, notées S_I , S_{II} et S_{III} , sont les contraintes principales. Dans notre étude, on ignore laquelle des contraintes principales est la plus grande, ou la plus petite ou encore l'intermédiaire.

Le développement du déterminant donne l'équation caractéristique cubique

$$S^3 - I_1 S^2 + I_2 S - I_3 = 0 \quad (4.14)$$

I_1 , I_2 et I_3 sont les invariants du tenseur de contrainte S_{ij} tels que :

$$I_1 = S_{ii} = S_{11} + S_{22} + S_{33} \quad (4.15)$$

$$I_2 = \frac{1}{2}(S_{ii}S_{jj} - S_{ij}S_{ji}) = S_{12}^2 + S_{23}^2 + S_{31}^2 - (S_{11}S_{22} + S_{22}S_{33} + S_{33}S_{11}) \quad (4.16)$$

$$I_3 = \det S_{ij} = S_{11}S_{22}S_{33} + 2S_{12}S_{23}S_{31} - (S_{11}S_{32}^2 + S_{22}S_{31}^2 + S_{33}S_{12}^2) \quad (4.17)$$

Les solutions de l'équation (4.14) sont S_I , S_{II} et S_{III}

En remplaçant λ par S_I dans l'équation 4.11, on obtient un système homogène permettant de déterminer les trois composantes n_i^I de la première direction principale à un facteur près, ce facteur se calcule par la condition :

$$n_i^I n_i^I = (n_1^I)^2 + (n_2^I)^2 + (n_3^I)^2 = 1$$

et on procède de la même manière avec S_{II} et S_{III}

Les cosinus directeurs des trois contraintes principales sont récapitulés dans le tableau ci-dessous

Tableau 4.3. Cosinus directeurs affectés aux contraintes principales

S_I	S_{II}	S_{III}
$n_1^I = \cos \alpha_{11}$	$n_1^{II} = \cos \alpha_{21}$	$n_1^{III} = \cos \alpha_{31}$
$n_2^I = \cos \alpha_{12}$	$n_2^{II} = \cos \alpha_{22}$	$n_2^{III} = \cos \alpha_{32}$
$n_3^I = \cos \alpha_{13}$	$n_3^{II} = \cos \alpha_{23}$	$n_3^{III} = \cos \alpha_{33}$

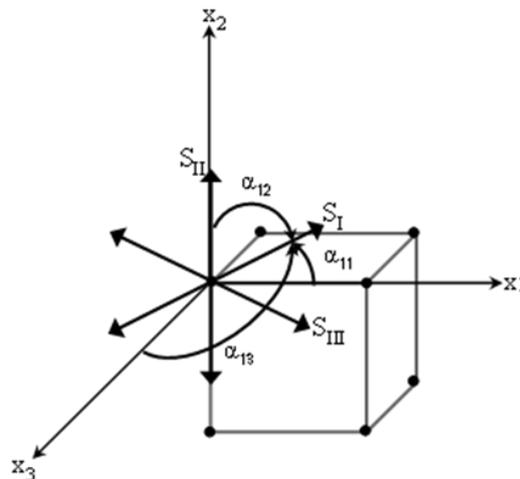


Figure 4.7. Angles de rotation des contraintes principales

4.5 Résultats et discussions

La figure 4.8 montre l'état de contrainte sous charge roulante au nœud N9539 (figure 4.10) au milieu de sa surface supérieure. On peut voir que l'évolution des composantes tensorielles est similaire aux recherches précédentes, en particulier celles de (Lekarp, 2000). Cependant, l'intensité de la composante verticale S_{22} est beaucoup plus importante que celle de la composante longitudinale S_{33} , qui est responsable de l'apparition du phénomène d'orniérage et de la

composante transversale S_{11} . En ce qui concerne les contraintes de cisaillement, on constate que S_{23} est beaucoup plus importante que S_{12} . En comparant ces résultats avec ceux de (Di Benedetto, 2005), il existe une différence entre la pression exercée par la roue sur l'éprouvette et l'amplitude de la contrainte verticale, pour le nœud N9539, localisé au milieu et à la surface elle est supérieure de 15 % par rapport la pression de la roue, alors que pour la présente étude elles sont presque égales. La figure 4.9 illustre l'état de contrainte sous charge roulante, dans le nœud N9551, elle montre l'évolution des composantes respectives est similaire à celle du nœud N9539, l'amplitude de la contrainte verticale est égale à 95%, alors que dans la présente étude, elle est égale à 75% les courbes sont plus fines et les perturbations dues au frottement sur la surface également plus atténuée en profondeur. On peut également constater que les composantes de cisaillement S_{13} et S_{23} sont plus proches en intensité et que les pics des trois composantes normales S_{11} , S_{22} et S_{33} se situent à l'aplomb du passage de roue, alors qu'à cette même position, les contraintes de cisaillement sont nulles en surface et S_{12} est légèrement négatif. Ces figures démontrent bien la performance du modèle proposé.

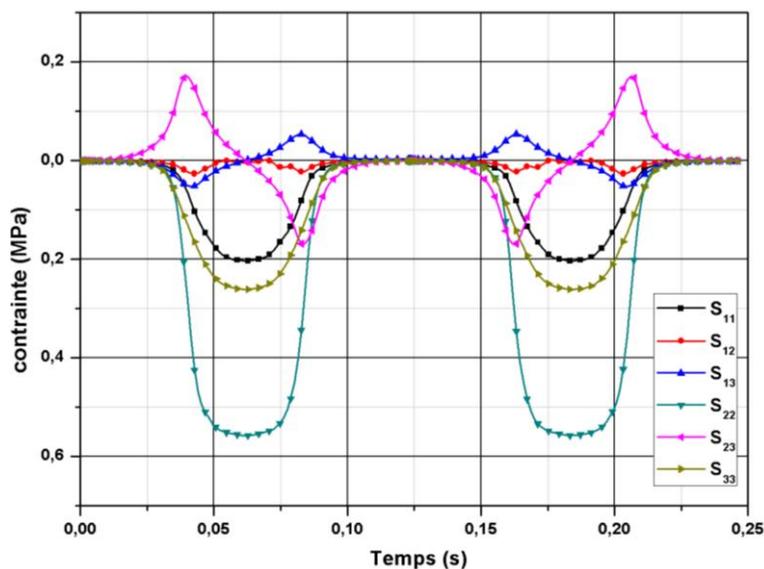


Figure 4.8. Variation des composantes du tenseur des contraintes du nœud N9539 lors du déplacement de la roue

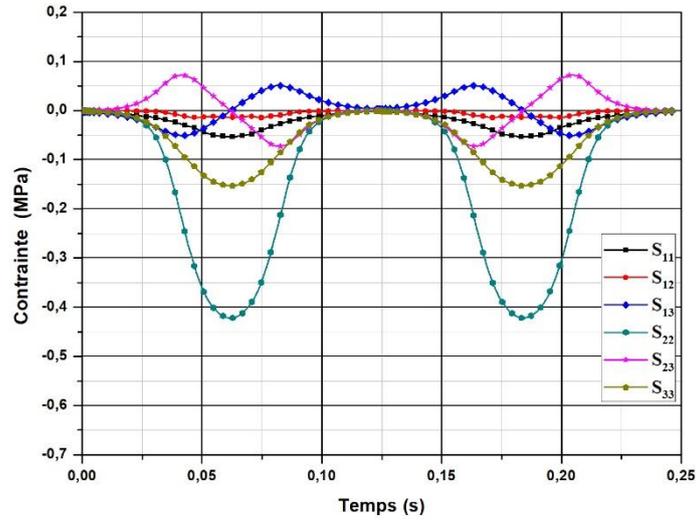


Figure 4.9. Variation des composantes du tenseur des contrainte du nœud N9551 lors du déplacement de la roue

