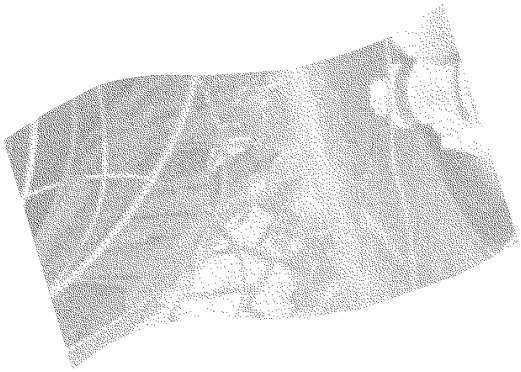
Étude exploratoire sur les phénomènes d'éclatement et d'explosion de pneus de camions lourds



ÉTUDES ET RECHERCHES

René Benoît
Michel Gou
Olivier Bellavigna
Toan Vu-Khanh
Patricia Dolez
Carlos Arrieta
Cédrick Nohilé
Tung Ha-Anh

R-479

RAPPORT

irsst

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent* pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

Dépôt légal
Bibliothèque et Archives nationales
2006
ISBN 13 : 978-2-89631-082-1 (version imprimée)
ISBN 10 : 2-89631-082-7 (version imprimée)
ISBN 13 : 978-2-89631-083-8 (PDF)
ISBN 10 : 2-89631-083-5 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
Télécopieur : 514 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
novembre 2006

Étude exploratoire sur les phénomènes d'éclatement et d'explosion de pneus de camions lourds

ÉTUDES ET RECHERCHES

René Benoît[1], Michel Gou[2], Olivier Bellavigna[2], Toan Vu-Khanh[3], Patricia Dolez[3], Carlos Arrieta[3], Cédrick Nohilé[3] et Tung Ha-Anh[3]

[1]Service de la recherche, IRSST

[2]École Polytechnique de Montréal

[3]École de technologie supérieure de Montréal

RAPPORT

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca

Cette publication est disponible en version PDF sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

SOMMAIRE

Cette activité a pris naissance en réponse à une demande de l'Association sectorielle transport entreposage (ASTE), appuyée par le ministère du Transport du Québec, la Société de l'assurance automobile du Québec, la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) et des représentants du « Comité de Liaison du Transport » : l'IRSST était sollicité pour examiner les moyens de réduire les risques reliés aux éclatements des pneus.

Une étude bibliographique poussée a donc été réalisée avec pour objectifs principaux 1) de déterminer l'importance du phénomène d'éclatement des pneus et son influence sur la sécurité des personnes, 2) de comprendre les phénomènes impliqués dans l'éclatement des pneus, 3) de déterminer les principales causes à la source du phénomène, 4) d'étudier la possibilité d'appliquer des méthodes d'aide à la détection précoce du risque d'éclatement, 5) d'identifier des pistes de solutions, et 6) de proposer des avenues de recherche afin de déterminer des moyens de prévention pour réduire les risques d'accidents causés par l'éclatement des pneus. L'objectif général de cette activité étant d'effectuer le travail préliminaire à un éventuel projet de recherche de plus grande envergure qui permettrait de combler les manques et les questions sans réponses identifiés dans la littérature et auprès des ressources offertes par le milieu.

Les sources d'information utilisées dans le cadre de cette étude sont essentiellement constituées de rapports d'accidents, au Québec et ailleurs, et de littérature technique et scientifique. Elles ont été corroborées et complétées par des discussions avec de nombreuses personnes-ressources du milieu, tant au niveau des utilisateurs que des manufacturiers, ainsi qu'avec des experts dans le domaine.

Un des premiers résultats de cette activité concerne l'objet de l'étude. En effet, alors que la demande identifiait uniquement l'explosion des pneus comme problématique, il est apparu que le phénomène de l'éclatement, bien que nettement moins violent que l'explosion, peut survenir à n'importe quel moment dans le processus menant à l'accident. L'explosion, qui correspond à l'étape ultime du processus, se produit si trois conditions de température, de concentration en gaz inflammables et en oxygène dans le pneu sont réunies sans que celui-ci n'ait déjà cédé au préalable sous l'effet de la pression, phénomène correspondant à l'éclatement.

Une deuxième conclusion importante de cette étude est relative à l'importance du phénomène. Depuis 1990, il s'est produit, au Québec, en moyenne deux décès tous les trois ans, ce qui représente près de 1 % des décès attribuables aux accidents de travail. Et c'est le secteur des transports qui est le plus touché. De plus, tant au niveau du nombre de décès qu'en ce qui concerne les coûts occasionnés à la CSST, il apparaît que les accidents impliquant un éclatement ou une explosion de pneu ont des conséquences beaucoup plus graves que ceux n'impliquant pas

de pneus. Il est également ressorti des discussions avec les gens du milieu que le nombre de cas qui sont rapportés n'est pas représentatif de l'étendue du phénomène et que l'occurrence d'éclatement et d'explosion de pneus serait plus fréquente et les situations, où le pire a été évité de justesse, seraient plus nombreuses si l'on tenait compte des cas pour lesquels il n'y a pas eu d'enquête avec dépôt d'un rapport à la CSST.

Un troisième point préoccupant concerne les températures auxquelles les réactions chimiques de pyrolyse et/ou de thermo-oxydation sont amorcées, lesquelles réactions produisent les gaz inflammables pouvant provoquer un éclatement ou une explosion. En effet, même si des tests sont nécessaires afin de déterminer exactement ces valeurs dans des conditions correspondant à celles menant à un éclatement ou à une explosion de pneu, certaines informations tirées de la littérature, ainsi que de l'analyse de données issues d'une simulation d'explosion d'un pneu par soudage sur la jante, indiquent que ces réactions chimiques peuvent se produire à partir de températures aussi basses que 150 à 200ºC en ce qui concerne la température du caoutchouc constituant la matrice du pneu, et de moins de 100ºC pour l'air contenu dans ce pneu. Or ces températures sont très proches des températures de service au niveau de certaines parties des pneus de camions.

Finalement, même si une vaste gamme de dispositifs de surveillance en fonctionnement a été identifiée, aucun ne semble être à l'heure actuelle en mesure de répondre de manière adéquate aux besoins de détection et d'alerte par rapport au phénomène d'éclatement et d'explosion des pneus. En effet, en plus de divers problèmes techniques qui restent à résoudre et des contraintes liées à la rapidité d'évolution du processus une fois enclenché, la plus grosse difficulté réside dans le manque actuel d'indicateurs permettant de reconnaître l'amorce des processus pouvant mener à un éclatement ou à une explosion. Ce manque d'indicateurs se manifeste aussi au niveau des procédures entourant le traitement d'une situation potentiellement à risque. Une fiche de prévention relative aux risques d'éclatement et d'explosion des pneus, qui a été produite en collaboration avec l'Association sectorielle transport et entreposage, reflète bien ce manque actuel d'outils permettant de prévenir ou même de traiter de manière sécuritaire et satisfaisante pour le milieu les cas potentiellement à risque.

Les conclusions de cette étude mettent en évidence le besoin d'effectuer un projet permettant de combler ces lacunes, principalement au niveau des indicateurs de seuil sécuritaire de fonctionnement. Ce projet entend comprendre à la fois la cueillette de données sur des pneus en service et lors d'expériences visant à recréer des situations pouvant mener potentiellement à des éclatements et des explosions, ainsi que des expériences de laboratoire en conditions contrôlées destinées à étudier les mécanismes des processus impliqués dans les phénomènes d'éclatement et d'explosion. À l'issue d'une telle recherche, des réponses devraient pouvoir être apportées quant aux indicateurs manquant actuellement, ce qui permettra éventuellement de développer des moyens de détection et de prévention utilisables et acceptables par le milieu.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier M. Dominique Malo, le directeur général de l'Association sectorielle transport entreposage (ASTE), pour son étroite collaboration. Nous remercions également M. Langis Lafrance, conseiller en prévention des accidents, pour ses commentaires et son apport technique.

Nous tenons aussi à souligner la collaboration de M. Gérald Larouche de l'Association des industries de la forêt du Québec (ASSIFQ), qui nous a mis en relation avec le milieu forestier et qui nous a également permis d'avoir accès à des informations importantes sur des accidents survenus à la suite de contact avec des lignes à haute tension.

Nous remercions particulièrement M. François Régis Bory de la CSST avec qui nous avons eu des échanges d'information très fructueux.

Merci également à M. Jean-Robert Fontaine, directeur de la flotte chez Boutin Transport. Nos remerciements s'adressent aussi à M. Benoit Plamondon, gérant du département « Poids lourd », et à M. Paul Labadie, représentant sur la route pour le Centre de camion Desharnais à Québec.

Nous avons apprécié la collaboration de M. François Beauchamp, directeur des services techniques pour Michelin Canada.

Nous soulignons particulièrement notre reconnaissance aux membres du « Comité de Liaison Transport » de l'ASTE avec qui nous avons eu le plaisir de travailler, notamment à la réalisation de la fiche de prévention.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE i

REMERCIEMENTS iii

TABLE DES MATIÈRES v

Liste des tableaux x

Liste des figures xi

Lexique xii

1. INTRODUCTION 1

2. CONTEXTE DE L'ACTIVITÉ DE RECHERCHE 3
   2.1 Origine et contexte 3
   2.2 Problématique 3

3. OBJECTIFS DES TRAVAUX 5

4. MÉTHODOLOGIE 7
   4.1 Revue de littérature 7
   4.2 Collecte d'information sur les accidents, besoins, attentes et autres données techniques 7
      4.2.1 Analyse des rapports d'enquêtes des accidents graves et mortels 7
      4.2.2 Études des causes 7
      4.2.3 Étude de différents moyens de prévention des risques 8
      4.2.4 Analyse et synthèse 9

5. RÉSULTATS 10
   5.1 Importance du phénomène d'éclatement et d'explosion des pneus pour la sécurité 10
      5.1.1 Analyse des rapports d'enquêtes d'accidents graves et mortels disponibles sur le site Web de la CSST 10
         5.1.1.1 Analyse des conséquences des cas recensés dans les rapports d'enquête 11
         5.1.1.2 Analyse des causes des cas recensés dans les rapports d'enquêtes 13
         5.1.1.3 Analyse de deux cas récents non répertoriés dans les bases de données 13
      5.1.2 Analyse des informations obtenues auprès du « Dépôt de données centrales et régionales de la CSST » 14
         5.1.2.1 Importance relative de l'agent causal « Pneus » dans l'ensemble des lésions 15
         5.1.2.2 Importance du genre d'accidents « FRAPPÉ PAR OU EXPLOSIONS » 16
         5.1.2.3 Importance relative des éclatements et explosions de pneus 16
         5.1.2.4 Importance relative des groupes professionnels touchés 17

5.1.2.5 Importance relative des secteurs 18
5.1.2.6 Conclusion de l'analyse des informations obtenues du « Dépôt de données centrales et régionales de la CSST » 19
5.1.3 Analyse d'informations provenant d'autres sources obtenues dans la littérature 20
5.2 Une description générale du phénomène 20
5.2.1 Description générale d'un pneu et de ses composantes 20
5.2.1.1 Composantes 20
5.2.1.2 Matériaux constitutifs 22
5.2.1.3 Procédé de fabrication 23
5.2.1.4 Principales caractéristiques, spécifications et performances des pneus 24
5.2.2 Description générale des phénomènes d'éclatement et d'explosion des pneus de camions lourds 25
5.2.2.1 Phénomène général d'éclatement d'origine mécanique 25
5.2.2.2 Phénomènes généraux d'éclatement d'origine chimique 27
5.2.2.2.1 Information générale sur la pyrolyse 27
5.2.2.2.2 Information générale sur la thermo-oxydation 28
5.2.2.3 Processus général menant à l'éclatement ou à l'explosion de pneus 28
5.3 Une mise à jour des connaissances sur le phénomène de l'éclatement ou explosion des pneus 32
5.3.1 Situations provoquant la défaillance de pneu 32
5.3.1.1 Défaillance due au service 32
5.3.1.2 Défaillance par chauffage externe 33
5.3.1.3 Électrocution par la foudre ou une ligne à haute tension 35
5.3.1.4 Problématiques liées à l'entretien des pneus et des jantes de véhicules lourds 36
5.3.2 Modes et mécanismes les plus probables d'éclatement et d'explosion de pneus 36
5.3.2.1 Expansion de l'air contenu dans le pneu 37
5.3.2.2 Diminution de la résistance mécanique du pneu 38
5.3.2.2.1 Conditions d'opération normales et effet sur les propriétés 38
5.3.2.2.2 Effet d'une température élevée 40
5.3.2.2.3 Conditions environnementales, vieillissement chimique et fatigue 40
5.3.2.3 Dégradation thermochimique du caoutchouc 40
5.3.3 Les phénomènes de dégradation physique et chimique 41
5.3.3.1 Réactions chimiques 41
5.3.3.1.1 La pyrolyse 41
5.3.3.1.2 La thermo-oxydation 43
5.3.3.1.3 La combustion 44
5.3.3.1.4 Analyse des données disponibles obtenues d'un cas d'accident mortel 45
5.3.3.2 Phénomène de vieillissement des pneus 45

5.3.3.2.1 Mécanismes du vieillissement chimique du caoutchouc 46
5.3.3.2.1.1 Vieillissement par oxydation 46
5.3.3.2.1.2 Vieillissement thermique en absence d'oxygène 46
5.3.3.2.1.3 Vieillissement par ozonation.....46
5.3.3.2.1.4 Action de la lumière du soleil 47
5.3.3.2.2 Les adjuvants contre le vieillissement du caoutchouc 47
5.3.3.2.3 Mécanismes de dégradation liés aux fibres de renfort....47
5.3.3.2.4 Effets du vieillissement sur les propriétés mécaniques des pneus 47
5.3.3.2.4.1 Effets sur la matrice caoutchouc 47
5.3.3.2.4.2 Effets sur les renforts 48
5.3.3.2.4.3 Effets du vieillissement en service.....49
5.3.3.3 Fatigue 49
5.3.3.3.1 Facteurs influant sur la fatigue.....50
5.3.3.3.2 Analyse de la fatigue produite par la mise en service des pneus 50
5.3.3.3.3 Facteurs influant sur la fatigue des cordes et des fibres de renfort.....51
5.3.4 Importance relative des phénomènes, les risques et les conséquences.....51
5.3.4.1 Résultats et analyse de l'expérimentation réalisée par Michelin.....52
5.3.4.2 Analyse du délai de réaction 55
5.3.4.3 Conséquences.....58
5.3.5 Modèles disponibles sur le comportement du pneu dans différentes situations 58
5.3.5.1 Modélisation de la distribution de température normale dans un pneu 59
5.3.5.2 Modélisation de l'effet de la surchauffe d'un frein 59
5.3.5.3 Modélisation du phénomène de sous-gonflage.....59
5.3.5.4 Modélisation du bris en service d'un pneu 59
5.3.5.5 Modélisation de l'éclatement en surpression.....60
5.3.6 Moyens de prévention.....60
5.3.6.1 Technologies de surveillance de la pression de gonflage des pneus 60
5.3.6.1.1 Principaux concepts des systèmes de monitoring de pression et température des pneus.....61
5.3.6.1.1.1 Capteur de position de la suspension, de la jante ou du pneu 61
5.3.6.1.1.2 Capteur de vitesse de rotation des roues 61
5.3.6.1.1.3 Capteur interne à communication électromagnétique ou par fréquence radio (RF) 61
5.3.6.1.2 Différentes technologies disponibles de monitoring développées par des manufacturiers 62
5.3.6.1.2.1 Motorola 62

5.3.6.1.2.2 Siemens VDO Automotive 62
5.3.6.1.2.3 VisiTyre par ETV Corporation 63
5.3.6.1.2.4 Système eTire de Michelin 64
5.3.6.1.2.5 SmarTire Systems 65
5.3.6.2 Systèmes de contrôle de la pression.....66
5.3.6.3 Système de gonflage des pneus à l'azote 67
5.3.6.4 Protection anti-surpression.....69
5.3.6.5 Technologies alternatives.....69
5.3.6.5.1 Pneus anti-crevaison 69
5.3.6.5.2 Pneus autogonflants 70
5.3.6.5.3 Pneus mécaniques 70
5.3.6.5.4 Portails thermiques.....70
5.3.6.6 Mesures préventives et procédures afin d'améliorer la sécurité dans le domaine du transport 71
5.3.6.6.1 Procédures recommandées par différents organismes concernés par l'éclatement et l'explosion des pneus de camion 71
5.3.6.6.1.1 Mines, gouvernement du Queensland, Australie 71
5.3.6.6.1.2 Le Groupe Guilbault ltée, Boucherville 71
5.3.6.6.1.3 Service de sécurité incendie au Québec.....72
5.3.6.6.1.4 Association sectorielle paritaire – Secteur services automobiles 72
5.3.6.6.2 Les mesures préventives à l'atelier de réparation ou d'entretien 73
5.3.6.6.2.1 Quelques mises en garde reliées aux activités de soudure ou de chauffage plus ou moins intense sur la roue, sur les boulons ou d'autres composantes à proximité d'un pneu 73
5.3.6.6.2.2 Pneu qui a roulé à une pression inférieure à 80 lb/po^2 74
5.3.6.6.2.3 Aspects mécaniques à vérifier lors du montage d'un pneu sur la jante 75
5.3.6.6.2.4 Utilisation de lubrifiants lors du montage d'un pneu sur la jante 76
5.4 Démarches réalisées auprès du milieu 77
5.4.1 Secteur du transport 77
5.4.2 Transport forestier.....77
5.4.3 Secteurs des mines 78
5.4.4 Compagnie Michelin.....78
5.5 Des méthodes scientifiques, techniques ou expérimentales de caractérisation des phénomènes.....78
5.5.1 Suivi des paramètres contrôlant l'occurrence d'un éclatement ou d'une explosion 79
5.5.1.1 Mesure de la température.....79

5.5.1.2 Mesure de la pression....79
5.5.1.3 Mesure de la déformation....79
5.5.2 Dégradation thermochimique du caoutchouc....80
5.5.3 Vieillissement chimique....81
5.5.4 Fatigue....81

6. Examen des pistes de recherche....83
6.1 Nécessité de poursuivre par une étude approfondie....83
6.2 Quelques pistes de recherche....84

7. Valorisation des résultats....85
7.1 Diffusion des résultats....85
7.2 Proposition d'une étude approfondie....85
7.3 Présentation des résultats à des organismes de transport....85

8. DISCUSSION....87
8.1 Importance du phénomène de l'éclatement et de l'explosion des pneus pour la sécurité....87
8.2 Processus physiques et chimiques impliqués dans l'éclatement ou l'explosion des pneus....87
8.3 Phénomènes de dégradation dus au vieillissement et à la fatigue du pneu....88
8.4 Mesures de prévention....89
8.4.1 Maintien de la pression normale recommandée....89
8.4.2 Les procédures sécuritaires....89
8.4.3 Les technologies de surveillance....90
8.4.4 Axes de développement possibles....91

9. CONCLUSION....93

10. RÉFÉRENCES....95

Annexe A Phénomènes de vieillissement des neus…… ……..…107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1.1-1 Synthèse des rapports d'enquête de la CSST de 1990 à 2004 12
Tableau 5.1.2-1 Ensemble des lésions dont l'agent causal est « PNEUS » pour la période 1995-2004 15
Tableau 5.1.2-2 Lésions dont le genre d'accident est «frappé par ou explosion» et dont l'agent causal est «pneus» 16
Tableau 5.1.2-3 Ensemble de toutes les lésions dont le genre d'accidents est «frappé par ou explosions», peu importe l'agent causal.....16
Tableau 5.1.2-4 Comparaison des lésions attribuables aux éclatements ou explosions de pneus .17
Tableau 5.1.2-5 Répartition des éclatements et explosions de pneus selon les groupes professionnels (CCDP-2) 18
Tableau 5.1.2-6 Répartition des cas pour les 5 grands groupes professionnels les plus touchés ..18
Tableau 5.1.2-7 Les secteurs d'activité économique les plus touchés 19
Tableau 5.3.2-1 Variation de la pression due à l'effet de l'expansion thermique seule 38

LISTE DES FIGURES

Figure 5.1.1-1 Nombre cumulatif de décès causés par l'éclatement ou l'explosion d'un pneu entre 1990 et 2004 11
Figure 5.1.1-2 Photos des pneus détruits par un arc électrique sur un fardier 14
Figure 5.2.1-1 Schéma type d'un pneu de camion à structure radiale sans chambre à air [18] 22
Figure 5.2.2-1 Photos caractéristiques de pneus ayant subi une rupture éclair 26
Figure 5.2.2-2 Cumul et séquence des événements pouvant mener à une destruction brutale du pneu 29
Figure 5.3.1-1 Photo de l'empreinte laissée par le pneu dans un plafond en acier haut de 6 mètres [36] 35
Figure 5.3.1-2 Photo de la jante et du pneu qui a frappé le travailleur [36] 35
Figure 5.3.3-1 Schématisation des étapes de réaction de la pyrolyse 42
Figure 5.3.3-2 Schématisation des étapes de la réaction de thermo-oxydation [61] 44
Figure 5.3.4-1 Banc d'essai expérimental d'une soudure sur jante avec pneu monté sur la roue 53
Figure 5.3.4-2 Variation de la température en fonction de la pression interne d'un pneu lors d'une expérience contrôlée d'explosion par chauffage au chalumeau de la jante 54
Figure 5.3.4-3 Variation de la température et de la pression internes d'un pneu en fonction du temps lors d'une expérience contrôlée d'explosion par chauffage au chalumeau de la jante 54
Figure 5.3.4-4 Photos de l'accident d'avril 2004 tirées du rapport d'enquête CSST DP14037975 [129] 56
Figure 5.3.4-5 Séquence possible des événements lors de la surchauffe d'un pneu sur un camion (d'après [8]) 57
Figure 5.3.6-1 Capteur pression et température de type MEMS de Motorola [144] 62
Figure 5.3.6-2 Système Tire IQ de Siemens [142] 63
Figure 5.3.6-3 Dispositif VisiTyre de ETV Corporation [149] 64
Figure 5.3.6-4 Diagramme schématisé du dispositif VisiTyre [149] 64
Figure 5.3.6-5 Système eTire de Michelin [139] 65
Figure 5.3.6-6 Dispositif SmarTire [146] 66
Figure 5.3.6-7 Sytèmes de contrôle et de gonflage embarqués [152] 66
Figure 5.3.6-8 Ajustement des pressions selon les conditions réelles d'opération [152] 67
Figure 5.3.6-9 Générateur d'azote de l'entreprise Nitronics Systems [155] 68
Figure 5.3.6-10 Capteur de pureté du gonflage à l'azote d'un pneu [156] 68
Figure 5.3.6-11 Produit De-Fuzer Valve de Rimex [157] 69
Figure 5.3.6-12 Éléments observables sur un pneu à risque de rupture éclair [166] 75
Figure 5.3.6-13 Exemple d'utilisation d'un gabarit de mesurage d'une jante de pneu de camion [43] 76
Figure 5.5.4-1 Schéma de l'acquisition de données dans la technique acousto-ultrasonique [177] 83

LEXIQUE

Combustion* :	Phénomène constitué par des réactions chimiques en chaîne entre le carburant et l'oxygène, réaction qui, dans le cas des hydrocarbures, dégage globalement beaucoup de chaleur.
Déflagration* :	Onde de combustion se propageant à une vitesse subsonique.
Déjantement :	Séparation soudaine du pneu de son assemblage sur sa jante.
Éclatement* :	Détérioration mécanique d'un matériau généralement par rupture violente.
Explosion* :	Expansion brusque d'un gaz sous pression qui peut résulter d'une réaction généralement rapide d'oxydation ou de décomposition.
Fatigue* :	Processus de changement de structure permanent, localisé et progressif, apparaissant dans une matière soumise à des contraintes et à des déformations variables, qui peut aller jusqu'aux craquelures ou à une rupture complète.
Oxydation* :	Addition d'oxygène ou d'un autre élément fortement électronégatif à un autre élément ou à un composé.
Pyrolyse* :	Décomposition chimique irréversible d'un matériau sous la seule action de la chaleur, c'est-à-dire produite par une élévation de température sans réaction avec l'oxygène.
Stœchiométrie* :	Proportions dans lesquelles les quantités de matière réagissent ensemble dans une réaction chimique donnée.
Thermo-oxydation* :	Oxydation provoquée par l'élévation de la température.
Vieillissement* :	Ensemble des modifications chimiques ou physiques irréversibles affectant un matériau au cours du temps.
Vieillissement chimique** :	Phénomène de vieillissement impliquant une modification de la structure chimique du matériau.

* Grand dictionnaire terminologique de la langue française : http://www.granddictionnaire.com

** Verdu, J. (2002). Vieillissement chimique des plastiques: aspects généraux. In P. t. d. l'Ingénieur (Ed.), Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites (Vol. AM 3151)

1. INTRODUCTION

Au Québec, d'après les rapports d'accidents de la CSST, tous les trois ans, deux décès impliquant des véhicules lourds sont directement attribuables à l'éclatement ou à l'explosion d'un pneu. La majorité de ces accidents survient dans des situations où les intervenants procèdent à des réparations temporaires en bordure de la route ou dans des situations normales d'entretien, de remplacement ou de réparation de roues. Il s'agit d'un danger difficile à détecter. Un apport de chaleur plus ou moins intense au pneu, un arc électrique ou la foudre amorcent différentes réactions chimiques dont les effets ne sont pas précisément décelables avant que le pneu n'éclate ou n'explose.

L'Association sectorielle transport et entreposage (ASTE), appuyée par la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST), le ministère du Transport du Québec et la Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ), a demandé à l'IRSST d'effectuer une recherche exploratoire afin de mieux comprendre et prévenir les risques d'éclatement et d'explosion des pneus de camions. De plus, l'étude vise aussi à préciser l'importance des différents facteurs contributifs dans la genèse du processus.

Cette étude explore également les paramètres qui permettraient de contrôler ces phénomènes, les systèmes, actuels ou en développement, de surveillance et de détection permettant de connaître la condition réelle du pneu à risque.

Ce rapport présente les résultats de cette activité exploratoire de recherche qui vise à mettre à jour les connaissances sur les phénomènes d'éclatement et d'explosion des pneus, leurs causes, leurs conséquences, les risques et les moyens de les prévenir.

2. CONTEXTE DE L'ACTIVITÉ DE RECHERCHE

2.1 Origine et contexte

Cette activité de recherche s'inscrit dans le cadre d'une demande formelle de l'Association sectorielle transport entreposage (ASTE) pour réduire les risques dus à l'éclatement des pneus de camions lourds.

L'Association sectorielle transport et entreposage[a] avec l'appui du ministère du Transport du Québec, de la Société de l'assurance automobile du Québec[b], de la CSST[c] et des représentants du « Comité de Liaison du Transport », dont fait partie l'Association du camionnage du Québec, a demandé à l'IRSST :

- d'expliquer les causes et d'évaluer l'importance du risque relié à l'éclatement d'un pneu;
- d'expliquer le processus et de décrire les causes pouvant entraîner l'éclatement d'un pneu (neuf ou usagé);
- de recommander des mesures de prévention en fonction des causes identifiées afin de prévenir les risques d'accident pouvant être occasionnés par l'éclatement d'un pneu;
- de fournir des indicateurs (signes avant-coureurs) d'un pneu qui surchauffe (risque d'éclatement);
- de contacter les fabricants des systèmes de contrôle de pression des pneus ainsi que les entreprises de transport (utilisatrices), afin d'évaluer l'efficacité de ces systèmes comme moyen de prévention éventuel;
- de documenter pour évaluer l'efficacité des pistes de solution suivantes[d] :
    - Valve de sécurité;
    - Système de régulation de la pression;
    - Gonflement des pneus à l'azote.

2.2 Problématique

À la suite d'accidents mortels causés par l'éclatement ou l'explosion de pneus, les efforts fournis pour trouver des moyens de prévention relatifs à ce risque par les groupes concernés n'ont pas donné de résultats satisfaisants. Malgré les rapports d'expertise produits à la suite de ces accidents, les phénomènes impliqués demeurent obscurs à cause, notamment, de leur complexité et du peu d'études scientifiques qui adressent spécifiquement ce problème. Conséquemment, les éventuelles solutions préconisées pour prévenir ce risque sont également peu étudiées. Par

---

a Malo, Dominique, directeur de l'Association sectorielle transport entreposage (ASTE), lettre adressée à la direction des opérations de l'IRSST, 28 avril 2004.

b St-Cyr, Johanne, vice-présidente de la Société de l'assurance automobile du Québec, lettre adressée à la direction des opérations de l'IRSST, 28 juin 2004.

c Larue, Marie, alors directrice de la prévention-inspection de la CSST, lettre adressée à la direction des opérations de l'IRSST, 17 juin 2004.

d Malo, Dominique, directeur de l'Association sectorielle transport entreposage (ASTE), demande reformulée, courrier électronique, 29 octobre 2004.

ailleurs, l'ampleur de cette problématique n'est pas bien définie. Il s'avère donc nécessaire de préciser la problématique dans le cadre de cette étude. En réponse à la demande du secteur, la problématique a été étudiée et est présentée plus en détail avec les résultats à la section 5.1 Importance du phénomène d'éclatement et d'explosion des pneus pour la sécurité.

On peut cependant déjà souligner quelques faits saillants. En consultant les rapports d'accidents de la CSST [**1**], nous constatons en effet que plusieurs accidents graves, impliquant l'éclatement de pneus, sont survenus depuis 1990. D'après les rapports d'accidents recensés entre 1990 et 2002, mettant en cause directement l'éclatement d'un pneu, nous dénombrons huit décès et deux blessés graves. La majorité de ces accidents impliquent des camions lourds dans des situations d'entretien, de remplacement ou de réparation de roues.

Le 2 avril 2004, un autre accident impliquant l'explosion d'un pneu est survenu dans le parc des Laurentides, et a fait un mort. D'après les informations actuellement disponibles, on dénombre environ deux décès tous les trois ans, attribuables à l'éclatement d'un pneu.

Un rapport d'étude [**2**] sur l'incidence de l'état mécanique des poids lourds sur la sécurité routière (subventionné par la Société de l'assurance automobile du Québec) souligne qu'en termes de dangerosité relative aux défaillances possibles**,** les pneus se situent au deuxième rang derrière le système de freinage. Parmi les phénomènes répertoriés lors de cette étude, on note les éclatements de pneus en service causés par l'usure excessive, par le décollement de la bande de roulement d'un pneu rechapé, par la trop faible pression de gonflage d'un des pneus d'un assemblage double ou encore par un mauvais assemblage du pneu sur la jante de la roue.

Bien que l'éclatement d'un pneu semble un évènement relativement rare, il entraîne la plupart du temps des blessures mortelles. En fait, c'est l'imprévisibilité du phénomène, l'absence de signes avant-coureurs (la « détectabilité »), la rapidité (la difficulté d'évitement) et la violence du phénomène qui le rendent si dangereux dans des situations très variées d'entretien, de remplacement ou d'utilisation normale (d'après l'examen de rapports d'enquête d'accidents mortels mettant en cause l'éclatement de pneus [1]). Les causes de l'éclatement d'un pneu sous pression peuvent être de sources multiples, externes ou internes, indépendantes ou combinées. Il n'existe pratiquement pas à ce jour et à notre connaissance, d'études scientifiques publiées sur ce problème qui touche plus particulièrement l'industrie du transport routier. Des éclatements de pneus sur de gros camions miniers[e,f] [**3**,**4**], de même que sur de gros porteurs aériens, où les conséquences peuvent être dramatiques à l'atterrissage, sont également rapportés, mais les études ou les données scientifiques les concernant ne sont généralement pas accessibles ou du domaine public.

Ce type de problème affecte plusieurs groupes de personnels. En effet, les personnels de réparation et d'entretien, de même que les camionneurs sont particulièrement concernés. À

---

e Association sectorielle – Secteur mines et services miniers, Communications personnelles avec M. Jean Drolet, directeur de l'association.

f Comité technique permanent sur l'équipement minier souterrain, Ontario Naturel Resources Safety Association (Association ontarienne de sécurité au travail – ressources naturelles), communications personnelles avec M. John Milne et M. Jean Belec.

l'occasion d'incendie de pneus sous pression, les pompiers et les intervenants sur les lieux sont également à risque de blessures.

En plus des problèmes inhérents à la gestion du risque sous plusieurs aspects, il s'agit donc d'une problématique complexe mettant en jeu des phénomènes physiques, mécaniques et chimiques, exigeant une approche interdisciplinaire.

3. OBJECTIFS DES TRAVAUX

Cette activité de recherche est d'abord une activité exploratoire préliminaire, dont le but est de dégager une vue globale du problème d'éclatement soudain et d'explosion des pneus. Cette étude vise également à identifier des pistes de solutions et les besoins de recherche et de développement pour la prévention de ce phénomène. L'éclatement et l'explosion des pneus sont des phénomènes très brefs et très complexes impliquant plusieurs facteurs. Il est donc nécessaire de comprendre ces phénomènes et les facteurs internes et externes qui interviennent dans les processus d'éclatement et d'explosion.

L'activité vise donc à récolter les informations pertinentes potentiellement utiles pour l'ensemble de cette problématique et à dresser un état des connaissances. Cette activité de recherche vise aussi à déterminer le niveau et l'importance du risque auquel sont exposés les travailleurs lors des différentes tâches qui les amènent dans une zone où un danger d'éclatement ou d'explosion peut exister. Cette problématique et ce type de danger existent dans différents secteurs (transport et mines par exemple).

Étant donnée la complexité de la problématique, cette activité vise donc dans un premier temps à déterminer l'ampleur du problème, les phénomènes en jeu, les causes possibles, les axes de recherche et les pistes de solutions.

Les objectifs principaux de cette étude préliminaire consistent donc à :

1. déterminer l'importance des phénomènes d'éclatement et d'explosion des pneus et leur influence sur la sécurité des personnes;

2. comprendre les phénomènes impliqués dans l'éclatement et l'explosion des pneus;

3. déterminer les principales causes à la source du phénomène;

4. étudier la possibilité d'appliquer des méthodes d'aide à la détection précoce du risque d'éclatement et d'explosion;

5. identifier des pistes de solutions;

6. proposer des avenues de recherche afin de déterminer des moyens de prévention pour réduire les risques d'accidents causés par l'éclatement et l'explosion des pneus.

4. MÉTHODOLOGIE

4.1 Revue de littérature

Cette activité de recherche s'appuie sur une revue de la littérature scientifique. Les principaux thèmes explorés dans cette revue de la littérature concernent entre autres :

- Le type d'accidents et leurs caractéristiques.
- Les causes de l'éclatement ou de l'explosion de pneus :
  - les causes internes,
  - les causes externes.
- Les phénomènes et réactions chimiques associés :
  - à la pyrolyse du caoutchouc,
  - à la thermo-oxydation du caoutchouc,
  - au vieillissement des pneus,
  - à la dégradation des propriétés mécaniques des pneus.
- Comportement mécanique de l'assemblage roue-pneu :
  - les différents types de ruptures,
  - les méthodes de simulation du comportement mécanique,
  - les approches expérimentales.

4.2 Collecte d'information sur les accidents, besoins, attentes et autres données techniques

Pour ces aspects de l'étude, la méthodologie s'appuie sur des recherches dans les bases spécialisées de données d'accidents, des rencontres avec des compagnies de transport et avec des fabricants de pneus ou d'équipements, ainsi qu'avec des représentants de groupes concernés du milieu.

4.2.1 Analyse des rapports d'enquêtes des accidents graves et mortels

Nous avons consulté la base de données d'accidents de la CSST afin d'obtenir tous les rapports d'enquêtes ou d'expertises disponibles et toutes les informations pertinentes sur des accidents reliés aux éclatements et explosions de pneus. Ces documents ont permis de faire l'analyse des données disponibles sur ce type d'accidents et d'en tirer des informations précieuses sur les contextes, les circonstances et les causes probables de l'éclatement ou de l'explosion des pneus.

4.2.2 Études des causes

Les causes de nature technique peuvent se regrouper en deux grandes catégories :

- Les causes internes, telles que la pyrolyse du caoutchouc, le vieillissement et la dégradation des pneus;

- Les causes externes, telles que la foudre. Il convient cependant de préciser que toutes les causes externes ne sont pas incontrôlables. Par exemple, la surchauffe du système de freinage pourrait être, dans certains cas, associée à un entretien inadéquat.

Plus spécifiquement, ces causes provoquent la surpression ou sont le résultat d'une sous-pression. Ainsi, en se basant sur les résultats de la recherche bibliographique et sur les données recueillies, l'étude évaluera les possibilités de simulations/modélisations et d'expérimentations du comportement mécanique des pneus sous différentes conditions, soit la surpression et la sous-pression.

4.2.3 Étude de différents moyens de prévention des risques

La prévention est considérée sous différents angles. Afin de prévenir les risques d'éclatements et d'explosions de pneus, l'étude vise dans un premier temps à déterminer et à décrire le processus, depuis la cause jusqu'aux effets après l'éclatement ou l'explosion. Ce processus évolue plus ou moins rapidement dans le temps. Afin de prévenir le risque d'éclatement ou d'explosion soudain d'un pneu et les conséquences qui en résultent, la méthode proposée consiste à examiner les moyens de détecter, d'éviter et d'atténuer les dangers, tout en portant une attention particulière aux facteurs déclencheurs.

Sur le plan technique, ces moyens s'appuient sur la détection des variables significatives de l'évolution du processus. Nous examinons donc quels signaux avant-coureurs pourraient être utilisés comme méthode de détection précoce de l'éclatement et de l'explosion d'un pneu.

Ainsi, en plus de la revue de la littérature scientifique et de la revue de la littérature technique, nous avons effectué des recherches sur les sites Internet des fabricants de pneus et d'équipements de mesures nous permettant d'identifier différentes méthodes de détection précoce de la dégradation des pneus par fissure, fatigue, pyrolyse ou autres. Ces méthodes et ces techniques ont été examinées dans le but de déterminer des dispositifs efficaces permettant d'alerter les personnes à risque de l'imminence d'un éclatement soudain ou d'une explosion du pneu. Par exemple, nous considérons les capteurs thermiques pouvant identifier le phénomène de pyrolyse ou bien déceler l'occurrence d'une augmentation importante de la température du pneu. Nous considérons également certains systèmes de régulation de pression ou de contrôle de surpression potentiellement aptes à prévenir les éclatements et explosions de pneus.

Une fois le risque connu, identifié et détecté, la prévention, sous cet angle, vise à déterminer les actions qui s'imposent avant que le phénomène d'éclatement ou d'explosion ne soit pratiquement inévitable. Ou, le cas échéant, à déterminer les moyens de protection appropriés pour intervenir et diminuer ou éliminer les risques de blessures.

Dans le cadre méthodologique de l'étude, des discussions avec quelques compagnies de transport ou des services de prévention des incendies ont eu lieu afin de vérifier les procédures de surveillance, d'inspection, d'entretien ou d'intervention basées sur les connaissances actuelles.

Dans ce contexte, la méthodologie consiste à étudier les procédures actuelles en tenant compte des résultats de l'étude et à les modifier ou à proposer l'élaboration de nouvelles procédures de

surveillance et d'intervention plus sûres à suivre lorsque des risques d'inflammation, d'éclatement ou d'explosion des pneus existent.

Pour que ces moyens, procédures et actions soient applicables de manière efficace et réaliste, ils doivent être déterminés en cohérence avec les résultats scientifiques, les contraintes, les besoins, les attentes et les capacités effectives du milieu pour les appliquer. Dans le cours de la présente étude, les chercheurs de l'équipe ont effectué des rencontres avec un comité de suivi formé entre autres du directeur et des conseillers de l'Association sectorielle transport et entreposage, de représentants de compagnies de transport (gestionnaires, conducteurs et personnel de maintenance), de la Commission de la santé et de la sécurité du travail, du ministère des Transports du Québec et de la Société de l'assurance automobile du Québec.

4.2.4 Analyse et synthèse

Les résultats ont été analysés sous trois angles d'attaque différents, soit l'aspect importance des lésions professionnelles, l'aspect matériaux et réactions chimiques et l'aspect mécanique. Comme il s'agit d'une problématique où chacun de ces aspects est intimement lié aux autres, l'analyse intègre l'ensemble des résultats, et les plus significatifs et pertinents font l'objet de la discussion.

Soulignons que l'analyse tient compte des limites du cadre de cette étude. En effet, il s'agit d'une étude exploratoire basée sur la documentation disponible et accessible dans la littérature scientifique du domaine public. N'ayant pas accès aux données brutes ni aux protocoles de mesure, une certaine prudence s'impose dans l'interprétation de ces résultats.

Finalement, le rapport propose les conclusions que l'on peut tirer de cette étude exploratoire et présente les perspectives pour les recherches futures de même que les recommandations qui en découlent.

5. RÉSULTATS

La section des résultats est organisée de la façon suivante. Dans un premier temps, la problématique relative à la sécurité est abordée dans la sous-section qui traite de l'importance des phénomènes d'éclatements et d'explosions pour la sécurité. Les différentes bases de données sur les dossiers d'accidents et de lésions professionnelles ont servi de sources d'information. Les données sont présentées sous forme de tableaux et sont analysées afin de déterminer les types de lésions, les genres d'accidents, l'importance relative pour les secteurs d'activité concernés, les groupes professionnels touchés et les causes techniques.

Dans un second temps, on présente une description générale des phénomènes afin d'introduire les résultats plus approfondis. Celle-ci comprend une description des composantes des pneus, les phénomènes d'éclatements ou d'explosions classés selon leurs origines mécaniques, chimiques ou combinées, et une synthèse du processus général qui conduit à l'occurrence d'un éclatement ou d'une explosion.

Une troisième partie porte sur la mise à jour de l'ensemble des connaissances scientifiques et techniques sur :

a) Les modes et mécanismes les plus probables d'éclatement et d'explosion des pneus,
b) Les phénomènes de dégradation physique et chimique,
c) L'importance relative des phénomènes, les risques et les conséquences,
d) Les modèles disponibles sur le comportement du pneu dans différentes situations, et
e) Les moyens de préventions.

La quatrième partie traite des résultats des démarches effectuées auprès du milieu. Finalement, dans la perspective d'une recherche plus approfondie, la dernière partie présente des méthodes scientifiques, techniques et expérimentales utilisables pour caractériser et prévenir les différents phénomènes impliqués dans l'éclatement ou l'explosion des pneus.

5.1 Importance du phénomène d'éclatement et d'explosion des pneus pour la sécurité

Pour ce qui est de l'analyse de l'importance du phénomène de l'éclatement et de l'explosion de pneus au Québec, deux sources principales de données ont été consultées. La première est la base de données des rapports d'enquêtes d'accidents graves ou mortels accessible sur le site WEB de la CSST [**5**] et la seconde est la base de données « Dépôt de données centrales et régionales de la CSST », qui contient l'ensemble des données sur les lésions indemnisées par la CSST.

5.1.1 Analyse des rapports d'enquêtes d'accidents graves et mortels disponibles sur le site Web de la CSST

Onze rapports d'enquêtes d'accidents, relatifs uniquement à un éclatement ou à une explosion de pneu, ont été répertoriés dans la base de données des accidents graves ou mortels de la CSST. Ces rapports couvrent la période s'étalant de juillet 1990 à avril 2004, soit 13,75 ans. Le Tableau

5.1.1-1 présente une synthèse de l'analyse de ces rapports (voir page 12). Cette analyse est principalement basée sur les informations fournies dans le rapport et sur les conclusions de l'auteur du rapport.

5.1.1.1 Analyse des conséquences des cas recensés dans les rapports d'enquête

La Figure 5.1.1-1 montre, d'après les rapports recensés dans la base de données sur les accidents graves ou mortels, le nombre cumulatif de décès survenus au Québec à la suite de l'éclatement ou de l'explosion d'un pneu. On peut considérer qu'il y a eu, en moyenne, deux décès aux trois ans.

Parmi les onze dossiers disponibles, on dénombre neuf décès et trois blessés graves ainsi qu'un dossier où il n'y a eu que des dégâts matériels importants. La plus grande proportion des accidents (5/11) est survenue en bordure d'une route lorsque le camion est à l'arrêt à cause d'un problème au niveau du système de freinage dans quatre des cinq cas. Quatre des cinq cas survenus sur la route ont causé la mort du travailleur et deux blessés graves. Le cinquième cas se limite à des blessures graves aux yeux. On dénombre quatre cas (4/11) survenus au garage ou à l'atelier d'entretien. Dans chacun de ces cas, le travailleur est décédé. On compte aussi un décès survenu dans une gare de triage. Finalement, un cas d'explosion de pneu, provoquée par un incendie causé par une défectuosité du système de freinage, est survenu dans une mine à ciel ouvert. On n'y déplorait cependant que des dommages matériels importants.

