N° d'ordre NNT : xxx

THESE de DOCTORAT DE L'ECOLE CENTRALE DE LYON
membre de l'Université de Lyon

Ecole Doctorale N° 162
MEGA - Mécanique, Energétique, Génie civil, Acoustique

Spécialité de doctorat : Mécanique

Soutenue publiquement le 22/06/2026 par :

Maxime MICHEL

Optimisation de la performance du fauteuil roulant de compétition: le frottement dans les interactions athlète/fauteuil/piste

---

Devant le jury composé de :

SMERDOVA	Olga	Maître de conférence, HDR	ISAE-ENSMA	Rapporteure
CHAZEAU	Laurent	Professeur des Universités	INSA Lyon	Rapporteur
SOTTA	Paul	Directeur de Recherche CNRS	INSA Lyon	Président du jury
MAZUYER	Denis	Professeur des Universités	Ecole Centrale Lyon	Directeur de thèse
LOUBET	Jean-Luc	Directeur de Recherche CNRS	Ecole Centrale de Lyon	Co-directeur de thèse
PICARD	Loïc	Docteur	Hutchinson	Invité

Table des matières

Résumé ..... **v**

Glossaire ..... **vii**

Remerciements ..... **xii**

Introduction générale **1**

I. Comment optimiser une performance en para-athlétisme ? **5**

1. Introduction **5**

2. Genèse de ce travail de thèse et objectifs **5**

a. Le Projet $Sciences2024$ et la course en fauteuil roulant 5

b. Les objectifs sportifs, industriels et scientifiques 6

3. Le fauteuil roulant de compétition pour le para-athlétisme **7**

a. Description détaillé du fauteuil roulant de compétition 7

b. Présentation du contact gant/main courante 8

c. Présentation du contact entre le pneu et la piste d'athlétisme 9

4. les élastomères **14**

a. Formulation et fabrication 14

b. Comportement mécanique des élastomères 15

5. Le contact statique entre un élastomère et une surface rigide **19**

a. Modèles de mécanique du contact sur une surface lisse et rugueuse 19

b. Contact glissant entre un élastomère et une surface rigide 22

6. La stratégie de recherche **24**

7. Bibliographie **26**

II. Analyse tribologique du contact gant/main courante **29**

1. Introduction **29**

2. Simulation expérimentale du contact gant/main courante en laboratoire **29**

a. Les caractéristiques du boxage de la main courante 29

b. Reproduction du contact en laboratoire 30

3. Formulation des matériaux **32**

a. Stratégie d'optimisation de la formulation 32

b. Paramètres de formulation 33
c. Choix de formulation 35
4. Résultat type d'un essai tribologique de référence 37
a. Choix des conditions expérimentales d'un essai tribologique de référence 37
b. Protocole expérimental 37
c. Protocole de mesure 38
d. Un exemple de mesure de frottement 39
e. Un exemple de mesure d'usure 41
5. Influence de la formulation sur le frottement 42
a. Influence de la matrice élastomère 42
b. Influence de la charge de renfort 45
c. Influence de la résine tackifiante 46
d. Conclusions sur l'influence de la formulation sur le frottement 48
6. Influence de la formulation sur la tenue en usure 50
a. Influence sur la perte de masse 50
b. Analyse des faciès d'usure 51
7. Retour des athlètes en compétition 56
a. Validation des essais laboratoire sur la piste 56
b. Retour d'expérience des athlètes 58
c. Aide au choix des matériaux 59
8. Conclusions 59
9. Bibliographie 61

III. Analyse du contact pneu/piste d'athlétisme : Effet de la topographie et de la mécanique des matériaux 63

1. Introduction 63
2. Simulation expérimentale du contact pneu/piste d'athlétisme en laboratoire 63
a. Analyse cinématique du contact réel 63
b. Reproduction du contact pneu/piste d'athlétisme 66
3. Caractérisation topographique et mécanique d'une piste d'athlétisme 68
a. Présentation d'une piste d'athlétisme 68
b. Analyse topographique de la piste d'athlétisme 69
c. Analyse mécanique de la piste d'athlétisme 74
4. Caractérisation topographique et mécanique d'une bande de roulement 79
a. Formulation et géométrie 80

b. Topographie de surface 81
c. Propriétés mécaniques 82
5. Conclusions 88
6. Bibliographie 90

IV. Analyse du frottement dans le contact pneu/piste d'athlétisme 91
1. Introduction 91
2. Influence de la formulation du pneu sur le frottement dans des conditions de glissement pur 92
a. Réponse tribologique du contact modèle pneu/disque en verre en glissement pur 92
b. Réponse tribologique en glissement pur sur une piste d'athlétisme 99
3. Influence de la formulation de l'échantillon sur le frottement en se rapprochant des conditions réelles 103
a. Réponse tribologique dans des conditions de roulement-glissement 103
b. Influence de la vitesse d'entrainement sur la réponse tribologique en roulement-glissement 108
c. Contribution de la piste dans le contact bande de roulement/piste d'athlétisme 110
d. Décomposition des composantes de roulement et de glissement de la force tangentielle 115
e. Résumé des résultats obtenus en laboratoire 116
4. Optimisation des boyaux en conditions réelles 116
a. Définition d'un protocole de mesure de résistance au roulement sur piste 117
b. Données expérimentales spécifiques à l'essai mis en place 118
c. Analyse de l'évolution du coefficient de résistance au roulement, selon le boyau utilisé, et sa pression de gonflage 120
5. Conclusions 122
6. Bibliographie 123

Conclusion générale 125

Annexes 129
1. Annexe A : Comparaison des faciès d'usure 129
2. Annexe B : Questionnaire de satisfaction du revêtement des gants 131
3. Annexe C : Normes des pistes d'athlétisme 134

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet national $Sciences^{2024}$, dont l'ambition est de mobiliser l'expertise des sciences pour optimiser la performance des athlètes français en vue des Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris 2024. Ce travail de recherche s'est basé sur une approche systémique, mené en collaboration avec l'entreprise Hutchinson et la Fédération Française Handisport, traitant le fauteuil roulant comme un ensemble mécanique dont la performance globale dépend de l'optimisation des interfaces avec l'extérieur. Cette stratégie s'articule autour de deux axes: maximiser l'efficacité de la propulsion en augmentant l'adhérence du contact gant/main courante lors du boxage, et minimiser la résistance au frottement du contact pneu/piste.

La méthodologie de recherche mise en œuvre repose sur un dialogue entre les mondes industriel, scientifique et sportif: elle croise ainsi l'expertise en formulation chimique des élastomères de la société Hutchinson avec celle en tribologie expérimentale du LTDS et des mesures *in operando* sur le terrain avec les athlètes de l'équipe de France.

L'étude du contact gant/main courante révèle que le contrôle de l'adhérence lors de la phase de « boxage » est régi au premier ordre par la nature de la matrice élastomère, tandis que l'ajout de résines tackifiantes permet d'ajuster ce « grip » au second ordre. Toutefois, les retours d'expérience des athlètes sur le terrain ont souligné que l'usure constitue un paramètre de performance tout aussi important à contrôler. En effet, si les formulations à base de polyisoprène (IR) maximisent l'adhérence, les sportifs ont mis en évidence une usure « très rapide » générant des débris de caoutchouc perturbant la qualité de la poussée. Il est donc nécessaire de définir un compromis entre adhérence et usure, adapté au profil de chaque athlète. Ce choix dépend de la catégorie de handicap (T53 ou T54) et de la force de boxage générée, qui influencent la sévérité des sollicitations mécaniques, et des distances sur lesquelles est aligné l'athlète. Ainsi, l'IR s'avère être un matériau performant pour les sprinteurs, car l'usure rapide est moins pénalisante sur des distances courtes nécessitant un grip maximal. En revanche, la matrice SBR constitue le meilleur compromis pour les coureurs de demi-fond, offrant une adhérence élevée tout en présentant une perte de masse drastiquement réduite et un faciès d'usure douce.

Après avoir maximisé la vitesse du fauteuil en optimisant l'efficacité de la propulsion au niveau du contact gant/main courante, l'enjeu est désormais de limiter les phénomènes dissipatifs au sein de l'interface pneu/piste. Une caractérisation mécanique révèle que les revêtements Mondo possèdent une souplesse comparable à celle des bandes de roulement développées. La démarche expérimentale a été progressive, débutant par des essais fondamentaux sur disque en verre pour permettre une visualisation *in situ*, avant de passer à des essais sur pistes réelles en laboratoire, pour aboutir finalement à des mesures directement sur le terrain. Ces travaux ont démontré que rouler sur un sol souple influence considérablement les réponses tribologiques du système. Ces dernières sont difficilement différentiables en conditions de roulement-glissement sur piste en laboratoire pour des formulations de caoutchouc distinctes. Ces résultats ont alors conduit à explorer la pression de gonflage du pneu comme levier de performance complémentaire. Les essais sur le terrain ont ainsi révélé qu'un sur-gonflage s'avère contre-productif, générant un bourrelet de matière qui freine l'avancement du fauteuil. Ceci a permis d'identifier une pression optimale comprise entre 3 et 5 bars.