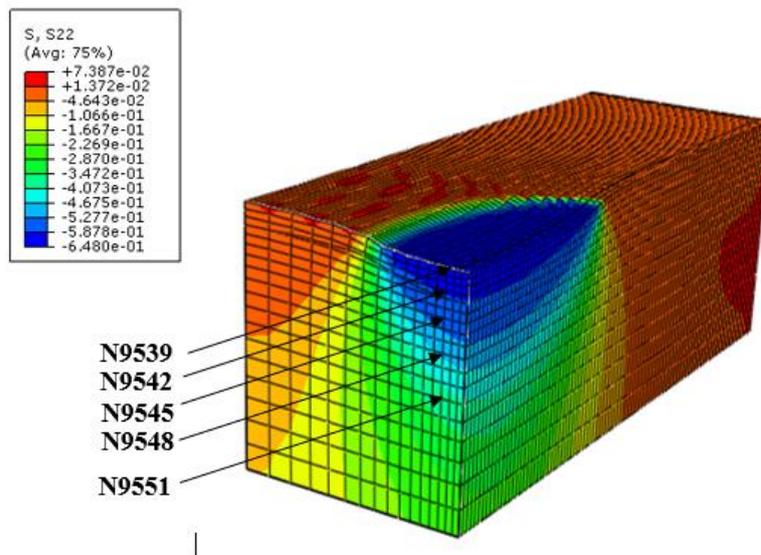


Figure 4.10. Contrainte verticale S_{22} roue au milieu de l'éprouvette ainsi que le positionnement des nœuds étudiés

La figure 4.11 illustre la variation des différentes composantes du tenseur de contrainte dans les 4 premiers cycles de chargement de notre modèle

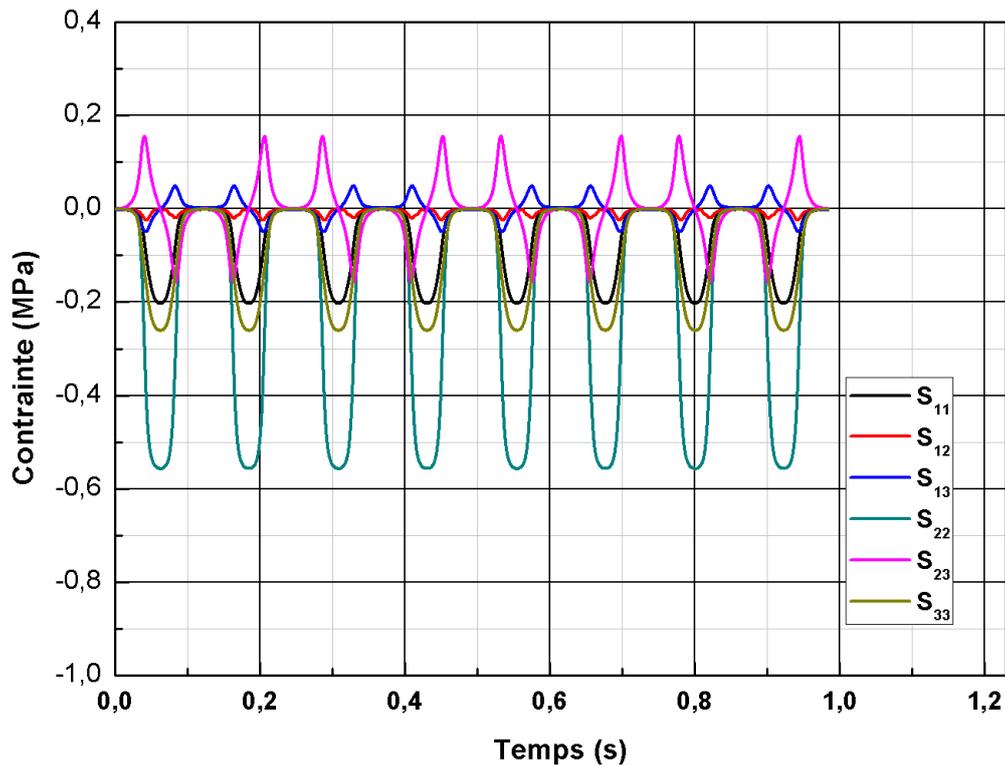


Figure 4.11. Variation des composantes du tenseur des contraintes de 4 cycles de la roue au nœud N9539

Les figures 4.12, 4.13 et 4.14. illustrent l'évolution de la rotation des contraintes principales S_I , S_{II} et S_{III} au nœud N9539 pendant le mouvement de retour et d'avance de la roue. Les angles ont été pris en valeur absolue, et la variation importante de l'angle de rotation est clairement mise en évidence lorsque l'intensité est proche de la valeur maximale, juste avant et après son passage sur le nœud considéré. La contrainte principale S_{II} a été soumise à une importante rotation totale α_{22} qui est proche de 90° . On pense que c'est l'effet du roulement qui a pu générer cette grande variation. On a également observé que le saut d'intensité a été à l'origine d'une rotation de 20° de la contrainte qui est de l'ordre de 43 à 46 degrés (selon l'intensité des contraintes). Les courbes représentant ces rotations sont des courbes à pic angulaire. Les trois angles de rotation s'annulent lorsque la roue passe sur le nœud et sont donc colinéaires au référentiel (o, x_1, x_2, x_3) (figure 4.7.). En ce qui concerne les deux autres contraintes principales S_I et S_{III} d'angles de rotation respectifs α_{11} et α_{33} leurs valeurs augmentent rapidement lorsque la roue se rapproche du nœud considéré et elles sont des valeurs de 49° . De plus, après son passage cette rotation augmente à 42° et l'angle de rotation total est alors de 91° . La figure 4.15., montre le sens de rotation des contraintes principales. D'après la présente étude, il a été constaté que le sens de rotation des contraintes principales est directement lié au sens de déplacement de la roue sur l'éprouvette, lorsque la roue se déplace de

gauche à droite, le sens de rotation est celui des aiguilles d'une montre, et lorsqu'elle se déplace de droite à gauche, la rotation est celle des aiguilles d'une montre.

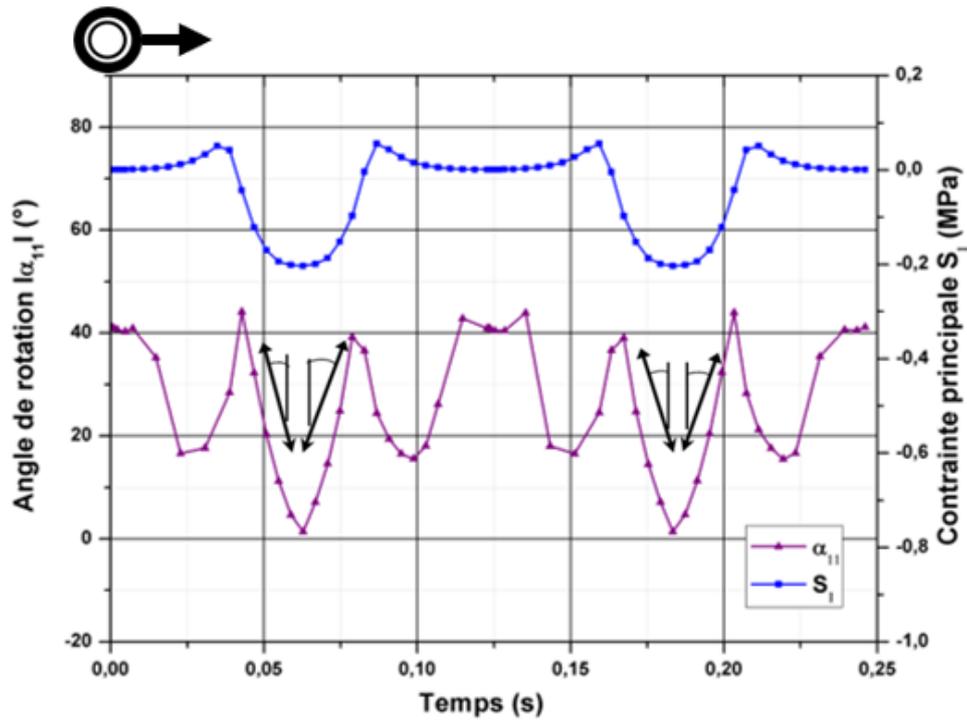


Figure 4.12. Variation de la rotation de l'angle α_{11} en fonction de la contrainte principale S_I