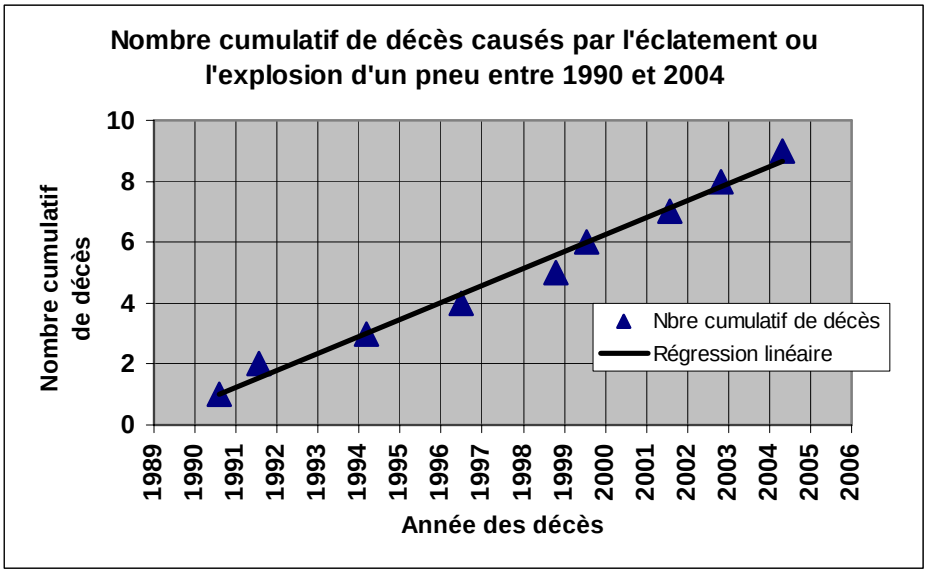


Figure 5.1.1-1 Nombre cumulatif de décès causés par l'éclatement ou l'explosion d'un pneu entre 1990 et 2004

Réf.	Date	Consé-quences	Description sommaire, type d'accidents	Cause probable pertinente	Type véhicule impliqué	Type de pneu	Type de lieu route, garage,autre	Notes
2528	7-7-90	1 décès	Explosion à l'intérieur d'un pneu qui, en se déjantant frappe, le réparateur	Soudure d'une jante détériorée avec pneu gonflé	Roue de camion indéterminé	indéterminé	G	Utilisation de produit inflammable pour faciliter l'installation du pneu. Une jante détériorée est surchauffée lors de la soudure de la jante. Les gaz produits par la combustion de la graisse enduite sur la jante ont explosé sous l'effet de la chaleur du soudage.
2534	3-7-91	1 décès	Éjection subite des roues d'un chariot élévateur lors d'un remplacement de pneus	Explosion de la jante due à une fissure	Chariot élévateur Taylor Model TYTC 1100L Capacité 55 T	indéterminé	A	Présence d'une fissure d'origine inconnue dans la jante. Le travailleur n'a pas vu cette fissure lors du démontage de l'anneau de rétention.
2779	31-7-95	Blessures graves aux yeux	Éclatement d'un pneu sur l'essieu arrière du côté intérieur d'une remorque de sciure de bois	Surchauffe du pneu à cause d'une fuite d'air du système de freinage. Apparition d'une petite flamme visible sur l'intérieur du tambour de frein.	Remorque tritandem	non mentionné	R	Un cas typique de surchauffe entraînant une explosion à la suite d'une dégradation importante du caoutchouc par réaction chimique (pyrolyse ou thermo-oxydation) suivie d'une rupture brutale du pneu possiblement combinée à une déformation de la jante.
2796	10-2-94	1 décès	Éclatement du flanc d'un pneu arrière de remorque	vraisemblablement dû à une surchauffe du système de frein	Mack avec remorque pour le bois	Michelin X 11R 24.5 XYZ	R	Pneu surchauffé par le système de freinage. Dégradation du pneu et rupture brutale du flanc. Pneu déchiré sur la surface interne et pas de trace d'autre dégradation
2990	4-6-96	1 décès	Travailleur frappé par la projection d'un pneu lors d'une réparation de la jante (soudure)	Déformation de la jante et projection du pneu à la suite d'une explosion causée par l'effet de la soudure avec un pneu gonflé	Camion lourd indéterminé	indéterminé	G	Lors de la soudure, il y a eu échauffement important du pneu. Vraisemblablement déformation de la jante à cause de l'explosion et du déjantemant du pneu suivie de la projection du pneu jusqu'au plafond (6 m) laissant une empreinte très marquée.
3039	10-10-96	Dommages matériels* 8 blessés graves**	Incendie localisé aux pneus arrières d'un camion minier qui fait exploser le pneu intérieur gauche après un certain temps	Incendie provoqué par une fuite d'huile et la chaleur d'un frein défectueux	Camion transport minerai Titan Modèle 2200 à benne	Bridgestone V Steel R Lug 3700 R57 et Goodyear Unisteel E4 type 4H	M	Le pneu s'est enflammé à cause d'un carburant qui se serait répandu. La mise à feu est causée par la chaleur dégagée par un frein bloqué. Sous l'effet des flammes externes, fusion et carbonisation du caoutchouc jusqu'à T> T vulcanisation *Selon Rap.CSST **Selon rapport QCM
3113	21-9-98	1 décès	Conducteur frappé par l'explosion d'un pneu du côté passager à l'arrière du camion	Les faisceaux électriques surchauffent des câbles sur le châssis et les flammes se propagent au pneu.	Tracteur routier 10 roues Mack modèle 800 pour le transport du bois	Michelin XMP 170E	R	Dégradation du pneu à la suite d'un incendie provoqué par une cause externe (faisceaux électriques sur un longeron). Le lien avec pyrolyse n'est pas évident. Caoutchouc fondu et brûlé, carcasse déchirée, explosion du pneu suite à l'incendie (cause externe).
3182	24-6-99	1 décès	Rupture éclair lors du gonflage d'un pneu radial déjà dégradé après une réparation antérieure	Rupture éclair du flanc du pneu	Camion à benne	Dunlop de bas de gamme	G	Rupture éclair en lien avec un pneu ayant roulé en sous-pression ou en surcharge.
3305	3-7-01	1 décès	Travailleur frappé à la tête, projection de la jante, lors du gonflage d'un pneu de remplacement à la suite de l'explosion du pneu initial	Jante de roue en alliage d'aluminium déformée par la chaleur intense	Tracteur routier Navistar International 1994	Michelin XZA2 et Yokohama TY517	G	La surchauffe des freins a provoqué l'explosion de 2 pneus et endommagé la jante. Lors du remplacement d'un des 2 pneus, il y a eu projection de la jante au moment du gonflage. Perte des propriétés mécaniques de l'aluminium si T° > 315 °C et suite au roulement sur pneu
3364	27-9-02	1 décès + 2 blessés	Un pneu du 1er essieu de traction coté intérieur sur un tracteur 10 roues, explose au visage du camionneur lorsqu'il tente de réparer un récepteur de freinage. Transport de bois.	Échaufement du pneu via la surchauffe du tambour de frein	Tracteur Kenworth, ARTIS 1998	Michelin Radial Tubeless	R	Il y aurait eu début de pyrolyse selon le rapport des experts. Rapport d'expertise détaillé.
3487	2-4-04	1 décès	La tête du camionneur est projetée sur le différentiel du tracteur par le souffle de l'explosion du pneu	Échauffement du pneu via la surchauffe du tambour de frein. Frein de stationnement bloqué, fuite d'air du récepteur de freinage	International Modèle 9400, 2000, 10 roues	Michelin Radial XZA-1, LRG Tubeless 11 R22.5	R	Accident similaire à Réf. 3364. Réaction chimique possible: pyrolyse ou thermo-oxydation à l'intérieur de la roue intérieure arrière gauche

Type de lieu: route (R), garage (G), mine (M), autre (A)

Tableau 5.1.1-1 Synthèse des rapports d'enquête de la CSST de 1990 à 2004

5.1.1.2 Analyse des causes des cas recensés dans les rapports d'enquêtes

Dix des onze cas mettaient en cause des sources de chaleur, dont neuf cas concernaient un apport de chaleur au système pneu-jante. L'autre est imputable à un pneu vraisemblablement endommagé parce qu'il avait roulé en sous-pression. Le dernier cas serait dû à une jante fissurée. Les sources de chaleur se répartissent de la façon suivante :

1) Sources de chaleur s'exerçant directement sur la jante :
    - Soudure sur la jante (2/10)
    - Surchauffe de la roue à la suite d'une défaillance du système de freinage (5/10)
2) Flammes d'une source externe chauffant le pneu (2/10)
3) Chaleur générée à l'intérieur du caoutchouc :
    - Réaction à une sollicitation mécanique importante, comme rouler en sous-pression (1/10)
    - Résistance au passage d'un courant électrique de forte intensité et de haut voltage produit par la foudre ou un arc électrique à proximité d'une ligne haute tension (aucun cas à notre connaissance pour la période 1990-2004, cependant deux cas récents, non répertoriés dans cette base de données, sont présentés ci-après).

5.1.1.3 Analyse de deux cas récents non répertoriés dans les bases de données

Deux événements se sont produits en 2005. Cependant, comme ces deux événements sont relativement récents et qu'ils n'ont pas fait de victime, ils ne sont pas rapportés dans les bases de données de la CSST. Toutefois, ces incidents méritent une attention spéciale, car ils ont une cause commune, ils se sont produits à peu de jours d'intervalle et surtout ils auraient pu causer des victimes.

À Normandin au Québec, le 10 juin 2005, un camion à benne vient décharger de la terre sous une ligne haute tension. Le sol est constitué de terre noire. La journée est très chaude et très humide. Lorsqu'il lève la benne pour décharger, le conducteur entend le bruit d'une explosion. Il a alors le réflexe de commander immédiatement la descente urgente de la benne et de s'avancer de quelques mètres. Le bruit de cette explosion (suivi d'autres explosions) est également entendu par le propriétaire de la gazonnière située à proximité. Celui-ci met une quinzaine de minutes pour se rendre sur les lieux. Une dernière explosion retentit au moment où il arrive. Il constate que les 10 pneus du camion sont à plat. Certains ont explosé violemment. Le chauffeur et le propriétaire sont convaincus que la benne ne peut pas avoir touché la ligne à haute tension et qu'il y avait un dégagement d'au moins 4 pieds. Les deux personnes sont indemnes, mais tous les pneus sont inutilisables. Un arc électrique se serait vraisemblablement produit à cause des conditions de l'air favorables à la conduction électrique comme c'était le cas le 4 juin précédent (accident expliqué ci-après).

Le 4 juin 2005, près de l'intersection du chemin Campbell et de la route 167 à La Doré dans le parc de Chibougamau, tous les pneus d'un fardier de la compagnie Transport Jacques Tremblay inc. ont été détruits à la suite d'un arc électrique, qui s'est produit lors d'un passage du véhicule à proximité d'une ligne haute tension. Dans ce cas, le camion manœuvrait lentement pour se garer en bordure du chemin lorsqu'il est passé à proximité de la ligne à haute tension. Il s'en est suivi une série d'explosions de pneus. Tous les pneus n'ont pas explosé, mais tous les pneus ont subi des perforations et sont devenus inutilisables (Figure 5.1.1-2). Les personnes présentes auraient pu être blessées gravement. Heureusement, elles ne se trouvaient pas dans la trajectoire des débris des explosions. D'après les témoignages recueillis, les pneus auraient explosé à un intervalle variant de 30 secondes à quelques minutes.

Figure 5.1.1-2 Photos des pneus détruits par un arc électrique sur un fardier

Ce type d'événements n'est pas toujours rapporté. Il semble cependant se produire relativement fréquemment. Il est toutefois difficile d'en mesurer l'importance, étant données les sources d'information dont nous disposons.

5.1.2 Analyse des informations obtenues auprès du « Dépôt de données centrales et régionales de la CSST »

Le dépôt de données centrales et régionales de la CSST rassemble toutes les données codées sur les lésions professionnelles indemnisées par la CSST. Ces données sont codées selon le « Manuel de codage du Service de la statistique » [**6**]. Elles permettent de dresser un portrait statique des lésions indemnisées par la CSST en lien avec l'éclatement et l'explosion des pneus. Il faut cependant tenir compte des limites du codage des données principalement utilisées à des fins d'indemnisation. Nous avons sélectionné les codes les plus pertinents (agent causal, genre d'accidents, …)[g], afin d'estimer l'importance des lésions associées à l'éclatement ou à l'explosion de pneus.

Dans le manuel de codage, l'agent causal est défini de la façon suivante : « l'agent causal de la lésion identifie l'objet, la substance, l'exposition ou le mouvement du corps qui a produit directement la blessure ou la maladie préalablement identifiée. » Dans cette étude, l'agent causal est le pneu.

[g] Avec la collaboration de M. Paul Massicotte de la direction scientifique de l'IRSST

5.1.2.1 Importance relative de l'agent causal « Pneus » dans l'ensemble des lésions

Le Tableau 5.1.2-1 présente le nombre de dossiers, de jours perdus et les déboursés totaux pour chaque dossier indemnisé. On y trouve aussi le nombre moyen de jours perdus et le déboursé moyen pour la période de dix ans s'échelonnant de 1995 à 2004.

Lésions 95-04: agent causal PNEUS					
an	Nb dossiers	Jours	Deb_TOT	Moy jours	Deb moy
1995	283	29 031	2 252 252 $	102.6	7 958 $
1996	286	17 439	1 335 241 $	61.0	4 669 $
1997	525	31 719	2 529 864 $	60.4	4 819 $
1998	561	40 771	3 287 776 $	72.7	5 861 $
1999	490	32 057	2 568 625 $	65.4	5 242 $
2000	454	24 789	2 170 024 $	54.6	4 780 $
2001	482	33 719	2 958 090 $	70.0	6 137 $
2002	493	41 547	4 129 699 $	84.3	8 377 $
2003	432	27 239	2 479 014 $	63.1	5 738 $
2004	416	16 750	1 643 125 $	40.3	3 950 $
Total PNEUS 95-04	**4 422**	**295 061**	**25 353 710 $**	**66.7**	**5 734 $**

Tableau 5.1.2-1 Ensemble des lésions dont l'agent causal est « PNEUS » pour la période 1995-2004

Le Tableau 5.1.2-2 montre, pour la même période que pour le Tableau 5.1.1-1, le nombre résiduel de lésions lorsque l'on ne retient que les dossiers dont le code « genre d'accidents » correspond aussi aux codes identifiés dans la première colonne du Tableau 5.1.2-2. Ce choix consiste à sélectionner les genres d'accidents dont la description est la plus représentative de l'éclatement ou de l'explosion de pneus. Il permet ainsi de circonscrire le plus possible, dans les données ayant pour agent causal le pneu, celles dont les lésions s'apparentent le plus à ce genre d'événement. On retient donc 360 dossiers pertinents à ce genre d'accidents sur les 4 422 dossiers impliquant tous les autres genres d'accidents où l'agent causal est aussi « pneus ».

Lésions 95-04: Genre d'accident FRAPPÉ PAR + EXPLOSIONS, agent causal PNEUS							
Genre accid	Desc genre accid	Nb dossiers	Jours	Deb_TOT	Décès	Moy jours	Deb moy
02000	Frappé par un objet, non précisé	47	1 561	187 594 $		33.2	3 991 $
02200	Frappé par un objet volant, non précisé	14	3 927	360 538 $		280.5	25 753 $
02210	Frappé par un objet volant ou une particule détaché	27	1 585	467 677 $	3	58.7	17 321 $
02220	Frappé par une substance ou un objet éjecté	36	4 092	498 488 $		113.7	13 847 $
02290	Frappé par un objet volant, n.c.a.	12	626	65 481 $		52.2	5 457 $
02900	Frappé par un objet, n.c.a.	172	9 560	806 660 $		55.6	4 690 $
50000	Feu ou explosion, non précisé	3	132	10 272 $		44.0	3 424 $
51000	Feu, non précisé	0	0	0 $		0.0	0 $
51900	Feu, n.c.a.	0	0	0 $		0.0	0 $
52000	Explosion, non précisée	1	13	544 $		13.0	544 $
52200	Explosion d'un contenant ou de canalisations sous pression	22	1 842	347 067 $	2	83.7	15 776 $
52900	Explosion, n.c.a.	26	5 829	679 373 $		224.2	26 130 $
	Total 95-04: FRAPPÉ PAR + EXPLOSIONS PNEUS	**360**	**29 167**	**3 423 694 $**	**5**	**81.0**	**9 510 $**

Tableau 5.1.2-2 Lésions dont le genre d'accident est «frappé par ou explosion» et dont l'agent causal est «pneus»

5.1.2.2 Importance du genre d'accidents « FRAPPÉ PAR OU EXPLOSIONS »

Le genre d'accidents « frappé par ou explosions » ne permettrait pas à lui seul d'estimer tous les cas d'éclatements et d'explosions de pneus. C'est pourquoi nous avons choisi parmi tous les codes « frappé par et explosions » ceux décrits dans le Tableau 5.1.2-2. Afin de relativiser ce genre d'accident par rapport à toutes les lésions recensées, le tableau ci-dessous montre le nombre de lésions ayant les mêmes genres sélectionnés précédemment, mais pour tout type d'agents causaux.

Lésions 95-04: FRAPPÉ PAR + EXPLOSIONS					
an	Nb dossiers	Jours	Deb_TOT	Moy jours	Deb moy
1995	11 274	332 009	29 147 131 $	29.4	2 585 $
1996	9 322	273 533	23 747 691 $	29.3	2 547 $
1997	4 271	119 142	10 752 383 $	27.9	2 518 $
1998	5 673	162 610	16 310 385 $	28.7	2 875 $
1999	5 184	139 135	13 421 556 $	26.8	2 589 $
2000	5 644	163 494	16 295 163 $	29.0	2 887 $
2001	5 109	143 541	13 934 525 $	28.1	2 727 $
2002	5 150	160 844	16 293 560 $	31.2	3 164 $
2003	5 189	156 427	17 338 472 $	30.1	3 341 $
2004	5 524	131 821	13 356 526 $	23.9	2 418 $
Total FRAPPÉ PAR + EXPLOSIONS PNEUS 95-04	**62 340**	**1 782 556**	**170 597 393 $**	**28.6**	**2 737 $**

Tableau 5.1.2-3 Ensemble de toutes les lésions dont le genre d'accidents est «frappé par ou explosions», peu importe l'agent causal

5.1.2.3 Importance relative des éclatements et explosions de pneus

On peut estimer l'importance relative des lésions attribuables à l'éclatement, à l'explosion et à l'incendie des pneus, en comparant le nombre de dossiers et les variables de coût des données obtenues en fonction de différents tris effectués pour les agents causaux et les genres d'accidents sur l'ensemble des lésions.

En comparant les données de la dernière ligne du Tableau 5.1.2-1 et les données de la dernière ligne du Tableau 5.1.2-2, on obtient la première ligne du Tableau 5.1.2-4. Cette comparaison permet de constater que, parmi tous les accidents dont l'agent causal est un pneu, 8.14 % de ceux-ci seraient apparentés à l'éclatement ou à l'explosion du pneu. Toutefois, il est important de remarquer que le pourcentage relatif des déboursés totaux est de 13,5 % par rapport au déboursé total pour l'ensemble des lésions attribuables aux pneus. De même, le déboursé moyen lorsqu'il y a éclatement ou explosion est aussi beaucoup plus élevé en proportion, soit 165,87 % par rapport au déboursé moyen de l'ensemble.

Comparaisons	Nb dossiers	Jours	Deb_TOT	Moy jours	Deb moy
Pour le même agent causal «**PNEUS**» rapport en % des «**FRAPPÉ PAR** ou **EXPLOSIONS**» vs tous « **GENRES ACCIDENTS** »	**8.14%**	**9.89%**	**13.50%**	**121.42%**	**165.87%**
Même genre d'accident « **FRAPPÉ PAR** ou **EXPLOSIONS** » rapport en % de l'agent causal « **PNEUS** » vs tous les autres agents causaux	**0.58%**	**1.64%**	**2.01%**	**283.35%**	**347.53%**

Tableau 5.1.2-4 Comparaison des lésions attribuables aux éclatements ou explosions de pneus

Nous comparons aussi l'ensemble des lésions ayant pour agent causal les pneus et les genres particuliers d'accidents qui y sont normalement associés avec l'ensemble des lésions ayant tous les types d'agents causaux, mais également les mêmes genres d'accidents. On effectue cette comparaison en faisant le rapport entre les données des dernières lignes du Tableau 5.1.2-2 et celles du Tableau 5.1.2-3. Ce rapport est exprimé en pourcentage sur la deuxième ligne du Tableau 5.1.2-4. On y observe donc que l'éclatement ou l'explosion de pneus ne représente que 0,58% de tous les éclatements ou explosions. Cependant le rapport du déboursé moyen lorsqu'il s'agit d'éclatement ou d'explosion de pneus est de 347,5%.

De ces comparaisons, on peut observer que l'éclatement ou l'explosion de pneus entraînent proportionnellement des coûts nettement supérieurs à leur représentativité en nombre dans l'ensemble des lésions. Ce qui permet aussi d'en déduire que ce type d'événements occasionne des lésions beaucoup plus graves lorsqu'il y a des pneus impliqués. Les statistiques de la CSST révèlent aussi que le nombre de décès attribuables aux pneus comme agent causal représente près de 1% de tous les décès pour la même période de 1995 à 2004.[h]

5.1.2.4 Importance relative des groupes professionnels touchés

On détermine l'importance relative des groupes professionnels les plus concernés en triant les mêmes données que celles retenues pour le Tableau 5.1.2-2 pour les éclatements et les explosions de pneus, mais en croisant ces données avec la « Classification canadienne descriptive des professions (CCDP) ».

[h] Attention : la période de référence des données de la base d'accidents graves et mortels diffère de la période de référence des données tirées de la base du « dépôt de données centrales et régionales de la CSST »

Agent causal: FRAPPÉ PAR + EXPLOSIONS PNEUS 95-04 x CCDP-2				
G G Prof	Desc G G Professions	Nb dossiers	Jours	Deb_TOT
85	Travailleurs spécialisés dans la fabrication, le montage et la réparation	140	9 772	1 053 212 $
93	Manutentionnaires et travailleurs assimilés, n.c.a.	59	2 378	196 076 $
91	Personnel d'exploitation des transports	38	5 424	866 058 $
99	Travailleurs non classés ailleurs	33	2 141	211 775 $
51	Travailleurs spécialisés dans la vente	30	3 192	335 087 $
	Sous-total pour les cinq groupes les plus touchés (87%)	**300**	**22 907**	**2 662 208**
	Sous-total pour les autres groupes professionnels (13%)	**60**	**6 260**	**761 486**
	Total 95-04: FRAPPÉ PAR + EXPLOSIONS PNEUS x CCDP-2	**360**	**29 167**	**3 423 694**

Tableau 5.1.2-5 Répartition des éclatements et explosions de pneus selon les groupes professionnels (CCDP-2)

On observe sur ce tableau que cinq grands groupes cumulent 87 % des cas. Le tableau suivant répartit en pourcentage relatif ces 300 événements associés à l'éclatement et à l'explosion des pneus.

Agent causal: FRAPPÉ PAR + EXPLOSIONS PNEUS 95-04 x CCDP-2				
G G Prof	Desc G G Professions	Nb dossiers	Jours	Deb_TOT
Répartition des événements pour les 5 grands groupes les plus touchés				
85	Travailleurs spécialisés dans la fabrication, le montage et la réparation	47%	43%	40%
93	Manutentionnaires et travailleurs assimilés, n.c.a.	20%	10%	7%
91	Personnel d'exploitation des transports	13%	24%	33%
99	Travailleurs non classés ailleurs	11%	9%	8%
51	Travailleurs spécialisés dans la vente	10%	14%	13%
	Total	100%	100%	100%

Tableau 5.1.2-6 Répartition des cas pour les 5 grands groupes professionnels les plus touchés

On peut observer sur le Tableau 5.1.2-6 que les travailleurs spécialisés dans la fabrication, le montage et la réparation sont les plus touchés avec 47 % des cas. On remarque aussi que le personnel d'exploitation des transports, qui arrive au troisième rang en terme de nombre (13 % des cas), se situe au deuxième rang avec 33 % des coûts. Ce qui tend à confirmer l'importance relative de la gravité des cas dans le secteur des transports.

5.1.2.5 Importance relative des secteurs

Afin de déterminer l'importance relative des secteurs touchés par cette problématique, nous avons trié, en fonction des secteurs d'activité [**7**], les données ayant pour agent causal les pneus et pour genre d'accident celles présentées au Tableau 5.1.2-2 qui s'apparentent le plus à l'éclatement, l'explosion ou l'incendie de pneus.

Le tableau suivant regroupe, par ordre d'importance, les secteurs les plus touchés par ce genre d'accidents. On peut constater que les dix secteurs les plus touchés représentent 65,3 % de l'ensemble des secteurs concernés par cette problématique. De plus, on y observe que le secteur

des transports est le plus touché et qu'il comporte 15,3 % de l'ensemble des cas de tous les secteurs et près du quart des cas des dix secteurs dominants. La colonne « jours » (qui correspond au nombre de jours perdus) et la colonne « coûts » attribuables à ce type d'accident sont encore plus significatives de l'importance du problème. En effet, les dix secteurs les plus touchés se partagent 87,5 % des coûts et le secteur des transports à lui seul absorbe 36 % des coûts de ce sous-groupe. Ces résultats sont compatibles avec ceux du Tableau 5.1.2-6 précédent.

Agent causal FRAPPÉ PAR + EXPLOSIONS PNEUS 95-04 x CAEQ-2				
Code Caeq-2	Description du secteur	Nb dossiers	Jours	Deb_TOT
45	Transports	55	8 445	1 077 576 $
63	Commerce de détail de véhicules automobiles, pièces et accessoires	93	7 477	803 303 $
55	Commerce de gros de véhicules automobiles, pièces et accessoires	52	2 446	260 839 $
4	Exploitation forestiere	4	1 906	234 384 $
40	Constructeurs, promoteurs et entrepreneurs généraux	8	777	123 938 $
8	Carrières et sablières	2	1 101	112 620 $
27	Industries du papier et des produits en papier	1	946	110 061 $
99	Autres services	9	776	99 523 $
25	Industries du bois	8	391	99 330 $
29	Industries de première transformation des métaux	3	231	73 721 $
	Sous total pour les 10 secteurs les plus touchés	**235**	**24 497**	**2 995 297 $**
	Sous total de tous les autres secteurs	125	4 670	428 397 $
	Total 95-04: FRAPPÉ PAR + EXPLOSIONS PNEUS x CAEQ-2	**360**	**29 167**	**3 423 694 $**
% 10 secteurs dominants relatif au total de l'ensemble des secteurs		**65.3%**	**84.0%**	**87.5%**
% secteur Transports relatif au total de l'ensemble des secteurs		**15.3%**	**29.0%**	**31.5%**
% secteur Transports relatif au total des 10 secteurs dominants		**23.4%**	**34.5%**	**36.0%**

Tableau 5.1.2-7 Les secteurs d'activité économique les plus touchés

En calculant le déboursé total moyen par dossier (Deb_TOT/Nb dossiers), les secteurs codés 27, 4 et 8 ont les coûts les plus élevés. Cependant, le nombre de dossiers n'est pas significatif pour estimer ce coût moyen. Si l'on considère les trois premiers secteurs (plus de dix dossiers), on obtient un coût moyen de 19 592$ pour le secteur codé 45 (transports), de 8 637 $ pour le code 63 et de 5 016 $ pour le code 55. Les déboursés totaux sont donc respectivement de 2,3 et de 3,9 fois supérieurs à ceux des secteurs codés 63 et 55.

5.1.2.6 Synthèse de l'analyse des informations obtenues du « Dépôt de données centrales et régionales de la CSST »

L'analyse des données statistiques des bases de données de la CSST met en évidence l'importance relative des lésions professionnelles attribuables à l'éclatement ou à l'explosion des pneus. Bien que le système de codification et les limites d'interprétation du codeur ne permettent pas de distinguer avec précision les lésions causées uniquement par l'éclatement de celles causées par une explosion, on peut affirmer que ce genre d'accidents a un taux de gravité supérieur lorsque le pneu est l'agent causal.

L'analyse montre également que, par rapport à l'ensemble des secteurs, le secteur des transports absorbe proportionnellement une part importante des coûts liés à ce genre d'accidents. De plus, il

semble que la gravité des lésions soit relativement plus importante lorsque l'accident survient dans ce secteur par rapport aux autres, si on exclut les secteurs pour lesquels le nombre de dossiers n'est pas significatif.

5.1.3 Analyse d'informations provenant d'autres sources obtenues dans la littérature

On trouve dans la littérature technique quelques autres compilations d'accidents reliés à des destructions de pneus [8,9]. En particulier, le rapport OTRACO [9], qui concerne des engins de terrassement, rapporte 18 cas d'éclatement de pneu à travers le monde (Australie, Angleterre, Papouasie-Nouvelle-Guinée, Colombie, Chili, Argentine et Indonésie) entre 1981 et 2005. Les causes identifiées se répartissent comme suit : deux cas par apport de chaleur délibéré à la jante, deux cas par surchauffe du système de freinage, cinq cas par contact avec des lignes de haute tension, trois cas associés à des incendies, trois cas dus à la foudre, deux cas liés à un mauvais état du pneu causé par un endommagement préalable, et finalement un cas où des morceaux de bois ayant été oubliés dans le pneu lors de son montage ont émis du méthanol. Un autre auteur rapporte que des éclatements lors du gonflage de pneus ont eu lieu alors que les dimensions du pneu ne correspondaient pas à celles de la jante sur laquelle il était monté [10].

Ces accidents par destruction de pneus peuvent donc être majoritairement attribués à un apport de chaleur, soit directement à la jante (soudage ou surchauffe des freins), soit par un feu externe, soit créé par le pneu lors de son utilisation dans de mauvaises conditions (sous-gonflage) ou à cause d'un défaut dans sa structure, ou finalement par un arc électrique (foudre ou ligne à haute tension).

5.2 Une description générale du phénomène

5.2.1 Description générale d'un pneu et de ses composantes

Plusieurs modèles de pneus ont été proposés depuis que l'usage des moyens de transport moderne s'est répandu. En particulier, le modèle conventionnel ou à armature diagonale a été graduellement remplacé par l'architecture radiale, inventée par Michelin en 1946 et dont la structure plus stable augmente la longévité du pneu et la sécurité de la conduite en plus de diminuer la consommation en carburant [11].

5.2.1.1 Composantes

Un pneu peut être dissocié en plusieurs sous-éléments, chacun assurant une ou des fonctions spécifiques dans la structure globale [12,13,14,15,16,17]. La Figure 5.2.1-1 schématise les principales composantes d'un pneu à architecture radiale sans chambre à air. [18]

L'enveloppe étanche (1) est présente dans le cas des pneus sans chambre à air, de plus en plus utilisés. Elle est constituée d'une double couche de caoutchouc synthétique possédant une haute imperméabilité à l'air comme les composés de caoutchouc bromobutyle renforcés par du noir de carbone.

La nappe-carcasse (2) est l'élément structurel le plus important du pneu, qui lui permet de résister à la pression interne. Elle se compose d'un certain nombre de couches de câbles d'une fibre textile à haut module d'élasticité noyées dans une matrice de caoutchouc à faible module. Dans le cas des pneus de camions, la nappe-carcasse comporte soit des câbles de fibres textiles (pour les pneus à plis conventionnels), soit une couche de câbles d'acier (pour les pneus à construction radiale). Les câbles formant la carcasse sont ancrés de chaque coté autour des tringles (4) faites d'un acier à haute résistance en tension. Les tringles servent également à assurer une bonne assise du pneu sur la jante. Le talon du pneu, qui contient les tringles et pour lequel une bonne résistance à l'abrasion est requise, utilise des composés de caoutchouc polybutadiène renforcés de quantités importantes de noir de carbone.

Dans le cas de la structure conventionnelle ou diagonale, les couches successives de câbles se croisent avec un certain angle au sommet du pneu. Par contre, avec l'architecture radiale, les câbles sont tous orientés à 90º par rapport aux tringles et une pièce supplémentaire, les nappes du sommet ou ceinture (6), orientée perpendiculairement par rapport aux câbles de la carcasse, maintient la stabilité de la périphérie de la carcasse. La ceinture est composée de plusieurs couches de câbles à haut module d'élasticité, souvent quatre couches de câbles d'acier dans le cas des pneus de camion, qui sont orientées les unes par rapport aux autres selon un angle de 20º environ. Cette ceinture doit être rigide en circonférence pour ne pas s'étirer sous l'effet de la centrifugation et dans le sens transversal pour résister aux efforts de dérive. Par contre, elle doit être suffisamment souple dans le sens vertical pour absorber les aspérités de la chaussée.

Au niveau des flancs (5), une couche de caoutchouc souple protège la carcasse contre les chocs éventuels. Le matériau doit également résister à la fatigue et à l'abrasion et les composés de styrène-butadiène ou des mélanges caoutchouc naturel / polybutadiène sont généralement utilisés. Entre la carcasse et les flancs, une couche de gomme dure, appelée bourrage zone basse (3), transmet les couples moteur et de freinage de la jante à l'aire de contact au sol.

Finalement, la bande de roulement (7) chapeaute les nappes du sommet et contient les sculptures. Étant en contact avec la route, elle doit résister à l'usure et à l'abrasion tout en ne s'échauffant que faiblement et en gardant de bonnes propriétés d'adhérence dans de multiples conditions. Dans le cas des camions lourds, le caoutchouc naturel est favorisé (qui optimise les trois premières propriétés aux dépens de l'adhérence, en particulier sur sols mouillés), auquel du polybutadiène peut être ajouté en raison de son excellente résistance à l'abrasion. Pour les véhicules légers, des caoutchoucs synthétiques sont généralement utilisés.

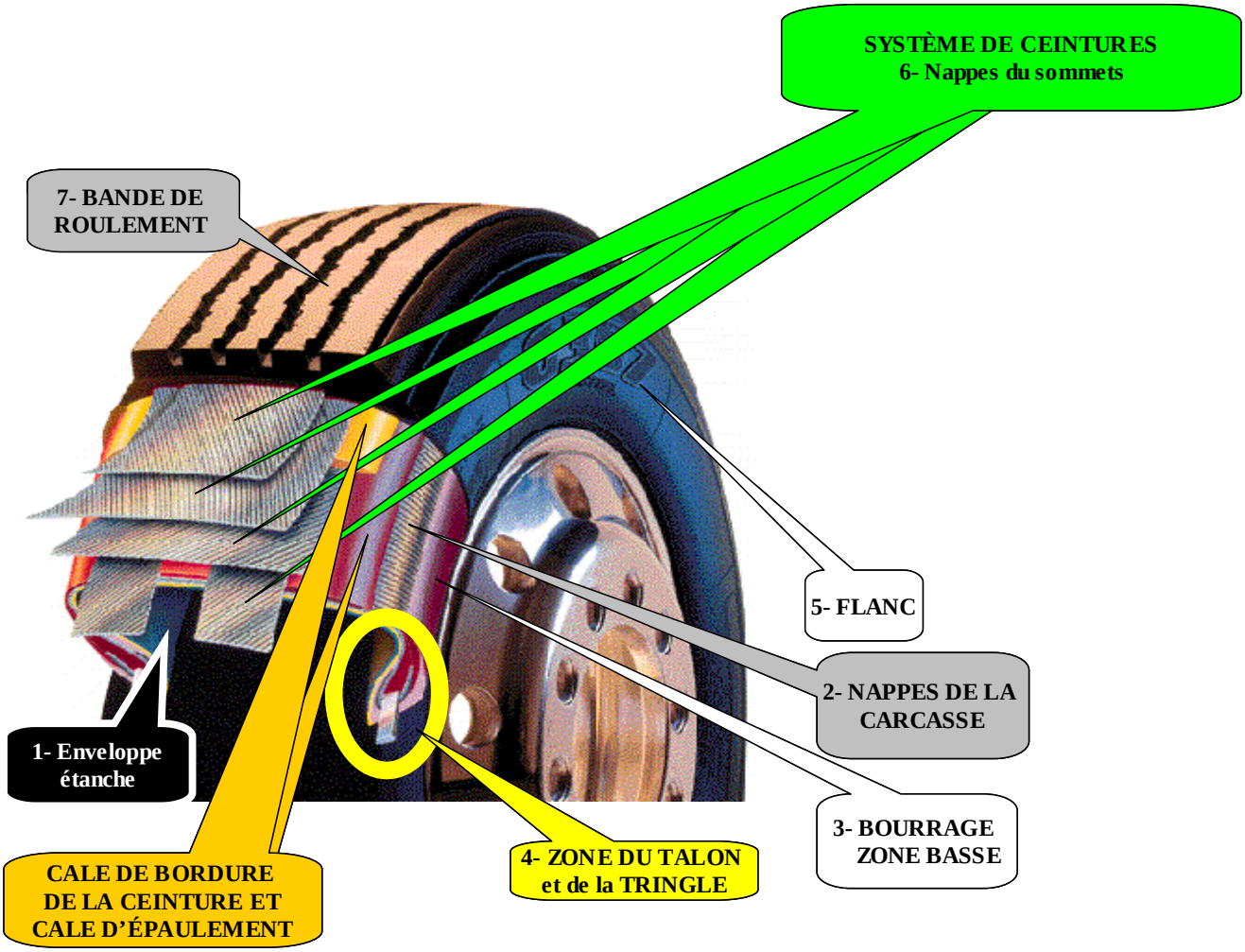


Figure 5.2.1-1 Schéma type d'un pneu de camion à structure radiale sans chambre à air [18]

5.2.1.2 Matériaux constitutifs

Les matériaux entrant dans la composition des pneus sont nombreux et varient selon la composante du pneu où ils doivent être intégrés, selon les spécifications générales du pneu et selon le fabricant [19,20,21]. En moyenne, les pneus de camions radiaux sont formés de 47% de caoutchouc naturel et synthétique, de 36% de produits chimiques divers, parmi lesquels le noir de carbone occupe la plus grande proportion, et de 17% de renfort textiles et câbles [22].

En ce qui concerne la matrice caoutchouc, quatre polymères de base, le caoutchouc naturel, le polyisoprène synthétique, le polybutadiène et le styrène-butadiène, sont utilisés sous la forme de composés les combinant. En moyenne, les pneus de camion comportent environ 80% de

caoutchouc naturel et 20% de caoutchoucs synthétiques, ce qui représente au total à peu près la moitié de leur poids.

Une longue liste d'additifs variés est ajoutée aux composés de caoutchouc, pour un pourcentage de 40% environ par rapport au poids final du pneu. Certains participent au procédé de vulcanisation, comme le soufre qui établit des liaisons entre les chaînes de polymères dans le procédé de vulcanisation, les « accélérants » (acides et bases organiques) qui augmentent la vitesse de la réaction, les retardateurs qui évitent une activation prématurée de la réaction lors des étapes de mélange et les activants (acide stérique et oxyde de zinc) qui activent les accélérants. D'autres facilitent la mise en œuvre, comme les plastifiants (peptides), les adoucisseurs (huiles) et les extendeurs (matériaux possédant des propriétés plastiques ou caoutchouteuses).

Une série d'additifs modifient les propriétés finales du caoutchouc. Par exemple, différents types de pigments secs, comme le noir de carbone et la silice, sont ajoutés sous forme de poudres finement dispersées comme agents de renforcement. D'autre part, des agents d'adhérence et des composés avec différents groupes ligands sont utilisés pour augmenter l'adhérence du caoutchouc avec respectivement les fibres textiles et les câbles en acier. Différentes catégories de protecteurs sont également incorporées dans le caoutchouc : les stabilisants pour protéger les caoutchoucs synthétiques à base diène lors de leur mise en œuvre, des antioxydants et anti-ozonants pour ralentir l'effet du vieillissement atmosphérique, ainsi que des ignifuges.

Ciullo et Hewitt, présentent différentes recettes de caoutchouc, correspondant aux différentes composantes du pneu dans lesquelles ce caoutchouc va être utilisé, montre comment les propriétés physiques et mécaniques du matériau sont ajustées aux spécifications requises en variant les types et proportions relatives des polymères présents ainsi que selon le choix de la nature et de la quantité d'additifs introduits [23].

Finalement, les matériaux de renfort utilisés pour la carcasse, les nappes du sommet et les tringles incluent différentes fibres textiles, comme le nylon et les fibres d'aramide, de rayonne, de verre ou de polyester, ainsi que des câbles d'acier, dont la surface peut être recouverte de laiton pour favoriser l'adhésion avec le caoutchouc. Les fibres synthétiques sont recouvertes d'adhésif, le plus souvent à base de latex resorcinol-formaldehyde, dans un procédé à étapes multiples incluant deux immersions dans l'adhésif, chacune suivie d'une cuisson en extension [24].

5.2.1.3 Procédé de fabrication

Le processus de fabrication se scinde en plusieurs étapes [12,20,21]. Dans un premier temps, les différents types de caoutchouc et d'additifs sont mélangés dans des malaxeurs Banbury. Ensuite, selon l'usage auquel il est destiné, le mélange chaud et gommeux ainsi obtenu est dirigé vers différents postes : d'une part, il peut servir à imprégner les fibres textiles et les câbles en acier afin de former la carcasse et les nappes du sommet; il peut également passer dans un ensemble d'extrudeuses et de laminoirs pour produire la bande de roulement et les flancs; et finalement, il peut être utilisé pour enduire le fil en acier, lui-même recouvert de laiton, qui servira à former les tringles.

Lors de l'assemblage des éléments constitutifs du pneu, la première étape consiste à déposer sur un support une double couche de caoutchouc synthétique, qui joue le rôle de doublure interne et remplace la chambre à air. Ensuite, les nappes constituant la carcasse sont mises en place sur les tringles, suivies par les nappes du sommet et le bourrage zone basse. Finalement, les flancs et la bande de roulement sont installés, donnant ce qui est appelé le pneu vert.

Lors de l'étape finale de vulcanisation, le pneu vert est inséré dans un moule sur la paroi duquel sont gravées les sculptures de la bande de roulement et les identifications du pneu. Réalisée sous pression et à 300ºC, la vulcanisation dure de 12 à 25 minutes selon la taille du pneu et permet de réaliser la polymérisation tridimensionnelle du caoutchouc et de sceller les différentes couches des éléments constitutifs du pneu entre elles.

Parmi les améliorations qui sont actuellement à l'étude au niveau du procédé de fabrication, on peut citer le mélange en continu des matériaux constitutifs, l'utilisation d'un support unique qui suit le pneu pendant toute sa fabrication, et la cuisson par chauffage électrique [17].

5.2.1.4 Principales caractéristiques, spécifications et performances des pneus

Afin de pouvoir comparer les performances des pneus les unes par rapport aux autres, un système de classification normalisé, le UTQG (Uniform Tire Quality Grading), a été mis en place par le « U.S. Department of Transportation (DOT) National Highway Traffic Safety Administration's (NHTSA) », basé sur trois critères déterminants, soit la vitesse d'usure de la bande de roulement, l'adhérence sur sol mouillé et la résistance à la chaleur [25]. Les indices UTQG doivent être disponibles auprès des fabricants de pneus pour chacun des types de pneus.

En ce qui concerne les propriétés mécaniques des pneus, un certain nombre de caractéristiques correspondant au comportement en opération peuvent être définies [15]. Tout d'abord, la résistance au roulement caractérise l'effet de la distorsion du pneu en mouvement, qui se manifeste par une surpression dans la zone avant du pneu et est causée par les pertes énergétiques, principalement par hystérésis, mais également par friction avec le sol et à cause de la résistance de l'air interne et externe. Le choix des matériaux et la structure du pneu influent de manière importante sur la résistance au roulement. D'autres propriétés sont également primordiales, comme le comportement au freinage, l'adhérence sur différents types de sols et dans différentes conditions d'humidité et de température, le comportement en virage, les propriétés de dérive et la rigidité dynamique en roulement.

Une autre série de propriétés vont déterminer la longévité du pneu [26]. En plus de la résistance à la chaleur définissant la température de service et la résistance à l'abrasion, incluses dans la classification UTQG, il est nécessaire de prendre en compte, entre autres, la résistance aux processus de vieillissement thermique, chimique et mécanique ainsi que la résistance aux agressions mécaniques comme la déchirure, la coupure et la piqûre.

Dans les années 50, le «U.S. National Bureau of Standards» a réalisé une étude dans le but de déterminer les modèles de pneus possédant les meilleures performances afin de réduire les coûts du carburant [27] : en effet, des recherches antérieures avaient montré que les différences de

perte en puissance, pour les pneus de différentes marques produits dans les années 20, engendraient des variations de consommation en carburant de près de 10 %. Un certain nombre de techniques de mesure de ces performances ont été mises au point ou améliorées dans le cadre de ces travaux.

5.2.2 Description générale des phénomènes d'éclatement et d'explosion des pneus de camions lourds

Les phénomènes d'éclatement et d'explosion se distinguent notamment par l'importance des pressions mises en cause. Par ailleurs, l'origine du phénomène mécanique, chimique ou une combinaison des deux, caractérise aussi les éventualités et les conditions menant à l'éclatement ou à l'explosion.

Dans un premier temps, la section suivante présente brièvement quatre types d'éclatement dus à des phénomènes d'origine essentiellement mécanique. Dans un second temps, nous présentons un aperçu des principaux phénomènes d'origine chimique, dont les causes et les mécanismes sont étudiés en détail à la section sur la mise à jour des connaissances. Cette section est complétée par une synthèse du processus général menant à l'éclatement ou à l'explosion des pneus de camions lourds.

5.2.2.1 Phénomène général d'éclatement d'origine mécanique

Les phénomènes d'éclatement d'origine mécanique peuvent se répartir en quatre catégories. Néanmoins, le quatrième type peut être considéré comme une combinaison de phénomènes d'origine mécanique et chimique.

1) Cas de surpression lors du gonflage d'un pneu

- Les causes possibles sont :
  - pression du compresseur mal ajustée,
  - problème de manomètre ou de valve (pour un pneu usé ou lorsque le pneu a une faiblesse structurelle qui fait en sorte qu'il ne peut résister à la pression maximale du compresseur),
  - montage inadéquat sur la jante et surpression volontaire lors du montage pour coller le pneu à la jante.

2) Le déjantage

Le déjantage se produit lors de la sortie accidentelle et soudaine du pneu sur sa jante avec évacuation violente de l'air ou d'autres gaz contenus dans le pneu.

- Les causes courantes sont :
  - impact mécanique plus ou moins violent sur la jante ou le pneu,
  - usure hors norme de la jante (rebord),
  - déformation de la jante ou de l'une de ses composantes à la suite d'une surchauffe,
  - montage incorrect du pneu à l'origine,
  - pièces de la jante incompatibles (jante multi-pièces),
  - incompatibilité dimensionnelle ou autre de la jante et du pneu.

3) Pneu en mauvais état ou avec une faiblesse structurale

Un pneu usé ou même neuf peut présenter un défaut structural plus ou moins perceptible. Il est alors possible qu'il ne puisse pas résister à la pression normale de gonflage. D'où l'importance de toujours gonfler un pneu dans une cage de protection. Ce point est présenté plus en détail dans la section sur les moyens de prévention.

4) Cas de rupture éclair ou dézippage « zipper failure »

Un défaut de conception, une surcharge, un sous-gonflage ou un impact peuvent provoquer une faiblesse, un bris ou une rupture de la carcasse du pneu. Le résultat peut provoquer l'échappement de la pression à cet endroit, parfois accompagné d'une marque ressemblant à un tissu décousu ou dézippé. Ce type d'éclatement a des causes mécaniques et d'autres, plus compliquées, associées à la dégradation chimique.

Photo A [28].

Photo B [29]

Figure 5.2.2-1 Photos caractéristiques de pneus ayant subi une rupture éclair

- Les causes possibles de la rupture éclair ou du *dézippage* « zipper failure » sont :
  - impact mécanique qui a endommagé la structure du pneu,

- détérioration de l'enveloppe exposant la toile ou la broche interne du pneu à la contamination par l'air ou l'humidité,
- défaut de conception du tissage de la gaine,
- usure importante de la carcasse,
- rouler en sous-pression (- 80 lb/po^2) [i] ou en surpression,
- surcharge,
- perte des propriétés mécaniques dues à la chaleur, la pyrolyse ou la thermo-oxydation.

5.2.2.2 Phénomènes généraux d'éclatement d'origine chimique

Un pneu et le caoutchouc qui le compose sont des produits relativement stables. Le pneu est cependant exposé à des environnements très variables et à des contraintes d'utilisation plus ou moins sévères. La chaleur, en particulier, est le principal facteur à l'origine des phénomènes d'éclatement d'origine chimique. Une élévation de la température du pneu, causée à titre d'exemple par : un frein bloqué, du soudage sur la jante ou à proximité de celle-ci, un arc électrique, la foudre, etc., peut provoquer la dégradation du caoutchouc du pneu et entraîner une réaction chimique en chaîne qui peut conduire à l'éclatement du pneu par surpression, ou même à une explosion violente du pneu. Ce phénomène peut se produire même après que la source de chaleur ait été éliminée.