Ce travail apporte une première contribution significative à la tribologie des élastomères sur surfaces souples rugueuses et a permis de traduire des résultats de laboratoire en solutions concrètes, contribuant directement à l'amélioration de la performance des para-athlètes français en compétition.

MOTS-CLÉS : Para-athlétisme, Élastomères, Frottement, Usure, Résistance au roulement

Glossaire

E_0	Module d'élasticité à l'origine
n	Nombre de chaînes par unité de volume, en m^{-3}
k	Constante de Boltzmann
T	Température, en °C
E'	Partie réelle du module complexe, en Pa
$\tan(\delta)$	Facteur de dissipation
λ	Taux d'allongement
L	Longueur en fonction du temps de l'échantillon, en m
L_0	Longueur initiale de l'échantillon, en m
E	Module d'élasticité, en Pa
η	Coefficient de viscosité, en $Pa.s$
σ	Contrainte de cisaillement, en Pa
σ_0	Contrainte initiale de cisaillement, en Pa
t	Temps, en s
τ	Constante de relaxation caractéristique du matériau, en s ; ou Contrainte de cisaillement, en Pa
ε	Déformation du matériau
τ_0	Temps de relaxation retardé, en s
T_0	Température de référence, en °C
a	Rayon de contact, ou demi-axe d'un contact elliptique, en m
R_1, R_2	Rayons des solides en contact, en m
p	Pression de contact, en Pa
p_{max}	Pression de contact maximale, en Pa
r	Distance d'un point quelconque du contact, en m
ν_1, ν_2	Coefficients de Poisson des solides en contact
E_1, E_2	Modules d'élasticité des deux solides en contact, en Pa
δ	Enfoncement, en m
F_N	Force normale, en N
R^*	Rayon de courbure réduit, en m
E^*	Module d'élasticité réduit, en Pa
ω	Travail d'adhésion par unité de surface de Dupré, en J/m^2
F_0	Force adhésive, en N
N	Nombre de sommets en contact entre deux solides
Φ	Variable aléatoire de densité de probabilité
β	Rayon de courbure moyen au sommet d'une aspérité, en m
z_s	Hauteur moyenne d'une aspérité par rapport à la moyenne de la surface, en m
$A_{réelle}$	Aire réelle de contact, en m^2
μ	Coefficient de frottement
R_a	Rugosité arithmétique moyenne linéaire, en m
F_x, F_y	Composante de la force tangentielle selon l'axe $\vec{x}$ et $\vec{y}$, en N ; ou trainée aérodynamique, en N
F_t	Force tangentielle, en N
NR	Caoutchouc naturel
SBR	Styrène-butadiène
IR	Polyisoprène synthétique
BR	Polybutadiène
IIR	Butyle
GP	Noir de carbone ayant de « grandes » particules
PP	Noir de carbone ayant de « petites » particules

t_0	Temps initial, en s
μ_{moy}	Moyenne des coefficients de frottement lors de la phase stabilisée d'un cycle de frottement
μ_{stab}	Moyenne des μ_{moy} lors de la phase stabilisée d'un essai de frottement
Ref	Echantillon de référence
R_{roue}	Rayon de la roue, en m
l	Demi-longueur du contact réel d'une roue sur un sol, en m
d	Arc du cercle du pneu non déforme en contact avec le sol, en m
u	Longueur glissée d'un pneu sur le sol, en m
$v, v_{fauteuil}$	Vitesse linéaire du fauteuil, en m/s
t_c	Temps de contact caractéristique lors de la rotation d'une roue, en s
v_g	Vitesse de glissement, en m/s
SRR	Ratio de Roulement-Glissement
S_a	Rugosité arithmétique moyenne surfacique, en m
S_q	Rugosité quadratique moyenne surfacique, en m
R_{sk}	Paramètre de Skewness
R_{ku}	Paramètre de Kurtosis
R_f	Fréquence des aspérités, en m^{-1}
ε_{ell}	Ellipticité, mesure de l'allongement d'une ellipse
b	Demi-axe d'un contact elliptique, en m
h	Epaisseur de l'échantillon, en m
h_0	Epaisseur initiale de l'échantillon, en m
I_1, I_2	Invariants du tenseur des déformations
W	Densité d'énergie élastique par unité de volume, en Pa
C_1, C_2	Constantes expérimentales du modèle de Mooney-Rivlin, en Pa
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	Rapport d'allongement dans les 2 directions de l'espace
G	Fonction de relaxation, en Pa
G_∞	Module de cisaillement aux temps longs, en Pa
A, B	Paramètres adimensionnels du modèle de Poynting
E_{eq}	Module élastique équivalent, en MPa
R_a, R_b	Rayons de courbures de l'échantillon, en m
A_{app}	Aire apparente de contact, en m^2
F_{0_charg}	Force adhésive lors du chargement, en N
$F_{0_decharg}$	Force adhésive lors du déchargement, en N
ω_{charg}	Travail d'adhésion par unité de surface lors du chargement, en J/m^2
$\omega_{decharg}$	Travail d'adhésion par unité de surface lors du déchargement, en J/m^2
F_R	Force résiduelle à long terme dans le modèle de Maxwell généralisé, en N
τ_1, τ_2	Temps caractéristique de relaxation associé au modèle de Maxwell généralisé, en s
τ_{app}	Contrainte de cisaillement apparente, en Pa
$\tau_{réelle}$	Contrainte de cisaillement réelle, en Pa
$d_{inter-pic}$	Distance moyenne séparant les aspérités d'une piste d'athlétisme sur un tour de frottement, en m
$nb_{aspérités}$	Nombre d'aspérités dénombré au microscope optique sur la trajectoire de l'échantillon glissant sur la piste
r	Distance entre l'échantillon en caoutchouc et le centre du disque lors d'un essai tribologique, en m
v_{disque}	Vitesse linéaire du disque au point de contact avec l'échantillon, en m/s
$v_{échantillon}$	Vitesse linéaire de l'échantillon au point de contact avec le disque, en m/s
a_0, b_0	Demi-axe d'un contact elliptique en condition statique, en m
$F_{t_{mesurée}}$	Force tangentielle mesurée, en N
$F_{t_{glissement}}$	Composante de glissement de la force tangentielle mesurée, en N

$F_{t_{roulement}}$	Composante de roulement de la force tangentielle mesurée, en N
D_{init}	Distance initiale de la phase de décélération de l'essai de décélération, en m
t_{init}	Temps initial de la phase de décélération de l'essai de décélération, en m
D	Distance de la phase de décélération de l'essai de décélération, en m
F_r	Force de résistance au roulement, en N
ρ	Densité de l'air, en kg/m^3
A	Aire frontale effective, en m^2
C_d	Coefficient de trainée aérodynamique
m	Somme de la masse de l'athlète et du fauteuil, en kg
g	Accélération de la pesanteur, en m/s^2
C_r	Coefficient de résistance au roulement
v_0	Vitesse du fauteuil lors de la phase initiale de décélération, en m/s

Remerciements

Je souhaiterais tout d'abord remercier les membres de mon jury, les rapporteurs Olga Smerdova et Laurent Chazeau, pour avoir pris le temps de lire mes travaux et pour la pertinence de leurs remarques. Mes remerciements vont également à M. le Président, Paul Sotta, pour les discussions très intéressantes que nous avons eues à l'issue de ma présentation.

Je tiens également à remercier Hutchinson pour m'avoir fait confiance et m'avoir donné l'opportunité de mener à bien cette thèse. Je remercie en particulier Christophe Chevalier, Laina Guo, Mohamadou Diew et Camille pour leur encadrement et leur aide tout au long de ce doctorat. Je remercie tout particulièrement Loïc. Merci pour ta gentillesse, ton investissement et pour les moments partagés à Montrodat ou à Évry lors des stages avec les athlètes. Mais également pour m'avoir toujours encouragé et soutenu dans les différentes étapes de ma thèse. Ton expérience m'a été d'une grande aide.

Je voulais également remercier tous les membres de la Fédération Handisport avec qui j'ai pu travailler: les athlètes, les entraîneurs, les responsables techniques … Sans votre participation, cette thèse n'aurait pas eu la même portée. Les essais sur le terrain réalisés grâce à vous ont apporté une énorme plus-value à ces travaux, donc merci pour cela.