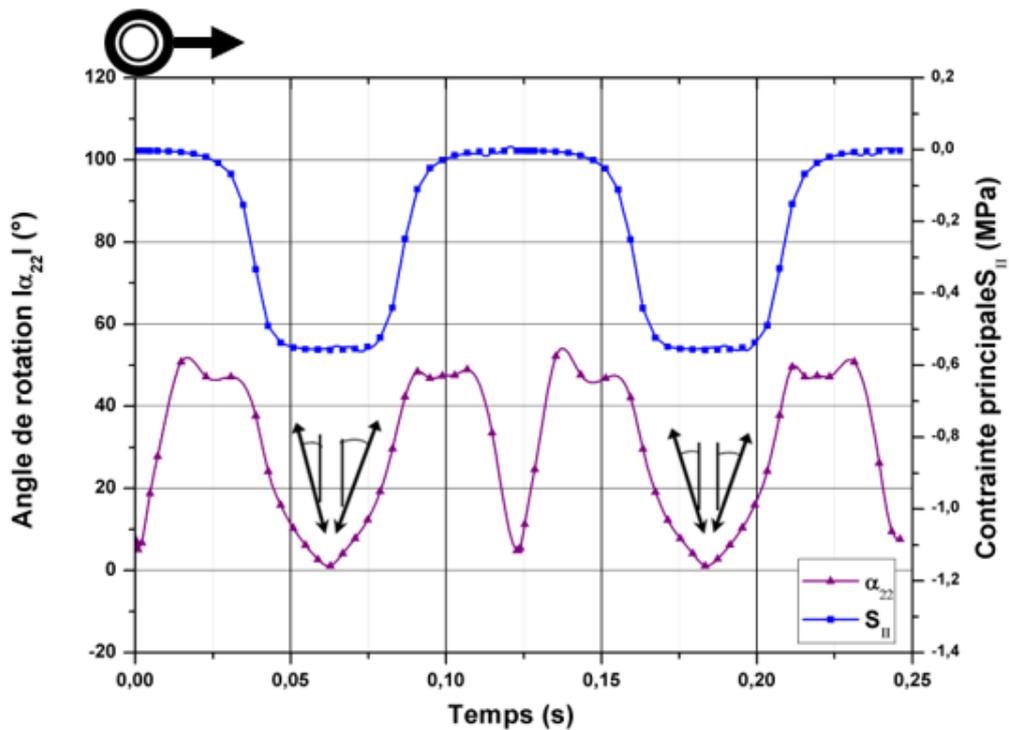


Figure 4.13. Variation de la rotation de l'angle α_{22} en fonction de la contrainte principale S_{II}

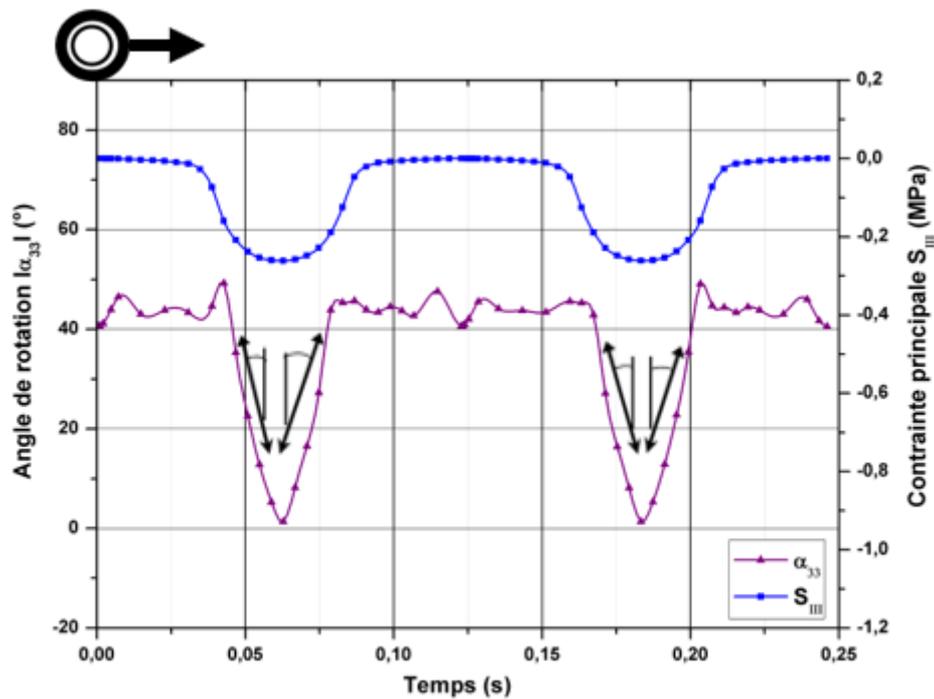


Figure 4.14. Variation de la rotation de l'angle α_{33} en fonction de la contrainte principale S_{III}

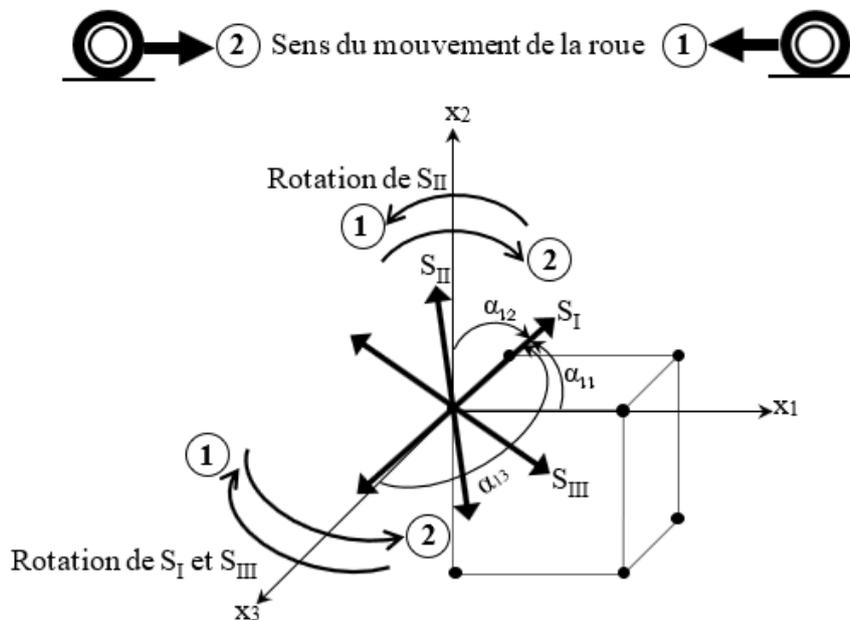


Figure 4.15. Rotation des contraintes principales en fonction de la direction du mouvement de la roue

La figure 4.16. associe la rotation α_2 du vecteur déplacement et la rotation de la contrainte principale S_{II} . Elle permet d'établir la relation entre ces deux grandeurs, qui augmentent rapidement au fur et à mesure que la roue se rapproche du nœud considéré, en l'occurrence le N9539, Il faut

noter que l'angle rotation α_{22} , au fur et à mesure que la roue se rapproche du milieu de l'éprouvette, croit trois fois plus vite que l'angle rotation α_2 du vecteur déplacement, ainsi qu'une variation de l'angle de rotation de la contrainte S_{II} avec une valeur de 45 degrés tout en étant dans le même intervalle. D'autre part, le vecteur de déplacement augmente de 15 degrés, lorsque l'intensité de la contrainte atteint son maximum.