Différentes réactions chimiques peuvent se produire dans le pneu sous l'effet de la chaleur, entre autres la thermo-oxydation et la pyrolyse. Cette dégradation chimique a été observée à partir de températures du caoutchouc à l'intérieur du pneu aussi basses que 185 °C. Il est à noter que cette température n'est pas la température mesurable sur la surface extérieure du pneu. Il faut également préciser qu'une réaction chimique peut se produire alors que la température de l'air ou des gaz à l'intérieur de la chambre du pneu peut être inférieure à 100 °C. L'occurrence d'une telle réaction chimique ne peut être détectée visuellement (Ces réactions chimiques sont présentées en détail à la section 5.3.3.1 qui traite de la mise à jour des connaissances sur les causes et les phénomènes identifiés de l'éclatement des pneus).

5.2.2.2.1 Information générale sur la pyrolyse

Examinons quelques informations sur la pyrolyse, qui se définit comme la décomposition chimique irréversible d'un matériau sous la seule action de la chaleur. Ce phénomène entraîne une dégradation chimique et mécanique du pneu qui peut se produire progressivement et dont les effets peuvent être cumulatifs à la suite de plusieurs surchauffes. La pyrolyse se produit :

- à l'intérieur même de la carcasse du pneu,
- en l'absence d'oxygène (le gonflement à l'azote n'élimine pas le phénomène de pyrolyse),
- en quelques secondes (à ce jour, nous n'avons pas trouvé de signe précurseur, fiable et détectable sans l'utilisation de techniques et d'instruments de mesure

[i] lb/po^2 correspond à psi

appropriés. La température est un indice, mais il n'est pas le seul élément à considérer).

5.2.2.2.2 Information générale sur la thermo-oxydation

La thermo-oxydation se produit lorsqu'il y a présence d'oxygène mais en quantité insuffisante pour une combustion. Ce phénomène se produit :

- à l'intérieur même de la carcasse du pneu,
- en présence d'oxygène (le gonflement à l'azote élimine le phénomène de thermo-oxydation),
- en quelques secondes (à ce jour, nous n'avons pas trouvé de signe précurseur, fiable et détectable sans l'utilisation de techniques et d'instruments de mesure appropriés. La température de l'air à l'intérieur du pneu est un indice, mais les seuils de sécurité pour prévenir le phénomène ne sont pas connus. D'autres indicateurs doivent être considérés).

5.2.2.3 Processus général menant à l'éclatement ou à l'explosion de pneus

La Figure 5.2.2-2 (voir page 29) illustre le processus général menant à un éclatement ou à une explosion d'un pneu sous l'effet d'un apport de chaleur, plus ou moins important, causé par une ou des sources internes ou externes.

Une source externe correspond à un apport direct de chaleur externe au pneu. C'est le cas notamment de la chaleur transmise à la roue sous l'effet d'un frein bloqué ou d'un roulement défectueux. Une source interne correspond à la chaleur générée à l'intérieur du caoutchouc en réaction à une sollicitation mécanique, normale ou excessive, résultant de causes telles que : le sous-gonflage, la surcharge, la vitesse ou le freinage. Ces sources produisent une chaleur plus ou moins intense transmise directement ou indirectement au pneu. La température du pneu, de l'air et des autres gaz ou contaminants à l'intérieur du pneu augmente. Il en résulte une augmentation de la pression à l'intérieur du pneu due à l'expansion thermique de l'air et des gaz dans le pneu. Cette augmentation de pression due à l'expansion thermique se poursuit tant que la température monte et tant que le pneu n'a pas cédé ou déjanté. Cette pression s'ajoute donc aux pressions résultant d'autres causes tout au long du processus.

À partir d'une certaine température (celle-ci est dépendante des réactions chimiques impliquées et sa valeur n'est pour le moment pas précisément déterminée), des réactions de dégradation chimique du caoutchouc sont déclenchées. Ces réactions chimiques, plus ou moins intenses selon le flux de chaleur transmise au pneu, vont produire des gaz et/ou des matières inflammables, lesquels augmentent encore la pression dans le pneu et, par conséquent, le risque d'éclatement. Une fois les réactions chimiques amorcées, elles peuvent se poursuivre, plus ou moins intensément ou rapidement, même si les sources de chaleur sont interrompues.

Ainsi, lorsque la température du pneu, des gaz et des matières inflammables produits à l'intérieur du pneu continue d'augmenter à cause des réactions chimiques et/ou à cause de la contribution des sources de chaleur, le risque d'éclatement augmente considérablement. En effet,

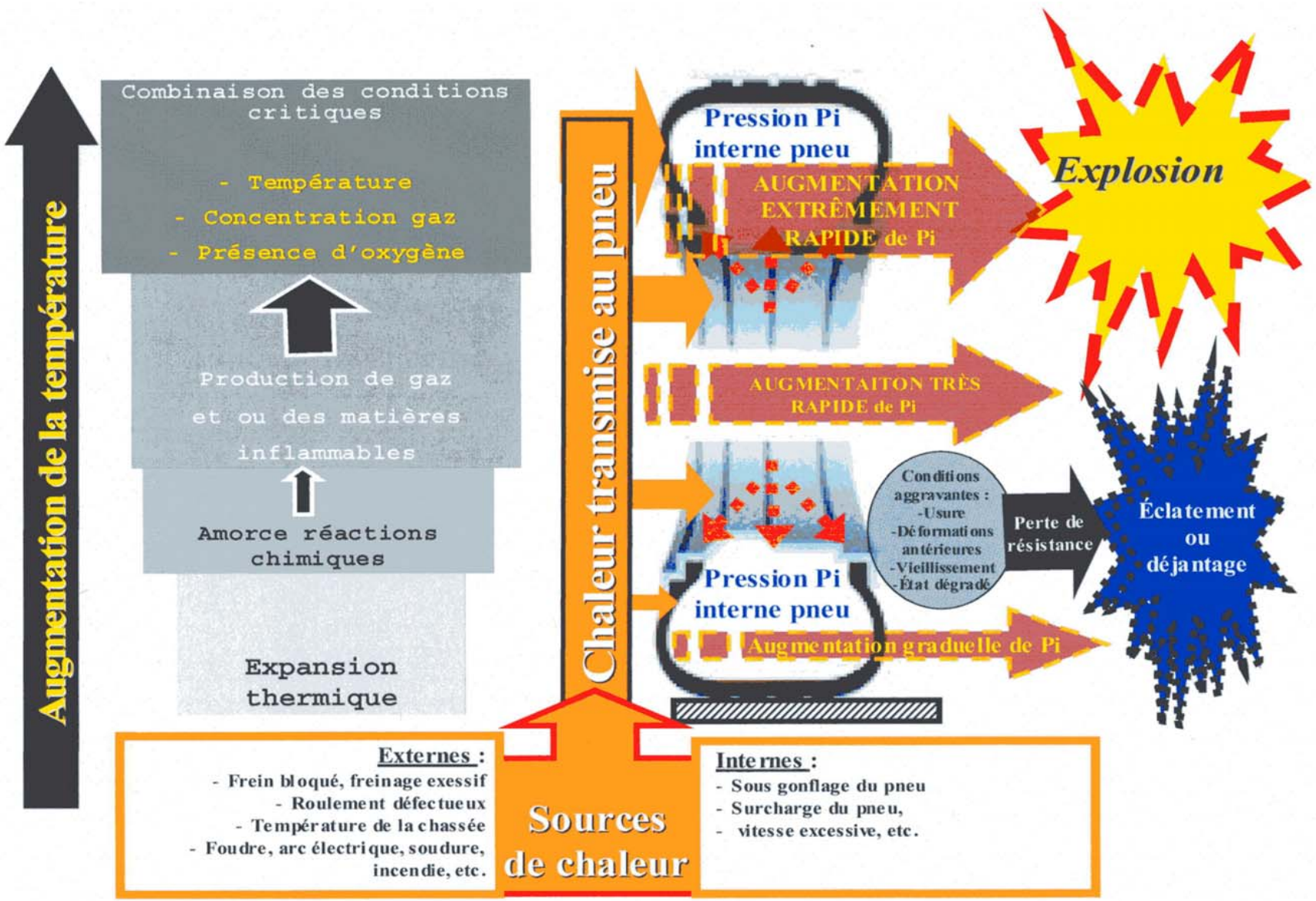


Figure 5.2.2-2 Cumul et séquence des événements pouvant mener à une destruction brutale du pneu

les gaz produits par la pyrolyse ou la thermo-oxydation ou les deux combinées provoquent une augmentation de la pression interne du pneu, laquelle peut conduire à un éclatement violent et soudain, mais sans explosion.

Par contre, si les trois conditions critiques suivantes sont réunies simultanément :

- concentration suffisante en gaz inflammable,
- température supérieure à la température d'auto-allumage des gaz,
- concentration en oxygène supérieure à 5,5 %,

il s'en suit une explosion violente où les pressions en jeu, au moment de l'explosion, sont de l'ordre de 1000 lb/po^2 ou plus, avec la création d'ondes de choc.

Il faut retenir que l'éclatement, bien que moins violent que l'explosion chimique, peut survenir à tout moment avant que les conditions de l'explosion chimique ne soient réunies. Même dans ce cas, si une personne se trouve dans l'environnement immédiat du pneu, elle s'expose à des blessures graves et même mortelles.

5.3 Une mise à jour des connaissances sur le phénomène de l'éclatement ou explosion des pneus

Grogan mentionne plusieurs des facteurs pouvant mener à un éclatement ou une explosion de pneus de camion [30]. Il différencie un éclatement simple, dû à un bris de la structure du pneu lié ou non à une surpression, d'une explosion proprement dite, phénomène beaucoup plus violent. Dans le cas de l'éclatement, il peut permettre un échappement soudain de l'air de gonflage libérant énormément d'énergie et pouvant provoquer des blessures à une personne placée à proximité dans le champ de projection du souffle. Dans le second cas, selon un processus chimique encore mal compris, il semble qu'en présence d'une chaleur intense, un mélange gazeux inflammable possédant une température d'autoallumage relativement basse est généré à l'intérieur du pneu. Dans certaines circonstances, la surchauffe interne du pneu peut devenir suffisamment élevée pour provoquer l'allumage du mélange et ainsi générer une explosion. La force de la pression interne du pneu soudainement libérée est alors additionnée à celle de la déflagration elle-même. Le risque de blessures graves ou mortelles est alors élevé pour les personnes se trouvant sur la trajectoire des projections de l'explosion. Selon Grogan, une des causes les plus répandues de ce type de phénomène est le fait d'effectuer une réparation par soudure sur une jante de roue sur laquelle un pneu est encore monté, ou encore d'utiliser une torche à souder pour dégager des boulons de roues. Un autre facteur contributif mentionné par l'auteur est l'utilisation de lubrifiants à base de produits pétroliers ou de solvants, lors de la pose de pneus, pouvant entraîner la production d'un mélange volatile explosif à l'intérieur du pneu.

Glenn [31] fait état de causes similaires menant à des explosions de pneu, soit :

- soudure ou utilisation d'une torche à souder sur une jante ou une pièce d'assemblage de roue alors que le pneu est encore monté et gonflé en place,
- surchauffe des freins,
- décharges électriques à partir d'une ligne à haute tension ou par la foudre,
- incendie de roue ou du véhicule,
- sous-gonflage sévère du pneu ou surcharge sévère du véhicule,
- présence de contaminants combustibles dans le pneu,
- carburant ou autre fluide déversé accidentellement et qui a été absorbé par le pneu.

5.3.1 Situations provoquant la défaillance de pneu

Dans cette section, nous présentons sommairement les principales situations tirées de la revue de la littérature et qui traitent de défaillance due au service, défaillance par chauffage externe, d'électrocution et des problématiques liées à l'entretien des pneus et des jantes de véhicules lourds.

5.3.1.1 Défaillance due au service

Les deux types d'éclatements soudains de pneu les plus courants identifiés par Grogan sont les bris de la tringle ou "Bead" ainsi que les bris par dézippage ou "Zipper failure" [30]. L'auteur

mentionne que ces types de bris sont généralement liés à un endommagement de la carcasse du pneu ayant fonctionné sous une pression de gonflage insuffisante. Dans le cas de bris par dézippage, ils se produisent généralement à mi-hauteur du flanc et l'auteur favorise plutôt l'appellation "éclatement de la couche de surface" du pneu. Notons que le terme de rupture éclair est aussi fréquemment utilisé pour nommer ce type de bris.

Les causes internes pouvant mener à un éclatement soudain du pneu sont principalement liées au sous-gonflage, à la surcharge, au mauvais état de la carcasse, au vieillissement du caoutchouc, ainsi qu'aux défauts de carcasse, de fabrication ou de rechapage.

Il est bien connu qu'en circulation, sous des conditions de vitesse et de charge normales, la température du pneu est maximale aux extrémités de la ceinture du pneu, à l'interface entre la bande de roulement et les flancs. Lorsque le pneu est sous-gonflé, le frottement interne à cet endroit devient plus important dû à une plus grande déflection de la carasse et une surchauffe interne du pneu se produit alors. En cas de surcharge, un phénomène similaire se produit, car la carcasse du pneu est alors plus sollicitée et se déforme davantage. En ce qui concerne le vieillissement du pneu, une étude de Legorju-Jago et Bathias [32] montre que les propriétés mécaniques du caoutchouc des pneus s'altèrent avec le temps et la fatigue reliée aux cycles de chargement. Le caoutchouc du pneu n'est pas tout à fait chimiquement stable. Avec le temps et le contact prolongé avec l'oxygène (oxydation), ainsi que la modification de la composition du caoutchouc par effet de cristallisation, des fissures de fatigue apparaîtront dans le caoutchouc (Le vieillissement et la fatigue sont traités en détail aux sections 5.3.3.2, 5.3.3.3 et à l'annexe A). Les réactions d'oxydation seront également accélérées à de plus hautes températures de fonctionnement, comme par exemple lorsque le pneu est en surcharge. Plus la température est élevée, plus la vitesse d'oxydation est rapide. Aussi, la chaleur peut affaiblir les armatures radiales (composantes des pneus) en acier, entraînant la fatigue et la rupture du métal. De plus, les propriétés de résistance à la fatigue du caoutchouc sont affectées par les divers dommages mécaniques et thermiques qui surviennent en mode de fonctionnement normal du pneu. Ceci explique pourquoi certains législateurs songent actuellement à réglementer le retrait obligatoire des pneus des véhicules, particulièrement des camions lourds, dans un délai de 8 à 10 ans après leur date de fabrication.

5.3.1.2 Défaillance par chauffage externe

Selon le magazine Tire & Wheel Canada [33], la cause la plus commune de surchauffe menant à une explosion est le travail de soudure sur une jante. Selon cette source d'information, lorsque le caoutchouc d'un pneu est surchauffé, à partir d'une température de 250ºC, le matériau va commencer à se décomposer en divers composés, dont des substances volatiles inflammables. Lorsque la source de la surchauffe continue à faire s'élever la température interne du pneu, le mélange d'oxygène de l'air de gonflage et des volatiles inflammables va s'auto allumer à une température d'environ 430ºC, produisant une explosion. L'auteur mentionne également les cas de freins ou roulements de roue surchauffés, d'incendie de roue, ainsi que d'électrocution comme autres causes potentielles d'échauffement.

Costa rapporte que la surchauffe du système de freinage peut entraîner une dégradation du caoutchouc des pneus et mener à un éclatement, particulièrement pour les pneus intérieurs des essieux arrière qui sont les plus exposés [34].

La majorité des auteurs mentionnent qu'un phénomène chimique de pyrolyse serait responsable de la dégradation de l'état du pneu ou encore de la décomposition du caoutchouc en des produits volatiles explosifs. Glenn indique que, dans certains cas, un phénomène d'oxydation thermique serait à l'origine de la dégradation et du bris soudain de la carcasse du pneu [31]. Ce pourrait être une des causes de la rupture éclair « zipper failure »

Brookes [35] indique que, lors d'opérations de soudage sur la jante alors qu'un pneu est encore en place, gonflé ou non, une explosion peut survenir plusieurs minutes après que l'opération de soudage ait été réalisée. Un incident de ce type est mentionné, au cours duquel deux techniciens ont été tués suite à l'explosion d'un pneu survenue entre 3 et 5 minutes après la réparation de la jante par soudage. On mentionne que la jante et le pneu se sont alors séparés et ont été projetés verticalement pour tous deux passer au travers du plafond de l'atelier. Suite à une enquête exhaustive et à des essais en laboratoire, il a été possible de déterminer que le lubrifiant utilisé lors de la pose du pneu était de type inflammable et que la présence de contaminants provenant de ce lubrifiant avait été un des facteurs contributifs à l'explosion. Une température maximale de 660ºC avait alors été enregistrée dans la zone de soudage.

Un accident similaire s'est produit au Québec en 1996 [36] (voir Figure 5.3.1-1 et Figure 5.3.1-2) causant le décès du travailleur. Il n'est cependant pas fait mention de la présence d'un lubrifiant quelconque à l'intérieur du pneu.

Figure 5.3.1-1 Photo de l'empreinte laissée par le pneu dans un plafond en acier haut de 6 mètres [36]

Figure 5.3.1-2 Photo de la jante et du pneu qui a frappé le travailleur [36]

Brookes mentionne également un autre cas où une jante aurait été réparée par soudage alors que le pneu monté sur la jante était dégonflé. On aurait ensuite regonflé le pneu et une explosion se serait produite quelques instants plus tard, faisant voler en éclats les fenêtres du garage. Dans ce cas également, le lubrifiant de montage utilisé était une huile minérale combustible. Brookes aurait été en mesure, après plusieurs tentatives infructueuses, de répéter expérimentalement l'incident en laboratoire et de conclure que, dans certaines situations, une décomposition chimique du caoutchouc du pneu peut permettre de générer des vapeurs inflammables à l'intérieur du pneu, et qu'une fois la température d'autoallumage de ces gaz atteinte, entre 240ºC et 440ºC selon certaines conditions comme la pression interne du pneu, une explosion peut bel et bien se produire. Selon Brookes, il s'agit toutefois d'un phénomène multifactoriel complexe qui ne mène pas toujours à une explosion, même lorsqu'on tente de le recréer en laboratoire.

5.3.1.3 Électrocution par la foudre ou une ligne à haute tension

Plusieurs incidents survenus dans le passé un peu partout dans le monde tendent à démontrer qu'en cas d'électrocution d'un véhicule lourd, les pneus peuvent éclater ou même exploser un certains temps après l'événement [37]. Ces cas d'électrocution ont été attribués à la foudre ou à la proximité de lignes à haute tension. Certains pneus en caoutchouc conduisent l'électricité. Par

exemple, le caoutchouc à renfort de noir de carbone ainsi que les ceintures et les renforts en acier transforment certains pneus en excellents conducteurs d'électricité. [38].

Il est utile de mentionner que, lors du passage d'un véhicule lourd sous une ligne à haute tension aérienne, il n'y a pas nécessité de contact direct entre la structure du véhicule et le câble de transport de courant pour qu'un arc électrique se produise. En effet, selon Jonassen [39], la tension de claquage nécessaire pour faire passer un arc électrique dans l'air, qui est normalement fonction du voltage et de la distance (environ 30kV par centimètre), est également influencée par la forme de l'objet (effet de pointe) mis à proximité de la source de courant, par la présence d'humidité dans l'air, etc. Ceci fait qu'un arc électrique et une électrocution du véhicule peuvent être générés, même si la structure du véhicule passe à plusieurs centimètres de la ligne à haute tension.

5.3.1.4 Problématiques liées à l'entretien des pneus et des jantes de véhicules lourds

Les problèmes de montage du pneu sur la jante sont souvent à l'origine d'éclatements ou de déjantements violents, soit parce que la jante ou le pneu sont trop usés ou en mauvais état, ou encore parce que les pièces sont de dimensions incompatibles [40]. Les articles de Laughery et coll. [41,42] décrivent par exemple les incompatibilités de jantes et de pneus rencontrées pour les roues de camions légers de 16 et 16,5 pouces de diamètre. L'omission de vérifier et de mesurer l'usure de l'épaulement de la jante, particulièrement pour les roues en alliage léger d'aluminium-magnésium [43] peut aussi conduire au déjantement soudain.

Un autre facteur à considérer concerne le fait que l'entretien des compresseurs des garages doit être suffisamment suivi pour limiter la présence d'huile minérale de lubrification du compresseur dans les pneus [43]. La présence d'huile dérivée de produits pétroliers dans l'air de gonflage favorise en effet la production de produits inflammables dans le pneu lors de surchauffes de ce dernier.

La présence de produits combustibles lors du montage des pneus peut être un problème majeur, particulièrement lors de travaux sur le bord de la route. Parmi les produits dangereux parfois utilisés par certains monteurs, mentionnons, entre autres, l'emploi de produits inflammables tels que l'essence ou l'éther utilisés comme scellants.

5.3.2 Modes et mécanismes les plus probables d'éclatement et d'explosion de pneus

L'éclatement ou l'explosion d'un pneu est le résultat d'une multitude de facteurs combinés de manière plus ou moins compliquée. La Figure 5.2.2-2 présentée à la page 29 illustre la genèse des événements et les principaux facteurs contributifs qui conduisent à l'éclatement ou à l'explosion d'un pneu. Dans cette section, nous étudions plus spécifiquement l'origine de ces facteurs et la façon dont ils contribuent directement ou indirectement à ce processus.

La description générale du phénomène de même que l'analyse des accidents, montrent que la chaleur est un facteur qui joue un rôle majeur dans le processus. Ainsi, lorsqu'un apport de chaleur est la cause de l'éclatement ou de l'explosion d'un pneu, deux phénomènes principaux pouvant intervenir ont été identifiés, soit l'expansion thermique de l'air dans le pneu et la dégradation par réaction thermochimique du caoutchouc. À ces deux phénomènes, peut se superposer l'effet d'une diminution des propriétés de résistance mécanique du pneu par rapport aux performances à neuf, soit par action directe de la température, soit suite au vieillissement chimique ou par fatigue préalable à l'apport de chaleur.

5.3.2.1 Expansion de l'air contenu dans le pneu

Pour calculer la pression interne du pneu en fonction de la température de son air de gonflage, en considérant l'air comme un gaz parfait, on peut utiliser l'équation (PV = nRT) de la façon suivante :

$$V_1 = \frac{nRT_1}{P_1} = V_2 = \frac{nRT_2}{P_2}$$

En première approximation, on peut considérer que le volume du pneu ne subit qu'une très faible variation par rapport aux variations de la pression et de la température. On peut donc estimer que :

$$P_2 = \frac{P_1 T_2}{T_1}$$

Pour les pneus de camions lourds les plus communs, la pression initiale à froid, soit à 20ºC (295.15 K), recommandée par les manufacturiers est de 90 lb/po^2. Ceci donne :

$$P = \frac{90\ (T + 273.15)}{295.15}$$

La relation suivante permet donc d'estimer rapidement les variations de pression dans le pneu résultant d'une augmentation ou d'une diminution de la température par rapport à la température à froid. Dans cette formule, la température est en degrés Celsius et la pression est en lb/po^2.

$$P = 0.305\ (T + 273.15)$$

Lorsque l'air contenu dans le pneu est soumis à une élévation de température, il se produit donc une augmentation proportionnelle de la pression dans le pneu.

À titre d'exemple, le tableau suivant donne les pressions théoriques subies par un pneu du seul fait de l'expansion thermique, s'il était au départ gonflé à 90 lb/po^2 à une température initiale de 20°C.

°C	Lb/po^2
20	90
50	99
100	114
150	129
200	144
300	175

Tableau 5.3.2-1 Variation de la pression due à l'effet de l'expansion thermique seule

Lors de la conception des pneus de camion, de manière à tenir compte des efforts dynamiques qui leur sont transmis en fonctionnement, les manufacturiers utilisent généralement des facteurs de sécurité variant de 3 à 8 [10] comme critère pour la pression de gonflage maximale que le pneu peut supporter. Ce facteur dépend aussi de l'application particulière et de la section de carcasse visée. L'effet de l'expansion thermique seule a peu de chances de produire un éclatement. Par contre, si le pneu est endommagé, la pression maximale que peut supporter le pneu peut être fortement réduite.

5.3.2.2 Diminution de la résistance mécanique du pneu

Dans les conditions d'opération normales ou sévères, différents phénomènes physiques ou chimiques peuvent entraîner une diminution des propriétés mécaniques du pneu, qui se traduit par une diminution plus ou moins significative de la pression maximale qu'une telle structure peut supporter

5.3.2.2.1 Conditions d'opération normales et effet sur les propriétés

La température est un paramètre majeur du pneu en opération. Les différents auteurs rapportant des travaux sur la caractérisation de la température des pneus en opération ont utilisé plusieurs méthodes directes de mesure, soit des thermocouples positionnés à divers endroits de la surface, de l'intérieur de la structure ou du volume pressurisé du pneu [44,45], ou un thermomètre infrarouge [46]. Par ailleurs, il a été montré que la mesure indirecte à partir des valeurs de pression dans le pneu donne des résultats identiques aux mesures par thermocouple [45]. Finalement, la cartographie en température dans un pneu en service a également été réalisée par simulation à partir des équations d'énergie [47].

Toutes ces études ont montré l'existence de gradients de température importants entre les différentes parties du pneu, en particulier entre le sommet et l'air contenu dans le pneu, d'une part, et les flancs, d'autre part [44,45,47]. Des auteurs ont même déterminé que le gradient reste constant et assez faible du sommet jusqu'à environ 2 cm de la base, correspondant à une diminution de la température de 2ºC, puis augmente fortement sur cette dernière section, la température chutant de 5 à 10ºC [45]. Des gradients existent également dans l'épaisseur du pneu, d'une température proche de l'ambiante en surface externe à beaucoup plus de 100ºC, par exemple à la surface interne de l'épaulement [47,48].

Pour ce qui est des températures dans les conditions normales, la compagnie Michelin [**49**] nous transmettait récemment l'information suivante :

« Bien qu'il existe plusieurs types de semelle dans notre gamme de pneus, une température de 100°C est représentative pour l'ensemble des pneus chez Michelin. Pour ce qui est des carcasses, la plage se situe entre 40°C et 50°C. La tringle se situe à 80°C et l'air interne aux environs de 45°C et 50°C. »

Tout changement de condition d'opération du pneu se traduit généralement par un changement de sa température, qui se produit de manière très progressive et peut être décrit approximativement par une fonction exponentielle [48]. Ce changement de température s'effectue, en particulier, lors du démarrage du véhicule, où le régime d'équilibre est atteint au bout de 45 minutes environ pour les véhicules de tourisme et de 115 minutes pour les camions, la température de l'épaulement se stabilisant le plus rapidement. Ce processus de stabilisation de la température est un phénomène en boucle, dans lequel une augmentation de la température se traduit par une réduction des pertes hystérétiques et une augmentation de la pression, menant à une réduction de la chaleur générée et à la stabilisation de la température. Ce temps d'atteinte de l'équilibre en température est indépendant de la vitesse du véhicule, de même que le temps de refroidissement du pneu après arrêt, qui prend environ trois heures [46].

Les effets de la vitesse du véhicule et de sa charge sur la température du pneu à l'équilibre ont également été étudiés [44,45]. Une variation pratiquement linéaire de la température du pneu avec la charge et la vitesse a été observée dans les zones étudiées. Soulignons au passage que la complexité des phénomènes mis en jeu, en particulier le comportement thermo-mécanique couplé, nécessite généralement un traitement itératif long et complexe. Afin d'étudier ces phénomènes, des auteurs ont proposé une nouvelle technique basée sur le concept de l'indice de déformation, selon lequel une relation est établie entre le flux de chaleur volumétrique élémentaire et la température, avec des temps de calculs fortement réduits, mais qui donne des résultats identiques aux traitements itératifs [50].

L'étude de l'effet de la température sur différentes propriétés mécaniques statiques et dynamiques des caoutchoucs et des composites renfort-caoutchouc a montré une influence importante de celle-ci [51, 52, 53]. Pour des températures situées autour de 100ºC, auxquelles est soumis le caoutchouc de certaines parties des pneus en condition de fonctionnement normal, des diminutions importantes du module statique et de la partie réelle du module dynamique, ainsi que des modifications du comportement au fluage entre autres, ont été mesurées. Ces variations sont associées à des changements microstructuraux se produisant localement dans la matrice du pneu.

Le caoutchouc, lui-même relativement sensible à l'effet de la température, peut être affecté par des phénomènes de dégradation physique, c'est-à-dire des phénomènes qui conservent la structure chimique du composé, mais modifient ses propriétés mécaniques : par exemple, entre 25 et 100°C, une légère diminution du module, attribuée à un ramollissement de la structure polymérique, a été observée à l'aide d'un analyseur mécanique dynamique [54].

En ce qui concerne la pression, étant donné qu'elle est directement reliée à la température de l'air dans le pneu, le même processus de stabilisation exponentielle après un changement des

conditions d'opération du véhicule est observé, par exemple après la mise en mouvement [55]. Le maintien d'une pression adéquate de l'air dans les pneus joue un rôle essentiel tant au niveau de la sécurité de la conduite, qu'en ce qui concerne la durabilité des pneus [56]. En effet, un pneu sous-gonflé se fatigue au niveau des flancs, ce qui augmente sa propension à l'éclatement, en plus de créer une usure précoce.

5.3.2.2.2 Effet d'une température élevée

Lorsqu'un pneu est soumis à une chaleur excessive, il est possible que la structure mécanique, par exemple par le biais de l'adhérence entre des éléments composant ce pneu, s'affaiblisse. En particulier, dans le cas de jantes en alliage d'aluminium, des déformations peuvent se produire si la température excède 315ºC [57].

De plus, afin de favoriser l'adhésion entre les câbles en acier et le caoutchouc constituant la matrice du pneu, ceux-ci sont recouverts d'une couche de laiton ou de bronze, et l'adhésion se fait par le biais de sulfures métalliques non-stœchiométriques [58]. Il est envisageable que, sous l'effet de hautes températures, ces composés soient détruits, réduisant de fait la cohésion de la structure mécanique du pneu.

5.3.2.2.3 Conditions environnementales, vieillissement chimique et fatigue

Finalement, pendant sa vie en service, incluant son entreposage, le pneu subit l'effet simultané de nombreux agresseurs environnementaux et mécaniques, comme par exemple l'action de l'oxygène et de l'ozone de l'air ou la fatigue liée aux sollicitations mécaniques appliquées. Une présentation plus détaillée des différents aspects du vieillissement chimique et de la fatigue ainsi que de leurs conséquences sur les propriétés mécaniques du pneu est fournie respectivement dans les sections 5.3.3.2 et 5.3.3.3 de ce rapport, de même qu'en annexe A.

5.3.2.3 Dégradation thermochimique du caoutchouc

La matrice polymère d'un pneu est composée de caoutchouc (naturel et copolymère de styrène et/ou de butadiène) pour environ 60% en poids et de noir de carbone pour environ 30% en poids. Le reste, soit environ 10%, étant formé de différents additifs incluant de l'oxyde de zinc et du soufre [59,60,61,62,63].

Lorsque la matrice polymère est soumise à une température élevée, différents phénomènes de dégradation thermochimique peuvent se produire, se traduisant par une modification de la structure chimique du matériau. Par exemple, la pyrolyse, obtenue à des températures aussi basses que 185ºC, caractérise la décomposition par seul effet de la chaleur [62]. On peut aussi mentionner la thermo-oxydation, où la présence d'oxygène vient abaisser la température à partir de laquelle la dégradation thermique commence [64]. Finalement, la combustion se caractérise par une oxydation complète des matériaux en présence. Une analyse plus détaillée de ces différents processus de dégradation thermochimiques du caoutchouc est présentée dans la section 5.3.3 de ce rapport.

Quel que soit le type de réaction chimique en jeu, une partie des produits incluent des gaz inflammables. Ces gaz, produits par la réaction de décomposition chimique, viennent contribuer

à l'augmentation de la pression dans le pneu due à l'expansion thermique de l'air initialement contenu dans ce pneu. En particulier, il a été calculé que la pyrolyse de 20g de caoutchouc produit une quantité suffisante de gaz pour créer une pression équivalente à la pression d'éclatement d'un pneu de camion [65]. Par ailleurs, ces gaz inflammables ont un point d'autoallumage aux environs de 430ºC [9]. En présence de plus de 5.5% d'oxygène et d'une concentration en gaz inflammables entre 1 et 8%, une explosion peut se produire, si la température à l'intérieur du pneu est supérieure à celle d'autoallumage des gaz [66].

Par ailleurs, la dégradation du caoutchouc libère également des poussières de carbone et de soufre. Dans le cas des poussières de carbone, la température d'autoallumage est de 200ºC [65] et de 190ºC dans le cas de celles du soufre [67]. Pour le soufre, le pourcentage contenu dans le pneu est situé entre 1 et 2 % en poids [60] et le taux minimal requis pour une explosion est de 30 mg/l [67].

Il faut ajouter également que la présence de matériaux étrangers combustibles ou inflammables dans le pneu peut favoriser ou accélérer la réaction chimique et l'explosion [68]**.** Rappelons à titre d'exemples trois types de contaminants possibles :

- les vapeurs d'essence aspirées par des compresseurs dont l'entrée d'air est située proche des pompes à essence ou autres sources d'air contaminées,
- l'huile de lubrification des compresseurs,
- des lubrifiants à base de produit pétrolier pour le montage des pneus.

5.3.3 Les phénomènes de dégradation physique et chimique

Nous regroupons dans cette section une revue des principales réactions chimiques pouvant contribuer à l'éclatement ou à l'explosion d'un pneu. De plus, nous présentons les phénomènes de vieillissement et de fatigue des pneus, de même que leurs principales causes, dont les effets peuvent influer significativement sur les conditions de l'éclatement d'un pneu.

5.3.3.1 Réactions chimiques

Trois réactions de dégradation thermochimique ont été identifiées comme pouvant se produire dans le pneu chauffé : la pyrolyse, la thermo-oxydation et la combustion.

5.3.3.1.1 La pyrolyse

La pyrolyse ou thermolyse est définie comme la décomposition d'un corps par la chaleur [69]. Plus précisément, il s'agit d'un clivage non catalysé d'une ou de plusieurs liaisons covalentes d'un matériau sous l'effet d'une augmentation de la température [70]. Cette réaction se produit soit en l'absence d'oxygène, ou soit dans une situation où l'apport d'oxygène est limité par diffusion, par exemple dans l'épaisseur du matériau [64].

Au niveau moléculaire, ce qui se produit est que, sous l'effet d'une augmentation de la température, les liaisons chimiques sont soumises à une excitation vibrationnelle. Elles se rompent lorsque l'énergie correspondant à cette excitation vibrationnelle est supérieure à l'énergie de dissociation de la liaison chimique. Par exemple, la liaison de réticulation d'un caoutchouc vulcanisé C-S-C a une température de dissociation anaérobique de 160ºC [26]. Le cas le plus fréquent est la rupture des liaisons avec l'hydrogène donnant naissance à des radicaux libres [64]. La dégradation se poursuit alors par propagation en chaîne du processus radicalaire comme illustré dans la Figure 5.3.3-1 où RH et R'-R'' représentent les chaînes polymériques.

Initiation : $RH \xrightarrow{T} R^{*} + H^{*}$

Propagation: $R'-R''+H^{*} \rightarrow R'H + R''^{*}$

Terminaison: $R''^{*}+H^{*} \rightarrow$ *produits inactifs*

Figure 5.3.3-1 Schématisation des étapes de réaction de la pyrolyse

D'une manière générale, les phénomènes qui peuvent se produire lors d'une réaction de pyrolyse sont la coupure aléatoire des chaînes, la dépolymérisation, la réticulation, la modification des groupes latéraux ainsi que des réactions impliquant les additifs et impuretés [64]. Dans le cas d'élastomères réticulés à l'aide du soufre, il a été observé, à des températures entre 100 et 180ºC, une légère augmentation du module d'Young attribuée à un accroissement de la densité de liaisons dans le réseau, puis entre 180 et 220ºC, une chute brutale du module à cause d'une destruction des liaisons réticulaires soufrées par déshydrogénation [54]. Jusqu'à 430ºC, le matériau constituant la matrice polymère du pneu se dissocie en larges agrégats de molécules par rupture des liaisons faibles ou dépolymérisation, tandis qu'au dessus de 430ºC, ces agrégats sont transformés en composés stables détectables par chromatographie [71].

Par ailleurs, des études par thermogravimétrie de la pyrolyse de matériaux de pneus de camion ont mis en évidence une température de réaction initiale aussi basse que 185ºC, laquelle varie inversement avec la vitesse de chauffe [62]. De plus, des analyses de la cinétique de pyrolyse des matériaux de pneu ont révélé trois réactions distinctes [62,63,72,73,74,75] : entre 185 et 310ºC, un pic large correspond à la dégradation des différents additifs organiques; ensuite, un pic étroit centré à 380ºC est associé à la décomposition du caoutchouc naturel; finalement, un dernier pic se manifeste entre 350 et 490ºC, et est attribué au deuxième caoutchouc en présence, soit du caoutchouc butadiène à 465ºC, soit du caoutchouc styrène-butadiène à 444ºC.

Lorsque le matériau est laissé suffisamment longtemps à une température assez élevée, il est décomposé en molécules plus petites et moins complexes. Les produits de la pyrolyse du pneu ont été étudiés extensivement dans le cadre de projets visant à recycler et valoriser les pneus usés [59,60,61,63,74,76,77,78] et se classent en trois catégories : des matières solides (35 à 40% en poids hors renforts aciers et textiles), des huiles (38 à 55%) et des gaz (10 à 30%).

Les résidus solides sont composés de fines particules de noir de carbone, de cendres et d'autres matériaux inorganiques comme de l'oxyde de zinc, des carbonates et des silicates, incluant environ 1% en poids de soufre. Leur valeur calorifique se situe autour de 30 MJ/kg.

Les résidus huileux de la pyrolyse de pneu sont un mélange complexe de composés organiques avec 6 à 24 carbones. On peut mentionner le toluène, les benzènes, les diméthylcyclohexènes, les xylènes, le styrène, le méthyloctène et le limonène, avec une majorité d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques. La valeur calorifique des résidus huileux est située entre 40 et 42 MJ/kg, valeur supérieure à celle spécifiée pour les huiles de chauffage commerciales [59].

Les gaz issus de la pyrolyse de la matrice polymère constituant le pneu sont composés principalement d'alcanes et d'alcènes, avec un nombre de carbones variant de un à cinq [76]. Leur valeur calorifique se situe entre 35 et 40 MJ/m^3, comparable à celle du gaz naturel (37 MJ/m^3).

5.3.3.1.2 La thermo-oxydation

Lorsqu'un matériau est soumis à une élévation de température en présence d'une quantité d'oxygène insuffisante pour une combustion complète, on parle de combustion sous-stœchiométrique ou thermo-oxydation [76]. Par rapport à la pyrolyse, la température à laquelle la dégradation commence peut être fortement diminuée et la réaction présente alors une plus forte exothermicité [66].

Il faut néanmoins noter que, même en présence d'oxygène, les réactions de pyrolyse et de thermo-oxydation peuvent coexister, d'une part parce que les processus non-oxydatifs sont très rapides, et d'autre part, parce que la réaction de thermo-oxydation est contrôlée par la diffusion de l'oxygène. Par exemple, une étude par thermogravimétrie de la décomposition de caoutchouc styrène-butadiène a montré l'apparition progressive dans la dérivée de la perte massique en fonction de la température d'un second pic autour de 500ºC, lorsque la proportion d'oxygène dans l'azote est augmentée, le premier pic correspondant à la réaction de pyrolyse dans une atmosphère d'azote pur devenant plus étroit et plus haut [79].

Les différentes étapes de la réaction de thermo-oxydation sont schématisées dans la Figure 5.3.3-2, où *R* est une molécule organique quelconque (une impureté ou un groupement du polymère) permettant la création de radicaux libres sous l'effet de la température et *PH* est le polymère. À basse température, l'absorption de l'oxygène est globalement linéaire dans le temps, mais le processus devient autocatalytique à plus haute température, c'est-à-dire qu'un radical libre donne naissance à trois radicaux libres selon la réaction : $H^{\bullet} + O_2 \rightarrow OH^{\bullet} + {}^{\bullet}O^{\bullet}$ [80].

Initiation : $R \xrightarrow{T} R^*$

Propagation: $R^* + O_2 \rightarrow RO_2^*$

$PH + RO_2^* \rightarrow RO_2H + P^*$

Terminaison: $PO_2^* + PO_2^* \rightarrow produits\ inactifs$

Figure 5.3.3-2 Schématisation des étapes de la réaction de thermo-oxydation [61]

L'oxydation seule provoque des modifications structurales à la fois à la surface et dans le volume du caoutchouc vulcanisé [80]. En particulier, les caoutchoucs de type diène sont particulièrement sensibles à l'effet de l'oxygène à cause de leurs doubles liaisons libres. Dans le cas du caoutchouc naturel, un faible taux d'oxydation produit une rupture des chaînes moléculaires et un relâchement du réseau réticulaire, tandis qu'une plus forte oxydation provoque un durcissement et une fragilisation. Dans le cas des caoutchoucs styrène-butadiène et butadiène, seule la cyclisation se produit, induisant un durcissement.

Plusieurs métaux lourds peuvent agir comme catalyseurs de la réaction d'oxydation dans les caoutchoucs [80]. En particulier, dans le cas du caoutchouc naturel, les composés à base de cuivre ou de manganèse, même sous forme de trace (0.001%), accélèrent le phénomène d'auto-oxydation. Pour le caoutchouc styrène-butadiène, surtout les composés à base de fer (Fe^{++}), mais aussi de cobalt et de nickel, accélèrent la réaction.

En ce qui concerne la température initiale de thermo-oxydation des caoutchoucs, certains mentionnent des températures de service plus basses en présence d'oxygène, soit 100ºC pour le caoutchouc naturel et le caoutchouc styrène-butadiène, par rapport à une dégradation thermique en atmosphère inerte [26]. Par ailleurs, d'autres auteurs rapportent des résultats montrant qu'à basse vitesse de chauffe, la température initiale de réaction pour le caoutchouc styrène-butadiène augmente lorsque la quantité d'oxygène par rapport à celle de l'azote passe de 0 à 20%, alors qu'elle semble diminuer, lorsque la vitesse de chauffe est plus élevée [79].

De la même façon que pour la pyrolyse, les produits de la réaction de thermo-oxydation des pneus se classent en trois catégories : des solides, des huiles et des gaz. Des auteurs rapportent une augmentation de la production de gaz de 22% à plus de 40%, lorsque la proportion d'oxygène dans l'azote passe de 0 à 11,5%, au détriment des résidus solides et huileux [81]. Par ailleurs, certains gaz sont produits uniquement par thermo-oxydation et non par pyrolyse, soit le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone, l'hydrogène et le dioxyde de soufre [76]. En ce qui concerne les résidus solides et huileux, la signature de la thermo-oxydation des élastomères est constituée des radicaux peroxydes ($R\text{-}OO^*$), lesquels sont décomposés en groupements hydroxyles (-OH) et carbonyles (C=O) [82].

5.3.3.1.3 La combustion

La combustion intervient lorsque suffisamment d'oxygène est fourni pour oxyder complètement les espèces en présence. Elle se manifeste par une diminution rapide des propriétés mécaniques,

un dégagement de gaz, de fumées et de suies, une diminution de la concentration en oxygène et une augmentation de la température [83].

Le processus de combustion peut être subdivisé en quatre étapes. Entre 200 et 480ºC se produit une réaction similaire à la pyrolyse. Une analyse cinétique approfondie a révélé que les paramètres de cette première étape diffèrent légèrement de ceux d'une pyrolyse menée en présence d'un gaz inerte à cause de la présence de l'oxygène [84]. En particulier, la température de réaction diminue quand la concentration en oxygène augmente. Ensuite, les résidus carbonés de cette première réaction sont oxydés entre 480 et 500ºC. Une troisième réaction se produit entre 600 et 650ºC, quand les résidus inorganiques sont décomposés à leur tour. Finalement, la combustion du carbone solide commence à 800ºC [85].

Les résidus de la combustion de la matrice polymère de pneu sont uniquement constitués de cendres et de gaz [84,86]. Si la combustion est complète (conditions idéales), les résidus gazeux sont composés uniquement de dioxyde de carbone, de dioxyde de soufre, d'azote et d'eau. Dans les cas où la combustion n'est pas parfaite, du monoxyde de carbone et du monoxyde d'azote peuvent également être présents.

5.3.3.1.4 Analyse des données disponibles obtenues d'un cas d'accident mortel

Dans un cas d'explosion de pneu suite à la défaillance du système de freinage ayant provoqué une surchauffe (dossier CSST ED003364), le spectre infrarouge d'une section de la surface interne du pneu explosé présentant un aspect poreux a été obtenu par la compagnie d'expertise BEI chargée de l'analyse des pièces à conviction. Il est inclus dans le rapport d'expertise et peut être comparé à celui obtenu pour une section non endommagée du pneu [87].

Dans les spectres de la zone non endommagée et de celle poreuse, les pics caractéristiques du caoutchouc styrène butadiène ont été identifiés. Par contre, dans le cas de l'échantillon poreux, une série de pics intenses additionnels se manifeste entre 1365 et 1465 cm^{-1}. Même si des études plus approfondies eurent été nécessaires pour que des conclusions soient tirées quant à la nature exacte des produits de réaction créés lors de cet événement, il est néanmoins possible d'identifier un processus de scission de chaîne, mis en évidence par exemple par le pic à 1428 cm^{-1} correspondant aux liaisons $S\text{-}CH_2$ et $S\text{-}CH_3$, ou par celui à 1465 cm^{-1} pouvant être associé aux groupements CH_3 [88].

5.3.3.2 Phénomène de vieillissement des pneus

Deux types de vieillissement peuvent être identifiés pour les polymères :

- Le vieillissement physique, où aucune altération de la structure chimique n'est observée. Il peut se manifester par des phénomènes de cristallisation secondaire, de relaxation structurale dans les polymères amorphes ou de fatigue statique ou dynamique, par exemple [89,90].
- Le vieillissement chimique, appelé aussi dégradation, qui correspond à une modification de la structure chimique du polymère [91].

5.3.3.2.1 Mécanismes du vieillissement chimique du caoutchouc

Différents processus de vieillissement chimique ont été mis en évidence dans le cas du caoutchouc [21,80]. Les agents de vieillissement sont environnementaux et incluent l'oxygène, la température, l'eau, l'ozone et la lumière.

5.3.3.2.1.1 Vieillissement par oxydation

Pendant l'oxydation du caoutchouc vulcanisé, les premiers produits de la réaction sont les hydroperoxydes, qui se décomposent à nouveau en radicaux libres pour commencer une nouvelle réaction dans la chaîne et qui peuvent aussi réagir avec les doubles liaisons du caoutchouc [80]. À basse température, l'absorption d'oxygène est presque linéaire, mais lorsque la température augmente, la réaction devient autocatalytique et s'accélère fortement.