Je tiens ensuite à remercier mes directeurs de thèse. Tout d'abord, pour votre expertise scientifique, pour m'avoir conseillé et orienté dans ce vaste sujet, et pour votre aide dans l'interprétation des résultats. Merci surtout de m'avoir accordé cette liberté de recherche et de m'avoir aidé à construire cette thèse un peu atypique, où l'on s'est éloigné d'une recherche uniquement menée au laboratoire pour aller au plus concret possible avec les athlètes.

Je voulais aussi remercier mon encadrante officieuse, Juliette. Merci de m'avoir soutenu tout au long de cette thèse, et encore plus particulièrement pendant la phase de rédaction, pour toutes tes relectures et pour tout ce que tu as apporté scientifiquement à ce travail de thèse.

Je vais éviter de dresser une liste de toutes les personnes à remercier au laboratoire, mais je tenais tout de même à remercier toutes les personnes que j'ai pu côtoyer durant ces cinq années. Que ce soit les permanents qui m'ont donné un coup de main sur les bancs d'essai, pour les analyses ou lors des prototypages, mais aussi les gestionnaires, sans qui pas grand-chose n'avancerait.

Je voulais également remercier tous les doctorants dont j'ai croisé la route. En partant du H10 pour finir à TMM, en cinq ans, j'en ai croisé du monde. Merci pour toutes les discussions scientifiques que nous avons pu avoir, mais surtout pour tous les bons moments. Pour un projet comme une thèse, c'est primordial d'avoir un bon équilibre et de se sentir bien sur son lieu de travail, et cela est en grande partie grâce à vous. Que ce soit pour un footing, une sortie vélo, une partie de padel ou de badminton, les entraînements de basket le jeudi, boire une bière, la pause goûter et j'en passe, vous avez fait en sorte que venir au laboratoire reste un vrai plaisir. Je vais tout de même glisser quelques mots à certains doctorants en particulier (mais pas trop de personnes et pas trop long, vous le savez, écrire n'est pas mon activité favorite).

Tout d'abord, merci à Cyril pour avoir partagé le bureau pendant toutes ces années. Même si tes goûts musicaux sont catastrophiques, on a vraiment passé de très bons moments dans ce bureau !

Cloé, merci pour les innombrables pauses goûter et les tout aussi nombreux footings que nous avons pu faire, toujours avec le sourire. Ça a été un plaisir d'avoir réalisé cette thèse en même temps que toi et d'avoir pu partager LORRY avec une personne aussi agréable avec qui travailler (encore désolé d'avoir cassé l'actionneur piezo, oupsi).

Et forcément, un petit mot pour Kaiser. Le vieux couple, comme nous appelle Juliette. Quel plaisir d'avoir partagé cette thèse avec toi. Ça a tout de suite matché, et tu es devenu bien plus qu'un collègue. Nous avons évolué ensemble pendant ces cinq ans, nous avons beaucoup partagé, et j'aurais probablement abandonné cette thèse il y a bien longtemps si je n'avais pas eu un co-bureau comme toi.

Ce dernier remerciement fait un lien tout trouvé avec la suite des remerciements, pour les copains en dehors du labo. Même si vous n'étiez pas forcément présents au quotidien, vous m'avez tout de même accompagné pendant ces cinq années. Pour avancer, il faut trouver un équilibre entre la vie personnelle et la vie professionnelle, et vous en avez fait partie intégrante, donc merci pour ça.

De la même manière que pour les remerciements au labo, je ne vais pas lister toutes les personnes avec qui j'ai passé de super moments et qui m'ont accompagné pendant ces 5 ans à travers moult week-ends, vacances, soirées jeux, etc … Mais je vais tout de même remercier deux ou trois personnes en particulier.

Tout d'abord Martin, qui est arrivé sur Lyon quelques temps après le début de ma thèse. Je ne compte plus les soirées jeux, les bars et les week-ends passés ensemble. Tu as toujours été une oreille attentive pour discuter et m'aider à avancer pour finir cette thèse.

En parlant des soirées jeux, merci également à Maud pour toutes les pauses bavardages/jeux du mercredi midi. Ça faisait du bien de faire un petit point d'avancement toutes les semaines autour d'une partie d'Harmonie ou de Naishi.

Puis un dernier coucou parmi les copains de Festu à Auriane. Toujours partante pour l'aventure. A chaque fois, c'était un bol de fraîcheur qui permettait d'oublier, le temps d'un week-end, le boulot et de reset le cerveau pour repartir en forme.

Et enfin, Quentin. Même si pendant une bonne partie de cette thèse, tu faisais le tour du monde et que je t'enviais énormément, c'était toujours un plaisir de t'appeler, de pouvoir me confier et de discuter comme si on s'était parlé la veille.

Et pour finir, un immense remerciement à ma famille, à mes sœurs et à mes parents. Merci pour votre soutien tout au long de ce doctorat. Même si je me suis fait doubler sur la ligne d'arrivée par Pauline pour le titre de premier docteur de la famille (mais elle a trichée, c'était moins long son travail de « thèse »), vous m'avez toujours encouragé à ne jamais lâcher et à aller jusqu'au bout. Vous avez toujours été à l'écoute et de bons conseils et cette réussite est en grande partie grâce à vous.

Introduction générale

Depuis plusieurs années, le handisport connaît une évolution croissante. Si la professionnalisation des para-athlètes n'est pas encore d'actualité, les compétitions de haut niveau, portées par le mouvement paralympique, se multiplient. À l'instar de l'athlétisme chez les sportifs valides, le para-athlétisme constitue la discipline majeure du handisport, tant par le nombre d'athlètes qu'il rassemble que par la diversité des épreuves qu'il propose. Afin d'assurer une équité sportive entre des athlètes aux profils variés, un système de classification a été mis en place, regroupant les compétiteurs en fonction de l'impact de leur handicap sur la performance.

La course en fauteuil roulant, l'une des branches du para-athlétisme, concerne des athlètes présentant une atteinte aux membres inférieurs et au tronc. Ces athlètes sont répartis en quatre classes, de T51 à T54, reflétant des niveaux de limitation fonctionnelle allant des atteintes les plus sévères aux plus modérées. Dans cette discipline, l'athlète mobilise principalement la puissance de ses membres supérieurs pour se propulser à l'aide d'un fauteuil roulant de course, en boxant la main courante. Toutefois, la performance ne dépend pas uniquement des capacités physiques de l'athlète : le matériel utilisé joue également un rôle déterminant. En compétition de haut niveau, où les écarts de performance sont souvent infimes, l'efficacité du fauteuil roulant et de ses réglages peut s'avérer décisive dans le classement final.

Dans le but d'accompagner les athlètes français dans leurs objectifs de performance et de médailles aux Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris 2024, le programme de recherche *Sciences*^{2024} a été mis en place en France. Ce programme ambitionne de mobiliser les sciences molles et dures afin d'apporter des réponses concrètes aux problématiques formulées par les sportifs et leurs entraîneurs. Il couvre l'ensemble des disciplines représentées aux Jeux de 2024, tant en sport valide qu'en handisport, et adopte une approche fondée aussi bien sur l'étude directe de l'athlète que sur l'optimisation des équipements sportifs qui lui sont spécifiques. Dans ce cadre, la course en fauteuil roulant soulève des enjeux particuliers liés à l'interaction entre l'athlète, son matériel et le sol, notamment en ce qui concerne les phénomènes de dissipation par friction et de rendement mécanique, qui constituent des facteurs déterminants de la performance en compétition.

Lors des échanges avec la Fédération Handisport autour des épreuves de course en fauteuil roulant, l'augmentation de la vitesse du fauteuil est apparue comme un enjeu majeur, structuré autour de deux problématiques complémentaires. La première consiste à améliorer l'efficacité de la phase de propulsion, qui intervient lors du boxage, moment où l'athlète transmet son énergie au fauteuil. La seconde vise à limiter les pertes d'énergie après cette phase de propulsion, en réduisant les phénomènes de dissipation lors du roulement du fauteuil sur la piste.

Cette thèse s'inscrit donc dans le cadre du projet *Sciences*^{2024} et porte plus spécifiquement sur les courses de para-athlétisme en fauteuil roulant. Ainsi, un partenariat a été créé entre la société Hutchinson par le biais d'un doctorat CIFRE et le Laboratoire de Tribologie et

Dynamique des Systèmes (LTDS, CNRS UMR5513, Ecole Centrale de Lyon) afin de croiser les connaissances d'Hutchinson en chimie des élastomères et les compétences du LTDS en tribologie.