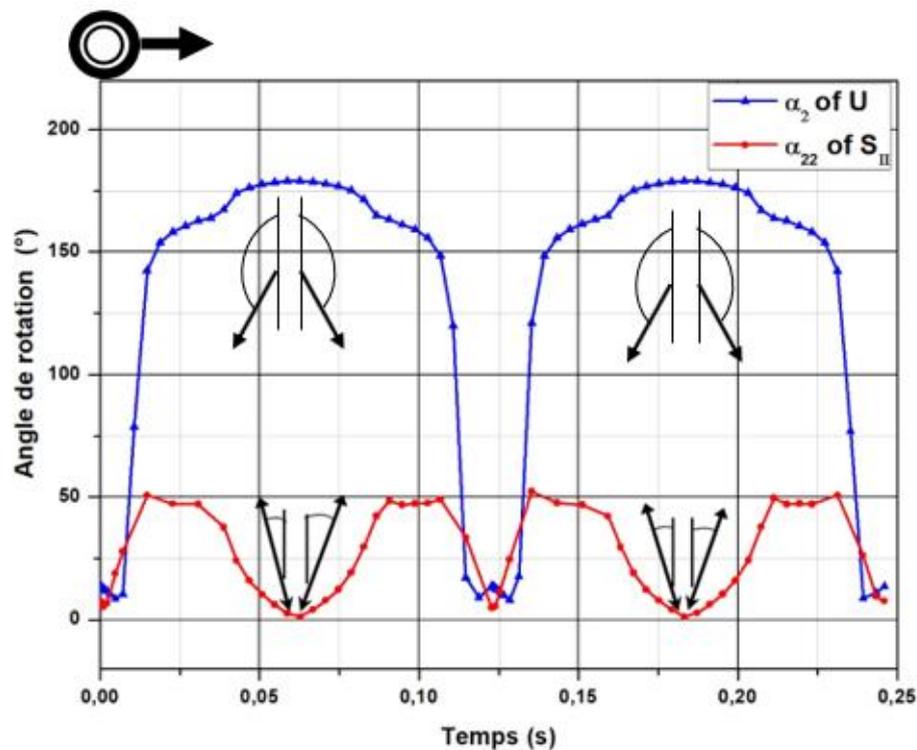


Figure 4.16. Variation de l'angle de rotation du vecteur déplacement et l'angle de rotation de la contrainte principale S_{II} du nœud N9539 lors du déplacement de la roue

Les figures 4.17. et 4.18. montrent l'état de la déformation de l'éprouvette sous charge roulante de la roue, au niveau des nœuds N9539 et N9551. Elles présentent les signaux des différentes composantes du tenseur de déformation. Ces courbes montrent qu'à l'approche de la charge, pour le nœud localisé à la surface, que la composante de cisaillement ϵ_{23} est beaucoup plus importante que les autres composantes, quand la charge est suffisamment proche, La pression de contact induit, pendant son mouvement des efforts de cisaillement à la surface, principalement aux voisinages des bords de la roue, cette déformation s'ajoute à la composante verticale ϵ_{22} , cet effet est essentiellement due à la forme de distribution de la charge sur l'éprouvette ainsi que son mouvement, mais concernant le nœud N9551 la composante verticale est plus grande que la composante tangentielle amplitude ceci est due essentiellement à l'atténuation du cisaillement en

profondeur. La figure 4.19 montre la variation du déplacement vertical U_2 à différentes profondeurs de l'éprouvette.

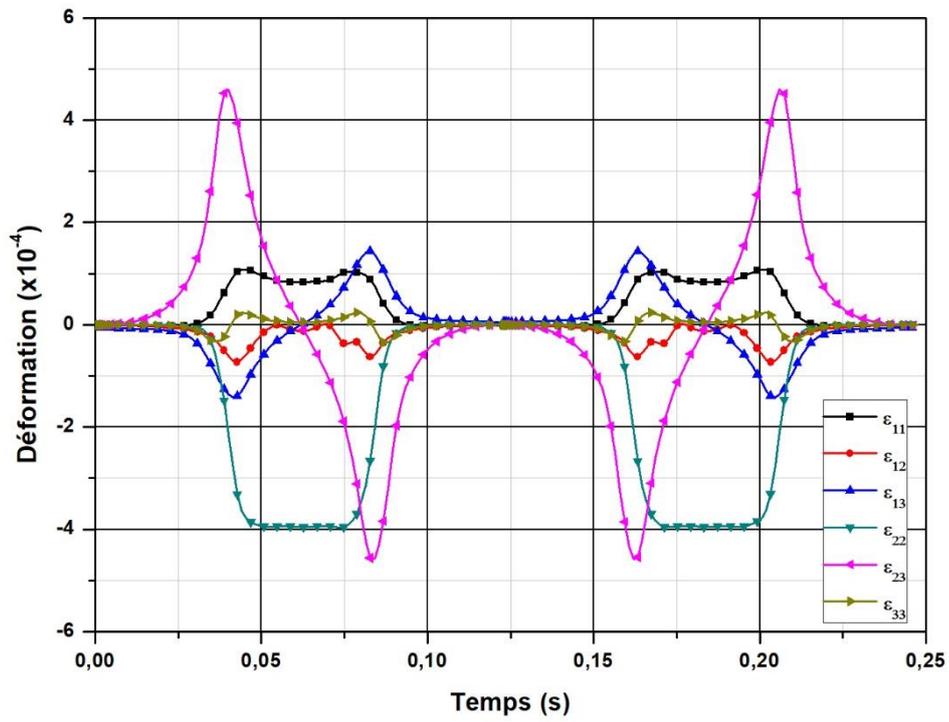


Figure 4.17. Variation des composantes du tenseur des déformations du nœud N9539 lors du déplacement de la roue

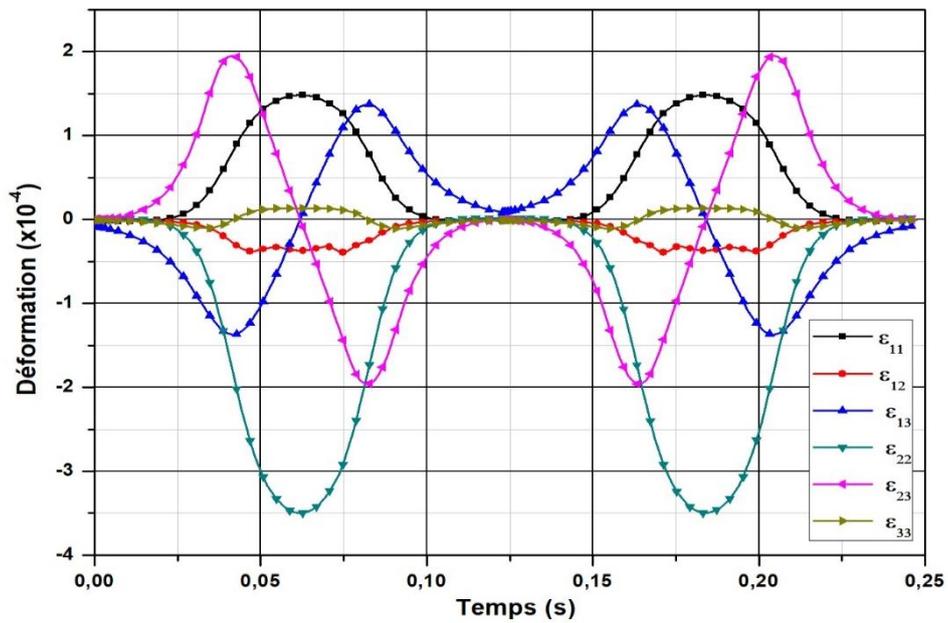


Figure 4.18. Variation des composantes du tenseur des déformations du nœud N9551 lors du déplacement de la roue