En général, les caoutchoucs vulcanisés à base de caoutchouc naturel, de caoutchouc isoprène et de caoutchouc isobutylène-isoprène subissent majoritairement des réactions de coupure de chaînes pendant l'oxydation, ils ont donc tendance à devenir plus souples. Par contre, ceux obtenus à partir de caoutchouc styrène-butadiène, de caoutchouc nitrile-butadiène, de caoutchouc polychloroprène et de caoutchouc de diène non conjugué éthylène–propylène subissent plutôt une réaction de cyclisation qui conduit au durcissement de la partie vieillie [80]. Les caoutchoucs qui ne contiennent pas de diènes dans leur structure sont moins enclins à l'oxydation.

En général, les études de vieillissement effectuées sur des formulations typiques de celles utilisées dans les pneus rapportent comme effet net de l'oxydation un durcissement du caoutchouc, le signe de la prépondérance du mécanisme de réticulation [92, 93, 94, 95, 96].

5.3.3.2.1.2 Vieillissement thermique en absence d'oxygène

En l'absence d'oxygène, plusieurs réactions peuvent avoir lieu sous l'effet de hautes températures, éventuellement en présence d'eau ou d'huile [80]:

- Décomposition thermique des réticulations et hydrolyse des structures sensibles à l'eau (polyesters, polyamides, polyimides, etc.), se traduisant par un ramollissement.
- Poursuite de la formation de réseaux inter et intramoléculaires, qui conduit à un durcissement.
- Déplacement des liaisons sans changement de leur nombre.

5.3.3.2.1.3 Vieillissement par ozonation

Les caoutchoucs vulcanisés contenant des doubles liaisons peuvent développer des craquelures lorsqu'ils sont soumis à une sollicitation statique en extension dans un environnement atmosphérique contenant de l'ozone, même en faible quantité [21,80,97]. Ces craquelures sont orientées perpendiculairement à la direction de la contrainte appliquée. La vitesse de formation des craquelures dépend fortement de la température et du taux d'humidité de l'air. Le mécanisme proposé pour expliquer cette action de l'ozone sur les caoutchoucs est la coupure de chaînes [98].

5.3.3.2.1.4 Action de la lumière du soleil

Ce phénomène se produit lors d'une exposition prolongée du caoutchouc à la lumière solaire [31]. L'addition de noir de carbone ou d'absorbeurs d'UV élimine ce phénomène de vieillissement, qui se traduit par l'apparition de petites craquelures sans orientation préférentielle à la surface du matériau [99].

5.3.3.2.2 Les adjuvants contre le vieillissement du caoutchouc

Afin de limiter les effets du vieillissement du caoutchouc sur les propriétés en service des pneus, différents produits chimiques sont ajoutés au mélange au cours de la fabrication :

- les stabilisants qui limitent le phénomène de réversion,
- les antioxydants qui agissent soit sur les radicaux libres ou sur les hydroxydes,
- les anti-ozonants qui limitent l'action de dégradation par l'ozone,
- les absorbeurs d'UV qui réduisent l'action du soleil.

Une présentation plus complète de ces adjuvants est donnée en annexe A.

5.3.3.2.3 Mécanismes de dégradation liés aux fibres de renfort

Les pneus sont des structures composites dont la matrice caoutchouc est renforcée par des fibres textiles et des câbles en acier. Actuellement, les fibres textiles sont principalement faites de matériaux synthétiques, le nylon 6 et 66 et le polyester étant les plus utilisés [100]. Elles sont sensibles au vieillissement chimique entre autres et peuvent subir des dégradations de type thermochimique à cause de la chaleur générée sous sollicitation dynamique par le composite viscoélastique que constitue un pneu [100]. Par ailleurs, l'adhésion entre les renforts et la matrice est, elle aussi, soumise à l'influence de différents agents de dégradation.

5.3.3.2.4 Effets du vieillissement sur les propriétés mécaniques des pneus

Différentes études ont été réalisées pour mesurer les effets du vieillissement sur les propriétés mécaniques des pneus. La majorité d'entre elles se sont intéressées indépendamment à la matrice caoutchouc et aux fibres de renfort, les tests étant effectués soit dans des conditions de vieillissement accéléré ou naturel.

Une observation générale quant aux différentes études trouvées dans la littérature est que les résultats quantitatifs et même qualitatifs de l'effet du vieillissement sur les propriétés mécaniques varient considérablement (jusqu'à un facteur 10) en fonction du type de pneu et de la composition de l'échantillon étudié [101]. Une généralisation est donc à considérer avec précaution.

5.3.3.2.4.1 Effets sur la matrice caoutchouc

Au niveau de la matrice caoutchouc, les propriétés qui sont le plus souvent rapportées sont, en mode statique, le module à 100, 200 et 300% d'élongation, la contrainte de rupture et

l'élongation à la rupture, et, en mode dynamique, le nombre de cycles à la rupture et le module dynamique.

La majorité des études sur les effets de la thermo-oxydation ont utilisé des procédures de vieillissement accéléré, soit un four avec circulation d'air [53, 92, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108]. Une étude importante [109] révèle l'importance de l'action de l'oxygène contenue dans le pneu sur le processus de dégradation oxydative du caoutchouc. D'autres auteurs ont mesuré des corrélations directes entre les propriétés de résistance en tension et d'élongation à la rupture et le taux d'oxygène contenu dans la chambre de vieillissement thermique [110].

En général, en ce qui concerne l'effet de l'ozone sur les propriétés mécaniques des matrices caoutchouc des pneus [92,97,105,111], les études montrent des disparités importantes entre les composés testés. Une évaluation de la dégradation par l'ozone en conditions de stockage naturel intérieur et extérieur réalisée aux États-Unis a montré l'effet dévastateur du stockage extérieur sans protection ainsi que des disparités importantes de dégradation selon la localisation géographique [97].

Les effets des rayons UV sur les propriétés mécaniques de formulations à base de caoutchouc butadiène-styrène peuvent être étudiés à l'aide d'un « weatherometer » en conditions accélérées [108]. Les résultats montrent une diminution majeure de la résistance en tension et de l'élongation après 72 heures d'exposition.

Dans la réalité, la matrice caoutchouc des pneus est généralement soumise simultanément à plusieurs agents de vieillissement chimique. Des auteurs ont mis au point différentes méthodes de vieillissement accéléré cycliques et dynamiques pouvant combiner les effets de la thermo-oxydation, de l'ozone, de la lumière ultraviolette, de l'étirement dynamique et de solutions aqueuses [92,93,105]. Selon ces conditions de vieillissement, des échantillons ont été soumis à une sollicitation en fatigue à raison de 18 heures par jour, sur un toit orienté plein sud (température en plein jour autour de 30ºC) près d'une autoroute en été dans l'état de l'Ohio avec un lavage à l'eau savonneuse une fois par semaine. On observe une augmentation initiale du module, similaire à l'effet du vieillissement par thermo-oxydation, suivie par une diminution en accord avec l'effet du vieillissement par ozonation.

5.3.3.2.4.2 Effets sur les renforts

Des mesures d'adhésion renfort/matrice ont été réalisées sur des pneus usés. Elles montrent que la région de l'épaulement du pneu, qui correspond aux contraintes et accumulations de chaleur les plus élevées, présente la plus grande détérioration de l'adhésion des renforts avec la matrice [112]. Par ailleurs, l'âge du pneu semble avoir un effet marqué sur la qualité des propriétés d'adhésion des renforts, surtout pour les pneus de type radial [111].

Lambillotte et Gibson [113] ont étudié l'effet combiné du vieillissement thermo-oxydatif et de sollicitations mécaniques dynamiques (appliquées successivement) sur la force d'adhésion entre les câbles de renfort en acier et la matrice en caoutchouc. On y observe une augmentation de la perte de résistance par l'effet des sollicitations mécaniques.

5.3.3.2.4.3 Effets du vieillissement en service

Dans une étude, l'effet de l'âge des pneus sur leur endurance à charge incrémentielle mesurée à l'aide d'un dynamomètre a été évalué et montre que les pneus de type diagonal conservent une majeure partie de leurs performances jusqu'à une durée de 20 ans, alors que les pneus radiaux vieillissent beaucoup plus rapidement [111].

Une analyse très poussée de l'effet du vieillissement en service a été réalisée sur des pneus ayant été utilisés dans six grandes villes américaines présentant des conditions climatiques et environnementales très différentes, soit Détroit, Phoenix, Los Angeles, Hartford, Miami et Denver [114]. Une première conclusion révèle que l'âge du pneu a plus d'effet sur la dégradation des propriétés mécaniques que le kilométrage, c'est-à-dire que la fatigue mécanique a une faible influence sur les propriétés mécaniques des pneus par rapport au vieillissement chimique [115].

Une autre conclusion majeure de cette étude concerne la proportion relative de l'influence des différents facteurs de vieillissement environnementaux. En comparant les taux de dégradation obtenus pour les six villes où ces pneus ont été utilisés, les auteurs observent que la vitesse de dégradation est maximale dans les villes les plus chaudes, et minimale dans celles plus froides, indépendamment du taux d'ozone atmosphérique et du taux d'humidité [101]. La température ambiante apparaît donc comme le facteur déterminant dans le processus de vieillissement des pneus en service, par rapport aux autres facteurs environnementaux ainsi qu'à la fatigue mécanique.

5.3.3.3 Fatigue

La fatigue agit en tant que facteur déterminant de la durée de vie des pneus. En effet, lorsque le véhicule sur lequel ils sont montés est en mouvement, les pneus sont soumis à une sollicitation cyclique dans laquelle chaque point du pneu subit une déflection à chaque tour ou cycle du pneu en conséquence de la contrainte nette exercée. Ce type de sollicitation est équivalent à une sollicitation en fatigue dans laquelle chaque point du pneu parcourt tout le domaine des contraintes une fois par cycle. En pratique, un pneu de camion standard dont le diamètre de roulement est de 41 pouces fait environ 15 millions de cycles tous les 50 000 kilomètres (distance représentative du kilométrage annuel moyen pour un véhicule commercial, tous types confondus). Par conséquent, l'usure et la dégradation des propriétés mécaniques causées par cette sollicitation dynamique peuvent être importantes.

Par ailleurs, le cisaillement causé par le cyclage mécanique induit dans le caoutchouc la formation de radicaux libres macro-alkyles [116]. En présence d'oxygène, certains de ces radicaux macro-alkyles réagissent pour former les radicaux alkylperoxyles, qui participent au processus de dégradation oxydative du caoutchouc : le phénomène de vieillissement par fatigue peut donc aggraver la dégradation du caoutchouc causée par l'oxydation. Un exemple concret a été mis en évidence dans le cas des pneus de SUV Firestone ayant fait l'objet d'un rappel majeur en raison de défaillances catastrophiques par délamination des nappes du sommet formant la ceinture [117]. En effet, la cause de cette délamination a pu être attribuée à une fatigue thermo-mécanique sévère causée par la combinaison d'une trop grande élongation en cisaillement cyclique entres les nappes du sommet générant une chaleur anormalement élevée et une forte sensibilité du caoutchouc à la dégradation thermo-oxydative.

D'autres auteurs ont étudié par thermographie infrarouge les profils de température de surface correspondant à la chaleur générée par des sollicitations cycliques en compression et en tension simulant la fatigue [118]. Ils ont mis en évidence la relation entre le comportement de propagation des fissures créées par la fatigue et les gradients de température autour de celles-ci.

5.3.3.3.1 Facteurs influant sur la fatigue

La fatigue mécanique est définie comme la formation et la croissance de fissures au sein d'un matériau conséquemment à l'application d'une contrainte fluctuante. Il faut différencier la fatigue causée par la vie en service du pneu, et les essais de fatigue développés en laboratoire.

Dans le premier cas, une grand nombre de facteurs interviennent, comme la pression de gonflement, la contrainte appliquée, la vitesse, les accélérations (longitudinale, latérale, verticale), la largeur de la jante, le type de surface de la route et le climat [119,120,121]. Un consensus s'établit selon les auteurs pour identifier la pression de gonflement, la vitesse, les contraintes exercées (souvent données sous forme de déflection du pneu) et surtout la température, comme étant les facteurs les plus importants en ce qui concerne la fatigue. En effet, la propagation de la rupture lors d'une sollicitation en fatigue est contrôlée par la température, étant donné que l'énergie de déchirement, qui détermine la propagation d'une fissure pour les composés en caoutchouc, dépend de la densité d'énergie élastique qui est à son tour fonction de la température [120]. Par conséquent, la température peut être exprimée comme une fonction des autres paramètres, une caractéristique exploitée pour la construction des diagrammes d'état utilisés pour connaître les conditions de service d'un pneu.

D'autres aspects exercent une influence sur l'histoire du chargement mécanique comme la période de repos sous déformation statique, la séquence de sollicitation, la multiaxialité des contraintes au cours de l'expérience ou la forme et la fréquence de la sollicitation [122]. L'effet de chacun des paramètres suivants sur le comportement en fatigue du caoutchouc est détaillé à l'annexe A.

En plus des facteurs cités ci-dessus, d'autres sont communs tant à la fatigue produite en service qu'aux essais en laboratoire, par exemple les facteurs environnementaux tels que la température, l'ozone et l'oxygène. D'autres facteurs influents sont liés à la formulation du caoutchouc tels que le type de polymère, les adjuvants, les antidégradants et la vulcanisation. Enfin, certains facteurs sont associés au comportement constitutif du caoutchouc comme l'effet Mullins, la cristallisation sous déformation et l'hystérésis.

5.3.3.3.2 Analyse de la fatigue produite par la mise en service des pneus

À notre connaissance, une seule équipe de chercheurs s'est intéressée à étudier la fatigue produite par l'utilisation « réelle » des pneus [123,124]. Leur objectif était de comparer différentes formulations de caoutchouc et leurs performances lors d'un test en fatigue réelle. Des détails supplémentaires sont présentés à l'annexe A.

5.3.3.3.3 Facteurs influant sur la fatigue des cordes et des fibres de renfort

Holt décrit les différents facteurs qui influencent la vie en fatigue des cordes en acier utilisées comme renfort dans les pneus [125], soit les conditions d'opération des pneus, le mécanisme de fatigue, les propriétés des filaments de la corde, la configuration des filaments dans la corde (enroulement spiral), l'adhésion avec le caoutchouc, le recouvrement en laiton et la formulation du caoutchouc.

Klein et al. ont mené une étude sur des pneus contenant trois différentes fibres de renfort en polymères, faites en viscose et nylon [126]. Les auteurs ont déterminé que la zone de plus faible résistance mécanique est la zone de flexion (épaulement). Il a été observé que la distance parcourue n'avait pas une influence importante sur la résistance mécanique des fils individuels. Leurs conclusions sont les suivantes :

- La fatigue des cordes ne correspond pas à une dégradation consistante de la résistance mécanique en tension; au contraire, le processus de fatigue est très rapide une fois commencé.
- Après une perte initiale de résistance mécanique, les auteurs ont montré l'existence d'une longue période de résistance constante.
- Les propriétés en tension se dégradent à un taux lent.
- La rupture des fibres se produit essentiellement dans la zone de flexion.
- L'endommagement des fibres est accompagné d'un endommagement local important du caoutchouc.
- Le profil de déflection s'améliore lorsque la distance parcourue et la pression de gonflement augmentent.

Naskar et son groupe [127] ont montré que les fibres en polyester généraient une quantité de chaleur plus importante, ce qui se traduisait par une réduction des propriétés en fatigue. Par contre, les fibres en nylon 66 montraient une résistance en fatigue excellente, même à haute déformation. Nkiwane et al. ont également étudié la fatigue des fibres en nylon 66 [128]. Les auteurs ont montré qu'au fur et à mesure que la contrainte augmente, la vie en fatigue des cordes diminue de manière exponentielle.

5.3.4 Importance relative des phénomènes, les risques et les conséquences

Dans cette section, nous examinons à partir d'une expérimentation d'explosion de pneu réalisée par la compagnie Michelin U.S., l'importance relative du phénomène d'expansion thermique et de réaction chimique, de même que ce qui caractérise les risques et les conséquences de ces deux phénomènes.

Dans cette expérience contrôlée, il s'agit d'un apport de chaleur intense à la jante. Cette expérimentation vise à illustrer les dangers et les conséquences de souder sur une jante lorsque le pneu y est installé. En relevant des mesures de température, de pression et de temps sur un film

fourni gracieusement par Michelin[j], nous pouvons illustrer ce qui se produit lors d'un apport de chaleur intense comme dans les cas de soudure. Cette expérience permet aussi de mieux comprendre ce qui doit se produire dans d'autres cas d'apport de chaleur à la jante comme lors de blocage de frein. L'accident du 2 avril 2004 (voir Tableau 5.1.1-1 Synthèse des rapports d'enquête de la CSST de 1990 à 2004 le dossier réf. no 3487) est un exemple type d'explosion à la suite d'un apport de chaleur intense causé par un blocage de frein.

5.3.4.1 Résultats et analyse de l'expérimentation réalisée par Michelin

Une expérience contrôlée d'explosion d'un pneu par chauffage au chalumeau de la jante a été réalisée par Michelin. La Figure 5.3.4-1 illustre le montage utilisé. Un pneu de camion monté sur une roue est installé sur un banc d'essai. La soudure s'effectue à l'aide d'un robot contrôlé à distance. Cette expérience a fourni les données de pression et de température de l'air dans le pneu ainsi que de temps présentées dans les Figures 5.3.4-2 et 5.3.4-3. L'apport de chaleur a duré 35 secondes, correspondant aux deux premiers points de chaque courbe. On peut voir sur la Figure 5.3.4-2 que la courbe des valeurs mesurées s'écarte de la droite correspondant à l'unique effet de l'expansion thermique de l'air contenu dans le pneu à partir d'une température interne dans le pneu de 97ºC. Ceci semble donc indiquer que la première phase de la réaction chimique a commencé à une température de l'air dans le pneu de 97ºC. D'autres tests sont nécessaires pour reproduire ce résultat et établir quelle est la valeur de température initiale de réaction de la matrice polymère (différente de la température interne du pneu) pour différentes compositions de pneus et pour les différentes vitesses d'apport de chaleur au système correspondant aux diverses situations identifiées comme pouvant mener potentiellement à une explosion ou à un éclatement.

On observe sur la Figure 5.3.4-3 que la température demeure relativement stable pendant près de deux minutes. Elle augmente ensuite très rapidement, en parallèle avec la pression. La Figure 5.3.4-2 montre que la variation de la pression en fonction de la température au dessus de 97ºC, qui combine les effets de l'expansion thermique de l'air initialement dans le pneu et de la réaction de dégradation chimique du matériau du pneu, possède elle-aussi un comportement linéaire. Or, une telle dépendance linéaire de la quantité de gaz produits en fonction de la température de la réaction a été mis en évidence tant pour la pyrolyse que pour la dégradation par thermo-oxydation des pneus [74, 81]. Ceci confirme donc la justesse de l'attribution de cette augmentation plus rapide de la pression et de la température dans le pneu au dessus de 97ºC à un processus de dégradation chimique du matériau du pneu s'ajoutant à l'expansion thermique de l'air.

---

j Nous avons obtenu ce film, utilisé lors de formations, grâce à M. Benoit Plamondon - Gérant du département Poids lourd et à M. Paul Labadie - Représentant sur la route pour le Centre de camion Desharnais à Québec.

Début de la soudure

Juste avant la fin de la soudure

Bras du robot soudeur relevé à la fin de la soudure

Explosion

Projection du pneu

État du pneu après l'explosion

Figure 5.3.4-1 Banc d'essai expérimental d'une soudure sur jante avec pneu monté sur la roue

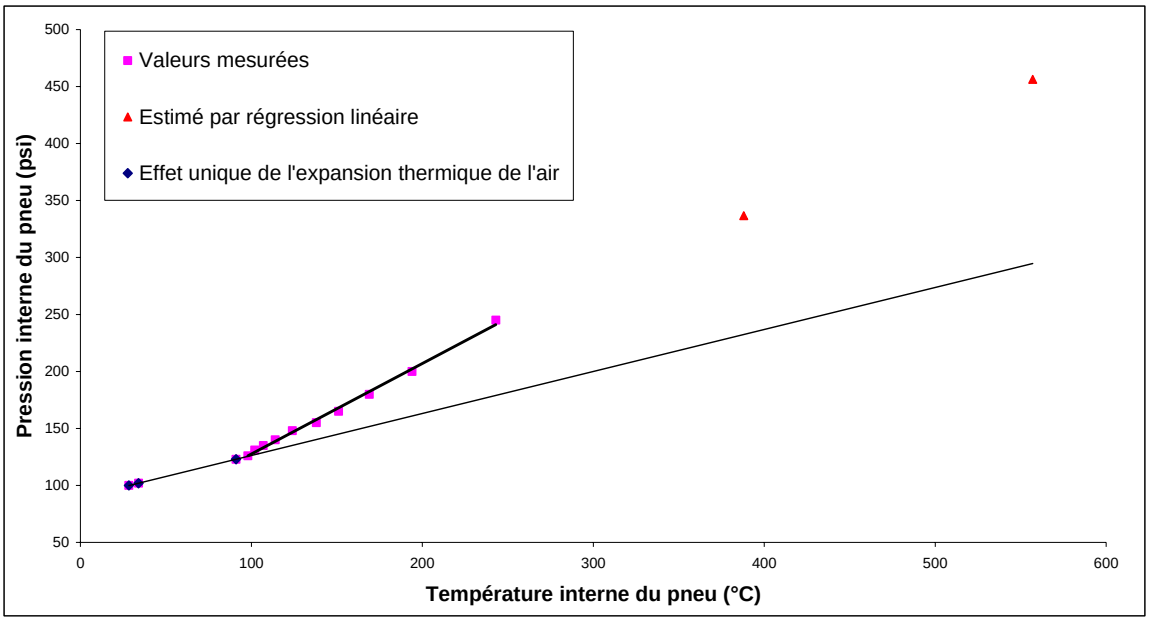


Figure 5.3.4-2 Variation de la température en fonction de la pression interne d'un pneu lors d'une expérience contrôlée d'explosion par chauffage au chalumeau de la jante

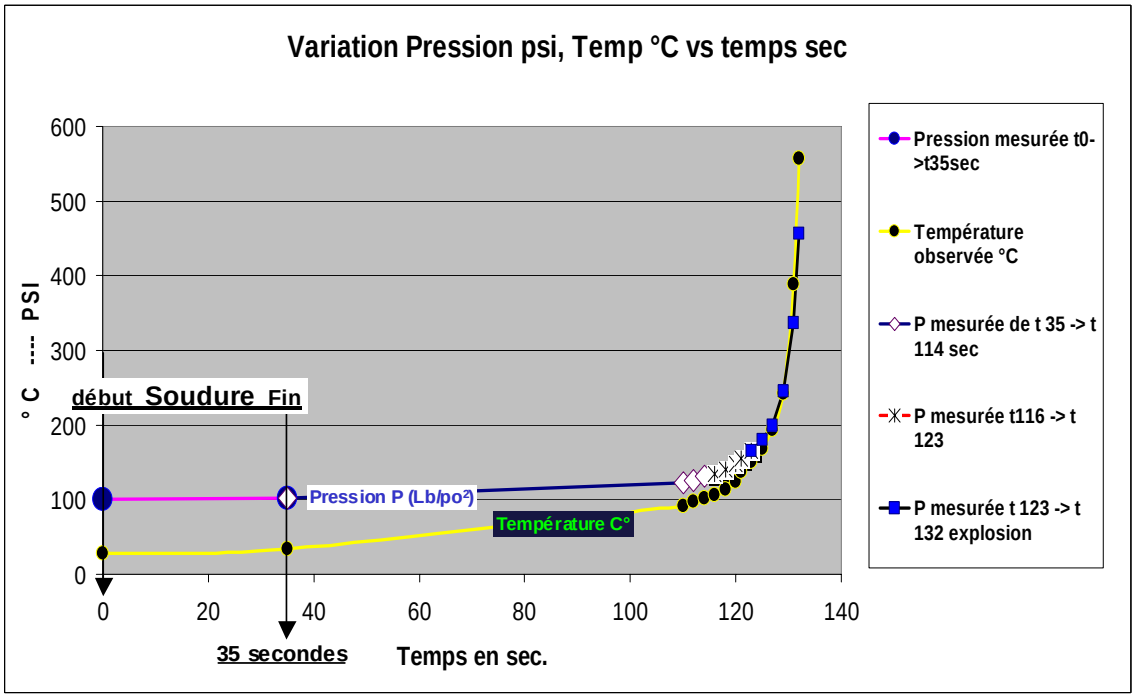


Figure 5.3.4-3 Variation de la température et de la pression internes d'un pneu en fonction du temps lors d'une expérience contrôlée d'explosion par chauffage au chalumeau de la jante

5.3.4.2 Analyse du délai de réaction

La chaleur qui est appliquée sur la jante peut prendre un certain temps avant de diffuser dans le pneu et d'échauffer la totalité des gaz contenus dans celui-ci. Le fait que le caoutchouc soit un mauvais conducteur de chaleur (conductivité thermique autour de 0,2 $W.m^{-1}.K^{-1}$ [54]) peut entraîner une accumulation de chaleur qui, à partir d'un certain temps, fournit assez d'énergie pour que la réaction de dégradation chimique de type exothermique s'accélère de façon exponentielle, comme le montre la Figure 5.3.4-3, soit environ 1,5 minute après l'interruption de la source de chaleur.

L'analyse du rapport d'enquête de la CSST [129] de l'accident survenu à un camionneur en avril 2004 montre que ce dernier avait immobilisé son véhicule en bordure de la route lorsqu'il s'était rendu compte d'un problème au système de freinage (Figure 5.3.4-4). Constatant que la roue arrière de son tracteur est complètement bloquée, il communique avec son répartiteur qui lui envoie un second véhicule. Le conducteur du second véhicule arrive vers 9h15 et prend en charge de procéder à la réparation du système de freinage. Il est établi que ce travailleur a communiqué avec son collègue à 9h59, soit 44 minutes après son arrivée. En faisant une estimation de l'ensemble des délais depuis le moment où le véhicule a été immobilisé, on obtient un délai supérieur à une heure entre le moment où la chaleur se transmet au pneu et le moment de l'explosion. On peut constater sur la Figure 5.3.4-4 la force de destruction du souffle, qui a projeté le travailleur sur le différentiel du tracteur routier.

Dans la situation de l'expérimentation réalisée par Michelin, il s'agit d'un délai relativement court. Cependant, dans le second cas, même si le pneu pouvait sembler relativement chaud, il n'y avait aucun signe permettant au travailleur de connaître l'ampleur du risque auquel il s'exposait.

De plus, dans le cas où de la chaleur est transmise au pneu, soit directement, soit par l'intermédiaire de la jante, un certain refroidissement peut être exercé par la circulation d'air provoquée par le déplacement du véhicule. À partir du moment où le véhicule s'immobilise, ce refroidissement cesse et la température continue éventuellement à monter, même si la source de chaleur a été désactivée [87]. Ce processus peut expliquer, en partie, certains cas comme celui décrit plus haut où l'explosion s'est produite alors que le véhicule était immobilisé depuis un certain temps.

Dans le cas où une réaction chimique se produit, même si, en apparence, la source de chaleur est désactivée (par exemple la surchauffe du frein), la dégradation thermique elle-même est exothermique et s'entretient sans apport de chaleur externe. De plus, ses conséquences ne se manifestent qu'une fois qu'ont été atteintes, soit la pression d'éclatement du pneu, soit la concentration critique en gaz inflammables, dans le deuxième cas les autres conditions nécessaires à l'explosion étant également réunies (température et présence d'oxygène) : la mauvaise conduction thermique du caoutchouc ne lui permet pas d'évacuer rapidement la chaleur en place et la réaction chimique peut se poursuivre, augmentant progressivement la concentration interne en gaz inflammables.

Photo A

Photo B

Photo C

Photo D

Figure 5.3.4-4 Photos de l'accident d'avril 2004 tirées du rapport d'enquête CSST DP14037975 [129]

Ce processus est illustré sur le graphique de la Figure 5.3.4-5. Dans la partie initiale de la courbe de température du pneu (courbe pleine à gauche), la montée puis la stabilisation de la température font partie du régime normal d'opération. Lorsqu'un apport de chaleur supplémentaire apparaît (marqueur 3), la température du pneu sort de son régime d'équilibre. L'arrêt du véhicule, correspondant au marqueur 5, se produit après le démarrage du processus de dégradation thermique du caoutchouc (marqueur 4) : la température continue pourtant à monter, d'une part à cause de l'arrêt du refroidissement par circulation d'air et d'autre part, à cause de la chaleur générée par la réaction de dégradation elle-même. En parallèle, la dégradation du caoutchouc génère des gaz inflammables, dont la variation de concentration dans le temps est représentée par la courbe en pointillé à droite. Si la température finit par redescendre d'elle-même, tout risque d'explosion n'est pas exclu. En effet, comme l'illustrent les parties finales des

courbes supérieures (traits plein et pointillé), si la température n'est pas descendue en-dessous de la température d'autoallumage avant que la concentration en gaz inflammables n'ait atteint sa valeur critique de concentration, l'explosion peut encore se produire si la concentration en oxygène est supérieure à 5,5%.

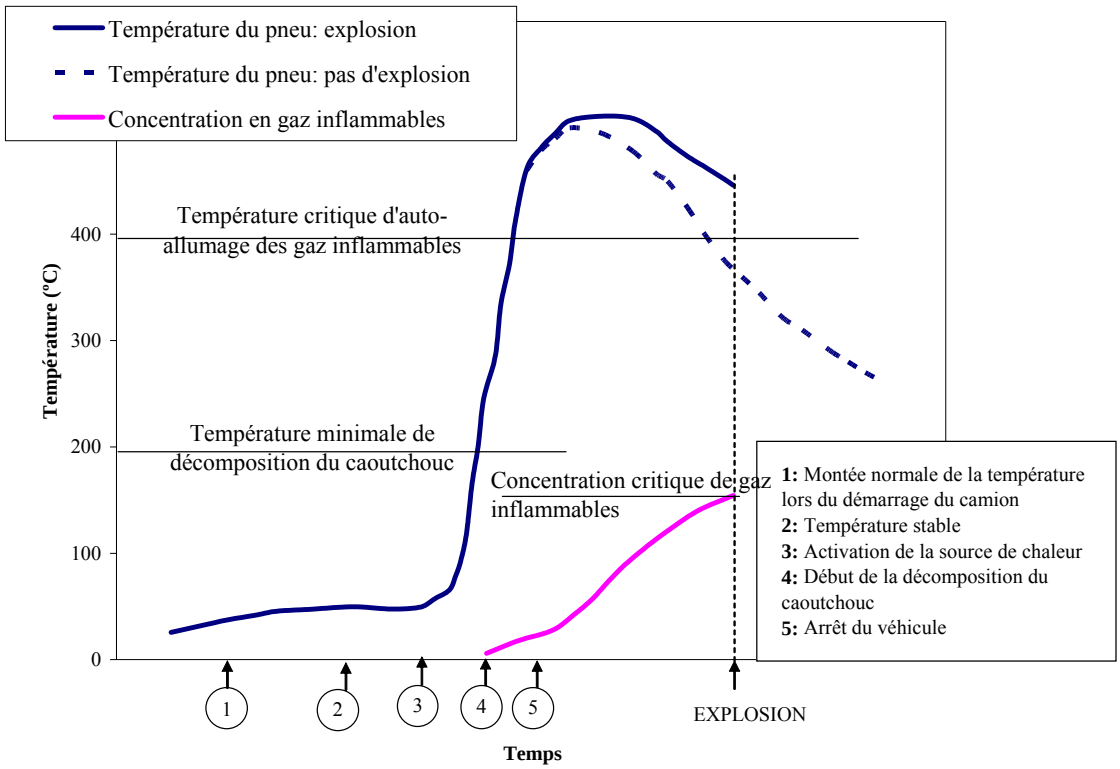


Figure 5.3.4-5 Séquence possible des événements lors de la surchauffe d'un pneu sur un camion (d'après [8])

Selon les niveaux d'énergie impliqués, il est possible de déterminer une certaine gradation dans les délais avant explosion [9]. En particulier, lorsqu'il s'agit de cas de foudre avec des tensions de l'ordre de plusieurs centaines de millions de volts, des courants allant jusqu'à 400 kA et des températures jusqu'à 15000 ºC, la dégradation du caoutchouc peut se produire simultanément sur une large surface interne du pneu, causant la génération immédiate de la concentration critique en gaz inflammables et par conséquent l'explosion. Par comparaison, lorsque les sources de chaleur sont de plus faible intensité, la dégradation s'effectue uniquement sur une petite surface du pneu immédiatement à proximité de la source de chaleur, et un laps de temps non négligeable peut être nécessaire avant que la concentration en gaz inflammables soit atteinte, comme cela semble s'être produit pour l'accident mentionné plus haut.

L'imprévisibilité (absence de signes distinctifs précis) combinée à un délai de latence plus ou moins important entre le moment de l'application de la chaleur et la conséquence potentiellement catastrophique amplifient considérablement l'importance du risque.

5.3.4.3 Conséquences

Selon le ou les phénomènes mis en jeu lors de la destruction du pneu, deux niveaux de dommages peuvent se produire. Dans le cas d'une expansion de l'air seule ou combinée avec une perte des propriétés mécaniques de la structure par des phénomènes de vieillissement physique, chimique ou par fatigue, on parle d'éclatement et les pressions en jeu sont de l'ordre de 100 à 150 lb/po^2 [9].

Par contre, si une réaction chimique se produit et provoque une explosion, les énergies impliquées sont de plusieurs ordres de grandeur plus élevés que dans le cas d'un éclatement. Les ondes de choc créées peuvent produire des pressions de plus de 1000 lb/po^2 dans le pneu, causant ainsi sa destruction [9].

Le diagramme de la Figure 5.2.2-2 à la page 29 illustre la suite des différents phénomènes pouvant mener à un éclatement ou à une explosion. À chaque séquence du processus, la destruction de la structure pneu/jante peut intervenir selon le niveau de pression auquel cette structure peut résister. Cette limite de la résistance est donnée en grande partie par l'histoire du pneu et de la jante, en particulier leur état d'usure respectif, la présence ou non de déformation et les effets du vieillissement sur les matériaux constitutifs.

Lorsque la pression limite de la structure a été atteinte, deux événements peuvent se produire. Si le point de faible résistance est le pneu, celui-ci éclate ou explose selon la valeur de pression. Par contre, si la jante a été endommagée, par exemple lors d'un usage en sous-pression ou à haute température, le pneu peut alors se déjanter.

Si le pneu et la jante résistent jusqu'à ce que les trois conditions critiques soient réunies, c'est-à-dire une température supérieure à la température d'autoallumage des espèces inflammables, une concentration suffisante de ces espèces inflammables et une concentration en oxygène supérieure à 5,5 %, alors le pneu explose.

5.3.5 Modèles disponibles sur le comportement du pneu dans différentes situations

Cette section présente les cinq types de modélisation suivants recensés dans la littérature scientifique :

1) Modélisation de la distribution de température normale dans un pneu
2) Modélisation de l'effet de la surchauffe d'un frein
3) Modélisation du phénomène de sous-gonflage
4) Modélisation du bris en service d'un pneu
5) Modélisation de l'éclatement en surpression

5.3.5.1 Modélisation de la distribution de température normale dans un pneu

Ebbott et al. [130] ont utilisé un modèle par éléments finis pour prédire la distribution de température en roulement de pneus de véhicules légers et de camions de taille moyenne. Tel que mentionné par Costa et al. [34], les modèles présentés montrent bien que la température maximale est enregistrée aux extrémités de la ceinture du pneu, sur la surface interne, à l'interface entre la bande de roulement et les flancs. La seconde zone de haute température se situe à l'intérieur du pneu, à l'interface entre la tringle et la structure du flanc. En comparant les données de Costa et al. avec celles de Ebbott et al., on peut estimer que, pour un pneu de camion standard, la zone de température maximale en roulement sous conditions de vitesse et de charge normales se situe aux extrémités de la ceinture d'acier, sur la face intérieure du pneu et avoisine 90ºC à 100ºC.

Park et coll. [131] ont également utilisé le logiciel ABAQUS pour modéliser par éléments finis la distribution de température en roulement dans un pneu de dimensions 205/60R15. Comme dans les autres cas, les températures les plus élevées sont localisées aux extrémités de la ceinture et vont de 75ºC à une vitesse de 60 km/h, jusqu'à atteindre plus de 90ºC à 120 km/h.

5.3.5.2 Modélisation de l'effet de la surchauffe d'un frein

De son côté, Costa [34] mentionne que la température moyenne normale de la tringle d'un pneu de véhicule lourd en fonctionnement devrait se situer aux environs de 90ºC. À l'aide de modélisations par éléments finis, il arrive à confirmer qu'en cas de surchauffe sévère d'un frein, la température de la tringle du pneu intérieur d'un assemblage double peut atteindre 130ºC à 150ºC. L'auteur mentionne également qu'à partir de 100ºC, la vie utile de la structure en composite à base de caoutchouc de la tringle est réduite de manière exponentielle avec l'élévation de la température.

5.3.5.3 Modélisation du phénomène de sous-gonflage

Il y a une incidence importante d'un mauvais gonflage sur l'hystérésis du pneu et donc sur l'augmentation de sa température en service. Selon Lin et Hwang [47], cette augmentation liée à une pression de gonflage insuffisante peut mener à une augmentation de la température de la carcasse du pneu de l'ordre de 50% (154ºC versus 103ºC). Ces données ont été obtenues à l'aide de modèles et simulations mathématiques. Ceci est valide pour des conditions de fonctionnement du pneu à haute vitesse, soit entre 100 et 120 km/h, ainsi que sous une charge nominale du véhicule. Selon les auteurs, lorsque combinée avec une surcharge du pneu, cette augmentation sera alors encore plus grande.

5.3.5.4 Modélisation du bris en service d'un pneu

Wei et al. [132] ont modélisé par éléments finis le bris en service d'un pneu en utilisant un modèle virtuel d'évaluation de bris mécanique appelé VCCT ou "Virtual Crack Closure Technique". En utilisant ce modèle, il est possible de prédire la vie en service d'un pneu avant le bris éventuel de son enveloppe selon le nombre de cycles de sollicitation. Le cas présenté par les auteurs a permis d'évaluer la durée de vie théorique du pneu modélisé à 9 898 355 cycles ou 15 000 km.

5.3.5.5 Modélisation de l'éclatement en surpression

Bolarinwa et al. [133] ont utilisé un modèle axisymétrique à deux dimensions par éléments finis sur logiciel ABAQUS pour simuler l'éclatement en surpression d'un pneu de véhicule léger de dimensions P195/65R15. À cette fin, les propriétés mécaniques de chacun des divers matériaux de l'enveloppe, du renfort et de la structure du pneu ont été identifiées. Le modèle a permis d'identifier une pression de rupture du pneu d'environ 2,5 fois la pression nominale de gonflement recommandée, et une zone de bris au niveau de la structure métallique du flanc à proximité de la tringle. Selon les auteurs, pour ce type de configuration de pneumatique, ces résultats correspondent aux données expérimentales disponibles.

Tseng et al. [134] ont également simulé de manière similaire, par éléments finis et selon un modèle axisymétrique à deux dimensions, l'éclatement en surpression d'un pneu de véhicule léger de dimensions P195/75R14. Le modèle proposé indique un bris au niveau de la tringle à une pression de 258 lb/po^2, ce qui est supérieur de 38 lb/po^2 (15%) à la valeur obtenue expérimentalement. Selon les auteurs, une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par simulation a ainsi pu être obtenue en utilisant la méthode des éléments finis.

5.3.6 Moyens de prévention

Ces données sont issues d'une revue de la littérature effectuée à partir de la documentation scientifique, technique et d'organismes spécialisés.

5.3.6.1 Technologies de surveillance de la pression de gonflage des pneus

Deux vastes études sur les débris de pneus retrouvés sur les voies rapides et accotements d'autoroutes ont été effectuées aux États-Unis dans les dernières années. La première étude a été faite en 1999 dans la région de Phoenix par le département des transports de l'Arizona [135] et la seconde a été conduite en 1995 et 1998 par « The Technology & Maintenace Concil's S.2 Tire & Wheel Study Group » [136]. Ces études montrent que, dans la majorité des cas (90%), les débris étaient liés à des bris de pneus qui n'étaient pas assez gonflés. Le sous-gonflage des pneus est donc un problème de sécurité bien réel. La surveillance de la pression de gonflage des pneus est clairement un des outils de prévention des bris de pneus en service qui doit être considéré.

Tel que mentionné précédemment, le sous-gonflage des pneus est un problème de sécurité bien connu. Pensons par exemple au récent dossier des pneus FIRESTONE WILDERNESS A/T équipant les véhicules Ford Explorer. La bande de roulement de ces pneus avait en effet tendance à se séparer de la carcasse par temps très chaud lorsque la pression de gonflage n'était pas suffisamment élevée. Il y a quelques années, ce phénomène a provoqué de nombreuses collisions graves avec capotage dans le sud des États-Unis. Outre le litige commercial entre les entreprises Ford et Firestone, ceci a éventuellement mené au U.S. TREAD Act de septembre 2005, exigeant des systèmes de surveillance de la pression des pneus ou TPMS (Tire Pressure Monitoring Systems) sur tous les véhicules légers à partir de 2008 [137,138]. Dans le cas spécifique des véhicules lourds, il s'agit d'une problématique réelle qui influence tant la sécurité d'opération que la durabilité des pneus [139].

En novembre 2005, suite à une proposition initiale de la Norvège, le groupe de travail des transports de marchandises dangereuses de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies [140] a d'ailleurs invité le Forum mondial de l'harmonisation des règlements concernant les véhicules à étudier de manière générale la question de la prévention des incendies de pneumatiques de camion et l'incidence d'une insuffisance de pression de gonflage sur le risque d'incendie, de même qu'à étudier les possibilités de normalisation des systèmes de détection de la pression des pneumatiques pour les poids lourds. Les systèmes de monitoring de la pression des pneus de camions sont donc un sujet tout à fait d'actualité ici en Amérique du Nord, mais aussi ailleurs dans le monde.

En ce qui concerne les systèmes de surveillance de la pression de gonflage des pneus ou TPMS (Tire Pressure Monitoring Systems), diverses technologies sont déjà disponibles ou sont en développement. Leurs objectifs sont de prévenir l'éclatement ou l'usure prématurée des pneus.

5.3.6.1.1 Principaux concepts des systèmes de monitoring de pression et température des pneus

5.3.6.1.1.1 Capteur de position de la suspension, de la jante ou du pneu

Il s'agit de la première génération de systèmes de monitoring qui a surtout été utilisée sur les véhicules automobiles haut de gamme. Ce type de technologie a toutefois maintenant tendance à être délaissé, car considéré peu précis.

5.3.6.1.1.2 Capteur de vitesse de rotation des roues

Ce type de dispositif effectue la comparaison entre les vitesses de rotation des roues sur un même essieu (un pneu moins bien gonflé entraîne une diminution de son diamètre effectif et augmente ainsi sa vitesse de rotation). Cette technologie n'est toutefois pas applicable aux assemblages de roues doubles des véhicules commerciaux. En fait, il s'agit de systèmes initialement développés par les manufacturiers Mercedes-Benz et BMW et qui ne sont plus envisagés comme futures applications commerciales, car jugés peu efficaces et fiables.

De plus, les exigences du U.S. TREAD Act spécifient que le système de monitoring TPMS doit être en mesure d'effectuer un diagnostic complet des pneus dans les premières secondes suivant le démarrage, alors que le véhicule est encore stationnaire. Les capteurs de vitesse de rotation des roues ne sont donc pas une technologie en mesure de répondre à cette exigence spécifique et il s'agit d'une autre raison pour laquelle ce type de système n'est plus actuellement considéré par les fabricants.

5.3.6.1.1.3 Capteur interne à communication électromagnétique ou par fréquence radio (RF)

Plusieurs entreprises sont en train de développer diverses technologies et divers protocoles de communication entre des capteurs montés sur le pneu ou la jante et le véhicule, particulièrement de type communication sans fil ou "Wireless" [141]. Par exemple, Goodyear et Siemens [142] [143], Motorola [144], Michelin [145], SmarTire Systems [146], ainsi que quelques autres manufacturiers ou équipementiers de systèmes automobiles, dont Beru et Shreader Electronics

[147], travaillent actuellement à raffiner la technologie de transmission sans fil par fréquence radio appliquée aux pneus. Les défis techniques liés à la vie des batteries, les coûts et la fiabilité sont parmi les principaux éléments devant être résolus avant que ces dispositifs ne soient utilisés à grande échelle [148].

L'entreprise australienne ETV Corporation développe également une technologie de communication pneus/véhicule basée sur des capteurs électromagnétiques [149]. De même, l'entreprise IQ Mobil propose un dispositif fort complexe appelé RDKS System utilisant la technologie et les protocoles de communication Bluetooth [147]. Dans chaque cas, les signaux de pression et/ou de température du pneu captés sont transmis à un afficheur embarqué ou à un système d'acquisition. On note toutefois que, lorsque des limites critiques de température et de pression sont proposées, elles semblent n'être fixées que de manière arbitraire, sans justification technique ou scientifique.

5.3.6.1.2 Différentes technologies disponibles de monitoring développées par des manufacturiers

5.3.6.1.2.1 Motorola

Le manufacturier Motorola a développé un capteur de pression et de température de type MEMS (Micro Electro-Mechanical System) fixé directement sur la valve du pneu [144]. Cette technologie utilise une pile, un transmetteur RF et un microprocesseur fixés à l'intérieur même du pneu. Les équipementiers Beru AG (Système TSS) [www.beru.com] et Schrader Electronics (SmartValve) [www.schraderelectronics.com] proposent des technologies similaires.

Figure 5.3.6-1 Capteur pression et température de type MEMS de Motorola [144]

5.3.6.1.2.2 Siemens VDO Automotive

Le manufacturier Siemens VDO Automotive développe et perfectionne actuellement une technologie appelée Tire IQ System [142] utilisant des capteurs de pression et de température sans pile insérés à l'intérieur de la carcasse du pneu. Ces capteurs sont de la taille d'une pile de montre. Le dispositif est doté de transmetteurs RF fixés dans les ouvertures de roue et d'un ECU centralisé. L'avantage de cette technologie est bien sûr l'absence de pile à l'intérieur du pneu, ce qui augmente la durabilité et l'applicabilité potentielles de cette technologie.

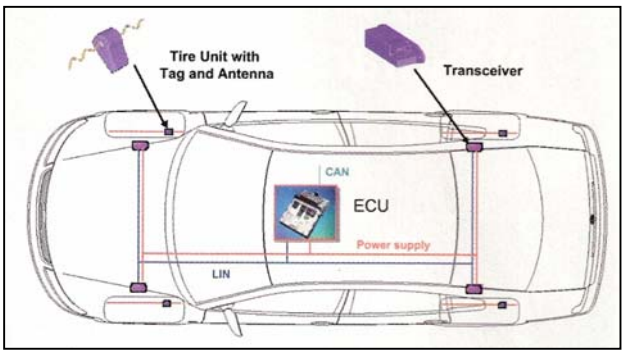


Figure 5.3.6-2 Système Tire IQ de Siemens [142]

Cependant, le dispositif de IQ Mobile utilisant le protocole Bluetooth n'est pas exempt de difficultés. Lors de l'utilisation d'un capteur manuel (hand-held), les données de la roue intérieure ne sont généralement captées que si l'utilisateur s'approche suffisamment du pneu. Dans le cas de l'utilisation d'un capteur externe fixe ou d'un capteur monté sur le véhicule, les données radio de la roue la plus proche sont captées, alors que celles de la roue la plus éloignée sont souvent non reçues. Il s'agit actuellement d'une limitation importante de cette technologie et plusieurs manufacturiers de pneus et équipementiers automobiles travaillent à combler cette lacune.