L'approche retenue repose sur une analyse tribologique des contacts impliquant les différents élastomères présents sur le fauteuil roulant et les équipements associés. Pour optimiser la propulsion du fauteuil, l'accent sera mis sur le contact entre le gant et la main courante, avec pour objectif final de proposer aux athlètes un revêtement de gant spécifiquement conçu pour maximiser la performance lors de la phase de boxage. Pour limiter les pertes d'énergie une fois le fauteuil propulsé, le contact entre le pneu du fauteuil et la piste d'athlétisme sera également étudié.

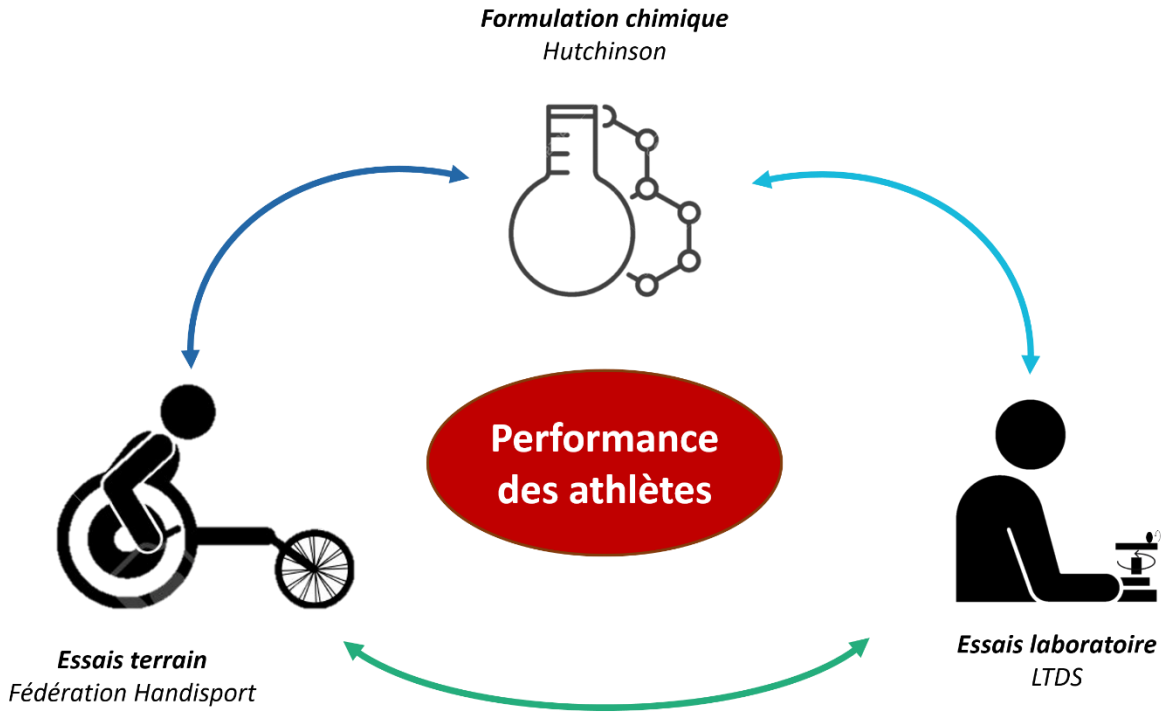


FIGURE 1 : L'AMELIORATION DE LA PERFORMANCE DES ATHLETES CONSTITUE L'OBJECTIF PRINCIPAL DE CETTE THESE. CELLE-CI S'APPUIE SUR DES ECHANGES CONTINUS ENTRE LE LTDS, HUTCHINSON ET LA FEDERATION HANDISPORT AFIN DE REPONDRE AUX BESOINS EXPRIMES PAR LES ATHLETES.

Cette démarche modèle de laboratoire s'appuiera sur des échantillons fournis par Hutchinson, à la fois pour les gants de boxage et pour les pneumatiques des fauteuils roulants, ainsi que sur la fourniture d'échantillons de pistes d'athlétisme identiques à celles utilisées lors des Jeux par l'entreprise Mondo, afin de se rapprocher des conditions réelles. Enfin, cette démarche systémique sera complétée par des essais conduits directement sur le terrain avec les athlètes en partenariat avec la Fédération Française Handisport.

Cette thèse sera organisée en quatre chapitres. Le premier chapitre propose un état de l'art, débutant par une description du fauteuil roulant de compétition, suivie d'une présentation des propriétés des élastomères et des mécanismes de contact connus entre un élastomère et une surface rigide. Il conduit à la présentation détaillée de la stratégie de recherche adoptée dans cette thèse.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du contact entre le gant et la main courante. Il décrit tout d'abord la méthodologie expérimentale mise en œuvre au laboratoire, puis analyse les résultats obtenus pour différentes formulations de revêtements de gants, en termes de frottement et d'usure. Le chapitre s'achève par une corrélation avec les retours des athlètes à la suite des essais réalisés à l'entraînement et en compétition.

Les troisième et quatrième chapitres portent sur le contact entre le pneu et la piste d'athlétisme. Les bandes de roulement et les pistes d'athlétisme étudiées font d'abord l'objet d'une caractérisation mécanique et topographique détaillée au sein du chapitre 3. L'analyse tribologique sous différentes sollicitations est ensuite menée, d'un contact modèle simplifiée à un contact réel, avant de conclure par des essais réalisés directement sur une piste d'athlétisme avec les athlètes, permettant de confronter les résultats de laboratoire aux conditions réelles de pratique.

Chapitre I : Comment optimiser une performance en para-athlétisme ?

1. Introduction

Avec l'obtention des Jeux Olympiques et Paralympiques en 2024, la France a choisi de mettre la science au service du sport en créant le projet *Sciences*^{2024}. Dans le cadre de ce programme, ce travail de thèse s'inscrit plus précisément dans un objectif de maximisation de la performance dans les compétitions para-athlétiques en fauteuil roulant en optimisant la chaîne piste/fauteuil/athlète. Après une brève description du projet Sciences^{2024}, le fauteuil roulant de compétition ainsi que ses spécificités sont décrits. Deux contacts tribologiques sont plus particulièrement étudiés, suite aux discussions avec la fédération et les para-athlètes : le contact entre le gant et la main courante, ainsi que celui entre le pneu et la piste d'athlétisme. Ces contacts étant principalement réalisés entre matériaux élastomériques, nous décrirons succinctement cette famille de matériaux, leurs propriétés mécaniques et rhéologiques. Un état de l'art de la mécanique du contact et de la tribologie des élastomères sera également présenté.

2. Genèse de ce travail de thèse et objectifs

a. Le projet $Sciences^{2024}$ et la course en fauteuil roulant

Le 13 septembre 2017, le Comité International Olympique attribue officiellement l'organisation des Jeux Olympiques et Paralympiques de 2024 à la ville de Paris. Un an plus tard, le projet $Sciences^{2024}$ est fondé, réunissant plusieurs établissements de l'enseignement supérieur, avec pour objectif d'optimiser les performances des athlètes tricolores et de contribuer à leur succès aux Jeux de Paris [1.1]. Pour atteindre ces objectifs, différents projets de recherche collaboratifs sont initiés en utilisant les sciences dites dures, afin de répondre aux questions soulevées lors de rencontres entre chercheurs et sportifs.

Les discussions avec la Fédération Handisport traitant des courses en fauteuil roulant, ont porté sur la question de la maximisation de la vitesse du fauteuil et ont permis de la décliner en plusieurs points. Parmi ceux-ci, on peut citer une demande des para-athlètes à la fois pour optimiser la propulsion du fauteuil lors du boxage, mouvement impulsionnel fourni par l'athlète sur la main courante adossée à la roue et pour minimiser la résistance au roulement des pneus sur la piste d'athlétisme. Ces points d'amélioration sont illustrés sur la figure 1.1 : pour mouvoir

le fauteuil qui roule sur la piste, l'athlète interagit avec le fauteuil via le contact entre son gant et la main courante avec une gestuelle précise et définie.