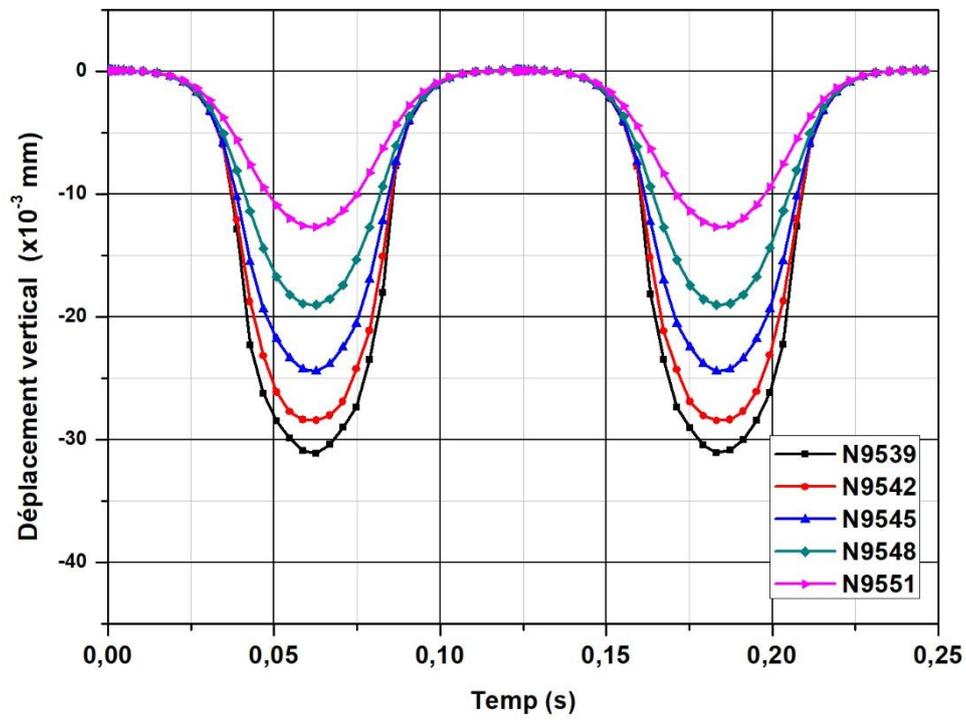


Figure 4.19. Variation du déplacement vertical à différentes profondeurs lors du déplacement de la roue

Les figures 4.20,4.21, 4.22, 4.23 et 4.24 sont tirées de l'output du modèle

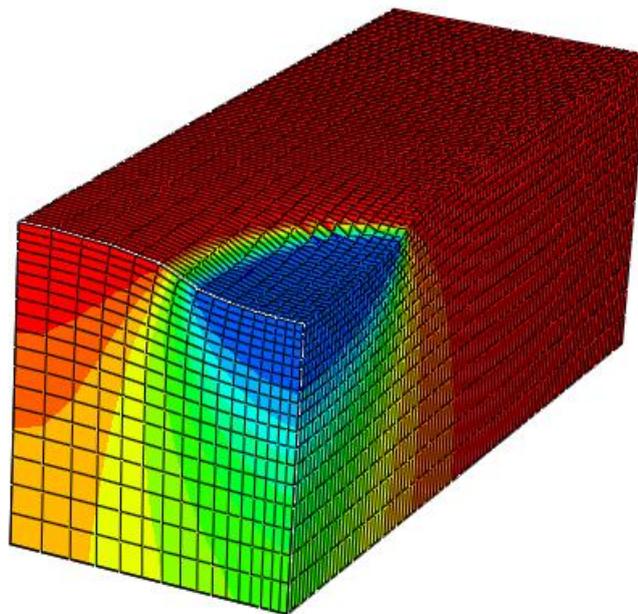


Figure 4.20. Contrainte verticale S_{22} roue au milieu de l'éprouvette

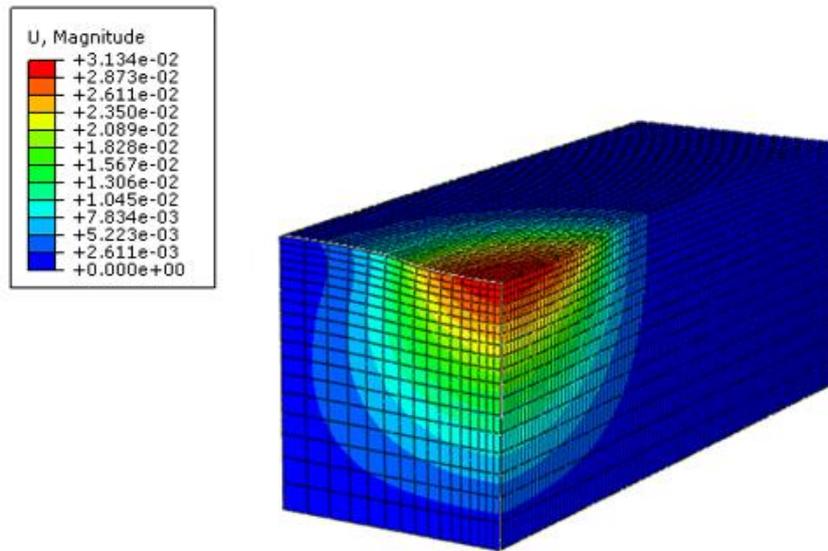
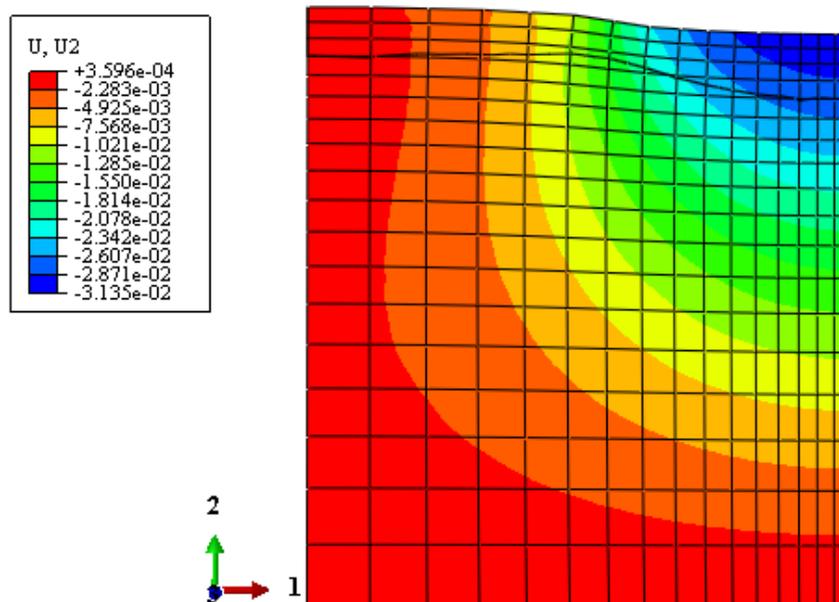


Figure 4.21. Déplacement total roue au milieu de l'éprouvette



ODB: Job-DEC4.odb Abaqus/Standard 6.12-3 Thu Dec 03 16:36:34 GMT+01:00 2020

Step: Step-1

Increment 25: Step Time = 6.2750E-02

Primary Var: U, U2

Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.500e+02

Figure 4.22. Coupe transversale de l'éprouvette représentant le déplacement vertical lors de la roue