5.3.6.1.2.3 VisiTyre par ETV Corporation

La technologie VisiTyre (TPMS) [149] est développée par l'entreprise ETV Corporation en Australie. Pour les applications sur des véhicules lourds, la technologie de transmission par capteurs électromagnétiques VisiTyre paraît potentiellement plus fiable que celle par fréquence radio et représente donc une solution plus prometteuse pour ce type d'application. C'est un dispositif sans pile utilisant des capteurs de pression et de température dans la roue, avec transmission de données par accouplement de capteurs électromagnétiques à position constante entre les jantes et le châssis du véhicule. La section fixe du capteur est alors installée sur l'étrier de frein ou sur une autre pièce fixe située à proximité de la roue.

Figure 5.3.6-3 Dispositif VisiTyre de ETV Corporation [149]

Cette technologie semble plus fiable que les dispositifs RF. En effet, lors de l'utilisation de dispositifs RF pour les applications sur des véhicules commerciaux, la difficulté réside dans la réception des fréquences radio transmises par les deux roues des assemblages de roues doubles. Il est généralement difficile et dans certains cas presque impossible d'assurer la réception des messages envoyés par les deux roues à cause des interférences entre les deux émetteurs et les vibrations et autres phénomènes physiques générés par les roues en rotation.

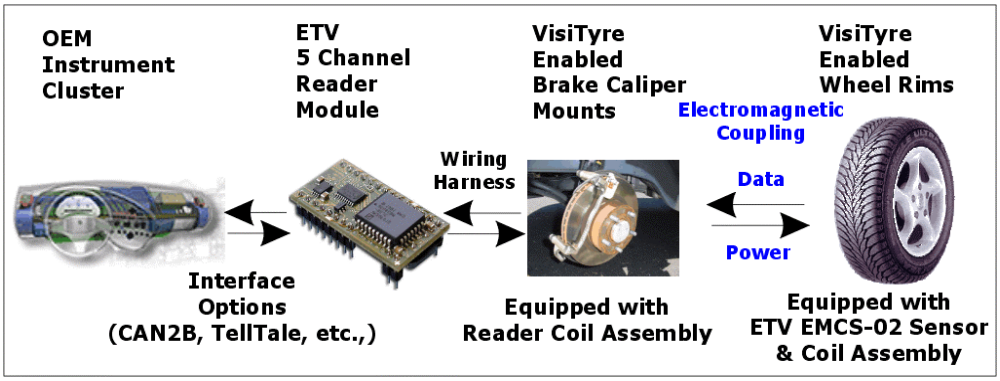


Figure 5.3.6-4 Diagramme schématisé du dispositif VisiTyre [149]

5.3.6.1.2.4 Système eTire de Michelin

Le fabricant de pneus Michelin travaille présentement au développement d'une technologie de monitoring appelée eTire et dotée d'un lecteur RF de pression manuel, externe ou encore embarqué ("hand held, drive by or on board") [139]. Comme il a été mentionné précédemment, les difficultés techniques liées à la transmission radio des données du capteur interne du pneu intérieur sur les assemblages de roues doubles constituent actuellement la plus grande lacune de ce type de technologie. Une des avenues de solution envisagées est l'utilisation de pneus à bande large permettant de remplacer les assemblages doubles sur les véhicules commerciaux. Avec ce

type de pneu, les problèmes de transmission RF ne se poseraient plus. Plusieurs législations américaines ont adopté des règles permettant l'utilisation commerciale de ce type de configuration à pneus simples (aussi appelée "super single"). Au Québec et au Canada, les législateurs sont sur le point d'adopter des règles similaires. Ces règles spécifient des capacités maximales en charge par essieu révisées et augmentées de manière à rendre l'utilisation de configurations à pneus simples plus rentables, sans toutefois mettre en danger les infrastructures routières, particulièrement en période de dégel.

L'utilisation généralisée à moyen terme de ces dispositifs de type RF sur les véhicules lourds à pneus simples est donc tout à fait envisageable. Ceci est d'ailleurs le cas sur certains autobus interurbains actuellement offerts par le manufacturier Prévost Car. Ce type de technologie permettrait, entre autres, de prédire les cas de fuite lente d'un pneu (slow leak) et d'avertir à l'avance le conducteur de manière à éviter un incident sur la route. Selon les résultats d'essais de simulations, le manufacturier Michelin prédit même qu'une fuite lente peut être détectée à l'aide de cette technologie plusieurs heures avant qu'une situation critique ne survienne.

Figure 5.3.6-5 Système eTire de Michelin [139]

Michelin a aussi collaboré, de concert avec la compagnie WABCO [150], au développement de systèmes comprenant un algorithme permettant de détecter l'apparition d'une crevaison à la suite d'une perte lente de pression. Le chauffeur a donc la possibilité de s'arrêter à l'atelier de réparations qui convient. Ce système a donc l'avantage supplémentaire de permettre une meilleure gestion des pannes et de réduire les interventions des unités mobiles sur la route, à la fois plus coûteuses et offrant des conditions moins sécuritaires qu'à l'atelier.

5.3.6.1.2.5 SmarTire Systems

L'entreprise canadienne SmarTire Systems [146] développe depuis plusieurs années un dispositif de type RF similaire à celui du manufacturier Michelin. Il s'agit d'un dispositif appelé SmarTire qui est doté de capteurs de pression et de température dans les pneus, avec transmetteur RF et afficheur dans la cabine.

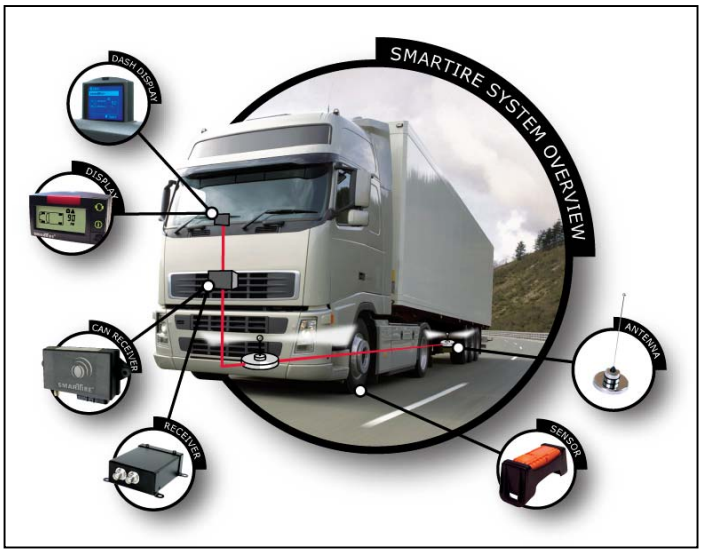


Figure 5.3.6-6 Dispositif SmarTire [146]

5.3.6.2 Systèmes de contrôle de la pression

Ces systèmes permettent d'ajuster la pression des pneus en fonctionnement afin de maintenir la pression désirée en tout temps. Les compagnies Arvin Meritor [151] et TPC International Ltd. [152] ont développé de tels systèmes sur des camions existants, comme le montre la Figure 5.3.6-7. Le système de « TIREBOSS » de la compagnie TPC qui permet au chauffeur d'ajuster les pressions en fonction de la charge et des conditions de la route pourrait présenter des avantages intéressants à la fois sur le plan de la sécurité et sur le plan des opérations. La Figure 5.3.6-8 montre la console d'ajustement des pressions et un exemple de valeurs préétablies.

Figure 5.3.6-7 Sytèmes de contrôle et de gonflage embarqués [152]

Company:	EXAMPLE ONLY	TIREBOSS Tire Pressure Control				
SETTING #	SETTING DESCRIPTION	Steer PSI	Drive PSI	Trailer PSI	MAX Kph	MAX TIME
1	HIGHWAY EMPTY		75		none	NO LIMIT
2	OFF HIGHWAY EMPTY		40		80	NO LIMIT
3	SLOW SPEED LOADED		45		31	NO LIMIT
4	MEDIUM SPEED LOADED		55		50	NO LIMIT
5	HAUL ROAD LOADED		65		82	NO LIMIT
6	HIGHWAY LOADED		100		none	NO LIMIT
7	EMERGENCY TRACTION		35		14	5 MIN
	Summer Haul					APP-1

Figure 5.3.6-8 Ajustement des pressions selon les conditions réelles d'opération [152]

D'après nos informations, ce genre de systèmes serait particulièrement intéressant pour les compagnies forestières. Le système gère automatiquement la pression de chaque pneu. Ce qui présente un avantage pour la sécurité, car en principe il limite l'occurrence, non souhaitée, d'une sous-pression aussi bien que d'une surpression.

5.3.6.3 Système de gonflage des pneus à l'azote

L'azote (N_2) est un gaz inerte qui tend à stabiliser le comportement en gonflage du pneu, en limitant l'action de l'oxygène et de l'humidité [153,154]. Les molécules d'azote sont également plus grosses que celles d'oxygène et migrent moins facilement avec le temps au travers de l'enveloppe en caoutchouc du pneu. Il est reconnu que l'utilisation de l'azote permet de mieux maintenir la pression de gonflage des pneus sur de longues périodes, car le taux de perte est plus faible qu'avec de l'air comprimé et les phénomènes d'oxydation du pneu et de la jante sont également moindres. Ces phénomènes d'oxydation affectent le comportement de vieillissement du caoutchouc des pneus et la présence d'azote permet généralement de ralentir ce processus de vieillissement. En plus de ces effets aérobiques, le vieillissement est également accéléré par les effets thermiques liés aux surchauffes et fluctuations de température de la carcasse du pneu, lorsque ce dernier est par exemple mal gonflé. En aidant à mieux maintenir la pression de gonflage, l'azote joue donc également un rôle à ce niveau pour ralentir le vieillissement du pneu. L'azote a aussi l'avantage de ne pas être combustible, contrairement à l'oxygène, en plus d'être sec comparativement à l'air comprimé qui contient toujours une certaine quantité d'humidité. La présence de cette humidité fait en sorte que la pression interne d'un pneu rempli d'air comprimé aura tendance à fluctuer beaucoup plus avec les variations de la température extérieure que dans le cas d'un pneu gonflé à l'azote. Pour ces diverses raisons, l'azote comprimé est utilisé depuis longtemps dans le secteur de l'aviation commerciale, des véhicules militaires, en course automobile, ainsi que pour les pneus de métro, dont celui de Montréal.

Un avantage supplémentaire du gonflage à l'azote est qu'il permet d'éviter le phénomène d'explosion, qui ne se produit qu'avec un minimum de 5.5% d'oxygène. La réaction de thermo-oxydation est également impossible, par contre la pyrolyse la remplace, produisant quasiment les mêmes effets.

Toutefois, la diminution du potentiel de bris en service sur les véhicules lourds par l'utilisation de cette technologie n'a pas encore été démontrée clairement. L'expérience passée d'opérateurs de flottes, tels que le manufacturier/transporteur français Air Liquide, indique également que diverses questions d'application, dont la disponibilité des postes de remplissage, n'ont pas encore été résolues. Par exemple, en cas de crevaison ou de pneu regonflé sur la route lors d'un appel de service, il n'est pas certain que le réparateur appelé sur les lieux sera équipé d'un dispositif de gonflage à l'azote. Les problématiques liées à la pureté du N_2 de gonflage dans les pneus n'ont également pas toutes été solutionnées, même si des détecteurs de concentration en N_2 sont disponibles sur le marché, dont celui de Nitronics Systems [155]. Cette entreprise, de même que la compagnie Parker [156] offrent divers produits permettant le gonflage des pneus à partir de stations de génération d'azote.

Figure 5.3.6-9 Générateur d'azote de l'entreprise Nitronics Systems [155]

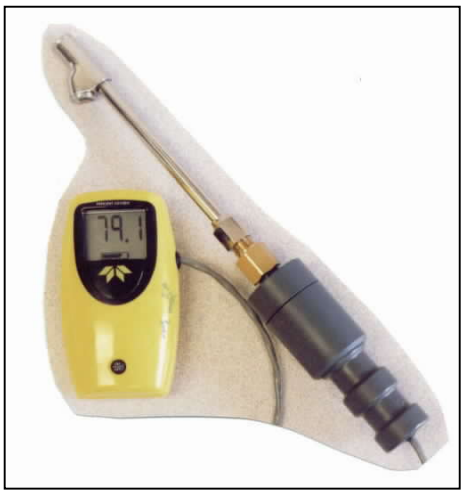


Figure 5.3.6-10 Capteur de pureté du gonflage à l'azote d'un pneu [156]

5.3.6.4 Protection anti-surpression

La problématique d'éclatement et d'explosion de pneus est presque toujours associée à une élévation soudaine de la pression de gonflage interne du pneu. Le manufacturier de pneus et de jantes de camion hors dimensions Rimex [157] offre un dispositif de protection en cas de surpression de type valve de sécurité. Il s'agit d'une valve fusible installée directement sur la valve des pneus de camions miniers et dont la température et la pression de déclenchement sont de 93.3 ^{0}C (200 ^{0}F) et de 190 lb/po^2 respectivement. Ce dispositif permet d'évacuer la surpression en cas de surchauffe interne du pneu. Cette technologie n'est toutefois disponible que pour les pneus de type hors route de très grandes dimensions, plus de 25 pouces de diamètre, utilisés sur les camions miniers.

Il s'agit donc d'un produit spécialisé et il n'est pas certain que son temps de réponse soit suffisant pour permettre d'éviter des incidents sur des véhicules commerciaux (réaction en chaîne très rapide). De plus, en application minière, l'utilisation de ces dispositifs est relativement récente et leur efficacité n'est pas encore clairement démontrée. Il s'agit toutefois d'une piste de solution qui semble potentiellement intéressante.

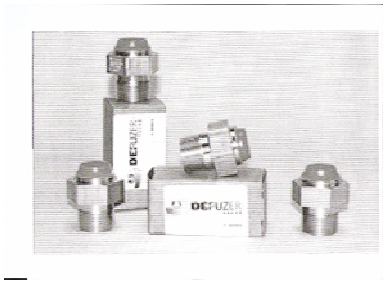


Figure 5.3.6-11 Produit De-Fuzer Valve de Rimex [157]

5.3.6.5 Technologies alternatives

Plusieurs autres technologies alternatives de prévention directe ou dérivée sont actuellement développées ou même commercialisées. C'est le cas des pneus de type anti-crevaison, de type autogonflant, et de type mécanique, ainsi que des portails thermiques.

5.3.6.5.1 Pneus anti-crevaison

Une étude du UMTRI aux Etats-Unis [158] montre que les pertes de contrôle sur route liées à une crevaison ou au déjantement soudain d'un pneu surviennent généralement sur l'essieu directeur ou "steer axle" et sont majoritairement (86%) liées à un problème de sous-gonflage. Cette étude fait une revue des diverses technologies de pneus résistant aux crevaisons ou "Blowout Resistant", ainsi que des technologies de prévention, incluant les systèmes de surveillance de type TPMS et d'équilibrage de la pression de gonflage mentionnés précédemment. Le pneu de véhicule léger Run-Flat développé par Goodyear, les travaux de

recherche sur les pneus à affaissement contrôlé PAX de Michelin, ainsi que la technologie RunFlat développée pour les véhicules militaires par Hutchinson sont également mentionnés. Même s'il s'agit de technologies visant le problème spécifique des crevaisons sur route, elles peuvent également présenter des bénéfices en ce qui concerne la prévention des éclatements et explosions de pneus, particulièrement dans les cas de détérioration de la carcasse liée à un sous-gonflage.

5.3.6.5.2 Pneus autogonflants

L'entreprise EnTire en est aux premiers développements d'un pneu autogonflant ou "Self-Inflating" [159], qui utilisent le principe de la pompe péristaltique pour pomper l'air extérieur à l'intérieur du pneu, alors que celui-ci est en rotation et ainsi conserver une pression de gonflage spécifique. L'entreprise Cycloid a développé une technologie de type similaire appelée "AutoPump Tire-Inflator" utilisant une pompe montée sur le moyeu de roue et actionnée par la rotation de cette dernière. Ce système a d'ailleurs équipé un prototype du manufacturier Daimeler Chrysler, soit un véhicule Jeep Grand Cherokee en 2002 [https://pressreleasenetwork.com/pr-2002/june/mainpr1300.htm]. Il s'agit de technologies prometteuses, mais qui en sont encore aux premiers stades de leur développement et qui ne sont pas encore commercialisées.

5.3.6.5.3 Pneus mécaniques

Une autre technologie en développement est le pneu de type entièrement mécanique proposé par Michelin [160]. Ce système, appelé "Tweel", n'utilise aucun air de gonflage et allie une jante déformable et une structure à rayons flexibles mais très robustes en matériaux composites faisant office de pneu. La déflexion de l'ensemble de cette structure permet de supporter en douceur la charge transportée ainsi que de franchir les obstacles habituellement rencontrés sur la chaussée. Il s'agit toutefois d'une technologie ne s'appliquant qu'aux pneus de véhicules légers et dont la commercialisation n'est pas prévue dans l'immédiat par Michelin.

5.3.6.5.4 Portails thermiques

Suite à la catastrophe du tunnel du Mont-Blanc dans les Alpes Européennes, ayant entraîné la fermeture prolongée de cet axe routier à cause d'un incendie provoqué par un feu de roue dans un camion, un portail thermique de détection a été développé par l'entreprise italienne Tecnosistemi Group [161]. Ce type de portail de détection de chaleur permettant la détection des anomalies sur les poids lourds à l'entrée de tunnels est maintenant en place sur les deux versants du tunnel du Mont-Blanc ainsi que sur le versant italien du tunnel de Fréjus. Cette technologie permet de détecter automatiquement les situations de surchauffe de pneu, de frein ou de moteur lors du passage du véhicule jusqu'à une vitesse de 100 km/h par un processus de scanographie infrarouge. Ce type de technologie est très onéreux et des applications commerciales plus étendues ne seront probablement possibles qu'à moyen et long termes.

5.3.6.6 Mesures préventives et procédures afin d'améliorer la sécurité dans le domaine du transport

5.3.6.6.1 Procédures recommandées par différents organismes concernés par l'éclatement et l'explosion des pneus de camion

5.3.6.6.1.1 Mines, gouvernement du Queensland, Australie

Dans son bulletin sur la sécurité dans les secteurs des ressources naturelles et des mines, le gouvernement du Queensland recommande les trois actions suivantes lorsqu'un danger d'explosion de pneu a été identifié (à titre d'exemple après le contact d'un véhicule à pneu en caoutchouc avec une ligne haute tension) [162] :

1. Stationner le véhicule dans une zone d'isolation, avec un rayon minimal de 300m;
2. Ne laisser entrer personne dans la zone d'isolation pendant 24h;
3. Alerter les services d'incendie.

5.3.6.6.1.2 Le Groupe Guilbault ltée, Boucherville [k]

Des instructions relativement aux pneus sont fournies aux chauffeurs et employés des ateliers du Groupe Guibault ltée et sont accompagnées du document 'Le pneu chauffé, une bombe à retardement', publié dans la revue le Routier en septembre 2004. Dans le dernier document, il est mentionné que des débris peuvent être projetés jusqu'à 300m et il est recommandé de ne pas utiliser le véhicule pendant 24h s'il y a eu électrocution ou foudre, incendie ou éclatement d'un pneu.

Ci-dessous, certaines recommandations extraites des documents du Groupe Guilbault:

1) Un pneu qui apparaît endommagé doit être dégonflé avant de le démonter du véhicule.
2) Un pneu, qui a roulé avec moins de 80% de sa pression initiale, ne devrait jamais être regonflé avant d'avoir été démonté et inspecté.
3) Toutes les pièces usées ou déformées doivent être rejetées.
4) Ne jamais souder une jante.
5) Dans les cas de surchauffe des pneus, causée par les freins collés, un sous-gonflage ou une crevaison, si vous sentez une forte odeur de caoutchouc brûlé ou si vous apercevez de la fumée, ne vous approchez pas : il y a grand risque d'explosion des pneus.

[k] Communication privée, Yvon Carrière, directeur de la flotte, Le Groupe Guilbault ltée.

5.3.6.6.1.3 Service de sécurité incendie au Québec

Monsieur Brault, expert en prévention des incendies et collaborateur à l'Association médiatique de la sécurité incendie du Québec, propose les mesures suivantes, lorsque les pompiers se retrouvent en présence de surchauffe ou d'incendie de pneus sous air [163] :

1) Porter en tout temps l'habit intégral de combat;
2) Rester à distance;
3) Ne pas tenter d'éteindre le feu avec un extincteur portatif;
4) Pas d'angle sécuritaire pour approcher un pneu qui brûle : certains explosent par le flanc, d'autres par la semelle;
5) Meilleure efficacité de la mousse, mais l'eau en grande quantité fonctionne aussi;
6) Pneu chauffé ou fumant à traiter comme une bombe dont la mèche est allumée;
7) Ne jamais tenter de dégonfler un pneu surchauffé;
8) Lorsque l'incendie est terminé ou si le véhicule a été en contact avec une ligne électrique, isoler le véhicule pendant 24h;
9) Après la période d'isolation, les pneus doivent être démontés et inspectés.

5.3.6.6.1.4 Association sectorielle paritaire – Secteur services automobiles

L'association sectorielle paritaire – Secteur services automobiles recommande une procédure détaillée pour le gonflage des pneus de camions lourds. À cause des risques inhérents à tout gonflage de pneu neuf ou usagé, il est recommandé de toujours placer le pneu dans une cage de protection adéquate, lors de cette opération. L'ASP – Secteur services automobiles recommande une cage de protection particulière pour ce type d'opération. Cette fiche est disponible sur le site WEB [164] de l'association.

Une procédure [165] particulière est recommandée pour prévenir la rupture éclair d'un pneu « zipper break » :

1) Dégonfler complètement le pneu suspect avant de le retirer du camion et bien l'identifier.
2) Écouter pour détecter un son particulier lorsqu'on fait rouler le pneu sur le plancher.
3) Inspecter minutieusement les flancs du pneu pour détecter toute distorsion, fissure, petite brèche craquelure, corde(s) d'acier exposée(s), décoloration, endroit mou ou plus flexible.
4) Utiliser un éclairage rasant, parallèle au flanc du pneu, afin de détecter l'ombre produite par un renflement, une ondulation ou toute autre irrégularité.

5) Si n'importe laquelle de ces conditions est présente, le pneu est inutilisable et doit être traité comme tel.

6) Si aucune de ces conditions n'est détectée, le pneu doit être placé dans une cage de retenue et gonflé à 20 lb/po^2. Il faut alors vérifier s'il n'y a pas de distorsion ou d'ondulation.

7) Si une irrégularité est détectée, le pneu est inutilisable.

8) Si rien n'est détecté, gonfler le pneu jusqu'à 20 lb/po^2 au-dessus de la pression recommandée.

9) Laisser le pneu dans la cage à cette pression pendant 20 minutes.

10) Ne jamais placer la tête ni les mains dans la cage.

11) Si une irrégularité apparaît, le pneu est inutilisable.

12) Si tout semble normal, dégonfler jusqu'à la pression recommandée par le manufacturier avant de retirer le pneu de la cage.

13) Si des soupçons persistent, **ne prendre aucun risque** et faire vérifier le pneu par des techniciens entraînés.

5.3.6.6.2 Les mesures préventives à l'atelier de réparation ou d'entretien

Les mesures préventives sont essentiellement basées sur les connaissances actuelles disponibles et sur le principe de précaution, sachant l'importance des conséquences pour les personnes lorsqu'il y a éclatement ou explosion du pneu.

5.3.6.6.2.1 Quelques mises en garde reliées aux activités de soudure ou de chauffage plus ou moins intense sur la roue, sur les boulons ou d'autres composantes à proximité d'un pneu

- **Interdiction formelle** de souder sur la jante ou sur une des composantes de la roue.
- **Interdiction de souder** à proximité ou sur une composante susceptible de transmettre la chaleur à la jante ou au pneu lorsque le pneu est monté. Il est recommandé de démonter la roue dans de telles circonstances.
- **Dans les cas exceptionnels** où il n'y a pas d'autre solution que de chauffer à proximité de la jante afin par exemple de dégeler des pièces ou de débloquer des boulons, il est impératif de dégonfler complètement le pneu et de le décoller de la jante avant d'utiliser la source de chaleur. En effet, **il est primordial de savoir que le danger n'est pas forcément écarté parce que le pneu est dégonflé**. Le pneu, la jante et les composantes doivent être refroidis jusqu'à la température ambiante avant de procéder à toute éventuelle réinstallation de ces pneus. De plus, il est impératif de ne jamais les remonter, ni de les gonfler, sans que leur roue ne soit d'abord examinée attentivement pour déceler toute trace de dégradation. Cependant, il s'agit ici d'une **précaution minimale**. Il serait donc nécessaire de toujours utiliser toute autre solution de rechange au chauffage dans tous les cas.

- **Étapes à suivre lorsqu'un chauffage ne peut être évité :**
    - Dégonfler et décoller le pneu (ou les pneus dans le cas de roues doubles) de la jante
    - Effectuer la réparation
    - Laisser refroidir jusqu'à température ambiante
    - Inspecter la jante et le pneu pour toute trace de dégradation

5.3.6.6.2.2 Pneu qui a roulé à une pression inférieure à 80 lb/po^2

- Ne pas regonfler le pneu, il est possible que le pneu ait surchauffé ou qu'il se soit dégradé. On doit le démonter pour bien l'examiner,
- Toujours vérifier les indices de fatigue du pneu pour éviter le phénomène d'éclatement associé au *dézippage*,
- Exemples d'éléments observables (voir Figure 5.3.6-12) :
    - Vérifier la présence de marbrures (lignes noires circonférentielles à l'intérieur des flancs) [166],
    - Vérifier la présence de signes de séparation ou de déformation de la couche de gomme intérieure (liner), à l'intérieur du pneu,
    - Vérifier la présence de poussières de carbone provenant de la destruction de la couche de gomme intérieure (liner),
    - **En cas de doute, le pneu doit être mis aux rebus. Ce type de risque d'éclatement, associé au dézippage, est dû aux pincements de la carcasse du flanc. Ce type de défaut ne peut pas être détecté visuellement. Ces pincements ne sont détectables qu'aux rayons X.**

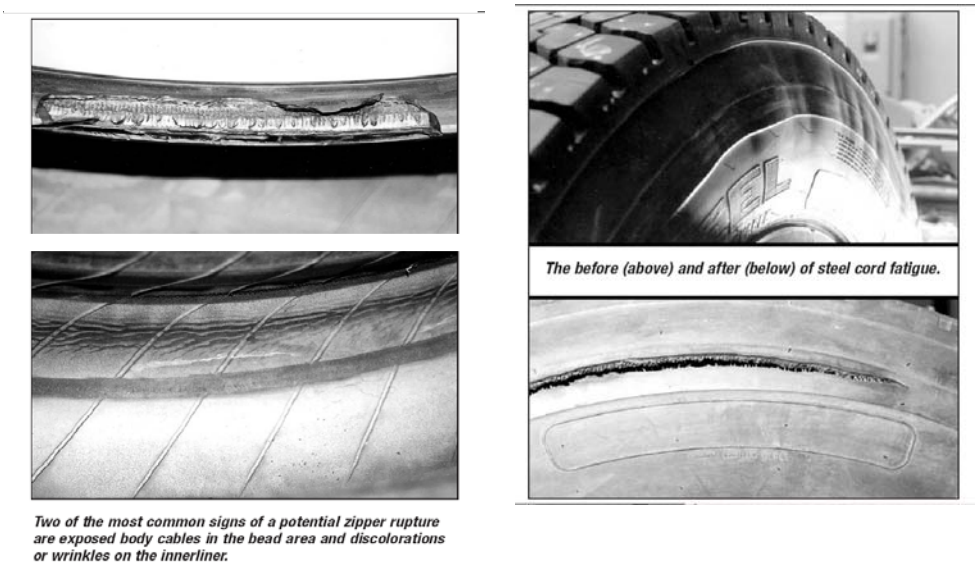


Figure 5.3.6-12 Éléments observables sur un pneu à risque de rupture éclair [166]

5.3.6.6.2.3 Aspects mécaniques à vérifier lors du montage d'un pneu sur la jante

- Toujours inspecter la jante
  - l'état général (trace d'impact, fissure, trace de surchauffe, …)
  - la géométrie (roue voilée, déformée)
  - des indications d'usure
- Lors de la pose d'un pneu sur une jante usagée, il est important de vérifier la géométrie de la jante et en particulier le degré d'usure de son épaulement (voir photo de la Figure 5.3.6-13).
- Si la jante semble être déformée ou usée au niveau de l'épaulement, s'assurer qu'elle respecte le gabarit et les tolérances du fabricant ou la faire inspecter par des experts.
- Ne jamais monter un pneu sur une jante :
  - fissurée
  - en mauvais état (usure, corrosion, orifices de fixation déformés, jante voilée)
  - ayant subi une surchauffe importante (incendie ou quasi-incendie)

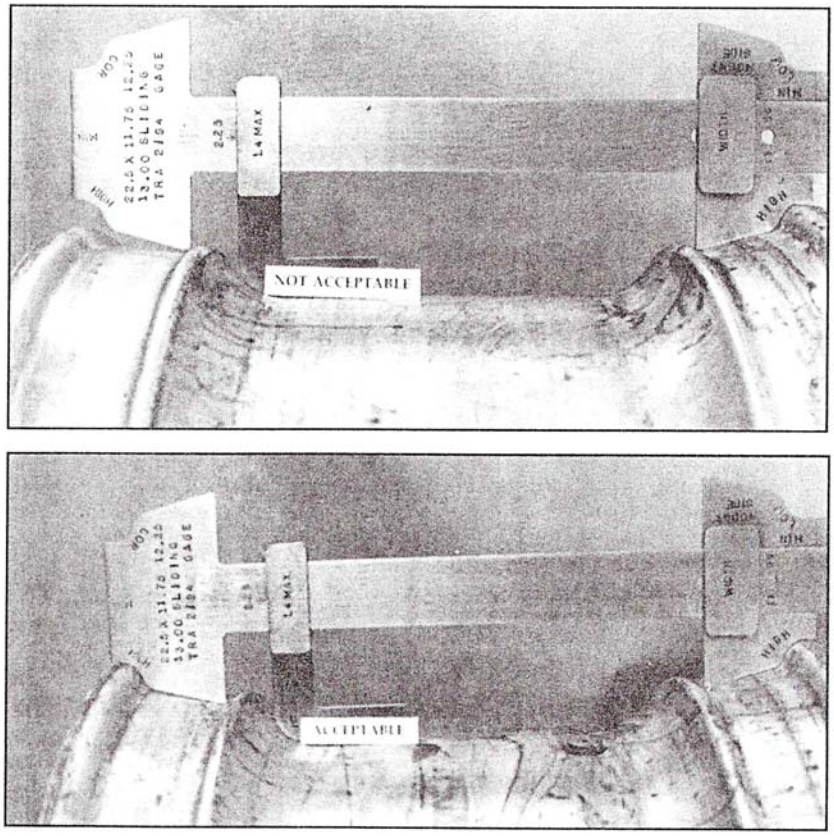


Figure 5.3.6-13 Exemple d'utilisation d'un gabarit de mesurage d'une jante de pneu de camion [43]

5.3.6.6.2.4 Utilisation de lubrifiants lors du montage d'un pneu sur la jante

- **Ne jamais utiliser un lubrifiant ou un adhésif contenant des matières inflammables** au moment du montage. Pour aider à la pose du pneu, utiliser uniquement les produits recommandés et approuvés par le fabricant.
- Selon le manufacturier de pneu Bridgestone [167] ainsi que dans « The Maintenance Council (TMC) Recommended Practice » [43], les lubrifiants de la tringle recommandés lors de la pose d'un pneu de camion (dans une solution d'eau) sont les:
  - Savons à base d'huile végétale (Vegetable oil soaps)
  - Savons de type animal (Animal soaps)
- **À éviter complètement les:**
  - Huiles ou graisses à base de produits pétroliers (peuvent créer un mélange volatile explosif)
  - Lubrifiants à base de solvants (peuvent créer un mélange volatile explosif)

- Huiles à base de silicone (peuvent provoquer le glissement éventuel de la tringle).

5.4 Démarches réalisées auprès du milieu

5.4.1 Secteur du transport

Au cours de la réalisation du projet, nous avons eu plusieurs réunions de travail avec des représentants de l'ASTE. Ces réunions avaient pour objectif de les informer du déroulement du projet et des résultats tout au long de sa réalisation. De plus, ces réunions ont permis à l'équipe du projet de consulter l'ASTE en tant qu'expert du secteur des transports et de s'assurer que les orientations de la recherche concordaient avec leurs besoins et attentes.

Une fiche de prévention a été préparée en collaboration avec l'ASTE et des représentants des compagnies de transport. Au moins trois rencontres spécifiques sur le sujet nous ont permis de discuter plusieurs aspects pratiques et techniques et de tenir compte de leur avis en tant qu'intervenants et experts de leur domaine.

Nous avons rencontré, à plusieurs reprises, le directeur de la flotte de la compagnie Boutin Transport. Ces rencontres nous ont également permis de discuter avec le responsable technique de la compagnie Michelin. D'après nos discussions, il ressort que la compagnie Boutin Transport pourrait équiper un véhicule d'un système de suivi des pressions et des températures des pneus afin de réaliser des essais routiers dans des conditions réelles, advenant la réalisation de la deuxième phase de l'étude. La compagnie Michelin pourrait éventuellement fournir le système de suivi.

Un représentant de la compagnie Brulotte Transport, membre du « Comité de Liaison Transport » de l'ASTE, s'est également dit intéressé à participer à cette expérimentation.

Nous avons visité le Centre de camion Desharnais à Québec. Nous avons eu l'occasion de discuter de plusieurs aspects liés à l'installation des pneus de camion. C'est également grâce à ce contact que nous avons eu accès au film produit par la compagnie Michelin sur une expérimentation de surchauffe de pneu à la suite d'une soudure sur la jante. Ce film nous a permis d'obtenir des données très intéressantes sur le phénomène d'explosion.

5.4.2 Transport forestier

L'Association de santé et de sécurité des industries de la forêt du Québec (ASSIFQ) est également préoccupée par le problème. Nous avons rencontré le conseiller responsable de ce dossier à plusieurs occasions. L'ASSIFQ propose certaines méthodes de prévention en vue de prévenir le risque d'éclatement.

Nous avons eu l'occasion d'observer des camions qui opèrent dans le secteur forestier. Ce qui nous a également permis de réaliser quelques relevés de température sur la surface extérieure des pneus avec des thermomètres infrarouges selon une procédure proposée par l'ASSIFQ. Il semble toutefois que cette technique présente des lacunes en ce qui concerne la précision.

Par ailleurs, c'est aussi grâce à ce conseiller que nous avons appris qu'un accident survenu dans son secteur le 10 juin 2005 avait fait éclater tous les pneus d'un fardier transportant une pelle mécanique. Un arc électrique s'était produit à proximité d'une ligne à haute tension. L'accident aurait pu faire des victimes compte tenu de la violence de l'explosion de certains pneus. Cet accident n'est pas répertorié. Nous en avons eu connaissance par hasard tout comme d'un autre accident du même genre survenu à peine quelques jours plus tard dans la même région et avec les mêmes conséquences. Il semble que ce type d'accident soit plus fréquent que ce qui est effectivement répertorié dans les bases de données.

5.4.3 Secteurs des mines

Nous sommes en contact avec un ingénieur de la Compagnie Minière Québec Cartier (CMQC) de Fermont. Le secteur minier est effectivement préoccupé par les explosions de pneus. Comme il s'agit de très gros camions, les pneus sont de très grande taille et les effets d'une explosion sont considérables. CMQC étudie la possibilité d'installer un système de suivi « Rimex ».

5.4.4 Compagnie Michelin

Nous sommes aussi directement en contact avec le directeur technique de la compagnie Michelin au Québec. Nous discutons des différentes possibilités de collaboration dans l'éventualité de la réalisation d'une deuxième phase. Par l'intermédiaire du directeur technique, nous avons des échanges avec le centre de recherche de la compagnie Michelin U.S. À ce jour, Michelin nous a déjà transmis quelques données sur les températures normales en opération des pneus de poids lourd. Nous leur avons soumis une liste de points et de demandes spécifiques et les discussions sont en cours au sujet d'un projet concret de collaboration.

5.5 Des méthodes scientifiques, techniques ou expérimentales de caractérisation des phénomènes

Cette étude exploratoire a démontré l'importance des conséquences, pour la sécurité, des accidents résultant de l'éclatement et de l'explosion des pneus de camions lourds. Bien que l'étude décrive plusieurs des phénomènes qui entrent en jeu dans le processus et qu'il en résulte une meilleure compréhension de ceux-ci, ils demeurent très difficilement maîtrisables. La revue de la littérature scientifique et technique accessible n'a pas permis de trouver des solutions scientifiquement démontrées. Ce qui démontre la nécessité d'effectuer une étude plus approfondie. De plus, il ressort de cette recherche préliminaire que les données expérimentales ne sont pas accessibles. Il serait donc nécessaire de réaliser une phase théorique et expérimentale afin d'obtenir des données fiables pour mieux comprendre les phénomènes et en déterminer les paramètres et les valeurs critiques qui ouvriraient la voie à l'élaboration des solutions concrètes scientifiquement démontrées.

Cette section présente différentes techniques expérimentales reconnues, que l'on pourrait utiliser pour mieux caractériser les processus, les variables et les valeurs nécessaires pour maîtriser ce risque. Le choix des techniques se fera en fonction des objectifs de la suite du projet et des moyens dont l'équipe de recherche pourra disposer.

5.5.1 Suivi des paramètres contrôlant l'occurrence d'un éclatement ou d'une explosion

5.5.1.1 Mesure de la température

Un certain nombre de paramètres ont été identifiés comme indicateurs d'un phénomène d'éclatement ou d'explosion. Le premier est bien évidemment la température. Il faut noter que celle-ci prendra différentes valeurs selon qu'elle est mesurée au niveau de l'air contenu dans le pneu ou sur des parois interne ou externe ou sur une autre partie du pneu, ou encore sur la face externe de la jante. Plusieurs outils sont disponibles pour mesurer cette température, comme des thermocouples ou des thermomètres pouvant être positionnés à l'intérieur de la chambre du pneu, ou même insérés dans le caoutchouc. En ce qui concerne la température de la face externe de la jante, les lecteurs par infrarouge existent mais présentent encore des difficultés techniques. Ces mesures de température peuvent être réalisées en statique mais aussi sur un pneu monté sur un véhicule en mouvement grâce à une transmission des données relevées par onde radio. Finalement, selon le type de source de chaleur, il peut être nécessaire d'effectuer des relevés de température au niveau des éléments du camion étant impliqués dans la transmission de la chaleur jusqu'au pneu.

5.5.1.2 Mesure de la pression

Un second paramètre est la pression interne du pneu. Dans le cas d'un éclatement, les pressions en jeu sont de l'ordre de 100 à 150 lb/po^2. Pour une explosion, elles peuvent dépasser 1000 lb/po^2. Dans la pratique, il a été observé que les phénomènes de destruction brutale du pneu se produisent souvent à des pressions intermédiaires, c'est-à-dire situées autour de 500 lb/po^2. Pour la prise de mesure en statique, des manomètres de capacité et de précision variables existent. Dans le cas de pneus montés sur des camions en mouvement, des systèmes d'acquisition de la pression incluant la transmission de données en continu sont actuellement disponibles sur le marché.

5.5.1.3 Mesure de la déformation

D'autres paramètres peuvent caractériser le comportement du pneu lors de son utilisation. Par exemple, les déformations subies au niveau des différentes parties du pneu ont été mesurées [168,169]. Il a été montré qu'elles sont de type membranaire sous l'effet du seul gonflage du pneu, mais qu'en roulement, leur amplitude est beaucoup plus élevée et qu'elles se produisent en flexion. En roulement, elles augmentent de façon linéaire avec la charge et diminuent de manière également linéaire avec la pression. Au niveau des fibres et câbles de renfort, des taux de déformation de 1000% par seconde ont été mesurés sur des véhicules de tourisme, lors de virage à 96 km/h [170].

L'importance de tenir compte de l'effet de ces taux de déformation lors des mesures des propriétés des matériaux destinées à être utilisées dans les simulations et autres modèles théoriques a amené des auteurs à proposer une nouvelle méthode de mesure basée sur un mode de charge dynamique pulsé [171] : il a été montré que l'obtention de résultats en termes de

courbes contrainte-déformation dans des conditions d'opérations typiques des pneus requière des taux de déformation compris entre moins de 0,1 à environ 5 s^{-1} à 25ºC.

D'autres auteurs ont étudié l'effet des différentes conditions d'opération des pneus sur la rigidité dynamique, qui caractérise le comportement en roulement du pneu [15]. Un autre paramètre décrivant ce comportement en roulement est la résistance au roulement, causée principalement par l'hystérésis dans le matériau du pneu due à la déflection de la carcasse en mouvement [15,55] : l'influence de la pression de gonflement, de la charge statique et dynamique, de la vitesse du véhicule, de la température interne du pneu et de l'état de la route entre autres a été examinée.

Finalement, les pertes en roulement peuvent également être utilisées pour caractériser le comportement d'un pneu en opération [48]. Il a été montré qu'elles augmentent avec la vitesse de déplacement si la température interne du pneu est maintenue constante, mais qu'elles diminuent lorsque cette température atteint l'équilibre. Elles sont proportionnelles à la charge, diminuent quand la pression du pneu augmente et finalement varient exponentiellement avec la température ambiante.

5.5.2 Dégradation thermochimique du caoutchouc

Plusieurs techniques de laboratoire peuvent être utilisées pour étudier les réactions chimiques se produisant au niveau du caoutchouc des pneus. Tout d'abord, la cinétique de la réaction peut être caractérisée à l'aide de la thermogravimétrie [82] et de la calorimétrie différentielle à balayage [79]. Dans le cas de la thermogravimétrie (TGA), la variation de la masse d'un échantillon de matériau est mesurée au fur et à mesure du chauffage de ce matériau, la vitesse de montée en température et l'environnement gazeux autour de l'échantillon pouvant être variés. En ce qui concerne la calorimétrie (DSC), le paramètre mesuré en fonction de la température de l'échantillon est le flux de chaleur absorbé (réaction endothermique) ou émis (réaction exothermique) par le matériau.

Par ailleurs, une analyse du matériau ayant subi la réaction chimique de dégradation peut être réalisée. En particulier, l'analyse par spectroscopie infrarouge (FTIR) permet de déterminer la composition chimique du matériau [79]. L'imagerie microscopique peut également donner de l'information sur l'étendue en épaisseur de la dégradation du matériau.

L'analyse de composition peut également être effectuée sur les produits liquides et gazeux issus de la dégradation du caoutchouc. Dans le cas des produits liquides, la caractérisation peut être effectuée à l'aide d'une analyse élémentaire C/H/N, de chromatographie gazeuse combinée à une spectroscopie de masse et d'analyse par spectroscopie infrarouge [59,172]. En ce qui concerne les produits gazeux, la chromatographie gazeuse permet d'obtenir le profil caractéristique des groupements chimiques [63].

Finalement, l'effet de la température sur les propriétés mécaniques du caoutchouc et du pneu peut être étudié. Dans le cas d'échantillons de caoutchouc de petite taille, un analyseur thermomécanique différentiel (DMTA) peut être utilisé [53], tandis que les échantillons de

caoutchouc de grande taille et de pneu sont caractérisés à l'aide de machines de traction munies d'une chambre de température.

5.5.3 Vieillissement chimique

Étant donné que la vie utile des pneus dépasse souvent la dizaine d'années, il est fort peu pratique de soumettre le caoutchouc à un vieillissement naturel pour étudier sa dégradation. Il est donc nécessaire d'avoir recours à des tests de vieillissement accéléré pour simuler les effets produits par le vieillissement naturel. Lors de ces programmes de vieillissement accéléré, un ensemble de paramètres contrôlés tente de reproduire les résultats obtenus lors d'un vieillissement naturel, tout en augmentant la cinétique de la réaction, ce qui implique l'imposition de conditions plus sévères. Néanmoins, ces tests en vieillissement accéléré doivent être considérés avec prudence et leur usage limité à des études comparatives plutôt qu'à la prédiction de la durée de vie [105]. Une autre approche consiste en l'utilisation d'outils numériques comme la simulation par éléments finis et les modèles mathématiques [95,106].

Afin de mesurer le taux d'oxydation, une première technique implique le dosage des groupements carbonyles ou hydroxyles, soit par spectrophotométrie IR, soit par spectrofluorimétrie, par RMN du carbone ou par spectroscopie d'électrons [91]. Une autre méthode consiste à quantifier le changement de la densité de réticulation pour estimer le degré d'oxydation, par exemple par mesure du taux de gonflement dans un solvant [91,94]. Finalement, la dernière technique identifiée est basée sur l'élasticité du caoutchouc [91]. De manière générale, ces deux dernières méthodes s'appliquent à tous les cas de vieillissement par coupure statistique des chaînes polymères.

Dans la majorité des études de vieillissement, le suivi de la dégradation du caoutchouc se fait au moyen de mesures des propriétés mécaniques. En mode statique, le module à 100, 200 et 300% d'élongation, la contrainte de rupture et l'élongation à la rupture sont habituellement utilisés [92,93,105]. En effet, dans le cas de coupures de chaînes ou de réticulation, une relation lie la contrainte à la rupture et la masse molaire moyenne, et, par extension, le temps de vieillissement [91].

En sollicitation dynamique, les propriétés mesurées sont, entre autres, le nombre de cycles à la rupture et le module dynamique [53]. Par ailleurs, certains auteurs utilisent la valeur tan δ, soit le rapport entre le module de conservation et le module de pertes, comme indicateur de la variation des propriétés mécaniques avec le vieillissement [104].

Bien qu'elles ne fournissent qu'une analyse qualitative des différents phénomènes, les mesures optiques permettent d'apprécier les défauts provoqués par l'action des agents dégradants, comme les fissures, la perte d'éclat, la décoloration etc.

5.5.4 Fatigue

La méthode la plus répandue actuellement dans l'industrie pour prédire la durée de vie des pneus est de soumettre les pneus à des essais avec un dynamomètre, au cours desquels sont appliquées

plusieurs combinaisons de vitesse et de sollicitation de la bande de roulement afin de représenter les conditions d'opération typiques rencontrées pendant la vie en service des pneus. Selon la sévérité de la sollicitation, des endommagements localisés dans des régions critiques telles que la bande de roulement, la paroi latérale inférieure et l'épaulement peuvent être induits. Cette technique permet de fournir des résultats fiables quant à la durabilité structurale et à la prédiction de vie. Mais son utilisation est coûteuse, tant en temps qu'en matériaux, et son application aux pneus usagés est peu fiable. Kovac et al. rapportent les résultats de plus de 50 essais différents réalisés chez un fabricant de pneus pour caractériser la performance d'un pneu [173].