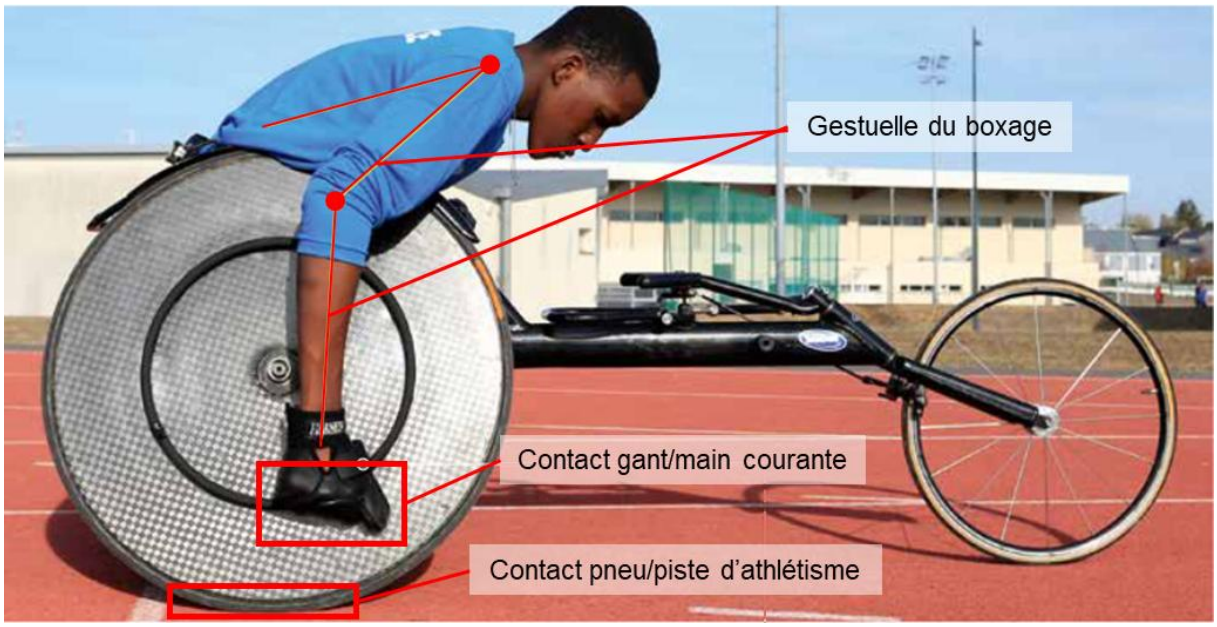


FIGURE 1.1 : ILLUSTRATION D'UN FAUTEUIL DE COMPETITION SUR UNE PISTE D'ATHLETISME. L'ATHLETE YASSER MUSANGANYA AGIT SUR CE FAUTEUIL AU NIVEAU DU CONTACT GANT/MAIN COURANTE POUR TRANSMETTRE L'ENERGIE PAR BOXAGE, ET AINSI PERMETTRE AU FAUTEUIL DE ROULER SUR LA PISTE. DEUX CONTACTS TRIBOLOGIQUES EMERGENT : LE CONTACT GANT/MAIN COURANTE ET LE CONTACT PNEU/PISTE D'ATHLETISME

La transmission de l'effort fourni par l'athlète propulsant le fauteuil se réalise grâce à la phase de boxage. En effet, pendant une course, la vitesse est telle que les athlètes n'ont pas le temps d'agripper la main courante pour la mettre en rotation, ils vont donc la frapper. Cette dernière est un cerceau en aluminium fixé sur la roue que les athlètes recouvrent d'un élastomère afin de limiter le glissement avec le gant lors du boxage. Les gants peuvent être soit « souples », soit thermoformés pour s'adapter à la morphologie de la main de l'athlète. Dans les deux cas, une plaque d'élastomère est collée sur la surface de contact du gant pour favoriser son accroche sur la main courante.

Le contact sur la piste d'athlétisme est réalisé au niveau des pneus du fauteuil. Ceux montés sur les roues arrière sont plus précisément des boyaux. Ils sont issus du cyclisme professionnel, et ne sont donc pas conçus spécifiquement pour les courses d'athlétisme en fauteuil. La Fédération Handisport s'interroge sur les possibilités d'adaptation de ces boyaux aux problématiques spécifiques d'une course en fauteuil roulant, sur une piste d'athlétisme souple.

b. Les objectifs sportifs, industriels et scientifiques

Au démarrage du projet $Sciences^{2024}$, l'objectif chiffré annoncé par le Ministère des Sports était de doubler le nombre de médailles olympiques par rapports aux jeux de Tokyo et d'obtenir 15 médailles d'or aux Jeux Paralympiques. En para-athlétisme, la course à la médaille se joue à quelques dixièmes voire centièmes de secondes. Par exemple, au cours de la finale du 800 m en T53 des Jeux Paralympiques de Rio de Janeiro en 2016, moins d'une demi-seconde sépare la 5ème place du champion paralympique thaïlandais Paeyo et seulement 2 centièmes séparent le quatrième de la médaille de bronze. Pour l'athlète français Pierre Fairbank, le titre de champion olympique s'est joué à seulement deux dixièmes de secondes comme le montre la photo-finish de l'arrivée en figure 1.2 [1.2]. L'objectif de cette thèse est donc d'optimiser les contacts tribologiques impliqués dans la propulsion du fauteuil de compétition pour gagner ces fractions de secondes qui font toute la différence pour les athlètes.



FIGURE 1.2 : PHOTO-FINISH DU 800M T53 AUX JEUX PARALYMPIQUES DE 2016. L'ATHLETE FRANÇAIS PIERRE FAIRBANK FINIT EN 2EME POSITION A 19 CENTIEMES DE SECONDES DE LA MEDAILLE D'OR.

Un évènement mondial tel que les Jeux Olympiques et Paralympiques garantit une visibilité internationale de grande échelle, pour n'importe quel équipementier. L'intérêt pour une société telle qu'Hutchinson est donc double : promouvoir la marque, notamment auprès du grand public en équipant les athlètes avec de nouveaux boyaux et de nouveaux revêtements pour les gants ; approfondir d'une manière générale la recherche en tribologie des élastomères, dont les résultats peuvent être applicables ensuite à un grand nombre de domaines industriels.

Scientifiquement, les objectifs sont de mieux comprendre les phénomènes dissipatifs au sein des différents contacts définis précédemment. Ainsi, pour le contact entre le gant et la main courante, on cherchera à augmenter l'adhérence et le frottement afin de limiter le glissement relatif lors de la phase de boxage. Mais cette optimisation du frottement devra être mise au regard de l'usure de l'élastomère : il sera ainsi important de définir un optimum entre frottement et usure afin que l'élastomère du gant garantisse un niveau d'efficacité sur toute la durée d'une

course voire d'une compétition. En revanche, pour le contact pneu/piste, nous nous attacherons, au contraire, à minimiser la dissipation due au frottement. L'originalité de ce deuxième objectif scientifique réside dans la prise en compte du comportement de la piste d'athlétisme, ce matériau très spécifique, souple, conçu pour les courses des athlètes valides, et pas optimisé pour la course avec fauteuil.

3. Le fauteuil roulant de compétition pour le para-athlétisme

a. Description détaillée du fauteuil roulant de compétition

Le fauteuil roulant de compétition est un équipement très spécifique, adapté à chaque athlète et à leurs handicaps [1.3]. Un exemple est présenté à la figure 1.3.