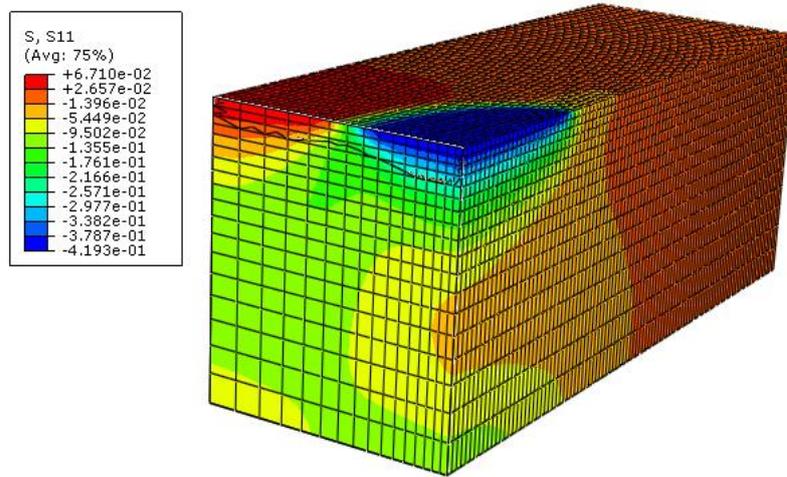


Figure 4.23. Contrainte transversale S_{11} roue au milieu de l'éprouvette

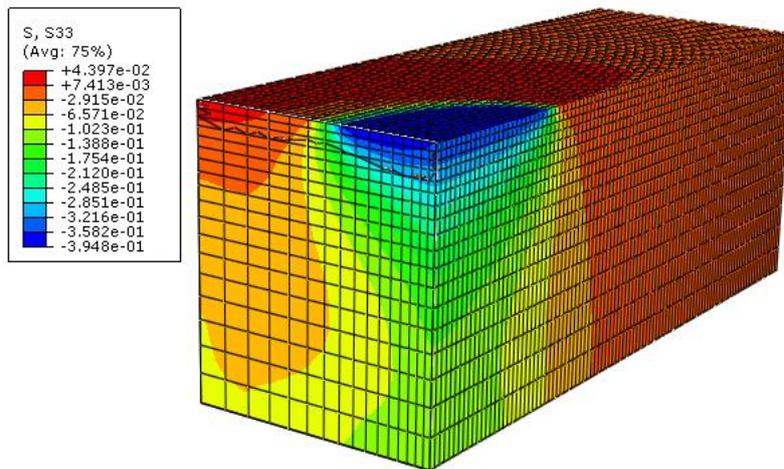


Figure 4.24. Contrainte longitudinale S_{33} roue au milieu de l'éprouvette

Les figures 4.25, 4.26 et 4.27., montrent la rotation des contraintes principales sur un élément C3D8R, en l'occurrence E9001, contenant le nœud N9539, utilisé dans la présente analyse pour trois position de la roue, juste avant son passage sur l'élément, au moment de son passage, et après son passage. Les angles des rotation des contraintes principales s'annulent, à l'aplomb de l'élément

c'est le point représentant le pic des courbes des angles de rotation α_{11} , α_{22} et α_{33} sur les figures 4.12, 4.13., et 4.14.

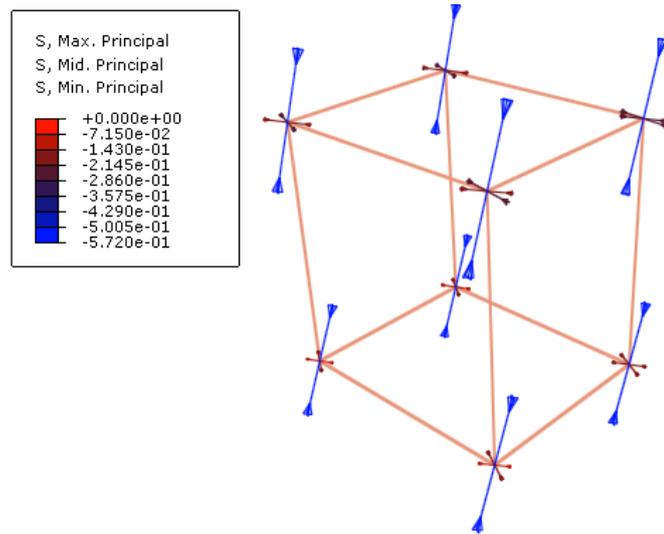


Figure 4.25. Rotation des contraintes principales avant le passage de la roue sur l'élément E9001

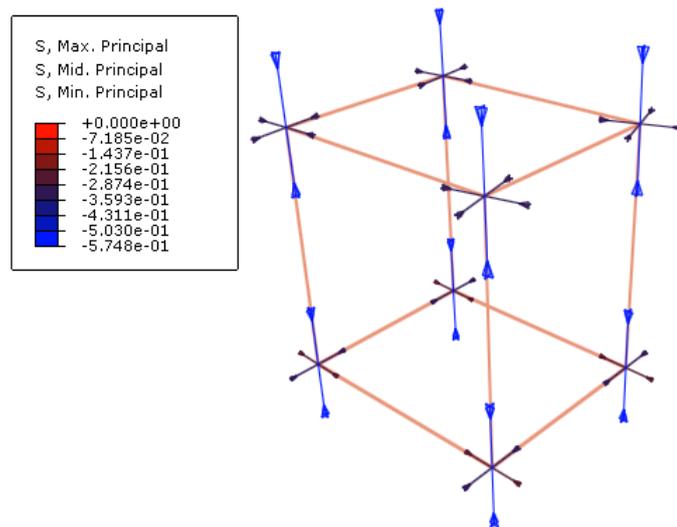


Figure 4.26. Rotation des contraintes principales lors du passage de la roue sur l'élément E9001

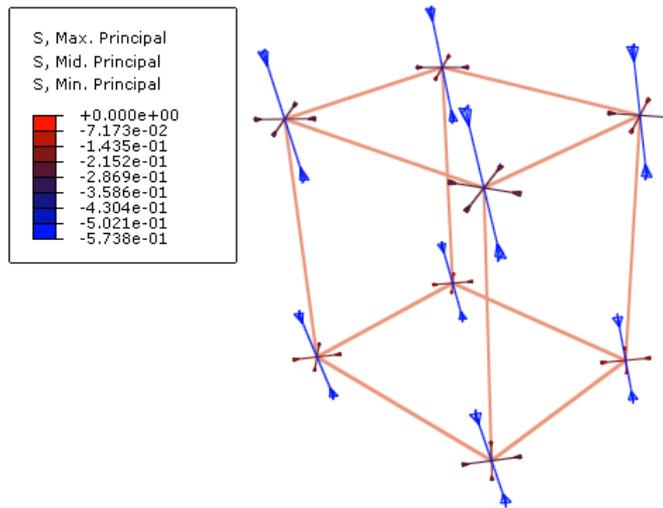


Figure 4.27. Rotation des contraintes principales après le passage de la roue sur l'élément E9001

4.6 Conclusion

Une description précise du comportement des mélanges bitumineux est nécessaire pour prédire et évaluer de manière adéquate les caractéristiques en fonction du temps et l'évolution des contraintes et des déformations dans les couches bitumineuses d'une chaussée souple. Les caractéristiques viscoélastiques des matériaux implémentés sur le CAE peuvent fournir des résultats plus précis, car elles présentent une meilleure approximation du comportement réel du matériau. Les valeurs des constantes de la série de Prony ont été obtenues par une courbe de régression utilisant la méthode des moindres carrés. Un bon ajustement a été obtenu pour toutes les valeurs mesurées, avec 7 paramètres en utilisant le modèle de Maxwell généralisé, composé de trois éléments. Le module de relaxation du mélange bitumineux analysé a montré une dépendance significative au temps, les valeurs du module passant de la valeur maximale de $G_0 = 3898$ MPa à la valeur minimale de $G_\infty = 297$ MPa. Les résultats du modèle utilisé, montrent des évolutions précises des signaux représentant les états de contrainte et de déformation, et sont similaires à la réalité en se référant aux études précédentes. On a également remarqué que la rotation des contraintes principales S_I , S_{II} et S_{III} fait un angle total de 90 degrés autour de leurs axes respectifs verticaux en suivant le mouvement de la roue pendant son passage. La même constatation a été faite concernant le vecteur de déplacement U en faisant une augmentation soudaine de son angle de rotation autour de l'axe vertical avec une valeur totale de 30 degrés. L'utilisation du modèle proposé nous a permis d'évaluer de manière réaliste les effets du mouvement de la roue lorsque celle-ci est proche de la verticale de l'élément étudié. Les modèles élastoviscoplastiques des structures de chaussées et l'effet de l'interface entre les couches bitumineuses et granulaires seront

traités dans des travaux futurs. Cette recherche vise à développer un modèle numérique tridimensionnel qui soit le plus étroitement possible similaire aux conditions réelles de l'essai d'orniérage français. Le modèle a une empreinte de roue à géométrie réelle (plutôt qu'une forme rectangulaire). Le mouvement de la roue lors de son passage sur l'éprouvette sera simulé par un déplacement horizontal, au lieu d'une charge incrémentale, technique utilisée dans les travaux antérieurs. Ces caractéristiques importantes du modèle représentent l'originalité et la nouveauté du modèle proposé, ce qui représente la différence majeure entre la recherche actuelle et les études précédentes. Le modèle actuel, qui est basé sur la méthode des éléments finis, utilise le code ABAQUS avec un modèle constitutif viscoélastique. Les propriétés viscoélastiques des matériaux ont été décrites par la série de Prony, également appelée module de relaxation en fonction du temps. La procédure de calcul de la série de Prony à partir de données expérimentales est expliquée. Les résultats obtenus sont en bon accord avec l'amplitude des signaux de contrainte, les rotations des contraintes principales ainsi que la rotation du déplacement total, lorsque la charge s'approche du nœud considéré, situé au centre de l'éprouvette.