Le besoin de trouver une alternative aux essais avec dynamomètre est souvent la force motrice qui se cache derrière la recherche sur la fatigue des pneus. Quelques techniques alternatives ont pu être identifiées dans la littérature pour mesurer le niveau d'endommagement créé par la fatigue ou pour prédire la durée de vie à neuf ou résiduelle du pneu:

- **Émission acoustique** : Cette technique est proposée par Lee et al. pour déterminer en temps réel l'endommagement subi par les échantillons lors d'un essai en fatigue [174]. Il s'agit d'une onde élastique de contrainte produite par la libération soudaine d'énergie entraînée par la déformation plastique ou par le début de l'endommagement local. Cette onde traverse le matériau et peut être convertie en potentiel électrique au moyen d'un transducteur piézoélectrique monté sur la surface de la pièce testée.
- **Génération interne de chaleur** : Cette technique est aussi proposée par l'équipe de Lee qui a mis en évidence que le taux de déformation en fatigue (qui sert à mesurer le niveau d'endommagement subi par l'échantillon en fatigue) était proportionnel à la génération interne de chaleur [175,176].
- **Approche acousto-ultrasonique** : Cette technique est proposée par dos Reis et al. comme une alternative d'essai non destructif pour déterminer l'endommagement des pneus avant rechapage [177]. L'efficacité relative de la transmission d'énergie du matériau est mesurée par le biais d'un pulse ultrasonique généré par un transducteur de transmission installé sur la surface de la pièce inspectée (Figure 5.5.4-1). Un endommagement important produit une plus grande atténuation du signal (facteur d'onde de contrainte). Dans leurs travaux, les auteurs se servent de cette technique pour évaluer la condition des cordes de renfort, mais son application pourrait être élargie à la matrice caoutchouc. Par contre, il a été observé que cette technique permettait d'identifier les défauts, mais pas de mesurer leur sévérité.

  Pour la validation des résultats expérimentaux, les auteurs se servent généralement de simulations par éléments finis [122,174,178].

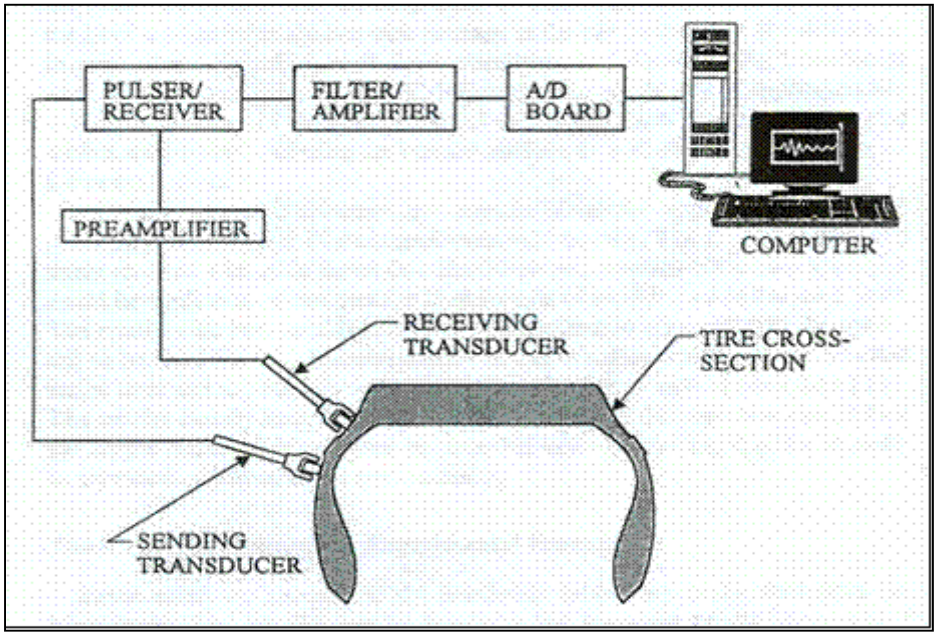


Figure 5.5.4-1 Schéma de l'acquisition de données dans la technique acousto-ultrasonique [177]

6. EXAMEN DES PISTES DE RECHERCHE

6.1 Nécessité de poursuivre par une étude approfondie

Les résultats obtenus de la revue de la littérature ne permettent pas de répondre à plusieurs questions importantes comme :

- quels sont les meilleurs indicateurs permettant d'anticiper les phénomènes dangereux ?
- Quelles sont les valeurs correspondant aux seuils critiques de ces indicateurs qui permettraient de prévenir une explosion ?
- Quelles relations existe-t-il entre chaque indicateur et quelles sont les caractéristiques de leur évolution ?
- Existe-t-il une configuration de ces indicateurs et de leurs caractéristiques qui permettrait de prédire le temps de réaction ?

Les réponses à ces questions sont importantes pour définir les meilleurs moyens de prévention du phénomène. Dans les cas où la cause ayant déclenché le processus n'aurait pas pu être évitée, il est primordial pour les intervenants de connaître l'évolution du phénomène afin d'intervenir en sécurité. Or, dans l'état actuel de la connaissance, les informations disponibles sont très imprécises et ne semblent pas validées scientifiquement.

6.2 Quelques pistes de recherche

Dans le cadre de la partie du projet concernant les aspects relatifs aux réactions chimiques comme causes des phénomènes d'éclatement/explosion des pneus de camion, un certain nombre de pistes de recherche ont été identifiées pour la phase II du projet, qui permettrait de compléter, par des mesures expérimentales et des simulations, l'analyse bibliographique effectuée dans le cadre de cette phase I. À tire d'exemple, voici quelques-unes des pistes de recherche possibles :

- Collecte de données expérimentales de température, de pression et de composition de l'air à l'intérieur du pneu lors de son utilisation normale, lors de conditions anormales (par exemple, en surchauffe lors d'une montée de côte à grande dénivellation, en sous-pression ou en surcharge) et lors d'événements pouvant mener potentiellement à une explosion (expérience similaire à celle du film de Michelin reproduisant une surchauffe à différentes vitesses, un incendie externe et un arc électrique avec plusieurs niveaux d'énergie).

- Étude par thermogravimétrie de la cinétique de dégradation thermochimique de pneus de plusieurs compositions sous des atmosphères reproduisant celles observées lors de la collecte de données et aux différentes vitesses de chauffage correspondant aux différentes conditions d'utilisation du pneu (normales, anormales et pouvant mener potentiellement à une explosion).

- Spectroscopie infrarouge (FTIR) de la composition chimique d'échantillons ayant subi différents types de traitements thermochimiques (dans des conditions correspondant aux données expérimentales recueillies).

- Comparaison des spectres FTIR de la surface interne de pneus ayant subi un éclatement ou une explosion potentiellement de nature thermochimique (obtenus de nos partenaires de l'industrie du transport) et comparaison avec les spectres des échantillons dégradés de manière contrôlée.

- Analyse thermomécanique (DMTA et machines de traction) d'échantillons de différents modèles de pneus de camion, afin de déterminer l'effet de la température sur la résistance mécanique structurale.

- Simulations de scénarios de cas d'éclatement ou d'explosion de pneus visant à déterminer de manière exacte les conditions minimales d'isolation des véhicules suspects.

7. VALORISATION DES RÉSULTATS

7.1 Diffusion des résultats

Les résultats de cette étude ont été présentés tout au long de sa réalisation au principal demandeur, lors de plusieurs rencontres de travail. L'ASTE, en tant que principal relayeur, assumera la diffusion des documents de vulgarisation. Dans un premier temps, une fiche de prévention préparée pendant la réalisation du projet devrait être disponible dans les mois à venir.

Nous présenterons les résultats au « Comité de Liaison Transport » piloté par l'Association sectorielle transport et entreposage (ASTE). Ce comité regroupe des représentants de l'Association du Camionnage du Québec (ACQ), de la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST), du ministère du Transport du Québec (MTQ), de la Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ), du Conseil canadien des ressources humaines en camionnage (CCRHC), de même que de plusieurs compagnies de transport à titre individuel.

Nous comptons également présenter les résultats aux centres de formation professionnelle de camionneurs comme : le Centre de formation du transport routier de Saint-Jérôme et le Centre de formation en transport de Charlesbourg. Nous pourrons aussi participer aux différents colloques organisés par la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) et aux différentes associations sectorielles concernées par la problématique de l'éclatement et de l'explosion des pneus.

Sur le plan scientifique, nous envisageons de participer à la conférence de l'Association québécoise pour l'hygiène, la santé et la sécurité du travail (AQHSST). Un article destiné à être soumis à une revue scientifique internationale est également en cours de rédaction. Par ailleurs, des articles de vulgarisation et de sensibilisation pourront être soumis aux revues suivantes : Prévention au Travail, Le Routier, SAAQ.

En plus du secteur des transports, nous considérons que les résultats obtenus sont pertinents pour d'autres secteurs et ils devraient également faire l'objet d'une attention particulière. Nous pensons entre autres à l'Association sectorielle des affaires municipales (APSAM), qui compte parmi ses membres les pompiers, à l'Association de santé et de sécurité des industries de la forêt du Québec (ASSIFQ) et à l'Association de santé et de la sécurité des mines (ASP Mines).

7.2 Proposition d'une étude approfondie

L'étude conclut à la nécessité de poursuivre la recherche. Les résultats de cette étude serviront de base à la préparation de la suite et à la rédaction d'un protocole de recherche.

7.3 Présentation des résultats à des organismes de transport

Les approches de solutions envisagées pour prévenir les lésions professionnelles associées aux risques d'éclatement et d'explosion des pneus de camions lourds pourraient également présenter d'autres avantages susceptibles d'intéresser des organismes comme le ministère des Transports du Québec (MTQ), Transport Canada, les ministères de l'Environnement fédéral et provincial.

En effet, d'après les informations obtenues, les techniques de surveillance de la pression des pneus pourraient favoriser des économies de carburant, lorsque les poids lourds circulent avec des pneus gonflés aux valeurs de pression recommandées.

Un document faisant la synthèse du projet actuel et mettant en valeur les avantages potentiels pour ces organisations, pourrait également favoriser leur éventuelle collaboration aux travaux de la deuxième phase du projet.

8. DISCUSSION

8.1 Importance du phénomène de l'éclatement et de l'explosion des pneus pour la sécurité

L'éclatement et l'explosion des pneus de camions lourds est un type d'accident difficile à étudier. En effet, les bases de données, contenant les informations sur les accidents ou les lésions professionnelles, ne permettent pas de distinguer les cas d'éclatement des cas d'explosion, beaucoup plus violente. Cependant, le risque de blessures graves est très élevé dans les deux cas.

La base de données sur les accidents graves et mortels a permis de couvrir la période 1990 à 2004. Par contre, l'étude de la base de données sur les lésions professionnelles ne couvrait que la période de 1995 à 2004, en raison de certains changements du système de classification survenus au début de cette période. Quoi qu'il en soit, l'analyse des données de ces deux bases montre que les accidents attribuables à l'éclatement ou à l'explosion des pneus sont responsables de près de 1 % de tous les décès pour les périodes étudiées.

Lorsqu'on compare les déboursés totaux, pour le genre d'accident dont l'agent causal est un pneu, aux déboursés totaux du même genre d'accident, peu importe l'agent causal, on constate que l'agent causal pneu implique des coûts 3,5 fois plus élevés. Ce qui donne un indice important de la gravité des accidents qui surviennent à cause de l'éclatement ou de l'explosion d'un pneu.

Dans le secteur des transports, le coût moyen des déboursés totaux par accident est deux fois supérieur au coût moyen pour l'ensemble des secteurs pour ce genre d'accident. Ce facteur signifie que les accidents de ce genre impliquent des lésions plus sévères, lorsqu'ils se produisent dans le secteur des transports.

L'analyse des rapports d'enquêtes permet aussi de constater l'imprévisibilité de l'événement. La détection du danger potentiel de même que l'estimation du risque qu'il représente sont très problématiques, car il n'y a pas de signes précurseurs qui permettent d'établir avec la précision nécessaire l'imminence de l'éclatement ou de l'explosion. Par exemple, dans un cas d'accident, nous avons pu estimer qu'il s'est écoulé un temps supérieur à une heure entre le moment où le phénomène devant conduire à l'explosion s'est produit et le moment de l'explosion elle-même. Pendant tout ce temps, le travailleur n'a pas eu conscience de l'ampleur du danger et tout indique que, malgré son expérience, il n'a pas identifié de signes suffisamment alarmants pour s'éloigner du danger. Dans d'autres cas, l'explosion s'est produite de façon presque instantanée après que le phénomène causal se soit produit.

8.2 Processus physiques et chimiques impliqués dans l'éclatement ou l'explosion des pneus

Les rapports d'enquête d'accidents graves et mortels étant suffisamment exhaustifs, il a été possible d'établir que la majeure partie des cas répertoriés au Québec impliquent un apport de chaleur. Que ce soit directement par un chalumeau, une flamme ou un arc électrique, ou indirectement à la suite d'une défaillance du système de freinage ou d'une utilisation en dehors des conditions normales (sous-pression, surcharge …), l'apport de chaleur peut être associé au

facteur déterminant relativement aux éclatements et explosions de pneus de camion documentés. Ces conclusions correspondent aussi à ce qui est rapporté dans la littérature.

Aux plus basses températures, le seul phénomène en présence est l'expansion thermique de l'air causant une élévation de la pression dans le pneu. Dans les cas où la structure mécanique du pneu est affaiblie, un éclatement peut se produire à ce stade et à n'importe quel moment. Dans le cas où la température atteint une valeur située autour de 150-200°C dans le caoutchouc, un processus de pyrolyse et/ou de thermo-oxydation se produit, selon la quantité d'oxygène en présence (pyrolyse dans le volume, thermo-oxydation en surface). Les gaz produits par la réaction combinent leurs effets avec le phénomène d'expansion thermique pour provoquer une accélération de l'augmentation de la pression interne : les risques d'éclatement augmentent.

À partir du moment où les trois conditions d'autoallumage d'une des espèces inflammables produites lors de la décomposition de la matrice polymère sont réunies, soit une concentration suffisante en espèces inflammables, une température supérieure à la température d'autoallumage de ces espèces inflammables et une concentration en oxygène supérieure à 5,5 %, l'explosion se produit, impliquant la formation d'ondes de choc.

8.3 Phénomènes de dégradation dus au vieillissement et à la fatigue du pneu

Le vieillissement chimique (ou dégradation) de la matrice caoutchouc des pneus est causé principalement par l'oxydation (qui peut être accélérée par l'augmentation de la température et par le rayonnement solaire) et par l'attaque de l'ozone. Plusieurs adjuvants (antioxydants, antiozonants, absorbeurs UV, etc.) sont généralement inclus dans la formulation de la matrice caoutchouc lors de la fabrication du pneu. Le comportement du pneu face aux différents processus de vieillissement dépend fortement de la composition du caoutchouc et de la présence de ces adjuvants. Le vieillissement climatique naturel combine l'influence de ces différents agents environnementaux et conduit à une perte des propriétés mécaniques plus ou moins rapide selon la sévérité des conditions rencontrées et selon la nature des matériaux impliqués.

Le phénomène de la fatigue est influencé par de nombreux paramètres opérationnels, de même que par le matériau et l'environnement. Des chercheurs ont montré que le processus de fatigue dans le pneu est contrôlé par l'accumulation d'une déformation (fluage). La fatigue des cordes de renfort en acier est intimement liée à l'adhésion entre les cordes et la matrice caoutchouc. Quant aux fibres de renfort polymères, des phénomènes tels que la génération interne de chaleur et le durcissement par déformation jouent un rôle fondamental lors de la défaillance en fatigue.

Des études de durabilité en service ont montré que, parmi les agents de vieillissement chimique, l'oxygène, par le biais du processus de dégradation du caoutchouc par thermo-oxydation, est la cause prédominante de la diminution des propriétés mécaniques du pneu. L'influence de la thermo-oxydation se révèle également plus importante que l'effet de la fatigue mécanique.

Le vieillissement chimique et mécanique (fatigue), quelle qu'en soit la cause, entraîne donc une diminution progressive des propriétés mécaniques des pneus. Par rapport au phénomène d'éclatement des pneus, la conséquence d'un tel processus de dégradation peut mener à une réduction par rapport à sa valeur à neuf de la pression que la structure du pneu est capable de supporter. Par conséquent, lorsqu'un apport de chaleur anormal provoque une augmentation de

la pression interne du pneu, la rupture se produira à une valeur moindre pour un pneu usagé que pour un pneu neuf. Étant donné que l'étendue des dommages est directement liée à la pression à laquelle se produit l'éclatement, le vieillissement chimique ou mécanique ne peut donc être considéré comme un facteur d'aggravation des conséquences des phénomènes d'éclatement de pneus pour les situations où les personnes sont directement exposées (véhicule à l'arrêt). Ceci n'est cependant pas le cas pour les situations d'éclatement lorsque le véhicule est en mouvement, car les problèmes de tenue de route ou de stabilité demeurent entiers.

8.4 Mesures de prévention

Les mesures préventives peuvent être abordées en fonction du lieu, de la tâche, de l'environnement immédiat. Mais il faut aussi les aborder sous l'angle de l'entretien préventif en combinaison avec des méthodes de gestion qui, dans le milieu du transport, ont de plus en plus recours à des technologies modernes de suivi des opérations et de maintenance.

8.4.1 Maintien de la pression normale recommandée

Il se dégage un large consensus de la part des fabricants de pneus et des organismes gouvernementaux concernés par la sécurité routière, sur l'importance de maintenir les pneus des véhicules gonflés à la pression recommandée par le fabricant en fonction de la charge et de la vitesse d'utilisation du véhicule. Outre les problèmes de stabilité, une pression trop faible entraîne une surchauffe du pneu. L'étude a démontré que la chaleur était le principal facteur de dégradation des pneus et que, même au niveau de ses propriétés physiques, le caoutchouc est sensible à des températures relativement basses.

Dans le cas des poids lourds, nous savons qu'après que le pneu ait roulé pendant quelques heures, le temps de refroidissement normal est de l'ordre de 2 heures. Ces durées relativement longues peuvent s'expliquer par le fait que les températures d'utilisation, même en conditions normales d'opération, sont relativement élevées pour certaines parties du pneu. Ce qui peut, en pratique, poser certains problèmes pour mesurer la pression des pneus lorsque le véhicule est en service. En effet, il est rare que le véhicule soit immobilisé suffisamment longtemps pour que les pneus aient eu le temps de refroidir. Si le chauffeur prend la température des pneus alors que l'air à l'intérieur est au-dessus de la température normale, il aura une lecture erronée. Comme il n'a pas l'information nécessaire pour calculer le facteur de correction à appliquer, il en résulte généralement une surestimation de la pression. Des cas nous ont été rapportés où des chauffeurs étaient tentés de diminuer la pression pour la ramener à la valeur associée à une température normale. Ce qui évidemment amplifie le problème. Les technologies de surveillance de la température et de la pression, discutées ci-après, font automatiquement les corrections nécessaires.

8.4.2 Les procédures sécuritaires

Dans un premier temps, il ressort clairement de l'analyse des résultats, qu'il existe des procédures reconnues pour éviter bon nombre d'accidents majeurs à l'atelier. Dans ces cas, la sensibilisation du personnel aux dangers que représentent les pneus peut s'avérer une avenue intéressante. Il est cependant impératif de fournir en parallèle une formation adéquate sur les

risques associés et les moyens de les réduire. À titre d'exemple, il est très important, lors du gonflage d'un pneu neuf ou usagé, de toujours utiliser une cage de protection bien conçue et des outils appropriés. Nous avons aussi confirmé qu'il était impératif de ne jamais souder une jante lorsque celle-ci est en contact avec un pneu gonflé ou non, cette opération étant d'ailleurs interdite. Les principales mesures de prévention en atelier, analysées pendant cette étude, sont répertoriées dans une fiche de sécurité que l'ASTE devrait rendre accessible dans un avenir rapproché.

Par ailleurs, le problème d'éclatement et d'explosion est beaucoup plus problématique lorsque le véhicule est en opération, car ce sont les conditions et les situations d'opération de même que les défaillances imprévues, qui initient le déclenchement de la séquence pouvant conduire à une situation dangereuse, par exemple l'éclatement ou l'explosion du pneu.

8.4.3 Les technologies de surveillance

L'analyse des résultats montre qu'il serait très important de pouvoir fournir aux camionneurs les outils nécessaires pour qu'ils soient alertés suffisamment tôt, c'est-à-dire avant que la cause ou les causes identifiées ne dégénèrent et ne conduisent à l'éventuelle catastrophe. D'autre part, dans l'éventualité où la situation serait déjà trop avancée, les camionneurs aussi bien que les autres personnes susceptibles d'intervenir doivent être en mesure d'estimer le moment où ils peuvent effectivement intervenir de façon sécuritaire.

Le problème majeur avec les phénomènes d'éclatement ou d'explosion vient du fait qu'ils se produisent à l'intérieur du pneu, qu'ils ne sont pas ou très difficilement détectables de l'extérieur et qu'il peut s'écouler une période de temps très variable entre l'amorce du phénomène et l'événement catastrophique. Ce temps de latence varie de quelques minutes (soudage sur une jante) à plusieurs heures dans le cas de surchauffe due à un frein partiellement bloqué. Et dans le cas d'un arc électrique, le temps de latence peut varier de quelques secondes à plus de vingt-quatre heures.

Ce qui pose la question cruciale des outils disponibles. L'étude décrit les principaux systèmes, sur le marché ou en développement, pour la surveillance de la pression et de la température des pneus. Cette étude a démontré l'importance que ces paramètres jouent dans la genèse des phénomènes d'éclatement ou d'explosion des pneus. Malgré quelques problèmes d'ajustement ou d'application en situation réelle, plusieurs de ces systèmes s'avèrent très prometteurs. La Communauté Économique Européenne (CEE) envisage d'ailleurs de réglementer pour une normalisation de ces systèmes afin de les rendre disponibles, sinon obligatoires, pour les poids lourds. Les États-Unis ont déjà légiféré pour que les fabricants de véhicules légers installent graduellement ces systèmes de surveillance de la pression des pneus sur leurs nouveaux véhicules.

Les problèmes techniques sont plus difficiles à résoudre pour les poids lourds nord-américains, en particulier parce qu'ils sont munis de roues jumelées. Cependant, il semble, d'après les informations recueillies au cours de l'étude, que les pneus simples à bande large pourraient se répandre au Québec comme ils le sont déjà en Europe. Ces pneus offriraient l'avantage de simplifier la mise au point des systèmes de surveillance de la pression et de la température. L'avantage de ces systèmes pour la sécurité consiste à prévenir les chauffeurs et le personnel

d'entretien des éventuels problèmes de conduite en sous-pression ou dans des conditions de surchauffe favorables à l'amorce de la dégradation du pneu et éventuellement à son éclatement soudain ou à son explosion. Cependant, dans le cas d'un apport de chaleur externe comme dans le cas d'un grippage des freins, rien n'indique que ces systèmes seront en mesure d'alarmer le chauffeur ou le personnel de maintenance de manière adéquate. En effet, nous n'avons pas trouvé d'étude scientifique décrivant les seuils de pression et de température critiques ou d'algorithmes de calcul permettant de prédire l'occurrence du phénomène ou le niveau de danger correspondant à une situation anormale. Ce point est d'autant plus important que les températures de certaines parties du pneu, en condition d'opération normale, sont proches des valeurs où il serait peut être important de sonner l'alarme.

8.4.4 Axes de développement possibles

Nous pouvons conclure de ce qui précède qu'il serait opportun et nécessaire d'approfondir ces questions afin de fournir aux différents intervenants les outils leur permettant de diagnostiquer correctement le danger afin de mieux se protéger et d'intervenir en sécurité.

En effet, parmi les questions épineuses en suspens, les transporteurs ont besoin de savoir concrètement pendant combien de temps leur personnel doit se tenir à l'écart d'un pneu à risque d'éclater ou d'exploser. Il n'y a pas, à notre connaissance, d'étude scientifique qui réponde de manière satisfaisante à cette question. Par ailleurs, il reste à déterminer quels sont les indices objectifs ou les moyens et les outils, scientifiquement validés, pour estimer ou prédire correctement et suffisamment en avance l'occurrence possible de ce type d'événements indésirables.

La compagnie Wabco, en collaboration avec Michelin, a développé un système qui utilise un algorithme permettant de prédire la venue d'un roulement à plat à la suite d'une perte lente de pression. On peut donc envisager qu'il soit possible de développer le même genre d'approche pour prédire le développement de conditions potentiellement favorables à l'éclatement ou à l'explosion d'un pneu.

9. CONCLUSION

Cette étude a démontré que les éclatements et les explosions de pneus de camions lourds sont des problèmes préoccupants pour le secteur des transports, en particulier. En plus d'infliger des lésions professionnelles graves, ces types d'accidents du travail sont responsables de près de 1% de l'ensemble des décès. Le secteur des transports absorbe la plus grande part des déboursés totaux pour ce genre d'accident, dont l'agent causal est « pneus ».

L'activité de recherche a mis en évidence les principales causes et les conditions nécessaires à l'amorce d'un processus compliqué qui peut conduire soit à un éclatement violent et soudain, soit à une explosion extrêmement violente et imprévisible. Grâce à une meilleure compréhension des phénomènes en jeu, dont la thermo-oxydation et la pyrolyse, l'étude a permis de mettre en évidence deux facteurs déterminants pour la gravité des accidents : l'absence de signes extérieurs objectifs qui permettent d'identifier le risque et la très grande variabilité du temps de latence entre le moment où une cause identifiable survient et le moment où l'éclatement ou l'explosion peut se produire.

La chaleur est le principal facteur contributif au déclenchement d'une série de réactions chimiques qui dégradent le caoutchouc des pneus et produisent des gaz et des matières inflammables. Les gaz produits s'additionnent au phénomène d'expansion thermique de l'air initialement dans le pneu, contribuant au risque d'éclatement. Une température élevée peut également entraîner une diminution des propriétés mécaniques du pneu, augmentant les probabilités d'un éclatement. La situation la plus dangereuse survient lorsque les trois conditions critiques de concentration et de température de ces produits inflammables découlant de réactions chimiques et de concentration en oxygène sont réunies, situation dans laquelle le pneu explose.

Des indicateurs existent, ainsi que des techniques et des moyens pour les mesurer, dans le but de permettre de prévenir les risques d'explosion. Cependant, les valeurs correspondant aux seuils critiques n'étant pas déterminées, ni les relations précises entre les points de mesures possibles, la détection n'est donc pas réalisable pour le moment.

En termes de sécurité, le problème d'éclatement est d'un niveau de difficulté moindre par rapport au problème d'explosion. Cependant, il nécessite également un suivi de l'évolution des indicateurs, comme la pression et la température à l'intérieur du pneu. Bien que le problème soit moins compliqué que pour la prévention des explosions, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour préciser les liens entre ces indicateurs et les risques.

L'étude démontre que, même si la prévention des explosions s'avère plus compliquée, il devrait être possible, en combinant judicieusement les caractéristiques de l'évolution des indicateurs, de déterminer un algorithme devant permettre aux utilisateurs de diagnostiquer correctement et facilement le risque afin de déterminer les moyens de prévention ou de protection les plus efficaces.

Nous concluons qu'une étude expérimentale est requise pour déterminer quelles sont les valeurs seuils et les meilleurs indicateurs des phénomènes dangereux et quelles sont les meilleures

technologies, disponibles et acceptables par l'industrie, pour en faire le suivi. Nous recommandons donc cette approche, car elle devrait permettre de donner des réponses plus précises aux questions des intervenants. En particulier, à quel moment y a-t-il un risque d'explosion? Combien de temps faut-il attendre avant d'intervenir? Quels sont les meilleurs moyens d'intervention selon la situation? Quelles sont les meilleures actions préventives pour éviter l'apparition de ce phénomène dangereux?

Cet axe de recherche s'inscrit dans les préoccupations actuelles des organismes concernés par la sécurité et s'avère d'autant plus prometteur que plusieurs compagnies travaillent à la conception de systèmes de suivi de plus en plus performants.

10. RÉFÉRENCES

1 Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec (CSST), Rapports d'enquêtes dépersonnalisés disponibles sur le site : http://centredoc.csst.qc.ca

2 Gou, M., Clément, B., Birikundavyi, S., Bellavigna, O. Abraham, E., « Incidence de l'état mécanique des poids lourds sur la sécurité routière », École Polytechnique de Montréal, pour la Société de l'assurance automobile du Québec, décembre 1997.

3 Ontario Natural Resources Safety Association, « Tire Explosions Due to Pyrolysis », Technical Report, March 1996.

4 Cutler, Tony, « Final Report to Hamersley Iron on Catastrophic Tyre Incident on Haultruck 06H1 at Channar on April 10, 2004 », OTRACO, 29 juin 2004.

5 Commission de la santé et de la sécurité de travail (CSST) accès centre de documentation pour télécharger les rapports d'enquêtes accidents sur le site WEB à l'adresse suivante : http://www.csst.qc.ca/portail/fr/actualites/rap_enquete/rap_enquete.htm.

6 Service de la statistique, « Manuel de codage », Direction de la statistique et la gestion de l'information, CSST, Révision nov. 96.

7 Institut de la statistique du Québec (ISQ), « Classification des activités économiques du Québec (CAEQ-2) » Système de classification utilisé dans les bases de données de la CSST.

8 Ontario Natural Resources Safety Association (ONRSA). (1996). Tire explosions due to pyrolysis (technical report).

9 OTRACO. (2004). Final report to Hamersley Iron on catastrophic tyre incident on haul truck 06H1 at Channar on April 10, 2004.

10 Frates, W. S. (2000). Tire inflation accidents, 2005, from http://www.tireaccidents.com/tire_inflation_accidents.htm.

11 Hofmann, W. (1989). Vehicle tires. In O. U. Press (Ed.), Rubber Technology Handbook.

12 Goodyear.Comment fabriquer un pneu. Retrieved 16 décembre 2005, 2005, from http://www.goodyear.ca/tire_school/howtomake-fc.html.

13 Michelin. (2004). Qu'est ce qu'un pneu ? Retrieved 16 décembre 05, 2005, from http://www.michelin.fr/fr/auto/auto_cons_bib_qu_est_pne.jsp.

14 Michelin. (2004). L'architecture d'un pneu. Retrieved 16 décembre 05, 2005, from http://www.michelin.fr/fr/auto/auto_cons_bib_arc_pne.jsp.

15 Wong, J. Y. (2001). Mechanics of pneumatic tires. In Theory of ground vehicles (3rd ed., pp. 3-90): John Wiley.

16 Sumner, A. J. M., Engehausen, R., & Trimbach, J. (2001). Polymer developments to improve tire life and fuel economy. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Cleveland, OH.

17 Beach, D., & Schroeder, J. (2000). An overview of tire technology. Paper presented at the Srping meeting, Rubber division, American Chemical Society, Dallas, Texas.

18 Giguère, Y, Directeur de la Formation Région de l'Est , Figure adaptée de la présentation « Expérience commerciale, une situation commerciale difficile, quelque chose de vous que nous ne saurons pas si vous ne nous le dites pas », CAT 2002, Goodyear Canada inc**.**

19 Goodyear.Ingrédients de base pour la fabrication d'un pneu. Retrieved 16 décembre 05, 2005, from http://www.goodyear.ca/tire_school/ingredients-fc.html.

20 CIWMB. (1996). Effects of waste tires, waste tire facilities, and waste tire projects on the environment. Retrieved 5 janvier 06, 2006, from http://www.ciwmb.ca.gov/Publications/default.asp?pubid=433.

21 Ciullo, P. A., & Hewitt, N. (1990). Rubber. In P. D. Library (Ed.), The rubber formulary (pp. 1-72). New York: Noyes Publications / William Andrew Publishing.

22 Gabor, J. L., Wall, J. F., & Rodgers, M. B. (2001). Overview of medium radial truck and off the road tire technology. Paper presented at the Spring meeting, Rubber division, American Chemical Society, Providence, Rhode Island.

23 Ciullo, P. A., & Hewitt, N. (1999). Natural rubber, isoprene. In P. D. Library (Ed.), The rubber formulary (pp. 73-110). New York: Noyes Publications / William Andrew Publishing.

24 Bhakuni, R. S., Rye, G. W., & Domchick, S. J. (1979). ADHESIVE AND PROCESSING CONCEPTS FOR TIRE REINFORCING MATERIALS. Tire Reinf and Tire Perform, Symp, Oct 23-25 1978(694), 122-138.

25 Goodyear Spécifications de pneus. Retrieved 16 décembre 05, 2005, from http://www.goodyear.ca/tire_school/tirespecs-fc.html.

26 Hofmann, W. (1989). A comparison of properties and uses of different rubbers. In O. U. Press (Ed.), Rubber Technology Handbook.

27 Anon. (1952). Studies of tire performance at national bureau of standards. Rubber Age (New York), 71(3), 361-364.

28 Giguère Yves, Directeur de la Formation Région de l'Est Goodyear Canada inc. Présentation : « Expérience commerciale - Une situation commerciale difficile - Quelque chose de vous que nous ne saurons pas si vous ne nous le dites pas », 1998.

29 Ultrich Bob, « Armed and still dangerous Zipper Rates are up. Injuries are down. Here's why., MDT 2001, www.mtdealer.com.

30 GROGAN, R.J. 1986. «An investigator's guide to tire failure». North Florida University, Jacksonville. 128p.

31 GLENN, WILLIAM. 1997. «Exploding tires: the hazard nobody's heard of». Occupational Health & Safety Canada. 13:2. p42, 7 pgs.

32 LEGORJU-JAGO, K., BATHIAS, C. 2002. «Fatigue initiation and propagation in natural and synthetic rubbers». International Journal of fatigue. 24:2-4. 85-92.

33 Person, E., Tire & Wheel Canada, September 2004, page Web consultée : http://www.autoserviceworld.com/issues_TW/ISarticle.asp?id=155770&story_id=38002112830&issue=09012004&PC=TW.

34 COSTA, A.L.A., NATALINI, M., INGLESE, M.F., XAVIER, O.A.M. 1998. «Tire bead overheating in urban buses and trucks using drum brake systems». Tire Science & Technology. 26:1. 51-62.

35 BROOKES, F.R. 1983. «Explosions initiated by welding the rims of wheels fitted with tubeless tyres». Journal of Occupational Accidents. 5:3. 149-160.

36 Hunter Réal, « Accident mortel survenu à un travailleur le 4 juin 1996, dans le garage de : entreprise de déboisement Côté et frères ltée, Villebois » Rapport d'intervention no R705714, CSST, Direction régionale de l'Abitibi-Témiscamingue, réf. EN002990.

37 CONSTRUCTION SAFETY MAGAZINE. 1994. «Electrical contact may cause delayed explosion in tires». Construction Safety Association of Ontario. 5:1. p2.

38 Manitoba Hydro, Safety first, site WEB consulté : http://www.hydro.mb.ca/francais/safety_first/farm_safety.shtml#myths.

39 JONASSEN, N. 1999. «Ions». Compliance Engineering. 16:3. 24-28.

40 INSERVICE. 2004. «Basic Tire Maintenance Tips». [En ligne]. http://inserviceextra.firechief.com/ (Page consultée le 23 janvier 2006).

41 LAUGHERY, KENNETH R., LAUGHERY, KEITH A., LOVVOLL, DAVID R.1998. «Tire-rim mismatch explosions: The role of on-product warnings». Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society. Vol. 2. 1088-1092.

42 LAUGHERY, KENNETH R. Sr., MAYER, DAVID L., VAUBEL, KENT P. 1990. «Tire-rim mismatch explosions. Human factors analysis of case studies data». Proceedings of the Human Factors Society 34th Annual Meeting. 1990. 584-588.

43 THE MAINTENANCE COUNCIL. 2001. Recommended Maintenance Practices manual 2000-2001. Council of ATA. RP 205A-1, RP 209C-1, RP 222A-22 & 39, RP 228-1, RP 232-1.

44 Prevorsek, D. C., Kwon, Y. D., Sharma, R. K., & Beringer, C. W. (1980). ANALYSIS OF TIRE DEFORMATION IN OPERATION FROM THE DATA OF TEMPERATURE RISE. SAE Preprints(800181), 15.

45 Richey, G. G., Hobbs, R. H., & Stiehler, R. D. (1956). Temperature studies of air in truck tire. Rubber Age, 79(2), 273-276.

46 Ziliang, Z., Youde, L., Qingnian, W., Jie, L., Liang, C., Zhimin, M., et al. (1999, 1999//). Application of infrared thermometer in testing of temperature field for a rolling tire. Paper presented at the Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference (IVEC'99), 6-9 Sept. 1999, Changchun, China.

47 Lin, Y.-J., & Hwang, S.-J. (2004). Temperature prediction of rolling tires by computer simulation. Mathematics and Computers in Simulation, 67(3), 235-249.

48 Schuring, D. J. (1980). ROLLING LOSS OF PNEUMATIC TIRES. Rubber Chemistry and Technology, 53(3), 600-727.

49 Beauchamp, F., directeur des services techniques, Michelin Canada, courriel reçu le 29 juin 2006.

50 Futamura, S., & Goldstein, A. (2004). simplifying the thermal analysis of a rolling tire with the deformation index method. Paper presented at the Spring meeting, Rubber division, American Chemical Society, Grand Rapids, MI.

51 Wineman, A., Jones, A., & Shaw, J. (2003). Thermomechanics of elastomers undergoing scission and crosslinking at high temperatures. Tire Science and Technology, 31(2), 68-86.

52 Hui-Feng, T., Xing-Wen, D., Yin-Tao, W., & Young-Jin, Y. (2004, 2004). Mechanical properties of cord-rubber composites and tire finite element analysis. Paper presented at the 5th World Congress on Computational Mechanics, 7-12 July 2002. Vehicle System Dynamics, Vienna, Austria.

53 Wei, Y. T., Nasdala, L., Rothert, H., & Xie, Z. (2004). Experimental investigations on the dynamic mechanical properties of aged rubbers. Polymer Testing, 23(4), 447-453.

54 Burlett, D. J. (2004). Thermal techniques to study complex elastomer/filler systems. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 75(2), 531-544.

55 Popov, A. A., Cole, D. J., Winkler, C. B., & Cebon, D. (2003). Laboratory measurement of rolling resistance in truck tyres under dynamic vertical load. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering, 217(D12), 1071-1079.

56 Transport Canada, S. r. (2003). Rouler sur l'air. Retrieved 16 dec 2005, 2005, from http://www.tc.gc.ca/securiteroutiere/tp/tp2823/gonflage.htm.

57 Dupras, A., & L'épicier, A. (2002). Accident mortel survenu à un travailleur le 3 Juillet 2001 au centre maraîcher Eugène Guinois Jr Inc. soit au 555, 4ème rang à Sainte-Clothilde-de -Châteauguay, dossier EN003305 (Rapport d'enquête d'accident).

58 Hofmann, W. (1989). Adhesion and adhesives. In O. U. Press (Ed.), Rubber Technology Handbook.

59 Laresgoiti, M. F., Caballero, B. M., de Marco, I., Torres, A., Cabrero, M. A., & Chomon, M. J. (2004). Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 71(2), 917-934.

60 Teng, H. S., Serio, M. A., Wojtowicz, M. A., Bassilakis, R., & Solomon, P. R. (1995). Reprocessing of Used Tires into Activated Carbon and Other Products. Industrial & Engineering Chemistry Research, 34(9), 3102-3111.

61 Pakdel, H., Pantea, D. M., & Roy, C. (2001). Production of dl-limonene by vacuum pyrolysis of used tires. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 57(1), 91-107.

62 Chen, J. H., Chen, K. S., & Tong, L. Y. (2001). On the pyrolysis kinetics of scrap automotive tires. Journal of Hazardous Materials, 84(1), 43-55.

63 Chen, F. Z., & Qian, J. L. (2003). Studies of the thermal degradation of waste rubber. Waste Management, 23(6), 463-467.

64 Verdu, J. (1984). Vieillissement des plastiques. Série AFNOR technique. Pub. Association française de normalization (Paris), Diffusé par Eyrolles.

65 Thomassin, M., & Blais, Y. (2004). Accident mortel survenu à un travailleur le 2 avril 2004 dans la réserve faunique des Laurentides, dossier EN003487 (Rapport d'enquête d'accident No. RAP0253028).

66 OTRACO. (2002). Tyre explosions: definitions, mechanisms, prevention, procedures (présentation).

67 Le ministre de l'environnement. (1996). Circulaire DPPR/SEI du 26 juillet 1996 relative à la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement Classement du soufre, from http://aida.ineris.fr/textes/circulaires/text0145.htm.

68 Glenn, W. (1997). Exploding Tires The Hazard Nobody's Heard of. OHS Canada Magazine, March 1997, 42.

69 Duval, C., & Duval, R. (1977). Dictionnaire de la chimie et de ses applications (3eme edition ed.).

70 Muller, P. (1994). Glossary of terms used in physical organic chemistry, from http://www.chem.qmul.ac.uk/iupac/gtpoc/index.html.

71 Murena, F., Garufi, E., & Gioia, F. (1996). Hydrogenative pyrolysis of waste tyres: Kinetic analysis. Journal of Hazardous Materials, 50(2-3), 143-156.

72 Lin, J. P., Chang, C. Y., & Wu, C. H. (1996). Pyrolytic treatment of rubber waste: Pyrolysis kinetics of styrene-butadiene rubber. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 66(1), 7-14.

73 Aylon, E., Callen, M. S., Lopez, J. M., Mastral, A. M., Murillo, R., Navarro, M. V., et al. (2005). Assessment of tire devolatilization kinetics. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 74(1-2), 259-264.

74 Gonzalez, J. F., Encinar, J. M., Canito, J. L., & Rodriguez, J. J. (2001). Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 58, 667-683.

75 Leung, D. Y. C., & Wang, C. L. (1998). Kinetic study of scrap tyre pyrolysis and combustion. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 45(2), 153-169.

76 Agency, U. S. E. P., Clark, C., Meardon, K., & Russel, D. (1993). Scrap tire pyrolysis. In N. D. Corporation (Ed.), Scrap Tire Technology and Markets.

77 Cunliffe, A. M., & Williams, P. T. (1998). Composition of oils derived from the batch pyrolysis of tyres. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 44(2), 131-152.

78 Napoli, A., Soudais, Y., Lecomte, D., & Castillo, S. (1997). Scrap tyre pyrolysis: Are the effluents valuable products? Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 40-1, 373-382.

79 Chen, K. S., Yeh, R. Z., & Chang, Y. R. (1997). Kinetics of thermal decomposition of styrene-butadiene rubber at low heating rates in nitrogen and oxygen. Combustion and Flame, 108, 408-418.

80 Hofmann, W. (1989). Aging and aging protectors. In O. U. Press (Ed.), Rubber Technology Handbook.

81 Lee, J. M., Lee, J. S., Kim, J. R., & Kim, S. D. (1995). Pyrolysis of waste tires with partial oxidation in a fluidized-bed reactor. Energy (Oxford), 20(10), 969-976.

82 Burlett, D. J. (1999). Studies of elastomer oxidation via thermal analysis. Rubber Chemistry and Technology, 72(1), 165-173.

83 Mairesse, M., & Petit, J. M. (1999). Produits de dégradation thermique des matières plastiques. Cahier de notes documentaires - Hygiène et sécurité au travail, 174, 47-57.

84 Conesa, J. A., Font, R., Fullana, A., & Caballero, J. A. (1998). Kinetic model for the combustion of tyre wastes. Fuel, 77(13), 1469-1475.

85 Choi, B.-C., Choi, W., & Lim, M.-T. (2001). Burning used automotive tires for activated carbon. JSME International Journal, Series B: Fluids and Thermal Engineering, 44(1), 133-139.

86 Kim, J. R., Lee, J. S., & Kim, S. D. (1994). Combustion characteristics of shredded waste tires in a fluidized bed combustor. Energy (Oxford), 19(8), 845-854.

87 Pyrotech BEI. (2002). Rapport d'expertise Pyrotech BEI (No. 003364).

88 Cothup, N. B., Daly, L. H., & Wiberly, S. E. (1990). Introduction to infrared and raman spectroscopy.

89 Struick, L. C. E. (1985). Physical Aging. In J. W. a. Sons (Ed.), Encyclopedia of Polymer Science and Engineering (2ème ed., Vol. 1, pp. 595-611).

90 Fayolle, B., & Verdu, J. (2002). Vieillissement physique des matériaux polymères. In P. T. d. l'Ingénieur (Ed.), Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites (Vol. AM3150).

91 Verdu, J. (2002). Vieillissement chimique des plastiques: aspects généraux. In P. t. d. l'ngénieur (Ed.), Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites (Vol. AM 3151).

92 Huang, D., LaCount, B. J., Castro, J. M., & Ignatz-Hoover, F. (2001). Development of a service-simulating, accelerated aging test method for exterior tire rubber compounds I. Cyclic aging. Polymer Degradation and Stability, 74(2), 353-362.

93 LaCount, B. J., Castro, J. M., & Ignatz-Hoover, F. (2002). Development of a service-simulating, accelerated aging test method for exterior tire rubber compounds II. Design and development of an accelerated outdoor aging simulator. Polymer Degradation and Stability, 75(2), 213-227.

94 Kataoka, T., Zetterlund, P. B., & Yamada, B. (2003). Effects of storage and service on tire performance: Oil component content and swelling behavior. Rubber Chemistry and Technology, 76(2), 507-516.

95 Ellwood, K. R. J., Baldwin, J., & Bauer, D. R. (2005). A finite element model for oven aged tires. Tire Science and Technology, 33(2), 103-119.

96 Pierre, C. C., Datta, S., & Datta, R. N. (2004). New Mechanistic View on Network Stabilization. KGK-Kautschuk und Gummi Kunststoffe, 57(3), 99-104.

97 Nellen, A. H., Dunlap, J., W.B., Glaser, J., C.J., & Landes, R. A. (1950). Effect of atmospheric ozone on tires during storage. Rubber Age (New York), 66(6), 659-662.

98 Waddell, W. H. (1998). Tire black sidewall surface discoloration and non-staining technology: A review. Rubber Chemistry and Technology, 71(3), 590-618.

99 Verdu, J. (2002). Différents types de vieillissement chimique des plastiques. In P. T. d. l'Ingénieur (Ed.), Techniques de l'Ingénieur: traité Plastiques et Composites (Vol. AM3152).

100 Naskar, A. K., Mukherjee, A. K., & Mukhopadhyay, R. (2004). Studies on tyre cords: Degradation of polyester due to fatigue. Polymer Degradation and Stability, 83(1), 173-180.

101 Bauer, D. R., Baldwin, J. M., & Ellwood, K. R. (2004). Correlation of rubber properties between field aged tires and laboratory aged tires. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Colombus, OH.