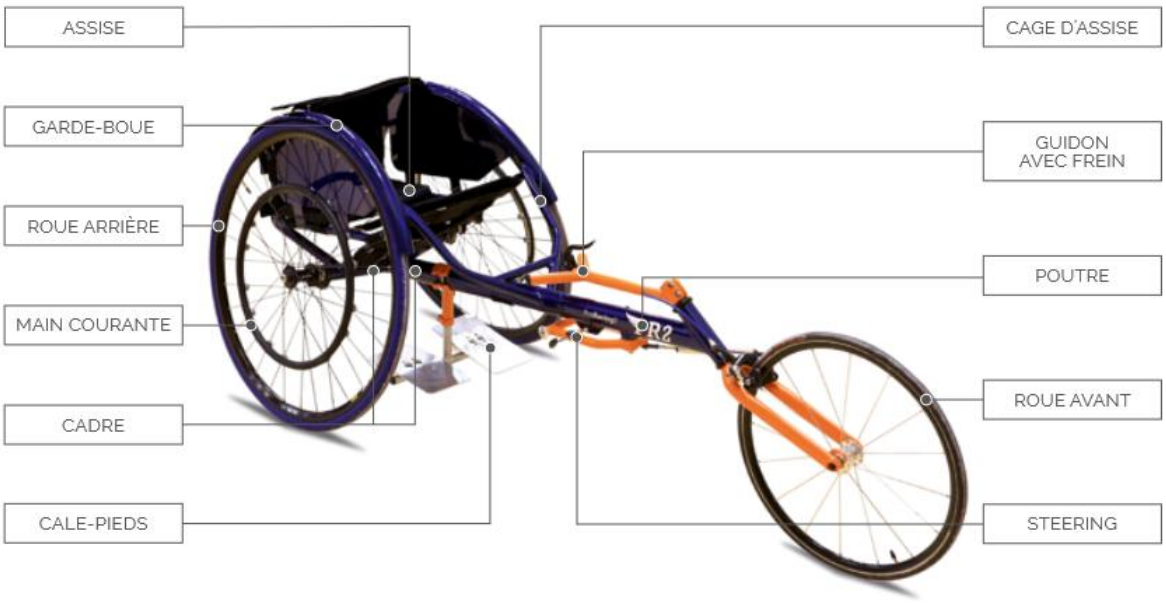


FIGURE 1.3 : DESCRIPTION DU FAUTEUIL ROULANT DE COMPETITION

Le châssis du fauteuil est principalement fabriqué en aluminium ou en carbone afin de réduire son poids. Il est conçu pour être aérodynamique, avec une assise basse et une position inclinée vers l'avant afin de réduire la résistance à l'air et optimiser la poussée. Le fauteuil dispose de deux roues à l'arrière, inclinées selon un angle de carrossage prédéfini lors de la conception du fauteuil. Cet angle correspondant à l'inclinaison des roues arrière par rapport à la verticale, est généralement compris entre 9° et 12° et n'est pas modifiable. Pour donner une forme allongée au fauteuil et améliorer la stabilité à haute vitesse, une roue plus petite de diamètre compris entre 20 et 22 pouces est installée à l'avant du fauteuil. Les boyaux utilisés sur les deux roues arrière proviennent du cyclisme professionnel, ils ne sont pas spécifiquement conçus, tant en termes de formes que de matières, pour les courses de para-athlétisme. L'entraînement de la roue est assurée par le boxage d'une main courante fixée sur

les roues arrière, et dont le diamètre varie d'un fauteuil à l'autre selon les capacités et la corpulence de l'athlète. Celle-ci est, elle aussi, généralement en aluminium. Elle est toujours recouverte d'un élastomère qui limite le glissement lors de la phase de propulsion.

b. Présentation du contact gant/main courante

Outre le fauteuil, les gants font également partie des équipements spécifiques à ce sport. Selon les athlètes, deux types différents sont utilisés : les gants « souples », ou les gants « durs », comme illustrés sur la figure 1.4. Les gants souples sont souvent préconisés pour les sprinters (en France, par Yasser Musanganya notamment), et permettent de fixer les 4 doigts longs sur la paume avec un scratch. La zone de contact se situe entre le pouce et l'index replié. Le deuxième type de gant est constituée d'une coque thermoformée qui épouse la main de l'athlète lorsqu'il vient boxer la main courante. Il est donc ajusté pour chaque athlète [1.4]. Dans les deux configurations, une plaque de caoutchouc est collée sur la zone de contact afin de réduire le glissement sur la main courante. La formulation de cette plaque de caoutchouc fournit les propriétés d'adhérence et de résistance à l'usure souhaitées.

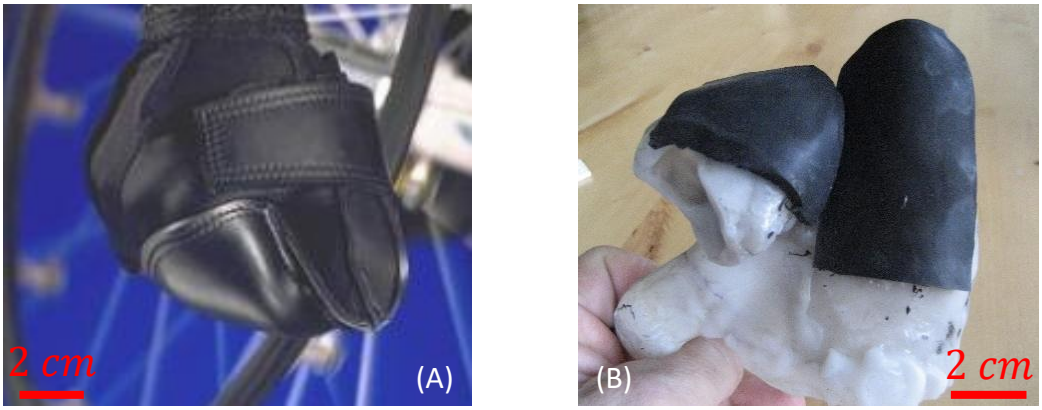


FIGURE 1.4 : GANTS DE PARA-ATHLETISME SOUPLE (A) ET DUR (B)

La phase de propulsion du fauteuil se réalise via une technique de poussée, également appelée boxage. Celle-ci dépend du type de gant que l'athlète utilise, mais aussi de son propre ressenti. Avec des gants souples, l'athlète a la possibilité de saisir la main courante entre son pouce et son index replié à l'intérieur du gant. En pratique, la préhension sur la main courante n'est possible que sur les deux ou trois premières poussées : par la suite, la vitesse de la roue devenant trop élevée, l'athlète n'a plus le temps de saisir la main courante et finit par la boxer directement [1.5]. L'athlète entraîne la main courante avec la rainure formée par son gant entre le pouce et ses doigts repliés sans venir attraper la main courante comme le montre l'illustration (a) de la figure 1.5. On observe généralement un mouvement du poignet à la fin de la poussée lorsque la main de l'athlète atteint la partie inférieure de la main courante.

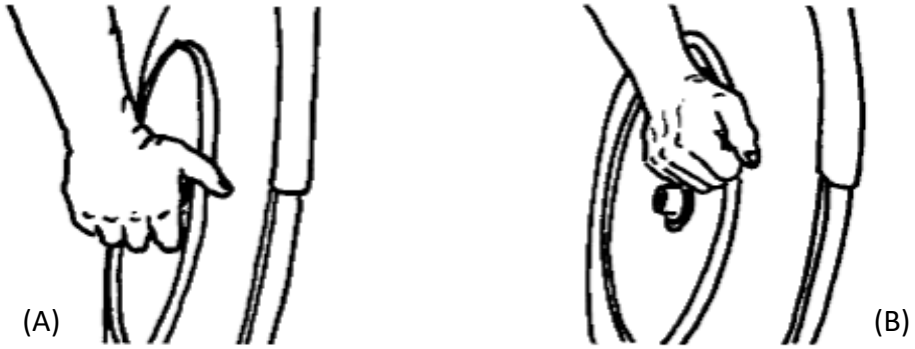


FIGURE 1.5 : REPRESENTATION SIMPLIFIEE DE LA GESTUELLE DE BOXAGE SANS LES GANTS AFIN DE MIEUX VISUALISER LA ZONE DE CONTACT AVEC DES GANTS SOUPLES (A), AVEC DES GANTS DURS (B)

Pour les gants durs, la préhension est strictement impossible. La surface de boxage située sur le gant est également légèrement différente, et correspond à la zone de contact établie avec le dos de l'index et du majeur comme le montre la représentation (B) de la figure 1.5. Puis de la même manière qu'avec un gant souple, le poignet tourne décalant le contact vers le pouce.

Une fois le départ effectué (la gestuelle de boxage différant sur les premières séquences), le mouvement de propulsion entre dans un régime établi. Il se décompose en deux parties : une phase de contact entre le gant et la main courante, durant approximativement 200 ms et à une vitesse avoisinant les 4-5 m/s, puis une phase de récupération où l'athlète ramène son bras vers le haut de la main courante. Cette phase dure environ 250 ms, pour un cycle total d'une demi-seconde [1.6].

Une analyse tribologique simplifiée de ce contact entre deux élastomères met en évidence une sollicitation cyclique et des impacts à fréquence élevée. L'objectif sera ainsi d'augmenter la transmission des efforts en réduisant le glissement au sein du contact sur des temps courts liés à la rapidité des cinématiques de contact et des cinétiques de chargement.

c. Présentation du contact entre le pneu et la piste d'athlétisme

Les pneus montés sur les fauteuils roulants sont des boyaux commerciaux. Un pneumatique classique est composé de cinq éléments principaux que nous retrouvons sur la figure 1.6 [1.7] :

- La carcasse, squelette du pneu, composée d'un assemblage de nappes de câbles en textiles enrobés de caoutchouc, et notamment d'une nappe de protection anti-crevaison.
- La bande de roulement constituée d'un mélange d'élastomères renforcés. Posée sur la carcasse, elle est en contact direct avec le sol.

- Les flancs vont également contribuer à l'adhérence et à la stabilité, notamment dans les virages. Ils auront également un rôle dans la rigidité globale de la structure.
- La chambre à air est le composant rempli d'air, permettant de maintenir la tension de la paroi du pneu pour que ce dernier puisse résister à la pression du poids du cycliste.
- Les talons, grâce à leurs tringles en acier, permettent de fixer la carcasse sur la jante de la roue. Ce dernier élément n'existe pas sur les pneumatiques de type boyau puisque ceux-ci sont directement collés sur la jante de la roue.