Ils permettent de mettre en évidence les paramètres qui influent sur l'apparition et le développement de l'orniérage.

Ces résultats seront confirmés par d'autres modèles plus complexes et plus réalistes que nous aborderont prochainement, en prenant en compte d'autres facteurs tels que les sollicitations tangentielles sur les points singuliers et l'effet de l'interface entre couches de chaussée.

Conclusion générale

Dans la conception de chaussées souples, la limitation de l'orniérage est l'un des phénomènes les plus importants à prendre en considération. Il est aisé de mesurer le développement d'une ornière, mais il est beaucoup plus complexe de le prédire. Celui-ci est dû principalement au cumul des déformations plastiques sous les actions répétées du trafic.

La seule connaissance du matériau utilisé ne suffit plus ; il faut aussi prendre en compte les conditions environnementales et la distribution des contraintes, et cela tout au long de la durée de vie de la chaussée. Le comportement des enrobés bitumineux, à caractère visqueux, étant étroitement lié à ces deux paramètres que sont la température et la fréquence de la sollicitation.

L'étude expérimentale de l'essai d'orniérage français sur une grave bitume GB3 de grade 3, a été réalisée au Laboratoire Régionale des Ponts et Chaussées d'Angers (France). L'essai a duré 12 jours, l'essai a été poussé jusqu'à 100.000 cycles de chargement au lieu des 60.000 cycles recommandés par la norme NF P 98-250-2. La loi de corrélation puissance a donné de très bons résultats, identique pour les 2 éprouvettes. Dans la quasi-totalité des profils en travers, la forme courbe circulaire de la déformée apparaît à partir de 30.000 cycles, le nombre de points par profil en travers est de 3, encore insuffisant pour avoir une ornière réelle, avec des bourrelets sur les côtés de la trajectoire de la roue, bien que certains de ces essais puissent être considérés comme une mesure directe de la résistance de l'enrobé à la déformation permanente, mettant en évidence les travaux de recherches réalisés par différents auteurs ainsi que les modélisations publiées sur ce thème. Le principe de l'essai est de soumettre une éprouvette du mélange bitumineux au mouvement cyclique aller/retour d'une roue chargée en surface. La profondeur de l'ornière est enregistrée en fonction du nombre de passages de la charge. Le succès de l'approche réside dans la bonne représentativité de l'essai d'orniérage par rapport à la situation in situ, toutefois, l'essai seul, effectué selon ces normes, ne permet pas de prévoir en détail l'évolution de l'orniérage dans une chaussée, dans la mesure où il ne permet pas de prendre en compte les bonnes conditions aux limites ainsi que la variabilité réelle rencontrée sur les chaussées.

Pour pallier à cela, nous nous sommes intéressés aux tests de simulation numérique tridimensionnelle, ce qui constitue notre seconde contribution, qui concerne la modélisation numérique de l'essai d'orniérage français, en prenant en considération la forme réelle elliptique

de l’empreinte de la roue combiné à un comportement viscoélastique des matériaux bitumineux, les simulations ont été réalisées à l’aide du code en éléments finis ABAQUS. Le but étant de développer et de proposer un modèle numérique tridimensionnel pour l’essai d’orniérage en question afin de mieux cerner la cinématique de la rotation des contraintes principales ainsi que le vecteur déplacement lors du passage d’une roue. Soucieux d’être le plus fidèle possible dans la reproduction des états de contraintes dans nos essais de laboratoire (essai FWTT), nous avons cherché à modéliser les états de contraintes dus au passage d’une charge dans des structures de chaussées en prenant en considération l’empreinte réelle de la roue, la pression sur l’éprouvette et sa vitesse de déplacement, avec une empreinte de roue à géométrie réelle (plutôt qu’une forme rectangulaire). Egalement, le mouvement de la roue, lors de son passage sur le spécimen, sera simulé par un déplacement horizontal, au lieu d’une charge incrémentale, comme souvent simulé dans les travaux répertoriés en littérature. Ces choix de simulation numériques constituent l’originalité du modèle proposé, ce qui représente une différence majeure entre la recherche actuelle et les études précédentes. Les résultats obtenus sont en très bon accord avec l’amplitude des signaux de contraintes, les rotations des contraintes principales ainsi que la rotation du déplacement total, lorsque la charge s’approche du nœud considéré, situé au milieu du modèle de l’éprouvette.

On peut aisément constaté que l’évolution des composantes tensorielles est similaire aux recherches précédentes, en particulier celles de (Lekarp, 2000). Cependant, l’intensité de la composante verticale S_{22} , responsable de l’apparition du phénomène d’orniérage, est beaucoup plus importante que celle des composantes longitudinale S_{33} ou transversale S_{11} . En ce qui concerne les contraintes de cisaillement, on constate que S_{23} est beaucoup plus importante que S_{12} . En comparant ces résultats avec ceux de (Di Benedetto, 2005), il existe une différence entre la pression exercée par la roue sur l’éprouvette et l’amplitude de la contrainte verticale, pour le nœud N9539, localisé au centre et à la surface qui est supérieure de 15 % par rapport la pression de la roue, alors que pour la présente étude elles sont presque égales.

Par ailleurs, l’évolution de la rotation des contraintes principales au nœud N9539 pendant le cycle aller/retour de la roue est mise en évidence. Les angles ont été pris en valeur absolue, et la variation importante de l’angle de rotation est clairement mise en évidence lorsque l’intensité est proche de la valeur maximale, juste avant et après son passage sur le nœud considéré. La contrainte principale S_{II} a été soumise à une importante rotation totale α_{22} qui est proche de 90° . On pense que c’est l’effet du roulement qui a pu générer cette grande variation. D’après la présente étude, il a été constaté que le sens de rotation des contraintes principales est directement lié au sens de déplacement de la roue sur l’éprouvette, lorsque la roue se déplace de gauche à droite, le sens de

rotation est celui des aiguilles d'une montre, et lorsqu'elle se déplace de droite à gauche, la rotation est celle des aiguilles d'une montre.

Ces résultats, comparés à ceux disponibles en littérature démontrent la bonne performance du modèle proposé.

Ces résultats seront confirmés par d'autres modèles plus complexes et plus réalistes que nous aborderont prochainement, en modélisant une structure de chaussée entière en prenant en compte d'autres facteurs tels que les sollicitations tangentielles lors du freinage des véhicules lourds et l'effet de l'interface entre couches de chaussée, ainsi que des lois de comportement plus avancées des différents matériaux.