102 Pannikottu, A. (2003). Service life prediction for elastomeric tire components. Paper presented at the Spring meeting, Rubber division, American Chemical Society, San Francisco, CA.

103 Adhikary, A., Mukhopadhyay, R., & Deuri, A. S. (1995). Effect of silane coupling agent (Si-69) on thermoxidative stability of butyl rubber compounds. Journal of Materials Science, 30(16), 4112-4114.

104 Datta, R. N., & Huntink, N. M. (2002). Stabilization of dynamic properties following ageing. KGK-Kautschuk und Gummi Kunststoffe, 55(7-8), 350-355.

105 Huntink, N. M., & Datta, R. N. (2003). A novel slow release antidegradant for the rubber industry. Part 1: Migration behavior of newly developed anti-ozonant compared to conventional antidegradants. KGK-Kautschuk und Gummi Kunststoffe, 56(6), 310-315.

106 Rodionova, O. Y., & Pomerantsev, A. L. (2005). Prediction of rubber stability by accelerated aging test modeling. Journal of Applied Polymer Science, 95(5), 1275-1284.

107 Nellen, A. H., & Sellers, H. M. (1929). Correlation between Geer oven and natural aging of selected tire compounds. Industrial and Engineering Chemistry, 21(11), 1019-1020.

108 Parker, D. K. (1995). Improved aging and UV resistance of TPEs derived from diimide HSBRs. Rubber World, 213(1), 33.

109 Baldwin, J. M. (2003). Accelerated aging of tires, Part I. Paper presented at the Fall Meeting, Rubber division, American Chemical Society, Cleveland, OH.

110 Schwarz, D. L., Askea, D. W., & Lambillotte, B., D. (2003). Laboratory simulated aging and the effect on the oxygen content in rubber. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Cleveland, OH.

111 Tuval, E., Thurm, A., & Rigbi, Z. (1999). The aging of tires and similar objects in open air storage. Journal of Polymer Engineering, 19(3), 209-221.

112 Kenyon, D. (1964). Testing tire ply adhesion. Adhesives Age, 7(8), 27-29.

113 Lambillotte, B., D., & Gibson, M. A. (2003). Steel cord adhesion after heat aging and dynamic exercice. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Cleveland, OH.

114 Baldwin, J. M., Dawson, M. A., & Hurley, P. D. (2003). Field aging of tires, Part I. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Cleveland, OH.

115 Baldwin, J. M., Bauer, D. R., & Hurley, P. D. (2004). Field aging of tires, Part II. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Clombus, Oh.

116 Hong, S. W., & Lin, C.-Y. (1999). Improved flex fatigue and dynamic ozone crack resistance through the use of antidegradants or their blends in tire compounds. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Orlando, FL.

117 Lee, B. L., Song, J. H., & Hosterman, A. (2003). Origins of catastrophic failure in SUV tires as composite structures. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Cleveland, OH.

118 Kerchman, V., & Shaw, C. (2001). Experimental study and finite element simulation of heat build-up in rubber compounds with application to fracture. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Cleveland, OH.

119 Blazic, O., Chiesa, A., & Ghilardi, G. (1979). FATIGUE OF TYRES. Proc of the Int Rubber Conf, IRC 79, Oct 3-6 1979, 638-647.

120 Grosch, K. (1988). ROLLING RESISTANCE AND FATIGUE LIFE OF TIRES. Rubber Chemistry and Technology, 61(1), 42-63.

121 Bobo, S. N. (1988). Fatigue life of aircraft tires. Tire Science & Technology, 16(4), 208-222.

122 Giuliani, G. P., Medri, G., & Pirondi, A. (2001). A test to evaluate fatigue crack growth in rubber compounds under mixed mode loading. Tire Science and Technology, 29(1), 44-55.

123 Sarbach, D. V., & Hallman, R. W. (1965). Road testing of American and Yugoslavian polybutadiene truck tyres under severe service conditions -- 1. Rubber and Plastics Age, 46(10), 1151-1154.

124 Sarbach, D. V., & Hallman, R. W. (1965). Road testing of American and Yugoslavian polybutadiene truck tyres under severe service conditions -- 2. Rubber and Plastics Age, 46(11), 1272-1274.

125 Holt, J. M. (1985). FACTORS INFLUENCING THE FATIGUE LIFE OF STEEL CORD IN TIRES. Wire Journal International, 18(10), 76277.

126 Klein, W. G., Platt, M. M., & Hamburger, W. J. (1962). Experimental study of tire cord fatigue. Textile Research Journal, 32(5), 393-408.

127 Naskar, A. K., Mukherjee, A. K., & Mukhopadhyay, R. (2004). Studies on tyre cords: Degradation of polyester due to fatigue. Polymer Degradation and Stability, 83(1), 173-180.

128 Nkiwane, L., & Mukhopadhyay, S. K. (2000). A study of flex fatigue characteristics of nylon 6.6 tire yarns and cords. Journal of Applied Polymer Science, 75(8), 1045-1053.

129 Tomassin, M., Blais, Y., « Accident mortel survenu à un travailleur le 2 avril 2004 dans la réserve faunique des Laurentide » Rapport d'intervention no DPI 1403795, EN003487, Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec (CSST), 9 déc. 2004.

130 Ebbott, T.G., Hohman, R.L., Jeusette, J.-P., Kerchman, V. 1999. «Tire temperature and rolling resistance prediction with finite element analysis». Tire Science & Technology, 27:1. 2-21.

131 PARK, H.C., YOUN, S.-K., SONG, T.S., KIM, N.-J. 1997. «Analysis of temperature distribution in a rolling tire due to strain energy dissipation». Tire Science & Technology. 25:3. 214-228.

132 WEI, Y.-T., TIAN, Z.-H., DU, X.W. 1999. «Finite element model for the rolling loss prediction and fracture analysis of radial tires». Tire Science & Technology. 27:4. 250-276.

133 BOLARINWA, E.O., ALATUNBOSUN, O.A. 2004. «Finite element simulation of the tyre burst test». Proceedings of the Institution of Mechanical engineers. 218:11. 1251-1258.

134 TSENG, N.T., PELLE, R.G., CHANG, J.P., WARHOLIC, T.C. 1991. «Finite element simulation of destructive tire testing». Tire Science & Technology. 19:1. 2-22.

135 CAREY, J. 1999. «Survey of Tire Debris on Metropolitan Phoenix Highways». Arizona Department of Transportation. 93p.

136 The Technology & Maintenace Concil's S.2 Tire & Wheel Study Group, http://www.saferco.com/articles/TMC.pdf.

137 PONTICEL, P. 2004. «Revised tire-pressure rule proposed». Automotive Engineering International. 112:10. p159.

138 PONTICEL, PATRICK. 2002. «Two tire pressure systems OK'd». Automotive Engineering International. 110:7. p128.

139 MERCIER, STEVE, LÉGÈRE, GLEN. 2005. «Prolonger la saison de transport avec les systèmes de contrôle de la pression des pneus». Routes & Transports. 34:2. 6-7.

140 COMMISSION ÉCONOMIQUE POUR L'EUROPE, COMITÉ DES TRANSPORTS INTÉRIEURS, Groupe de travail des transports de marchandises dangereuses, « Prévention des risques d'incendie liés aux pneumatiques », RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL SUR SA SOIXANTE-DIX-NEUVIÈME SESSION, 7-11 novembre 2005.

141 COSTLOW, T. 2004. «Wireless technologies to bombard vehicles». Automotive Engineering International. 112:12. p38.

142 GOODYEAR NEW TIRE IQ SYSTEM. 2003. «First Direct Battery-less Tire Measurement Technology Available from Goodyear, Siemens VDO Automotive». [En ligne]. http://www.goodyear.com/ (Page consultée le 23 janvier 2006).

143 JOST, K. 2003. «Direct tire-pressure measurement from Siemens, Goodyear». Automotive Engineering International. 111:5. p73.

144 COSTLOW, T. 2003. «Motorola rolls out direct tire pressure sensor». Automotive Engineering International. 111:7. 63-64.

145 MICHELIN ETIRE. 2005. «eTire Solution direct tire pressure monitoring systems (TPMS)». [En ligne]. http://www.michelintruck.com/ (Page consultée le 23 janvier 2006).

146 SMARTIRE SYSTEMS. 2005. «SmarTire's Commercial Vehicle System». [En ligne]. http://www.smartire.com/ (Page consultée le 23 janvier 2006).

147 YOUSON, MATT. 2003. «Flat out». Engineering. 244:9. 32.

148 MARSH, D. 2004. «Safety Check: Wireless sensors eye tire pressure». EDN. 48:18. p42, 8 pgs.

149 ETV CORPORATION PTY. 2005. «VisiTyre: a tyre pressure monitoring system (TPMS)». [En ligne]. http://www.etv.com.au/ (Page consultée le 23 janvier 2006).

150 Wabco, documents sur site WEB, http://www.wabco.info/intl/pdf/820/001/140/820_140.pdf.

151 Arvin Meritor, site WEB, http://www.arvinmeritor.com/home/default.asp.

152 TPC International Ltd., site WEB, http://www.tirepressurecontrol.com/fr_company.php.

153 TIRE RETREAD INFORMATION BUREAU. 2005. «Why Inflating Tires with Nitrogen Makes Sense». [En ligne]. http://www.retread.org/ (Page consultée le 23 janvier 2006).

154 BALDWIN, J.M., BAUER, D.R., ELLWOOD, K.R. 2004. «Passenger tires inflated with nitrogen age slower: Part 1 of 2 & Part 2 of 2». Rubber & Plastic News, September 20th 2004. 5p.

155 NITRONICS SYSTEMS. 2005. «TireLast Products: Nitrogen Purity Meter». [En ligne]. http://www.tirelast.com/ (Page consultée le 23 janvier 2006).

156 PARKER. 2005. «Bulletin TSN2C - Nitrogen Generator for Tire Inflation». [En ligne]. http://www.parker.com/ (Page consultée le 23 janvier 2006).

157 RIMEX. 2005. «De-Fuzer Valve». [En ligne]. http://www.rimex.com/ (Page consultée le 23 janvier 2006).

158 BAREKET, Z., BLOWER, D.F., MACADAM, C. 2000. «Blowout Resistant Tire Study for Commercial Highway Vehicles». University of Michigan Transportation Research Institute, Report No: UMTRI-2000-28. 50p.

159 ENTIRE. 2005. «The First Self-Inflating Tire». [En ligne]. http://www.selfinflatingtire.com/ (Page consultée le 23 janvier 2006).

160 BUCHHOLZ, K. 2005. «Tire and wheel fusion». Automotive Engineering International. 113:4. p40, 2 pgs.

161 TECNOSISTEMI GROUP. 2005. Heat Detection Portal for the Mont-Blanc Tunnel. [En ligne]. http://www.tecnosistemigroup.com/ (Page consultée le 23 janvier 2006).

162 Minahan, P. (2004). Tyre Fire, Pyrolysis and Explosions. Safety Bulletin, Queensland Government, Natural Resources, Mines and Engineering, 47.

163 Breault, Martin. « Un risque à connaître ». La revue sécurité incendie, automne 2004, p. 10-12. « Pyrolysis : tire ire ». OHS Canada, vol. 20, no. 6, p. 30-31. http://www.apsam.com/Themes/pneus/V14N1_P7.pdf.

164 Auto Prévention, « Gonflage de pneus de véhicules lourds : Mettez le danger en cage ! », Article du magazine Auto Prévention, décembre 2005, http://www.autoprevention.com/Publique/.

165 Auto Prévention, « Êtes-vous à l'abri de l'explosion d'un pneu ? », Article du magazine Auto Prévention, septembre 2000. http://www.autoprevention.com/Publique/.

166 Rohlwing, Kevin « Identifiying a zipper Rupture », ITRA International Tire and Rubber Association Fondation inc. Commercial Tire Service Update, Volume 5, Issue 11, November 2000.

167 BRIDGESTONE FIRESTONE. 2005. «Marche à suivre pour le montage et le démontage de pneus». [En ligne]. http://www.trucktires.com/ (Page consultée le 23 janvier 2006).

168 JANSSEN, M. L., & WALTER, J. D. (1971). Strain measurements in bias, belted bias, and radial ply tires. Rubber Chem Technol, 44(5), 1453-1455.

169 JANSSEN, M. L., & WALTER, J. D. (1971). Rubber strain measurements in bias, belted- bias and radial ply tires. Journal of Coated Fibrous Materials, 1, 102-117.

170 Janssen, M. L., & Walter, J. D. (1975). STRESSES AND STRAINS IN TIRES. Tire Science and Technology, 3(2), 67-81.

171 Young, D. G. (1991). Material characterization of rubber vulcanizates under dynamic conditions appropriate for tire modeling. Tire Science & Technology, 19(2), 79-99.

172 Gonzalez, J. F., Encinar, J. M., Canito, J. L., & Rodriguez, J. J. (2001). Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 58, 667-683.

173 Kovac, F. J., & O'Neil, K. B. (1968). Predicting fatigue performance of tires. Materials Research and Standards, 8(6), 27-32.

174 Lee, B. L., Medzorian, J. P., Hippo, P. K., Liu, D. S., & Ulrich, P. C. (1993). Fatigue lifetime prediction of angle-plied fiber-reinforced elastomer composites as pneumatic tire materials. Paper presented at the Second Symposium on Advances in Fatigue Lifetime Predictive Techniques, May 4-5 1992, Pittsburgh, PA, USA.

175 Song, J. H., Costanzo, F., & Lee, B. L. (2004). Fatigue of cord-rubber composites: V. Cord reinforcement effect. Rubber Chemistry and Technology, 77(4), 593-610.

176 Ku, B. H., Liu, D. S., & Lee, B. L. (1998). Fatigue of cord-rubber composites: III. Minimum stress effect. Rubber Chemistry and Technology, 71(5), 889-905.

177 dos Reis, H. L. M., & Golko, P. J. (1998). Prototype instrument to evaluate fatigue damage in the sidewalls of steel-belted radial truck tires. Tire Science & Technology, 26(1), 36-50.

178 Han, Y. H., Becker, E. B., Fahrenthold, E. P., & Kim, D. M. (2004). Fatigue life prediction for cord-rubber composite tires using a global-local finite element method. Tire Science and Technology, 32(1), 23-40.

ANNEXE A

PHÉNOMÈNES DE VIEILLISSEMENT DES PNEUS

1. LES DEUX TYPES DE VIEILLISSEMENT

Deux types de vieillissement peuvent être identifiés pour les polymères :

- Le vieillissement physique, où aucune altération de la structure chimique n'est observée. Il peut se manifester par des phénomènes de cristallisation secondaire, de relaxation structurale dans les polymères amorphes ou de fatigue statique ou dynamique par exemple [1,2].
- Le vieillissement chimique, appelé aussi dégradation, qui correspond à une modification de la structure chimique du polymère [3].

1.1 Mécanismes du vieillissement chimique du caoutchouc

Différents processus de vieillissement chimique ont été mis en évidence dans le cas du caoutchouc [4,5]. Les agents de vieillissement sont environnementaux et incluent l'oxygène, la température, l'eau, l'ozone et la lumière.

1.1.1 Vieillissement par oxydation

Pendant l'oxydation du caoutchouc vulcanisé, les premiers produits de la réaction sont les hydroperoxydes, qui se décomposent à nouveau en radicaux libres pour commencer une nouvelle réaction dans la chaîne et qui peuvent aussi réagir avec les doubles liaisons du caoutchouc [5]. À basse température, l'absorption d'oxygène est presque linéaire, mais lorsque la température augmente, la réaction devient auto-catalytique et s'accélère fortement. La présence de l'oxygène peut :

- Soit entraîner la coupure statistique des chaînes polymères qui peut se produire par coupure en β d'un hydroxyle (ramollissement ou dégradation);
- Soit entraîner une réticulation par oxydation des doubles liaisons de la chaîne au cours de laquelle un radical peroxyde donne naissance à un pont peroxyde (durcissement par cyclisation);
- Créer des liaisons chimiques sans produire de coupure des chaînes ou de réticulation;

Ces trois phénomènes concurrentiels se produisant simultanément à des degrés différents pendant l'oxydation.

En général, les caoutchoucs vulcanisés à base de caoutchouc naturel, de caoutchouc isoprène et de caoutchouc isobutylène-isoprène subissent majoritairement des réactions de coupure de chaînes pendant l'oxydation, ils ont donc tendance à devenir plus souples. Par contre, ceux obtenus à partir de caoutchouc styrène-butadiène, de caoutchouc nitrile-butadiène, de caoutchouc polychloroprène et de caoutchouc de diène non conjugué

éthylène-propylène subissent plutôt une réaction de cyclisation qui conduit au durcissement de la partie vieillie [5]. Les caoutchoucs qui ne contiennent pas de diènes dans leur structure sont moins enclins à l'oxydation.

Dans les matériaux polymères, l'oxydation est un processus radicalaire en chaîne qui obéit au schéma suivant [3]:

- Amorçage : À cette étape, des radicaux sont formés à partir du polymère lui-même ou à partir d'impuretés : polymère ou impureté $\rightarrow P^{\bullet}$ radicaux
- Propagation : Transformation des radicaux primaires $P^{\bullet}$ en radicaux peroxydes PO_2 et arrachement d'un atome d'hydrogène sur la chaîne macromoléculaire :

$$\begin{cases} P^{\bullet} + O_2 \rightarrow PO_2 \\ PO_2^{\bullet} + PH \rightarrow PO_2H + P^{\bullet} \end{cases}$$

PH étant le polymère,

- Terminaison : Les radicaux formés préalablement deviennent inactifs. La terminaison se déroule selon le schéma suivant :

$$PO_2^{\bullet} + PO_2^{\bullet} \rightarrow POOOOP$$

$$POOOOP \rightarrow PO^{\bullet} + PO^{\bullet} + O_2$$

$$PO^{\bullet} + PO^{\bullet} \rightarrow POOP \Rightarrow Combinaison$$

$$P''HO^{\bullet} + P'O^{\bullet} \rightarrow P'' = O + P' - OH \Rightarrow Dismutation$$

On voit donc que les produits formés au cours de l'oxydation sont : des hydroperoxydes (PO_2H), des peroxydes ($POOP$), des cétones ou des aldéhydes ($P'=O$) et des alcools ($POOH$).

Plusieurs composés métalliques lourds peuvent agir comme catalyseurs et accélérer le processus d'oxydation [5]. Les composés de cuivre et de manganèse sont particulièrement actifs sur les caoutchoucs naturels et isoprènes, alors que les caoutchoucs styrène-butadiène sont plus sensibles aux composés de fer, de cobalt et de nickel.

Au niveau du caoutchouc, deux types de vieillissement chimique aérobie peuvent être observés selon la température et la concentration en oxygène [6]: dans les deux cas, la première étape consiste en un clivage des chaînes par l'oxygène. Au niveau de la seconde étape, il peut y avoir soit propagation des radicaux à d'autres doubles liaisons, ce qui entraîne une augmentation du module et une diminution de la contrainte à la rupture, soit un réarrangement en produits stables, se traduisant par une diminution à la fois du module et de la contrainte à la rupture. Lorsque la température et la concentration en oxygène augmentent, le processus de scission de chaîne devient prépondérant sur le phénomène de recombinaison.

En général, les études de vieillissement effectuées sur des formulations typiques de celles utilisées dans les pneus rapportent comme effet net de l'oxydation un durcissement du caoutchouc, le signe de la prépondérance du mécanisme de réticulation [7,8,9,10,11].

1.1.2 Vieillissement thermique en absence d'oxygène

En absence d'oxygène, plusieurs réactions peuvent avoir lieu sous l'effet de hautes températures, par exemple en présence d'eau ou d'huile [5]:

- Décomposition thermique des réticulations et hydrolyse des structures sensibles à l'eau (polyesters, polyamides, polyimides, etc.), se traduisant par un ramollissement.
- Poursuite de la formation de réseaux inter et intramoléculaires, qui conduit à un durcissement.
- Déplacement des liaisons sans changement de leur nombre.

Le phénomène de réversion de la réticulation induit par la température, qui peut se produire dès la vulcanisation du caoutchouc, se traduit par un phénomène de coupure de chaînes [12,13] et provoque l'effet inverse de la thermo-oxydation. Il est à noter que, même en présence d'oxygène, un vieillissement anaérobie pourra être obtenu, si les températures employées sont élevées [14].

1.1.3 Vieillissement par ozonation

Les caoutchoucs vulcanisés contenant des doubles liaisons peuvent développer des craquelures lorsqu'ils sont soumis à une sollicitation statique en extension dans un environnement atmosphérique contenant de l'ozone, même en faible quantité [4,5,15]. Ces craquelures sont orientées perpendiculairement à la direction de la contrainte appliquée. La vitesse de formation des craquelures dépend fortement de la température et du taux d'humidité de l'air. Le mécanisme proposé pour expliquer cette action de l'ozone sur les caoutchoucs est la coupure de chaînes [16].

1.1.4 Action de la lumière du soleil

Ce phénomène se produit lors d'une exposition prolongée du caoutchouc à la lumière solaire [17]. Il se caractérise par l'apparition de petites craquelures connectées sans orientation préférentielle à la surface du matériau. Grâce à l'addition de noir de carbone ou d'absorbeurs d'UV, ce phénomène de vieillissement de surface peut être fortement limité [18].

1.2 Fatigue

La fatigue agit en tant que facteur déterminant de la durée de vie des pneus. En effet, lorsque le véhicule sur lesquels ils sont montés est en mouvement, les pneus sont soumis à une sollicitation cyclique dans laquelle chaque point du pneu subit une déflection à chaque tour ou cycle du pneu en conséquence de la contrainte nette exercée. Ce type de sollicitation est équivalent à une sollicitation en fatigue dans laquelle chaque point du pneu parcourt tout le domaine des contraintes une fois par cycle. En pratique, un pneu dont le diamètre est de 27 pouces fait environ 10×10^6 cycles tous les 22 000 km (la distance annuelle moyenne parcourue par un véhicule quelconque). Par conséquent,

l'usure et la dégradation des propriétés mécaniques causées par cette sollicitation dynamique peuvent être importantes.

Par ailleurs, le cisaillement causé par le cyclage mécanique induit dans le caoutchouc la formation de radicaux libres macro-alkyles [19]. En présence d'oxygène, certains de ces radicaux macro-alkyles réagissent pour former les radicaux alkylperoxyles qui participent au processus de dégradation oxydative du caoutchouc : le phénomène de vieillissement par fatigue peut donc aggraver la dégradation du caoutchouc causée par l'oxydation. Un exemple concret a été mis en évidence dans le cas des pneus de SUV Firestone ayant fait l'objet d'un rappel majeur en raison de défaillances catastrophiques par délamination des nappes du sommet formant la ceinture [20]. En effet, la cause de cette délamination a pu être attribuée à une fatigue thermo-mécanique sévère causée par la combinaison d'une trop grande élongation en cisaillement cyclique entres les nappes du sommet générant une chaleur anormalement élevée et d'une forte sensibilité du caoutchouc à la dégradation thermo-oxydative.

D'autres auteurs ont étudié par thermographie infrarouge les profils de température de surface correspondant à la chaleur générée par des sollicitations cycliques en compression et en tension simulant la fatigue [21]. Ils ont mis en évidence la relation entre le comportement de propagation des fissures créées par la fatigue et les gradients de température autour de celles-ci. Leurs mesures de température sont parfaitement décrites par des simulations par éléments finis basées sur une approche viscoélastique linéarisée et non linéaire.

1.2.1 Facteurs influant sur la fatigue

La fatigue mécanique est définie comme la formation et la croissance de fissures au sein d'un matériau, comme conséquence de l'application d'une contrainte fluctuante. Il faut différencier la fatigue causée par la vie en service du pneu des essais de fatigue développés en laboratoire.

Dans le premier cas, une grand nombre de facteurs interviennent, comme la pression de gonflement, la contrainte appliquée, la vitesse, les accélérations (longitudinale, latérale, verticale), la largeur de la jante, le type de surface de la route et le climat [22,23,24]. Un consensus s'établit selon les auteurs pour identifier la pression de gonflement, la vitesse, les contraintes exercées (souvent données sous forme de déflection du pneu) et surtout la température comme étant les facteurs les plus importants en ce qui concerne la fatigue. En effet, la propagation de la rupture, lors d'une sollicitation en fatigue, est contrôlée par la température étant donné que l'énergie de déchirement, qui détermine la propagation d'une fissure pour les composés en caoutchouc, dépend de la densité d'énergie élastique qui est à son tour une fonction de la température [23]. Par conséquent, la température peut être exprimée comme une fonction des autres paramètres, une caractéristique exploitée pour la construction des diagrammes d'état utilisés pour connaître les conditions de service d'un pneu.

Au niveau des essais de fatigue en laboratoire, les chercheurs essaient de simuler les conditions subies au cours de l'utilisation réelle du pneu en appliquant une sollicitation

dynamique cyclique, dont les paramètres sont ajustés afin de recréer les conditions rencontrées pendant la mise en service. Cette sollicitation impose une histoire de chargement mécanique sur le caoutchouc [25]. L'histoire du chargement mécanique est caractérisée par des paramètres tels que la contrainte maximale, minimale, alternée (contrainte maximale moins contrainte minimale divisée par deux) ou moyenne qu'on applique et/ou le rapport R (rapport entre les contraintes minimale et maximale). Ces paramètres sont interconnectés et deux suffisent à les déterminer tous (voir Figure 1.2.1-1).

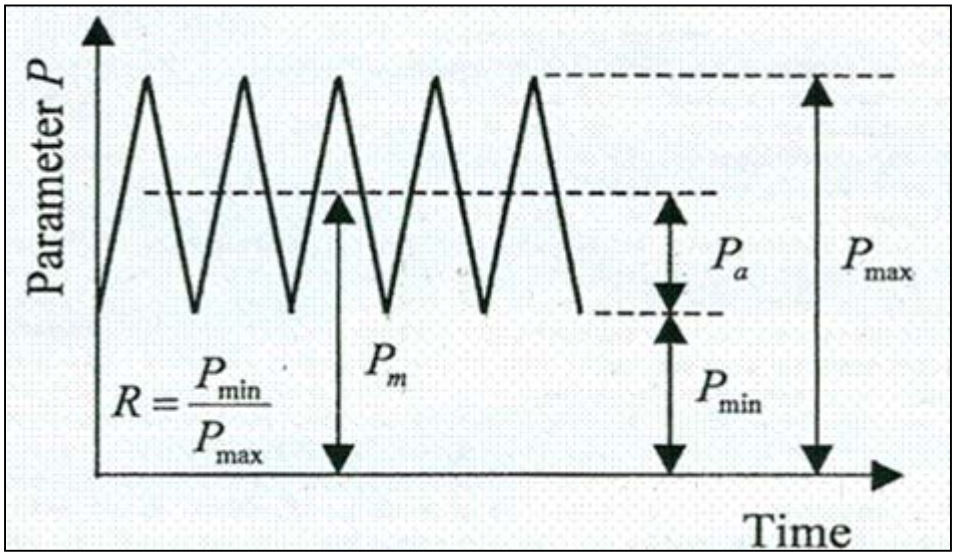


Figure 1.2.1-1 Paramètres des essais en fatigue (reproduit de [25]**)**

D'autres aspects exercent une influence sur l'histoire du chargement mécanique comme la période de repos sous déformation statique, la séquence de sollicitation, la multiaxialité des contraintes au cours de l'expérience ou la forme et la fréquence de la sollicitation. Dans ce qui suit, l'effet de chacun de ces paramètres sur le comportement en fatigue du caoutchouc est détaillé [26]:

- Contrainte maximale/alternée : seule la contrainte maximale permet de définir une configuration unique du matériau testé.
- Contrainte minimale : Le fait d'augmenter la contrainte minimale peut entraîner une augmentation de la durée de vie en fatigue pour les caoutchoucs qui cristallisent sous déformation comme le butyle-B. Le même comportement est observé pour le caoutchouc styrène-butadiène chargé avec du noir de carbone, qui est utilisé entre autres dans la bande de roulement [27].
- Période de repos sous déformation : La valeur de la période de déformation statique peut avoir des effets importants sur les propriétés en fatigue et sur la résistance mécanique des caoutchoucs. Par exemple, en faisant varier la déformation entre 1 et 400%, un rapport de 2.5 entre le maximum et le minimum de la vie en fatigue a été rapporté.

- Séquence de sollicitation : Lors de l'application d'une variation échelonnée de la contrainte, il a été observé que la durée de vie en fatigue augmente lorsque cette variation est croissante et diminue dans le cas d'une variation décroissante de la contrainte.
- Multiaxialité : Des différences sont observées selon que la contrainte, appliquée lors des essais en fatigue, est uniaxiale ou biaxiale.
- Fréquence et forme de la sollicitation : Lorsque la fréquence de la sollicitation est suffisamment élevée, la nature viscoélastique du caoutchouc entraîne une augmentation de la température à l'intérieur du matériau due au fait que le transfert de chaleur vers l'extérieur ne compense pas la génération interne de chaleur.

En plus des facteurs cités ci-dessus, d'autres sont communs tant à la fatigue produite en service qu'aux essais en laboratoire, par exemple les facteurs environnementaux tels que la température (une température élevée tend à augmenter le taux de formation de fissures ainsi que leur taux de croissance), l'ozone (sa présence favorise la croissance des fissures), l'oxygène (le vieillissement oxydatif réduit la résistance à la propagation de fissures). D'autres facteurs influents sont liés à la formulation du caoutchouc, tels que le type de polymère (s'il est susceptible de subir une cristallisation par déformation par exemple), les adjuvants (la présence de certains adjuvants, comme le noir de carbone, peut améliorer la performance en fatigue du caoutchouc), les antidégradants (ils aident à contrer les effet nuisibles des agents atmosphériques comme l'ozone et l'oxygène), la vulcanisation (le fait de dépasser le seuil de réticulation optimale peut rendre le caoutchouc plus rigide et, par conséquent, réduire la vie en fatigue). Enfin, certains facteurs sont associés au comportement constitutif du caoutchouc comme l'effet Mullins (un ramollissement temporaire observé lors d'une première sollicitation dans les caoutchoucs qui contiennent des adjuvants), la cristallisation sous déformation (quelques élastomères possèdent la capacité d'atteindre un état hautement ordonné, ce qui rend le caoutchouc plus résistant à la propagation de la rupture), l'hystérésis (mécanisme de dissipation non linéaire de l'énergie relié à la génération de chaleur) et la viscoélasticité.

1.2.2 Techniques d'essai de fatigue en laboratoire

Dans le but de trouver une méthode pour évaluer l'état général et prédire la vie en fatigue de pneus d'avions, plusieurs chercheurs ont entrepris des études de la fatigue en laboratoire sur des échantillons représentant des composites similaires à ceux utilisés dans la fabrication de pneus pour avions afin de mieux comprendre les phénomènes physiques impliqués et, si possible, d'établir une limite supérieure pour la vie en service de ces pneus [24,28,29,30,31]. En particulier, Lee et al. ont mené des essais sur des échantillons simulant la carcasse des pneus d'avion pour étudier leur comportement en fatigue lorsqu'on les soumet à une sollicitation en tension uniaxiale et biaxiale et en flexion hors plan, en mettant l'accent sur l'identification des paramètres reliés à la contrainte, à la déformation et à la température qui contrôlent la vie en fatigue de ces composites [31].

En parallèle, ils ont développé une technique de surveillance en temps réel du processus d'accumulation de l'endommagement, en utilisant la technique d'émission acoustique

[28]. Ils ont observé que lors de l'application d'une contrainte de cisaillement entre les cordes de renfort correspondant à 20 - 30% de la contrainte de rupture en tension uniaxiale, une séparation entre les cordes de renfort et la matrice caoutchouc se produit. Cette contrainte représente en effet la limite d'endurance (contrainte au-dessous de laquelle il n'y a pas d'initiation ni propagation de fissures) du composite étudié. Lorsque la déformation était augmentée, les courbes contrainte - déformation exhibaient une réponse caractéristique d'un durcissement par déformation jusqu'à un certain point. Au delà de ce point, la séparation entre cordes et matrice et la fissuration de la matrice se poursuivaient pour conduire éventuellement à un délaminage et à la défaillance catastrophique.

Ce même comportement a également été observé sous sollicitation cyclique, lorsque la contrainte minimale reste en régime de tension. Ce processus d'accumulation de l'endommagement était accompagné d'une augmentation de la déformation cyclique et de la température. La déformation cyclique comportait trois étapes : un incrément échelonné suivi d'une augmentation à un taux progressivement plus lent de la déformation jusqu'à atteindre 20% de la vie en fatigue, puis l'apparition d'une seconde région caractérisée par l'augmentation de la déformation cyclique à un taux constant (appelé taux de fluage dynamique) jusqu'à environ 80% de la vie en fatigue, point qui marque le démarrage du processus de délaminage et à partir duquel une troisième région se manifeste dans laquelle la déformation cyclique augmente à un taux plus rapide jusqu'à la défaillance catastrophique. Le même comportement était observé en fonction de la température.

Ces auteurs concluaient que le processus d'initiation de l'endommagement et l'éventuelle défaillance des composites testés étaient contrôlés par la déformation. Une autre étude a montré que la vie en fatigue des composites testés était inversement proportionnelle au taux de déformation dynamique (inverse du taux de fluage dynamique) et que la défaillance catastrophique (pour de basses fréquences et un réchauffement hystérétique négligeable) se produisait lorsque la déformation accumulée atteignait la déformation en rupture sous sollicitation statique en tension [29]. La réduction de la vie en fatigue observée lors de l'augmentation de l'amplitude de la contrainte appliquée était due simplement à un raccourcissement du temps pour atteindre le niveau de déformation accumulée catastrophique, confirmant ainsi l'hypothèse initiale.

Suite à ces résultats, Ku et al. ont proposé une expression empirique pour modéliser la relation entre le rang de déformation et la déformation minimale pour une durée de vie déterminée [30]:

$$\left(\varepsilon_a / \varepsilon_{a0}\right) + \left(\varepsilon_{\min} / \varepsilon_f\right) = 1$$

Où ε_a est le rang de déformation à la moitié de la vie ou premier cycle lorsque ε_{min} n'est pas zéro, ε_{a0} est le rang de déformation à la moitié de la vie ou premier cycle lorsque ε_{min} est égale à zéro, ε_{min} est la déformation minimale à la moitié de la vie ou premier cycle et ε_f est la déformation de rupture sous sollicitation statique. Cette équation définit une droite dans un graphique représentant le rang de déformation à moitié de vie en fonction de la déformation minimale à moitié de vie, et correspond à la limite au-dessous de laquelle la structure survit au nombre de cycles imposés.

Une expression basée sur le modèle de Palmgren-Miner est également proposée pour prédire l'endommagement accumulé entraîné par une sollicitation duale (faite à deux niveaux d'amplitude de contrainte) [31]:

$$D = \Delta\varepsilon_1 / \Delta\varepsilon_{f1} + \Delta\varepsilon_2 / \Delta\varepsilon_{f2}$$

Où D est l'endommagement accumulé, $\Delta\varepsilon_i$ est le fluage dynamique subi sous le $i$ème rang de contraintes et $\Delta\varepsilon_{fi}$ est le fluage dynamique correspondant à une défaillance catastrophique sous une sollicitation avec $i$ème rang de contraintes (voir Figure 1.2.2-1).

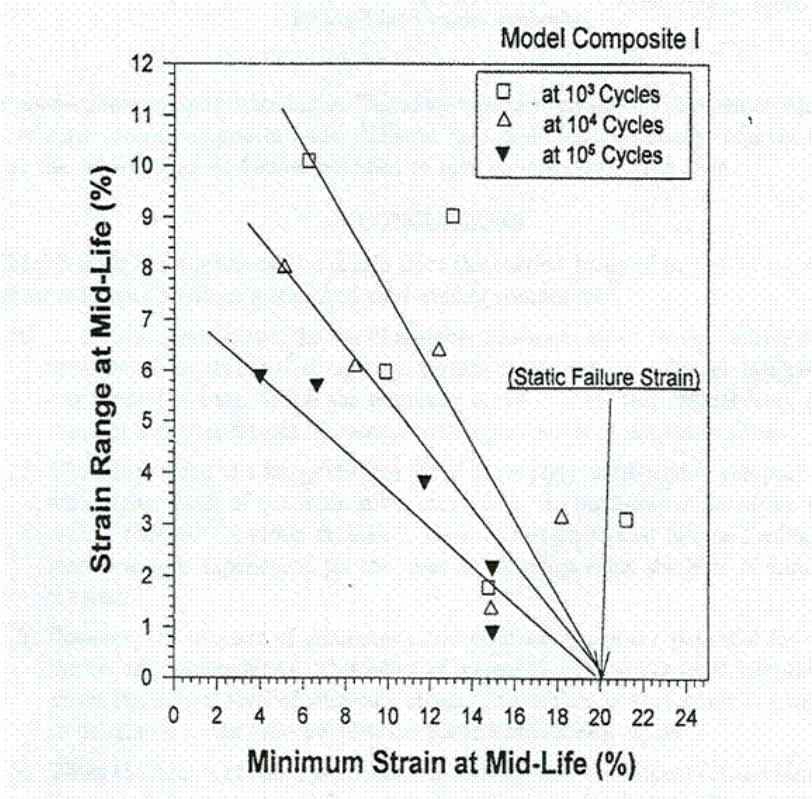


Figure 1.2.2-1 Diagramme de Goodman adapté aux données de contraintes à demi-vie (reproduit de [30]**)**

Rao et al. ont mené une étude similaire dans le but de prédire la performance de pneus rechapés avec des échantillons simulant les composites utilisés dans la fabrication de la ceinture, le composant du pneu jugé le plus important lors de la défaillance [32]. Ces auteurs estiment que les conclusions obtenues à l'issue des études menées par Lee et al. ne tiennent pas compte des spectres complexes rencontrés pendant la mise en service d'un pneu, les rendant peu réalistes. Ils ont testé trois ceintures composites avec différents angles de corde de renfort (22, 72 et 90º). À l'issue de leurs essais, les auteurs ont observé des mécanismes d'initiation et de propagation de fissures différents selon l'angle de la corde. Pour les essais avec une corde formant un angle de 22º, cinq étapes de développement de l'endommagement étaient observées : initiation de microfissures à l'interface entre les cordes et le caoutchouc, augmentation de la densité de microfissures,

formation de macrofissures à l'interface, propagation lente des macrofissures et propagation rapide des fissures jusqu'à la défaillance catastrophique. Les microfissures se présentaient uniquement au bord des cordes libres sur un côté de l'interface, comme dans le cas d'une sollicitation statique.

Dans le cas des cordes formant un angle de 90º, les étapes du développement de l'endommagement étaient identiques mis à part le fait que les fissures commençaient à l'intérieur des cordes au lieu de l'interface. Pour les cordes d'angle 72º, les étapes d'évolution de l'endommagement étaient presque identiques aux deux cas précédents, sauf que les surfaces de rupture montraient que la fissuration initiale débutait à l'intérieur des cordes et que la défaillance finale avait lieu toujours à l'interface.

Les auteurs ont proposé les équations suivantes pour modéliser la vie en fatigue en fonction de la déformation :

$$\log N = 8.56 - 2.45\log(\varepsilon) \quad \text{(pour 22º)}$$
$$\log N = 10.68 - 4.19\log(\varepsilon) \quad \text{(pour 72º)}$$
$$\log N = 8.91 - 2.95\log(\varepsilon) \quad \text{(pour 90º)}$$

Où N est le nombre de cycles et ε est la déformation. D'après leurs résultats, la vie en fatigue résiduelle peut être calculée au moyen de l'équation suivante :

$$N_r = N - 10^{(\log N)\left(\frac{E'}{E}-1\right)(f(\varepsilon)-1)}$$

Où N_r est la vie résiduelle en fatigue, N est la vie totale qui peut être calculée en utilisant les équations ci-dessus, E' est le module de la courroie endommagée et $f(\varepsilon)$ est calculé au moyen des équations suivantes :

$$f(\varepsilon) = 1.05 - 0.018\varepsilon + 6.6\times10^{-4}\varepsilon^2 \quad \text{(pour 22º)}$$
$$f(\varepsilon) = 1.14 - 0.018\varepsilon \quad \text{(pour 72º)}$$
$$f(\varepsilon) = 1.056 - 0.018\varepsilon + 6.0\times10^{-4}\varepsilon^2 \quad \text{(pour 90º)}$$

Finalement, Bobo a mené une étude pour essayer de trouver une méthode permettant de déterminer une limite de vie et pour développer un test accéléré pour la prédiction de vie des pneus d'avions au moyen de l'analyse de l'adhésion de la carcasse, c'est-à-dire l'adhésion entre la couche extérieure et la couche intérieure suivante [ ]. En prenant la défaillance comme le point où l'adhésion atteint 50% de sa valeur initiale, l'auteur a identifié la température comme le paramètre qui contrôle la vie en fatigue, et a construit un modèle pour prédire le réchauffement du pneu en fonction des différents paramètres du matériau, environnementaux et opérationnels. Les résultats obtenus laissaient entendre qu'aucun des paramètres sur lesquels le modèle était construit n'avait une influence déterminante sur la température de la région critique sous étude. Quant au développement d'un test accéléré pour prédire la vie en fatigue des pneus, l'auteur a choisi à nouveau l'adhésion entre couches comme paramètre pour déterminer l'endommagement subi comme conséquence de la fatigue. En se basant sur une étude faite au préalable, l'auteur a déterminé qu'à cause de la grande dispersion des données

sur l'adhésion, il était impossible de la relier à la fatigue pour obtenir un test robuste de prédiction de la durée de vie.

2. LES ADJUVANTS CONTRE LE VIEILLISSEMENT DU CAOUTCHOUC

Afin de limiter les effets du vieillissement du caoutchouc sur les propriétés en service des pneus, différents produits chimiques sont ajoutés au mélange au cours de la fabrication.

2.1 Les stabilisants

Ce type d'adjuvants vise à empêcher le phénomène de réversion pendant la cuisson du caoutchouc et la dégradation thermique au cours de l'utilisation du pneu. On peut mentionner le 1,3-bis-(citraconimidomethyl) benzène (Perkalink 900) [13], le bis-(3-triethoxysilylpropyl)tetra sulphide (S-69) qui agit également comme antioxydant [12] et le N-cyclohexyl-4,6-dimethyl-2-prymidine sulfenamide (CDMPS) [11].

2.2 Les antioxydants

Les antioxydants primaires, des amines secondaires ou des phénols substitués avec des hydrogènes très réactifs, agissent en neutralisant les radicaux avant que ceux-ci ne puissent réagir avec l'élastomère [4]. Des antioxydants secondaires détruisent les hyperoxydes avant qu'ils ne se décomposent en radicaux libres : actuellement, ce sont principalement des phosphites alkyl et alkylaryl.

2.3 Les anti-ozonants

L'antiozonant réputé le plus efficace est le *N*-1,3-Dimetylbutyl,-*N*'-phenyl-*para*-phenylènediamine, commercialisé sous de nombreux noms comme Antozite® 67P, Santoflex®13 et Wingstay®300, 6PPD, et HPPD [16]. Trois mécanismes ont été proposés pour décrire l'action des adjuvants anti-ozonants: le modèle piégeur, selon lequel l'adjuvant diffuse à travers le caoutchouc jusqu'à la surface où il réagit avec l'oxone plus rapidement que les doubles liaisons présentes dans le caoutchouc; la théorie du film protecteur, avec la formation d'un film protecteur à la surface du pneu lors de la réaction de l'adjuvant avec l'ozone; et finalement, le modèle renchaînant, où l'adjuvant entraîne des recombinaisons de liaisons et prévient les coupures de chaînes.

Certains groupes travaillent également sur le développement d'élastomères pouvant être mélangés au caoutchouc afin de leur procurer une protection contre le vieillissement par ozone, sans présenter la caractéristique de blanchiment des techniques d'anti-ozonant actuelles [33].

2.4 Les absorbeurs d'UV

L'usage du noir de carbone comme absorbeur d'UV a précédé l'exploitation de ses propriétés de renfort [4, 34]. D'autres absorbeurs d'UV sont les hydroxybenzophénones et les benzotriazoles [35].

3. MÉCANISMES DE DÉGRADATION LIÉS AUX FIBRES DE RENFORT

Les pneus sont des structures composites, dont la matrice caoutchouc est renforcée par des fibres textiles et des câbles en acier. Actuellement, les fibres textiles sont principalement faites de matériaux synthétiques, le nylon 6 et 66 et le polyester étant les plus utilisés [46]. Ces fibres sont sensibles au vieillissement chimique et à la fatigue. Par ailleurs, l'adhésion entre les renforts et la matrice est, elle aussi, soumise à l'influence de différents agents de dégradation.

3.1 Dégradation chimique des fibres polymères

L'hydrolyse, l'aminolyse et l'ammonolyse sont citées comme des mécanismes de dégradation des fibres en polyéthylène téréphtalate utilisés comme fibres de renfort pour les pneus [36]. Par ailleurs, les fibres textiles peuvent également subir des dégradations de type thermochimique, à cause de la chaleur générée sous sollicitation dynamique par le composite viscoélastique que constitue un pneu [46].

3.2 Dégradation de l'adhérence entre les renforts et la matrice

Pour assurer la durabilité des fibres de renfort ainsi que pour éviter le réchauffement par frottement et la fatigue due au mouvement relatif entre le caoutchouc et les fibres, il est impératif d'obtenir une adhésion adéquate entre celles-ci et la matrice polymère pendant toute la vie en service du pneu [37].

Dans le cas des câbles de renfort en acier, ceux-ci sont recouverts d'une couche de bronze ou de laiton, dans le but d'améliorer leur adhésion avec la matrice caoutchouc [38]. L'adhésion se produit pendant la vulcanisation par réaction chimique entre le cuivre du placage des câbles d'acier et le sulfure actif du caoutchouc, donnant du sulfure de cuivre. Pour que cette adhérence soit optimale, il a été montré que la couche d'oxyde de cuivre à la surface du placage doit posséder des caractéristiques bien particulières, tant au niveau de sa stœchiométrie que de son épaisseur.

Un des mécanismes de dégradation d'une telle adhésion consiste en la migration du cuivre à travers la couche de sulfure de cuivre jusqu'à l'interface avec le caoutchouc, venant grossir la couche de sulfure de cuivre et fragiliser la liaison [38]. De plus, la formation d'oxyde de zinc à partir du précipité de zinc détruit l'intégralité de la couche de sulfure de cuivre, provoquant également la rupture de la liaison métal-caoutchouc

[39]. Finalement, des auteurs ont identifié la corrosion des câbles d'acier par l'eau comme étant un autre mécanisme de perte de la cohésion structurelle des pneus [40]. Cette eau pénètre jusqu'aux câbles en acier par des trous et fissures présents dans la matrice caoutchouc suite au vieillissement ou au contact avec des obstacles pointus. Elle se propage le long des câbles d'acier, détruisant au passage la couche de laiton les recouvrant initialement. La rupture se produit à l'interface acier / couche de sulfure de cuivre.