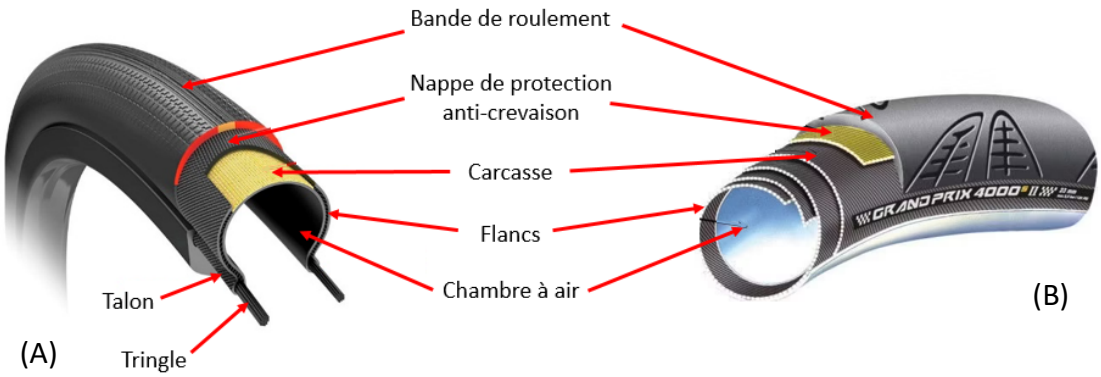


FIGURE 1.6 : STRUCTURE ET COMPOSITION D'UN PNEUMATIQUE CLASSIQUE (A) ET D'UN BOYAU (B)

La bande de roulement est un mélange caoutchouteux développé pour répondre au cahier des charges suivant : adhérer sur le sol, résister à l'abrasion, et limiter la résistance au roulement. Les flancs quant eux se déforment de manière cyclique pour maintenir une zone de contact suffisante et garantir la protection de la carcasse du pneu. Cependant, les pneus actuellement utilisés par les athlètes français sont conçus pour être montés sur un vélo, et rouler sur un sol rigide. La formulation de la bande de roulement n'est donc pas adaptée au contact avec une piste d'athlétisme souple. La position des flancs ne sont pas non plus adaptés au carrossage présent sur le fauteuil roulant.

Un autre facteur primordial dans la performance du boyau est sa pression de gonflage car elle influence directement la résistance au roulement, l'une des principales forces s'opposant à l'avancée du fauteuil. En effet plus la pression est faible, plus la surface de contact pneu/sol est importante et donc plus il y a de frottements et de résistance entre les deux.

Plusieurs études ont montré que, sous certaines conditions, la résistance au roulement ne décroît pas linéairement avec l'augmentation de la pression de gonflage, mais présente au contraire une évolution curvilinéaire, comme le montre la figure ci-dessous [1.8][1.9] :

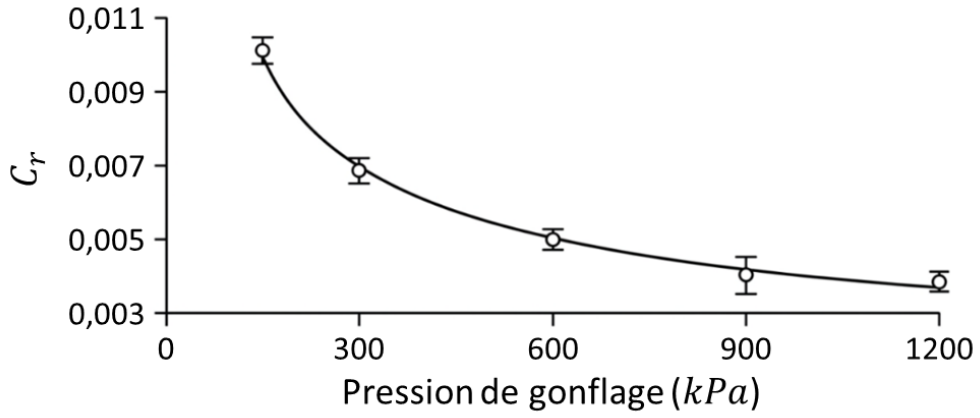


FIGURE 1.7 : EVOLUTION DU COEFFICIENT DE RESISTANCE AU ROULEMENT EN FONCTION DE LA PRESSION DU PNEU. L'ETUDE MONTRE QUE POUR UN CYCLISTE SUR UN SOL LISSE ET RIGIDE, LA RESISTANCE AU ROULEMENT DIMINUE LORSQUE LA PRESSION DE GONFLAGE AUGMENTE [1.8]

L'étude dont est issue la figure 1.7 s'appuie sur une méthodologie de décélération par inertie, reconnue pour sa très bonne reproductibilité ainsi que pour la sensibilité des mesures obtenues. Cette méthode sera décrite en détail au chapitre 4, où elle sera appliquée au cas spécifique des fauteuils roulants. Les essais ont été réalisés sur un cycliste masculin, entraîné, utilisant un vélo de route standard de 9,8 kg équipé de pneus tubulaires (Vittoria Corsa, 22 mm). Les mesures ont été menées en intérieur, sur un couloir de 60 m avec un sol carrelé, afin de s'affranchir des perturbations liées aux conditions météorologiques. C'est en se basant sur cette étude que les athlètes en fauteuil ont pris l'habitude de gonfler leurs boyaux entre 8 et 9 $bars$, afin de minimiser le coefficient de résistance au roulement. L'inconfort associé à ces hautes pressions est considéré comme secondaire, du fait de leurs durées relativement courtes en comparaison aux courses de cyclisme sur route. Par ailleurs, le risque de crevaison est plus faible sur une piste d'athlétisme que sur de l'asphalte.

Néanmoins, comme nous le verrons dans la suite de ce manuscrit, rouler sur une piste d'athlétisme diffère fondamentalement d'un roulement sur un sol rigide tel qu'un revêtement carrelé, ou même sur de l'asphalte. Il sera montré que l'évolution de la résistance au roulement en fonction de la pression de gonflage dépend fortement de la nature du sol. Par conséquent, les tendances observées sur des sols rigides ne sont pas nécessairement transposables au cas des pistes d'athlétisme.

Pour toutes les compétitions des World Athletics Series (dont les Championnats du Monde ou encore les Jeux Olympiques et Paralympiques), un contrat a été signé entre l'IAAF (International Association of Athletics Federations) et Mondo S.p.A., fabricant de sols sportifs. Ainsi, les courses en fauteuil roulant se sont déroulées au stade de France sur la piste baptisée Mondotrack EB. Il s'agit d'une évolution de la piste Mondotrack WS utilisée lors des Jeux Olympiques de Tokyo en 2021.

Les pistes d'athlétisme fabriquées par Mondo sont des matériaux multicouches résultant de la vulcanisation de deux couches en caoutchouc. La couche supérieure rugueuse est optimisée pour garantir les meilleures performances d'adhérence et de drainage lorsque l'athlète court.

Cela est possible grâce aux propriétés mécaniques du caoutchouc ainsi qu'à une texture brevetée, garantissant en plus de l'adhérence, de très bonnes propriétés de drainage de l'eau. La couche inférieure possède quant à elle une structure alvéolaire en forme d'hexagone allongé comme illustré sur la figure 1.8. L'objectif recherché de cette couche est de trouver l'optimum de performances en termes d'amortissement, de stockage et de retour d'énergie pour l'athlète [1.10]. Lors de l'impact entre le pied et la piste, les hexagones de la couche inférieure vont se comprimer pour absorber le choc, puis lorsque le pied quitte la piste, les cellules vont revenir à l'état initial et libérer l'énergie stockée lors de la compression pour aider l'athlète à se propulser plus loin et plus fort vers l'avant.