Références bibliographiques

- Absamad, EL ABD. (2006) Développement d'une méthode de prédiction des déformations de surface des chaussées à assises non traitées, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1.
- Alnedawi, A., Prasad Nepal, K., Al-Ameri, R., The Effect of Cyclic Load Characteristics on Unbound Granular Materials, *Transportation Infrastructure Geotechnology* (2019) 6: pp70–88 y (2019), <https://doi.org/10.1007/s40515-019-00070-1>
- Bassem, A., Modèle numérique pour comportement mécanique des chaussées : application à l'analyse de l'orniérage, Université de Lille, France, pp 130 (2006).
- Bilodeau, K (2008), "Étude de variabilité des propriétés des enrobés bitumineux", projet synthèse, Montréal, Ecole de Technologie Supérieure (Canada), LUCREB, 3-8 pages
- Bilodeau, K (2008), "Étude de variabilité des propriétés des enrobés bitumineux", projet synthèse, Montréal, Ecole de Technologie Supérieure (Canada), LUCREB, 3-8 pages.
- Blanc, M.: Etude expérimentale et modélisation du comportement des sols avec rotation d'axes principaux de contraintes. Ph.D. thesis, ENTPE, University of Lyon (2011)
- Boltzmann, L.: Zur Theorie der elastischen Nachwirkung. *Pogg. Ann. Phys.* 7, 624–654(1876)
- Brown S.F. (1974), Repeated load testing of a granular material, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 100, n° GT 7, pp. 825-841.
- Chan, F.W.K.: Permanent deformation resistance of granular layers in pavements. Ph.D. thesis, University of Nottingham, UK (1990)
- Christensen, R. M., 1982. *Theory of Viscoelasticity*. Academic Press, New York, USA, 1982
- Dawson, A., Corriera, A. G., The effects of subgrade clay condition on the structural behaviour of road pavements, *Flexible Pavement*, a Gomez Correia edition(1996), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 623 2.
- Di Benedetto, H. Modélisation : écart entre état des connaissances et applications. in *Journée LAVOC*. 1998. Genève
- Di Benedetto, H. Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux: résultats expérimentaux et formulation rhéologique in *Proceedings of the Fourth International RILEM Symposium*. 1990. Budapest.
- Di Benedetto, H., Corté, J.-F.: *Matériaux routiers bitumineux 2: constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*. Publication Hermes-Science, Lavoisier (2005)
- Di Benedetto, H., and all *Mechanical Testing of Bituminous Mixtures Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials* 242-250
- Dongmo Engeland, B.-J.: Caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuses. Ph.D. thesis, ENTPE – INSA Lyon, 325 pp (2005).
- Eason, G., The stresses produced in a semi-infinite solid by a moving surface force, *International Journal of Engineering Science*, vol.2, issue.6, pp.581-609, 1965. Doi: 10.1016/0020-7225(65)90038-8
- Fedakar, H. I., Cassandra, J., Rutherford & Bora Cetin., Effect of principal stress rotation on deformation behavior of dense sand-clay mixtures (2021),

- <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1948908>, Road Materials and Pavement Design, Taylor and Francis.
- FRANCKEN, L., VANELSTRAETE, A., “Complex moduli of bituminous binders and mixes. Interpretation and evaluation”, 1st European Eurobitume and Eurasphalt Congress, Strasbourg, 1996.
- FRANCKEN, L., VANELSTRAETE, A., “Relation between mix stiffness and binder complex modulus”, The Rheology of Bituminous Binders, Eurobitume Workshop, 1995.
- Frey.F.1998 Analyse des structures et milieux continus.Traité de Génie Civil.Volume 3
- Gidel, G., Hornych P., Chauvin J.J., Breyse D., Denis A. (2001) Nouvelle approche pour l'étude des déformations permanentes des graves non traitées à l'appareil triaxial à chargements répétés, Bulletin des LPC n°233, pp 5-21.
- H. Di Benedetto et al. Linear Viscoelastic Finite Elements Calculation of French Wheel Tracking Test Considering French Classical Mix “BBSG, Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials, (2013),Springer doi 10.1007/978-94-007-5104-0.
- Habiballah T. (2004) Modélisation des déformations permanentes des graves non traitées – Application au calcul de l'orniérage des chaussées souples, Thèse de Doctorat,Université de Limoges. <http://aurore.unilim.fr/ori-oai-search>
- Lekarp F., Isacson U., Dawson A. (2000) “ State of the art–II Permanent strain response of unbound aggregates”, Journal of Transportation Engineering ASCE, vol.126, No.1, pp76-83. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2000\)126:1\(76\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:1(76)).
- Ludomir U., Maher M, Prilesky H, Tighe S, Rothenburg L, The Use of Simple Performance Tests in the Development of Rutting Resistant Criteria for Asphalt Mixes in Canada Stage 1, Annual Conference of the Transportation Association of Canada Charlottetown, Prince Edward Island, (2006).
- Lugo-Uribe A., L. E. Dehonor-Gómez. M., (2020) Prony series calculation for viscoelastic behavior modeling of structural adhesives from DMA data. Ingeniería Investigación y Tecnología, doi.org/10.22201/ii.25940732e.2020.21n2.014
- Nguyen, H.M.: Comportement cyclique et déformations permanentes des enrobés bitumineux, Ph.D. thesis, ENTPE, University of Lyon (in French) (2010).
- Olard, F.(2000) Etude et modélisation de comportement thermo-mécanique des enrobés bitumineux, Mémoire de recherche pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies de Génie Civil de l'Ecole Doctorale MEGA de Lyon, juillet 2000.
- Perraton, D., Di Benedetto, H., Sauze´at, C., De la Roche, C., Bankowski, W., Partl, M.N., Grenfell, J.: Rutting of bituminous mixtures: wheel tracking tests campaign analysis. Mater. Struct. 44, 969–986 (2010)
- Perret, J.,Modélisation des charges d'essieu, Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, septembre 2004, 103 p.
- Pfeiffer, J.P., Van Doormaal, P.M., “The rheological properties of asphaltic bitumens”, J. Inst. Petrol., Vol. 22, 1936.
- Pucci, T., Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux, Thèse de Doctorat EPFL Lausanne, 2000.
- Quan,L., Weidong,H., Husam,S., Feipeng,X., Chuanqi,Y., Investigation of the rutting performance of various modified asphalt mixtures using the Hamburg Wheel-Tracking Device test and Multiple Stress Creep Recovery test (2019), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.015>. Construction and Building Materials.

- Schapery, R. A., (1982). Theory of viscoelasticity, Lecture notes.
- Tianshu, L and al., Pavement design method in Japan with consideration of climate effect and principal stress axis rotation (2021), <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100552>. Transportation Geotechnics.
- Tracking Test, Determination of the Track Depth of High-Stability Binding Layers. Construction Bureau, Civil Engineering Office, Department of City Traffic, Hamburg, Germany (1991).
- Tschoegl, N.W. (1989). The phenomenological theory of linear viscoelastic behavior. 1st edition: Springer-Verlag.
- VAN der POEL, C., “A general system describing the visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data”, Journal of applied chemistry, 1954.
- VAN DRAAT, W., SOMMER, P., “Ein gerat zue bestimlung der dynamiscen elasticitatsmoduln von asphalt”, Strasse und Autobahn, Vol. 16, 1965.
- Wenchang, L and al., An approach to investigate coarse aggregates movement of asphalt mixture based on wheel tracking test.(2021) <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125161>. Construction and Building Materials.
- Williams, J.G., CAWOOD, M.J., “European group on fracture: Kc and Gc methods for polymers”, Polymer Testing, Vol. 9, 1990, pp. 15-26.
- Witczak, M.W., ANDREI, D., MIRZA, W., “Development of Revised Predictive Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures”, InterTEAM Technical Report, NCHRP Project 1-37A, University of Maryland, March 1999.
- Witczak, M.W., Fonseca, O.A.: Revised predictive model for dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures. J. Transport. Res. Rec. 1540, 15–32 (1996).
- Witczak, M.W., PELLINEN, T.K., AC Mixture Response Comparison to Performance E* and Sm Prediction Equation Methodology Results, Superpave Support and Performance Models Management, NCHRP 9-19, Task C – Simple Performance Test, WesTrack Experimental Site, July 2000.
- Witczak, M.W., Root, R.E.: Summary of complex modulus laboratory test procedures and results. Am. Soc. Test. Mater. STP 561, 67–94 (1974).
- Zarka, J., Casier, J. (1979) Elastic plastic response of structure to cyclic loading: practical rules. Mechanics Today 6; Ed Nemat-Nasser, Pergamon Press: 93-198. doi:10.1016/B978-0-08-024749-6.50014-4.