Afin de réduire la sensibilité des câbles de renfort en acier à la corrosion, un nouveau procédé de mise en forme des filaments utilisant des préformes polygonales est proposé [41]. Les espaces microscopiques ainsi générés le long des câbles permettent une meilleure pénétration du caoutchouc entre les filaments, ce qui se traduit par une amélioration des propriétés en fatigue et de la résistance au vieillissement dans l'eau salée.

3.3 Fatigue des cordes et des fibres de renfort

Holt décrit les différents facteurs qui influencent la vie en fatigue des cordes en acier utilisées comme renfort dans les pneus [42] :

- Conditions d'opération des pneus : Lorsque le pneu roule, la sollicitation sur chacune des cordes varie entre une charge en tension moyenne causée par la pression de gonflement, une charge plus faible (qui peut être même compressive) et une charge en tension plus importante.
- Mécanisme de fatigue : La défaillance en fatigue est générée en un point du pneu où les filaments individuels ont subi un écoulement plastique dû à une force compressive. Ceci peut arriver à cause d'une surcharge compressive ou par la perte d'adhésion entre la matrice et les cordes.
- Filaments de la corde : La résistance en fatigue des filaments augmente lorsque leur diamètre diminue. Les données obtenues lors des essais en fatigue montrent qu'une corde comportant un grand nombre de fils de petit diamètre possède de meilleures propriétés en fatigue qu'une corde composée de moins de fils de diamètre plus grand. Par ailleurs, il y a peu d'amélioration sur la durée de vie en fatigue lorsque la résistance en tension des fils est augmentée.
- Filament individuel/corde assemblée : Le comportement en fatigue d'une corde ne peut pas être déterminé à partir du comportement des filaments individuels à cause des effets liés au contact entre ceux-ci, qui créent entre autres une augmentation du niveau de contraintes sur chaque filament. La configuration des fils semble également jouer un rôle important, même si les avis concernant la longueur optimale du pas d'enroulement divergent.
- Enroulement spiral : L'enroulement spiral tend à augmenter le seuil d'écoulement du matériau.
- Adhésion avec le caoutchouc : La perte d'adhésion entre la matrice caoutchouc et les cordes est l'élément le plus important, car elle entraîne une diminution du support latéral des cordes, ce qui augmente fortement la propension au flambage.
- Recouvrement en laiton : La présence d'un recouvrement en laiton améliore l'adhésion entre les cordes et la matrice.

- Formulation du caoutchouc : Chaque formulation présente ses propres caractéristiques d'adhésion avec les cordes.

Araujo et al. ont montré que la cause la plus probable de défaillance des cordes est le vieillissement par déformation imposé par certains procédés de mise en forme, tels que l'extrusion, qui diminuent la résistance en fatigue du matériau [43].

Quant aux fibres de renfort polymères, Klein et al. ont mené une étude sur des pneus contenant trois différents fibres de renfort faites en viscose et nylon [44]. Les auteurs ont conduit des essais sur le terrain en conditions douces et sévères. A la fin des essais, les fibres étaient épluchées pour mesurer la résistance mécanique des cordes, mais aussi des fils individuels en trois régions, soit la couronne, la région de flexion et la paroi latérale inférieure. L'adhésion entre les cordes et la matrice ainsi que les caractéristiques de déflection étaient également mesurées. Les auteurs ont déterminé que la zone de plus faible résistance mécanique est la zone de flexion (épaulement). Tant pour les échantillons soumis à une utilisation sur terrain doux que pour ceux soumis à des conditions plus sévères, la résistance mécanique exprimée en fonction de la distance parcourue démontrait une chute nominale initiale suivie par une période dans laquelle la résistance demeurait constante et une autre petite chute à la fin. Il a été observé que la distance parcourue n'avait pas une influence importante sur la résistance mécanique des fils individuels. Leurs conclusions sont les suivantes : 1) La fatigue des cordes ne correspond pas à une dégradation consistante de la résistance mécanique en tension : au contraire, le processus de fatigue est très rapide une fois commencé; 2) Après une perte initiale de résistance mécanique, les auteurs ont montré l'existence d'une longue période de résistance constante; 3) Les propriétés en tension se dégradent à un taux lent; 4) La rupture des fibres se produit essentiellement dans la zone de flexion; 5) L'endommagement des fibres était accompagné d'un endommagement local important du caoutchouc; 6) Le profil de déflection s'améliorait lorsque la distance parcourue et la pression de gonflement augmentaient.

Cho et al. ont évalué l'utilisation du changement de l'intensité de la brillance des courbes de thermoluminescence comme critère de résistance en fatigue de fibres en PET [45]. De leur coté, Naskar et al. ont travaillé sur des fibres faites en nylon 6, en nylon 66 et en polyester et les ont soumises à une fatigue alternée compression – tension [46]. Les auteurs ont montré que les fibres en polyester généraient une quantité de chaleur plus importante, ce qui se traduisait par une réduction des propriétés en fatigue. Par contre, les fibres en nylon 66 montraient une résistance en fatigue excellente, même à haute déformation.

Finalement, Nkiwane et al. ont également étudié la fatigue des fibres en nylon 66 sous forme de fils et de cordes imprégnées et non imprégnées soumises à différents niveaux de contraintes [47]. Les auteurs ont montré qu'au fur et à mesure que la contrainte augmente, la vie en fatigue des cordes diminue de manière exponentielle. L'explication proposée est reliée à une diminution du volume libre entre les filaments impliquant une augmentation de l'abrasion. Par analyse en microscopie électronique, il a été observé qu'à de faibles niveaux de contraintes, la rupture des échantillons était de type rupture en

fatigue (caractérisée par une déformation plastique importante) (voir Figure 3.3-1), tandis qu'à des niveaux de contraintes plus importants, la rupture était de type fragile (plasticité limitée ou inexistante). Dans tous les cas, le matériau était susceptible à un durcissement par déformation, condition qui, en général, affecte de manière adverse la vie en fatigue.

Figure 3.3-1 Image en microscopie électronique d'un filament en polyester après rupture du type fatigue (reproduit de [47]**)**

4. EFFETS DU VIEILLISSEMENT SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES PNEUS

Différentes études ont été réalisées pour mesurer les effets du vieillissement sur les propriétés mécaniques des pneus. La majorité d'entre elles se sont intéressées indépendamment à la matrice caoutchouc et aux fibres de renfort, les tests étant effectués soit dans des conditions de vieillissement accéléré ou naturel.

Une observation générale quant aux différentes études trouvées dans la littérature est à l'effet que les résultats quantitatifs et même qualitatifs de l'effet du vieillissement sur les propriétés mécaniques varient considérablement (jusqu'à un facteur 10) en fonction du type de pneu et de la composition de l'échantillon étudié [48]. Une généralisation est donc à considérer avec précaution.

4.1 Vieillissement chimique de la matrice caoutchouc

Au niveau de la matrice caoutchouc, les propriétés qui sont le plus souvent rapportées sont, en mode statique, le module à 100, 200 et 300% d'élongation, la contrainte de

rupture et l'élongation à la rupture et, en mode dynamique, le nombre de cycles à la rupture et le module dynamique.

4.1.1 Thermo-oxydation

Un nombre important d'auteurs se sont intéressés aux effets de la thermo-oxydation sur les propriétés mécaniques des composés caoutchouc présents dans les pneus. La majorité des études ont utilisé des procédures de vieillissement accéléré, soit un four avec circulation d'air [49,7,11,12,13,50,51,52,53]. Les conditions de vieillissement naturel par thermo-oxydation correspondaient à l'entreposage dans des locaux fermées [9,52].

Une étude importante a analysé le processus chimique correspondant aux conditions de vieillissement dans un four avec circulation d'air pour des pneus gonflés à l'air ou avec un mélange de 50% d'oxygène et 50% d'azote [54]. Jusqu'à 70ºC, le vieillissement est caractéristique d'un phénomène oxydatif aérobie. Lorsque la pression partielle en oxygène dans le pneu est augmentée d'un facteur 2, la vitesse de la réaction d'oxydation s'accroît d'un facteur 1,5 environ [55], ce qui révèle l'importance de l'action de l'oxygène contenue dans le pneu sur le processus de dégradation oxydative du caoutchouc. D'autres auteurs ont mesuré des corrélations directes entre les propriétés de résistance en tension et d'élongation à la rupture et le taux d'oxygène contenu dans la chambre de vieillissement thermique [56].

En ce qui concerne le module statique, les résultats des études montrent soit une augmentation suivie d'une diminution [57], soit une augmentation [7,51], soit une diminution [9,51]. Ces inconsistances peuvent être attribuées aux différences, outre de composition des formulations testées, de la température et de la durée du vieillissement.

Au niveau de l'élongation, l'effet observé est toujours une diminution après traitement par vieillissement thermo-oxydatif [9,52,53]. C'est également le cas pour la résistance en tension [49,52,53] et la contrainte à la rupture [9].

En sollicitation dynamique, les auteurs observent une augmentation des modules réel et complexe [49,13]. En ce qui concerne la valeur de tan δ, certains matériaux testés présentent une augmentation et d'autres, une diminution de sa valeur [49,9,13].

La Figure 4.1.1-1 donne un exemple de la variation du module à 100% d'élongation en fonction du temps de vieillissement à 70ºC pour deux formulations de la matrice caoutchouc typiques de celles utilisées pour la bande de roulement [7]. Cette augmentation du module est attribuée au mécanisme de réticulation causé par la thermo-oxydation.

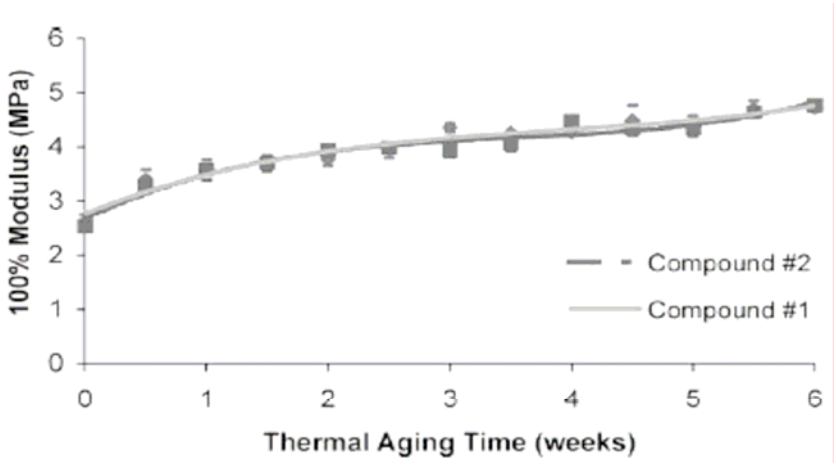


Figure 4.1.1-1 Module à 100% d'élongation en fonction de la durée de vieillissement thermique (à 70ºC) (reproduit de [8]**)**

Des auteurs ont déterminé des relations empiriques entre certaines propriétés mécaniques et la durée de vieillissement [48]. Le module et la densité de réticulation, qui augmentent avec la durée de vieillissement, ont un comportement linéaire dans le temps, correspondant à l'équation $A(t) = A(0)\,(1 + \alpha t)$, tandis que l'élongation à la rupture et la résistance au pelage, qui diminuent avec la durée de vieillissement, peuvent être décrites par l'équation $B(t) = B(0)\,(1/(1 + \beta t))$, les constantes α et β étant reliées à la vitesse d'oxydation du matériau et à son effet sur la propriété mécanique considérée.

En ce qui concerne l'effet de la température de vieillissement, une augmentation de la vitesse de dégradation de la contrainte à la rupture est observée jusqu'à 70ºC, puis le taux de dégradation diminue pour des températures de vieillissement plus élevées, ce qui est caractéristique du phénomène d'oxydation limitée par diffusion, dans lequel l'oxydation accélérée par les hautes températures consomme l'oxygène à un rythme plus élevé que sa vitesse de diffusion dans le matériau [6].

4.1.2 Ozone

En ce qui concerne l'effet de l'ozone sur les propriétés mécaniques des matrices caoutchouc des pneus, les études en vieillissement contrôlé ont utilisé une chambre d'ozonation standard [7,15,50,58]. Les résultats sont présentés, soit en termes de résistance au craquellement par l'ozone (normes), soit de module à 100% d'élongation. La durée avant l'apparition de la première craquelure ainsi qu'une classification sur une échelle de conditions appliquées sont également des méthodes utilisées. En général, les études montrent des disparités importantes entre les composés testés.

Par ailleurs, une évaluation de la dégradation par l'ozone en conditions de stockage naturel intérieur et extérieur réalisée aux États-Unis a montré des disparités importantes

de dégradation selon la localisation géographique et l'effet dévastateur du stockage extérieur sans protection [15].

La Figure 4.1.2-1 donne un exemple de l'effet du vieillissement par ozonation mesuré en termes de module à 100% d'élongation [7]. Les matériaux testés sont les mêmes que pour la Figure 4.1.1-1. Contrairement à l'effet de la thermo-oxydation, l'ozonation produit une diminution du module associée à un mécanisme de coupure de chaînes.

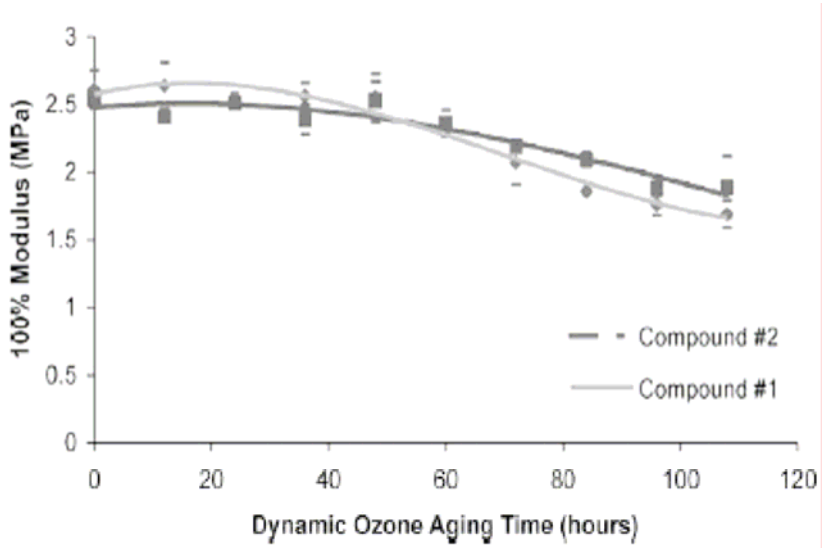


Figure 4.1.2-1 Module à 100% d'élongation en fonction de la durée du vieillissement par l'ozone (reproduit de [7]**)**

4.1.3 Rayonnements UV

Dans une étude, les effets des rayons UV sur les propriétés mécaniques de formulations à base de caoutchouc butadiène-styrène ont été étudiés à l'aide d'un weatherometer en conditions accélérées [53]. Les résultats montrent une diminution majeure de la résistance en tension et de l'élongation après 72 heures d'exposition.

4.1.4 Combinaison d'agents environnementaux

Dans la réalité, la matrice caoutchouc des pneus est généralement soumise simultanément à plusieurs agents de vieillissement chimique. Des auteurs ont mis au point différentes méthodes de vieillissement accéléré cycliques et dynamiques pouvant combiner les effets de la thermo-oxydation, de l'ozone, de la lumière ultraviolette, de l'étirement dynamique et de solutions aqueuses [7,8,50]. Les résultats présentés sont exprimés en termes de module à 100% d'élongation et de résistance à la fatigue, et sont comparés avec des mesures réalisées en vieillissement atmosphérique (dynamique ou statique).

La Figure 4.1.4-1 montre un exemple de résultats obtenus par vieillissement atmosphérique dynamique pour les mêmes composés 1 et 2 que dans le cas de la Figure

4.1.1-1 et de la Figure 4.1.2-1 [7]. Selon ces conditions de vieillissement, les échantillons étaient soumis à une sollicitation en fatigue 18 heures par jour, sur un toit orienté plein sud en été en Ohio (température en plein jour autour de 30ºC) près d'une autoroute avec un lavage à l'eau savonneuse une fois par semaine. On observe une augmentation initiale du module, similaire à l'effet du vieillissement par thermo-oxydation, suivie par une diminution en accord avec l'effet du vieillissement par ozonation.

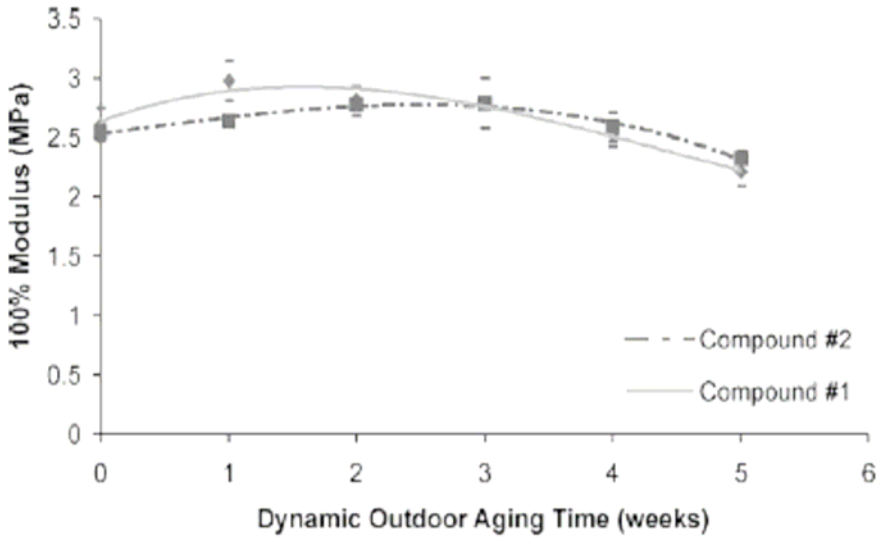


Figure 4.1.4-1 Module à 100% d'élongation en fonction du temps de vieillissement atmosphérique dynamique (reproduit de [7]**)**

4.2 Effets sur les renforts

Des travaux ont été réalisés pour évaluer l'effet d'un vieillissement de fibres de poly (éthylène-téréphtalate) à haute température en atmosphère humide, sous azote et encapsulées dans la matrice caoutchouc [36]. Les résultats sont exprimés en termes de rétention de la résistance et ont montré que le mécanisme de dégradation thermique des fibres polyester dans le caoutchouc correspond à un phénomène de coupures de chaînes similaire à une hydrolyse catalysée par les amines.

En ce qui concerne l'adhésion des câbles d'acier avec la matrice caoutchouc, le vieillissement par immersion de blocs de composites dans une solution d'eau salée à 90ºC a montré une perte d'adhérence plus ou moins rapide selon le modèle de câble et le type de construction [40]. D'autres auteurs ont étudié l'effet combiné du vieillissement thermo-oxydatif et de sollicitations mécaniques dynamiques (appliqués successivement) sur la force d'adhésion entre les câbles de renfort en acier et la matrice caoutchouc, observant une augmentation de la perte de résistance par l'effet des sollicitations mécaniques [59].

Finalement, des mesures d'adhésion renfort/matrice ont été réalisées sur des pneus usés. Elles montrent que la région de l'épaulement du pneu, qui correspond aux contraintes et

accumulations de chaleur les plus élevées, présente la plus grande détérioration de l'adhésion des renforts avec la matrice [37]. Par ailleurs, l'âge du pneu semble avoir un effet marqué sur la qualité des propriétés d'adhésion des renforts, surtout pour les pneus de type radial, comme le montrent les résultats de tests de traction reproduits dans la Figure 4.2-1 et la Figure 4.2-2 [58].

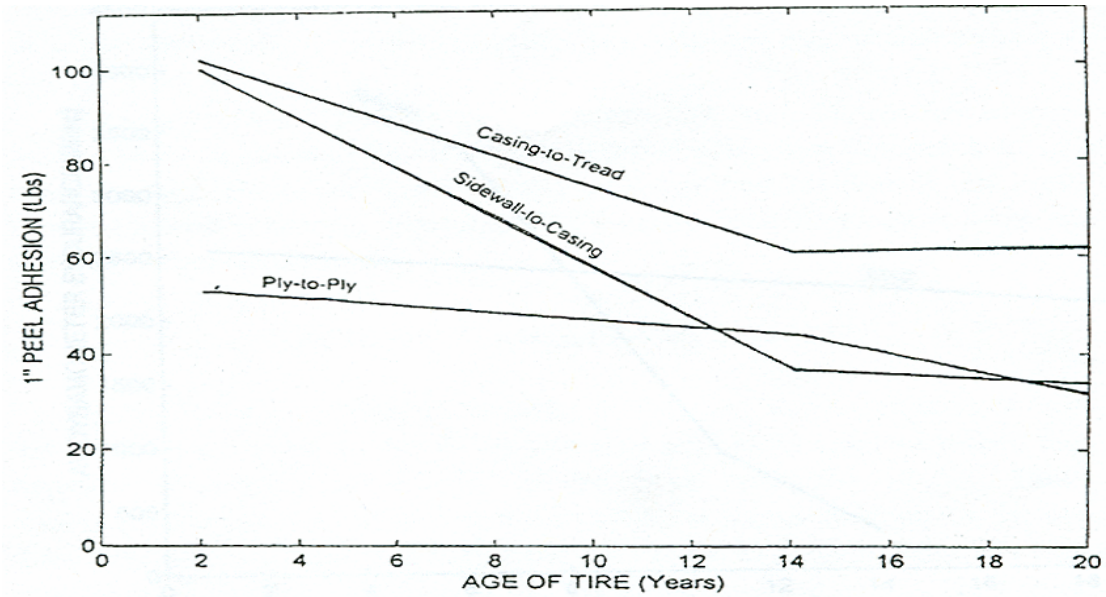


Figure 4.2-1 Test d'adhérence des renforts d'un pneu de type diagonal (reproduit de [58]**)**

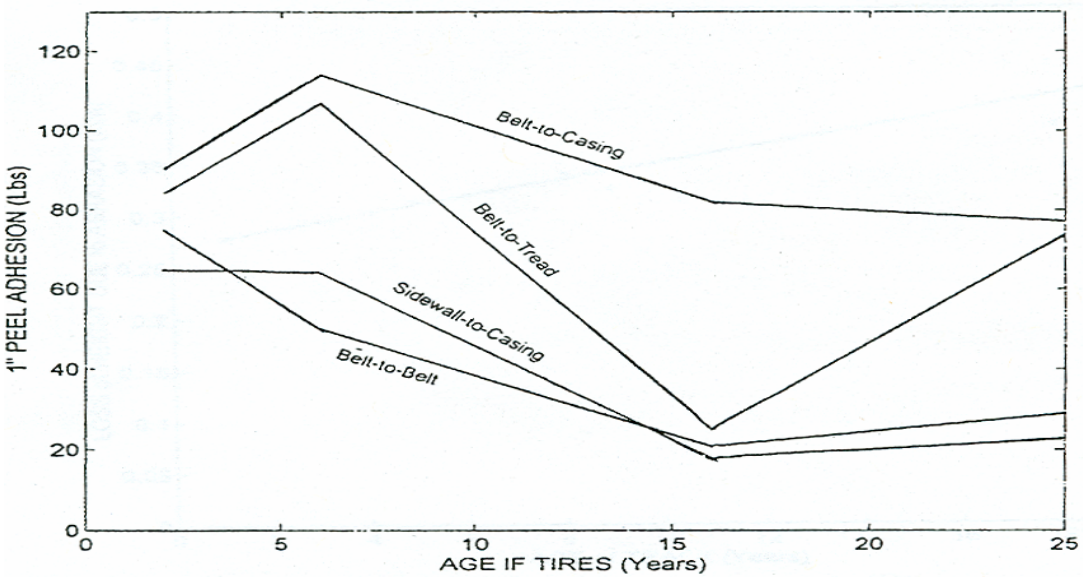


Figure 4.2-2 Test d'adhérence des renforts d'un pneu de type radial (reproduit de [58])

4.3 Fatigue produite par la mise en service des pneus

À notre connaissance, une seule équipe de chercheurs s'est intéressée à étudier la fatigue produite par l'utilisation « réelle » des pneus [60,61]. Leur objectif était de comparer différentes formulations de caoutchouc et leurs performances lors d'un test en fatigue réelle. Les auteurs ont choisi deux conditions pour les essais, l'une de ces conditions imposait la conduite pendant un certain nombre de miles sur un terrain « doux », tandis que pour l'autre, la conduite se faisait sur un terrain plus ardu. À l'issue de ces deux tests, les pneus étaient évalués au moyen d'une inspection visuelle pour déterminer le niveau d'usure subie par chaque formulation. Les formulations contenant un composé « maison » nommé AMERIPOL ont montré un niveau d'endommagement plus faible que les autres formulations contenant du caoutchouc naturel.

Par ailleurs, Blazic et al. proposent un certain nombre de règles, qui assurent que l'extrapolation des données expérimentales obtenues lors d'un essai de fatigue accéléré en laboratoire par rapport aux conditions d'utilisation réelle, soit valable [ ]:

- Les essais doivent s'effectuer au minimum sous deux conditions différentes.
- Les valeurs des contraintes utilisées doivent être plus grandes que la limite de Wholer, au-dessous de laquelle la vie en fatigue devient virtuellement infinie.
- Le type de défaillance obtenu dans les tests doit correspondre au type de défaillance rencontré lors du service réel du pneu.

4.4 Vieillissement en service

Étant donné la complexité de la structure composite des pneus et la variété d'agents de vieillissement potentiels et de leurs effets sur les propriétés mécaniques, des tests impliquant des pneus dans leur intégralité sont nécessaires.

Dans une étude, l'effet de l'âge des pneus sur leur endurance à charge incrémentielle mesurée à l'aide d'un dynamomètre a été évalué et montre que les pneus de type diagonal conservent une majeure partie de leurs performances jusqu'à 20 ans, alors que les pneus radiaux vieillissent beaucoup plus rapidement [58].

Une autre étude a soumis des pneus de différents modèles à des tests sur route afin d'évaluer l'effet de l'oxygène contenue dans l'air de gonflage [62]. Les pneus ont été classifiés en fonction de la distance parcourue jusqu'à destruction ou de l'état après 30 000 miles.

De son coté, l'agence gouvernementale chargée de la sécurité routière aux États-Unis, la NHTSA, a mené une étude évaluant les performances mécaniques de pneus usagés provenant d'une région possédant une température ambiante élevée où le processus de vieillissement est accéléré, soit la région de Phoenix, en Arizona, où la température moyenne annuelle est d'environ 23ºC [63]. L'étude a été effectuée sur 6 modèles de pneus de différentes marques. Les pneus testés devaient être en production entre 1998 et 2003 et devaient pouvoir être comparés aux pneus neufs de même modèle. Le tableau 1 montre les caractéristiques des différents types de pneus testés

Tire ID	Tire Manufacturer	Tire Model	Tire Size	Load Range	Speed Rating
B	BFGoodrich	Touring T/A SR4	P195/65R15	89	S
C	Goodyear	Eagle GA	P205/65R15	92	V
D	Michelin	LTX M/S	P235/75R15XL	108	S
E	Firestone	Wilderness AT	P265/75R16	114	S
H	Pathfinder	ATR A/S	LT245/75R16	120/116	Q
L	General	Grabber ST	255/65R16	109	H

Tableau 1. Caractéristiques des pneus étudiés (reproduit de [63]**)**

Le comportement mécanique des pneus a été analysé au moyen de deux essais basés sur la norme FMVSS 139 : l'augmentation échelonnée de la vitesse jusqu'à atteindre la rupture catastrophique, afin de caractériser la rétention des propriétés à haute vitesse, et l'augmentation échelonnée de la contrainte jusqu'à la rupture catastrophique, afin de caractériser la rétention de la capacité à supporter une charge mécanique. Les conditions, sous lesquelles s'est déroulé le second essai, sont décrites au tableau 2 et les résultats obtenus sont illustrés dans la Figure 4.4-1.

Test Stage (#)	Duration (hours)	Percent Max Load	Speed (mph)	Test
1	4	85%	75	*FMVSS 139 Endurance*
2	6	90%	75	
3	24	100%	75	
Inspection	**1**	**-**	**-**	**-**
4	4	110%	75	*Stepped-Up Load to Catastrophic Failure*
5	4	120%	75	
Etc.	4	+10% every 4 hours	75	

Tableau 2. Conditions de l'essai d'augmentation échelonnée de la contrainte jusqu'à rupture (reproduit de [63]**)**

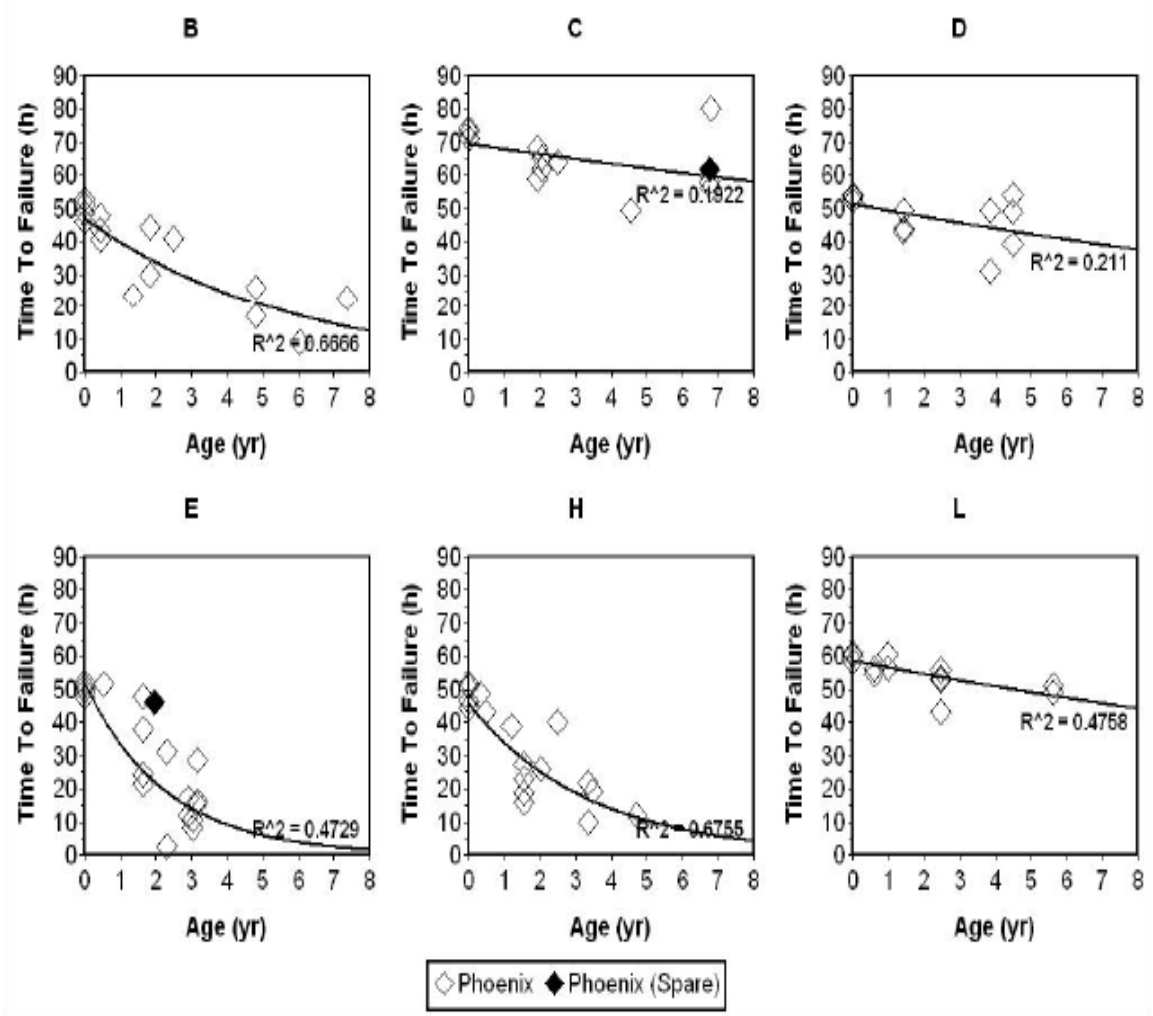


Figure 4.4-1 Résultats de l'essai d'augmentation échelonnée de la contrainte jusqu'à rupture (reproduit de [63]**)**

Bien que le comportement des courbes du temps d'atteinte de la rupture en fonction de l'âge du pneu soit différent pour chaque modèle de pneu analysé (pour les modèles B, E et H, les courbes ont l'allure d'une exponentielle décroissante, tandis que les courbes des autres modèles ont l'allure d'une droite), il est évident que le temps jusqu'à la rupture diminue avec l'âge du pneu, en conséquence du vieillissement en service.

Finalement, une analyse très poussée de l'effet du vieillissement en service a été réalisée sur des pneus ayant été utilisés dans six grandes villes américaines présentant des conditions climatiques et environnementales très différentes, soit Détroit, Phoenix, Los Angeles, Hartford, Miami et Denver [64]. Les paramètres étudiés incluaient trois facteurs environnementaux, soit la température ambiante, la concentration en ozone atmosphérique et l'état des routes, et deux conditions relatives à la conduite, soit la durée de service du pneu et le kilométrage annuel. Les propriétés mesurées comprenaient la résistance à la pelure et en tension, l'élongation à la rupture et la densité de réticulation.

Une première conclusion révèle que l'âge du pneu a plus d'effet sur la dégradation des propriétés mécaniques que le kilométrage, c'est-à-dire que la fatigue mécanique a une faible influence sur les propriétés mécaniques des pneus par rapport au vieillissement chimique. Les auteurs, qui cherchaient à mettre au point une méthode de vieillissement accéléré en laboratoire pour simuler le vieillissement en service, en ont conclu qu'il est possible de reproduire de manière satisfaisante, par un traitement thermique dans un four, le vieillissement subi par un pneu en service [65]. La différence d'un facteur 1,25 observée au niveau du taux de dégradation entre les pneus montés sur la voiture et les pneus de secours est attribuée à l'échauffement supplémentaire dû à l'action directe du soleil et lors de la circulation du véhicule [48].

Une autre conclusion majeure de cette étude concerne la proportion relative de l'influence des différents facteurs de vieillissement environnemental. En comparant les taux de dégradation obtenus pour les six villes où ces pneus ont été utilisés, les auteurs observent que la vitesse de dégradation est maximale dans les villes les plus chaudes, et minimale dans celles plus froides, indépendamment du taux d'ozone atmosphérique et du taux d'humidité [48]. La température ambiante apparaît donc comme étant le facteur déterminant dans le processus de vieillissement des pneus en service, par rapport aux autres facteurs environnementaux ainsi qu'à la fatigue mécanique.

5. RÉFÉRENCES

1 Struick, L. C. E. (1985). Physical Aging. In J. W. a. Sons (Ed.), Encyclopedia of Polymer Science and Engineering (2ème ed., Vol. 1, pp. 595-611).

2 Fayolle, B., & Verdu, J. (2002). Vieillissement physique des matériaux polymères. In P. T. d. l'Ingénieur (Ed.), Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites (Vol. AM3150).

3 Verdu, J. (2002). Vieillissement chimique des plastiques: aspects généraux. In P. t. d. l'ngénieur (Ed.), Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites (Vol. AM 3151).

4 Ciullo, P. A., & Hewitt, N. (1990). Rubber. In P. D. Library (Ed.), The rubber formulary (pp. 1-72). New York: Noyes Publications / William Andrew Publishing.

5 Hofmann, W. (1989). Aging and aging protectors. In O. U. Press (Ed.), Rubber Technology Handbook.

6 Baldwin, J. M., Bauer, D. R., & Ellwood, K. R. (2004). Accelerated aging of tires, Part II. Paper presented at the Spring meeting, Rubber division, American Chemical Society, Grand Rapids, Mi.

7 Huang, D., LaCount, B. J., Castro, J. M., & Ignatz-Hoover, F. (2001). Development of a service-simulating, accelerated aging test method for exterior tire rubber compounds I. Cyclic aging. Polymer Degradation and Stability, 74(2), 353-362.

8 LaCount, B. J., Castro, J. M., & Ignatz-Hoover, F. (2002). Development of a service-simulating, accelerated aging test method for exterior tire rubber compounds II. Design and development of an accelerated outdoor aging simulator. Polymer Degradation and Stability, 75(2), 213-227.

9 Kataoka, T., Zetterlund, P. B., & Yamada, B. (2003). Effects of storage and service on tire performance: Oil component content and swelling behavior. Rubber Chemistry and Technology, 76(2), 507-516.

10 Ellwood, K. R. J., Baldwin, J., & Bauer, D. R. (2005). A finite element model for oven aged tires. Tire Science and Technology, 33(2), 103-119.

11 Pierre, C. C., Datta, S., & Datta, R. N. (2004). New Mechanistic View on Network Stabilization. KGK-Kautschuk und Gummi Kunststoffe, 57(3), 99-104.

12 Adhikary, A., Mukhopadhyay, R., & Deuri, A. S. (1995). Effect of silane coupling agent (Si-69) on thermoxidative stability of butyl rubber compounds. Journal of Materials Science, 30(16), 4112-4114.

13 Datta, R. N., & Huntink, N. M. (2002). Stabilization of dynamic properties following ageing. KGK-Kautschuk und Gummi Kunststoffe, 55(7-8), 350-355.

14 Pannikottu, A. (2003). Service life prediction for elastomeric tire components. Paper presented at the Spring meeting, Rubber division, American Chemical Society, San Francisco, CA.

15 Nellen, A. H., Dunlap, J., W.B., Glaser, J., C.J., & Landes, R. A. (1950). Effect of atmospheric ozone on tires during storage. Rubber Age (New York), 66(6), 659-662.

16 Waddell, W. H. (1998). Tire black sidewall surface discoloration and non-staining technology: A review. Rubber Chemistry and Technology, 71(3), 590-618.

17 Popov, A. A., Cole, D. J., Winkler, C. B., & Cebon, D. (2003). Laboratory measurement of rolling resistance in truck tyres under dynamic vertical load. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering, 217(D12), 1071-1079.

18 Verdu, J. (2002). Différents types de vieillissement chimique des plastiques. In P. T. d. l'Ingénieur (Ed.), Techniques de l'Ingénieur: traité Plastiques et Composites (Vol. AM3152).

19 Hong, S. W., & Lin, C.-Y. (1999). Improved flex fatigue and dynamic ozone crack resistance through the use of antidegradants or their blends in tire compounds. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Orlando, FL.

20 Lee, B. L., Song, J. H., & Hosterman, A. (2003). Origins of catastrophic failure in SUV tires as composite structures. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Cleveland, OH.

21 Kerchman, V., & Shaw, C. (2001). Experimental study and finite element simulation of heat build-up in rubber compounds with application to fracture. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Cleveland, OH.

22 Blazic, O., Chiesa, A., & Ghilardi, G. (1979). FATIGUE OF TYRES. Proc of the Int Rubber Conf, IRC 79, Oct 3-6 1979, 638-647.

23 Grosch, K. (1988). ROLLING RESISTANCE AND FATIGUE LIFE OF TIRES. Rubber Chemistry and Technology, 61(1), 42-63.

24 Bobo, S. N. (1988). Fatigue life of aircraft tires. Tire Science & Technology, 16(4), 208-222.

25 Mars, W. V., & Fatemi, A. (2004). Factors that affect the fatigue life of rubber: A literature survey. Rubber Chemistry and Technology, 77(3), 391-412.

26 Giuliani, G. P., Medri, G., & Pirondi, A. (2001). A test to evaluate fatigue crack growth in rubber compounds under mixed mode loading. Tire Science and Technology, 29(1), 44-55.

27 Alshuth, T., & Abraham, F. (2001). Parameter dependence and prediction of fatigue properties of elastomer products. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Cleveland, OH.

28 Lee, B. L., Medzorian, J. P., Hippo, P. K., Liu, D. S., & Ulrich, P. C. (1993). Fatigue lifetime prediction of angle-plied fiber-reinforced elastomer composites as pneumatic tire materials. Paper presented at the Second Symposium on Advances in Fatigue Lifetime Predictive Techniques, May 4-5 1992, Pittsburgh, PA, USA.

29 Song, J. H., Costanzo, F., & Lee, B. L. (2004). Fatigue of cord-rubber composites: V. Cord reinforcement effect. Rubber Chemistry and Technology, 77(4), 593-610.

30 Ku, B. H., Liu, D. S., & Lee, B. L. (1998). Fatigue of cord-rubber composites: III. Minimum stress effect. Rubber Chemistry and Technology, 71(5), 889-905.

31 Lee, B. L., & Liu, D. S. (1994). Cumulative damage of fiber-reinforced elastomer composites under fatigue loading. Journal of Composite Materials, 28(13), 1261-1286.

32 Rao, S., Daniel, I. M., & McFarlane, D. (2001). Fatigue and fracture behavior of a steel cord/rubber composite. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 14(3), 213-224.

33 McElrath, K. O., Cross, J. P., Tse, M. F., & Mintz, D. (2000). Ozone resistance of BIMS-diene rubber blends: predictable, random, chaotic or simply complex ? Paper presented at the Spring meeting, Rubber division, American Chemical Society, Dallas, Texas.

34 Michelin. (2004). L'architecture d'un pneu. Retrieved 16 décembre 05, 2005, from http://www.michelin.fr/fr/auto/auto_cons_bib_arc_pne.jsp

35 Girois, S. (2004). Stabilisation des plastiques - Principes généraux. In P. t. d. l'ngénieur (Ed.), Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites.

36 Sawada, S., Kamiyama, K., Ohgushi, S., & Yabuki, K. (1991). Degradation mechanisms of poly(ethylene terephthalate) tire yarn. Journal of Applied Polymer Science, 42(4), 1041-1048.

37 Kenyon, D. (1964). Testing tire ply adhesion. Adhesives Age, 7(8), 27-29.

38 Su, Y.-Y., & Shemenski, R. M. (2000). Impact of oxide characteristics on coatings of steel reinforcement to rubber adhesion. In Conference Proceedings. Wire and Cable Technical Symposium (WCTS) (pp. 50-59). Nashville, TN, USA: Wire Association International Inc., Guilford, CT, USA.

39 Fulton, W. S., Smith, G. C., & Titchener, K. J. (2004). Interfacial microanalysis of rubber-tyre-cord adhesion and the influence of cobalt. Applied Surface Science, 221(1-4), 69-86.

40 De Jong, C. C. J. (1979). STEEL CORD: ANALYSIS OF USED TRUCK TIRES AND SIMULATION OF THE FOUND PHENOMENA IN LABORATORY

EXPERIMENTS. Tire Reinf and Tire Perform, Symp, Oct 23-25 1978(694), 69-86.

41 Basaran, M. (2002). Life time improvement of radial tires with the help of steel cords having superior corrosion and fretting resistance. Paper presented at the Spring meeting, Rubber division, American Chemical Society, Savannah, GA.

42 Holt, J. M. (1985). FACTORS INFLUENCING THE FATIGUE LIFE OF STEEL CORD IN TIRES. Wire Journal International, 18(10), 76277.

43 Araujo, J. E., Hallen, J. M., & Vazquez, L. (2002). Strain aging of an AISI 1070 steel. Wire Journal International, 35(1), 86-90.

44 Klein, W. G., Platt, M. M., & Hamburger, W. J. (1962). Experimental study of tire cord fatigue. Textile Research Journal, 32(5), 393-408.

45 Cho, H. H., Lee, K. H., & Bang, Y. H. (2000). Effect of fine structure on fatigue resistance property of poly(ethylene terephthalate) tire cord fibers. Journal of Applied Polymer Science, 78(1), 90-100.

46 Naskar, A. K., Mukherjee, A. K., & Mukhopadhyay, R. (2004). Studies on tyre cords: Degradation of polyester due to fatigue. Polymer Degradation and Stability, 83(1), 173-180.

47 Nkiwane, L., & Mukhopadhyay, S. K. (2000). A study of flex fatigue characteristics of nylon 6.6 tire yarns and cords. Journal of Applied Polymer Science, 75(8), 1045-1053.

48 Bauer, D. R., Baldwin, J. M., & Ellwood, K. R. (2004). Correlation of rubber properties between field aged tires and laboratory aged tires. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Colombus, OH.

49 Wei, Y. T., Nasdala, L., Rothert, H., & Xie, Z. (2004). Experimental investigations on the dynamic mechanical properties of aged rubbers. Polymer Testing, 23(4), 447-453.

50 Huntink, N. M., & Datta, R. N. (2003). A novel slow release antidegradant for the rubber industry. Part 1: Migration behavior of newly developed anti-ozonant compared to conventional antidegradants. KGK-Kautschuk und Gummi Kunststoffe, 56(6), 310-315.

51 Rodionova, O. Y., & Pomerantsev, A. L. (2005). Prediction of rubber stability by accelerated aging test modeling. Journal of Applied Polymer Science, 95(5), 1275-1284.

52 Nellen, A. H., & Sellers, H. M. (1929). Correlation between Geer oven and natural aging of selected tire compounds. Industrial and Engineering Chemistry, 21(11), 1019-1020.

53 Parker, D. K. (1995). Improved aging and UV resistance of TPEs derived from diimide HSBRs. Rubber World, 213(1), 33.

54 Baldwin, J. M. (2003). Accelerated aging of tires, Part I. Paper presented at the Fall Meeting, Rubber division, American Chemical Society, Cleveland, OH.

55 Baldwin, J. M., Bauer, D. R., & Ellwood, K. R. (2004). Accelerated aging of tires, Part III. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Columbus, OH.

56 Schwarz, D. L., Askea, D. W., & Lambillotte, B., D. (2003). Laboratory simulated aging and the effect on the oxygen content in rubber. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Cleveland, OH.

57 Frates, W. S. (2000). Tire inflation accidents, 2005, from http://www.tireaccidents.com/tire_inflation_accidents.htm.

58 Tuval, E., Thurm, A., & Rigbi, Z. (1999). The aging of tires and similar objects in open air storage. Journal of Polymer Engineering, 19(3), 209-221.

59 Lambillotte, B., D., & Gibson, M. A. (2003). Steel cord adhesion after heat aging and dynamic exercice. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Cleveland, OH.

60 Sarbach, D. V., & Hallman, R. W. (1965). Road testing of American and Yugoslavian polybutadiene truck tyres under severe service conditions -- 1. Rubber and Plastics Age, 46(10), 1151-1154.

61 Sarbach, D. V., & Hallman, R. W. (1965). Road testing of American and Yugoslavian polybutadiene truck tyres under severe service conditions -- 2. Rubber and Plastics Age, 46(11), 1272-1274.

62 Sperberg, L. R. (1967). Tire durability. Rubber Age, 99(11), 83-92.

63 MacIsaac, J., & Feve, S. (205). Tire Aging Test Development Project, from www.nhtsa.dot.gov

64 Baldwin, J. M., Dawson, M. A., & Hurley, P. D. (2003). Field aging of tires, Part I. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Cleveland, OH.

65 Baldwin, J. M., Bauer, D. R., & Hurley, P. D. (2004). Field aging of tires, Part II. Paper presented at the Fall meeting, Rubber division, American Chemical Society, Clombus, Oh.