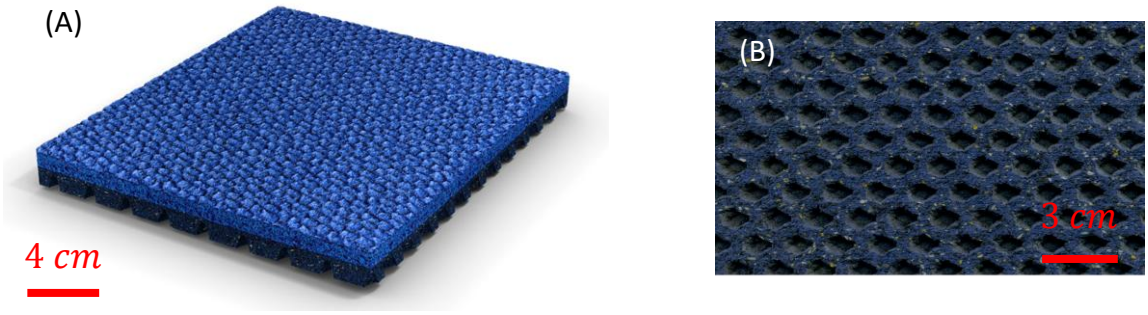


FIGURE 1.8 : PISTE WS DE L'ENTREPRISE MONDO (A) ET SA STRUCTURE INFERIEURE EN FORME D'HEXAGONES (B)

Au regard de ces informations, il apparaît que la piste est un produit réfléchi pour améliorer les performances des athlètes, mais uniquement celles des valides. Pour un fauteuil roulant, l'élasticité de la couche supérieure ou la structure géométrique de la couche inférieure pour l'absorption et la restitution d'énergie ne produisent pas forcément des aides à la performance. Toutefois, l'équité est respectée, tous les athlètes concourant sur la même piste pour une même compétition. En termes de vitesse moyenne, la course en fauteuil la plus rapide est le 800 m. Dans la catégorie T53, le record du monde est détenu par le canadien Brent Lakatos, en 1'31''91, soit une vitesse moyenne de 31,33 km/h. A titre de comparaison, le record du monde valide du 800 m est détenu par David Rudisha en 1'40''91. Sur des courses sprint, la mise en mouvement du fauteuil au départ fait baisser la vitesse moyenne, tandis que la fatigue liée à l'effort du sportif la diminue sur les courses plus longues.

Ce contact pneu/piste est donc réalisé entre deux élastomères dans des conditions de roulement-glissement avec une vitesse de roulement pouvant atteindre plusieurs m/s et un faible glissement relatif inférieur au pourcent de la vitesse du fauteuil. Cette cinématique sera détaillée dans le chapitre 3. Le carrossage est également susceptible de jouer un rôle dans la dissipation d'énergie par frottement. L'objectif ici sera de diminuer la dissipation au sein de ce contact, grâce à la compréhension des mécanismes élémentaires de friction dans ces conditions tribologiques caractéristiques de la course en fauteuil.

Les deux cas étudiés impliquant la mise en contact de deux élastomères, il est essentiel de bien comprendre les caractéristiques de ce type de matériau auxquelles est dédiée la partie suivante.

4. Les élastomères

a. Formulation et fabrication

Les élastomères sont des polymères présentant des propriétés mécaniques particulières, notamment une grande élasticité : ils sont ainsi capables de supporter des déformations allant jusqu'à 700%, sans subir de dégradation permanente. Cette famille de polymères est principalement obtenue par des réactions de polymérisation, de polycondensation ou de copolymérisation qui créent des liaisons covalentes entre les monomères engendrant des molécules de plus grande longueur [1.7]. Le polyisoprène obtenu par la polymérisation de milliers de monomères d'isoprène (d'une taille inférieure au nanomètre), atteint une longueur de l'ordre du micromètre.

Les propriétés de l'élastomère résultent de sa composition chimique : par exemple, la tenue mécanique varie si la matrice élastomérique est du caoutchouc naturel ou du styrène-butadiène. La longueur et la structure moléculaire des chaînes de polymères permettent d'obtenir les propriétés requises en termes de résilience, de comportement en flexion, de résistance à l'abrasion ou de résistance à la rupture. Ce matériau polymérique auquel sont ajoutés les charges de renfort, les plastifiants, les agents de protection et les agents de vulcanisation sert de matrice aux élastomères dits chargés.

Le processus de vulcanisation qui a pour but de constituer un réseau par des ponts chimiques entre les chaînes induit une augmentation de la rigidité du polymère non réticulé. Les températures de chauffe et le temps de cuisson pendant ce processus sont des facteurs importants pouvant modifier fortement le comportement mécanique du matériau final.

Les charges renforçantes sont des particules solides de taille nanométrique (allant de 20 à 200 nm pour les matériaux utilisés au cours de cette thèse) qui augmentent la rigidité du mélange. Dans les pneumatiques, elles sont principalement constituées de noir de carbone ou de silice. Le noir de carbone a été incorporé dans le mélange d'un pneu au début du XXème siècle, afin de décupler la résistance à l'usure du pneu. Les pneus chargés en silice sont plus récents dans l'industrie automobile et offrent un meilleur rendement en raison de leur plus faible résistance au roulement. L'introduction de cet élément de composition diminue également le coût final du matériau.

Les plastifiants sont utilisés afin de faciliter l'opération de malaxage des différents composants du matériau en augmentant la mobilité des chaines du polymère, et donc en diminuant la viscosité du mélange. Les agents de vulcanisation sont incorporés au mélange et créent les liaisons chimiques entre les différentes chaînes moléculaires lors de l'étape de cuisson en température. Cette étape de réticulation est nécessaire pour augmenter l'élasticité et réduire la plasticité du matériau.

Enfin, les agents de protection permettent d'éviter ou de limiter certains types de dégradations liées au temps, à la température, à l'exposition à l'ozone ou encore à la lumière. D'autres ingrédients peuvent également être rajoutés au mélange, comme par exemple, les résines tackifiantes qui améliorent l'adhérence de l'élastomère.

Les matériaux caoutchouteux finaux sont élaborés selon plusieurs procédés de mise en forme développés pour répondre aux demandes de l'industrie. Le moulage par compression est utilisé pour fabriquer des pièces ou des échantillons en petite série. Le principe consiste à injecter ou comprimer la matière dans un moule, en contrôlant la température, la pression appliquée et le temps passé dans le moule pour que le procédé de vulcanisation se réalise de manière optimale [1.11].

L'extrusion est, quant à elle, adaptée aux plus grandes séries. Une vis sans fin thermorégulée vient guider l'élastomère vers la filière qui donnera les dimensions géométriques du produit fini. Ensuite le matériau est passé dans un four pour activer sa vulcanisation. Le flux de matière entrant et le temps de vulcanisation sont contrôlés conduisant à une découpe adéquate de la matière en fin de chaîne de production. Ce mode de fabrication convient très bien pour la réalisation de formes telles que des profilés ou des bandes.

Le calandrage est un procédé destiné à la fabrication d'un pneumatique. Le caoutchouc est comprimé et étiré entre des rouleaux chauffés. A la suite de cette étape, une couche de caoutchouc d'épaisseur contrôlée est déposée sur la surface du textile et des câbles métalliques pour les tringles sont intégrés dans la structure du pneu afin de le renforcer.

b. Comportement mécanique des élastomères

Comme tous les polymères, les élastomères présentent une transition vitreuse caractérisée par une température critique au-dessous de laquelle ils sont dans un état vitreux avec une rigidité élevée et au-dessus de laquelle ils deviennent caoutchoutiques avec une rigidité faible. Ce changement d'état s'explique par l'augmentation de la mobilité des chaînes avec la température. La température de transition vitreuse des élastomères entrant dans la composition des matériaux étudiés dans ce travail, est bien inférieure à l'ambiante et à leur point de fonctionnement (aux alentours de -20 °C) : ils se trouveront donc dans leur état caoutchoutique.

L'élasticité des élastomères provient de leur structure moléculaire et en particulier de la contribution entropique liée aux conformations adoptées par les chaînes en fonction de l'allongement [1.7]. Lorsqu'une force est appliquée, ces chaînes se déroulent et s'étirent, limitant ainsi le nombre de leurs conformations. Par conséquent le travail de la force externe apporte l'énergie nécessaire pour empêcher les chaînes de revenir à leur état de pelote statistique initial.

Comme le montre la figure 1.9 (A), on observe, dans le cas des élastomères chargés une dépendance de la rigidité du matériau à la déformation appliquée. Aux faibles déformations, les interactions entre les chaînes polymériques et les particules renforçantes sont fortes, ce qui se traduit par une rigidité plus élevée. Le module d'élasticité, E_0 « à zéro déformation » définit alors le niveau du plateau caoutchoutique [1.7].

Le modèle entropique décrit précédemment permet d'en donner l'expression théorique suivante :

$$E_0 = nkT$$

avec n, le nombre de chaînes par unité de volume, k, la constante de Boltzmann, et T la température [1.7].

A mesure que la déformation augmente, ces interactions locales deviennent plus faibles, entraînant une décroissance de la rigidité du matériau. Celle-ci est associée à un maximum du module de perte visible sur la figure 1.9 (B) : ce phénomène est appelé l'effet Payne [1.12] et apparaît pour des déformations de l'ordre de quelques pourcents.

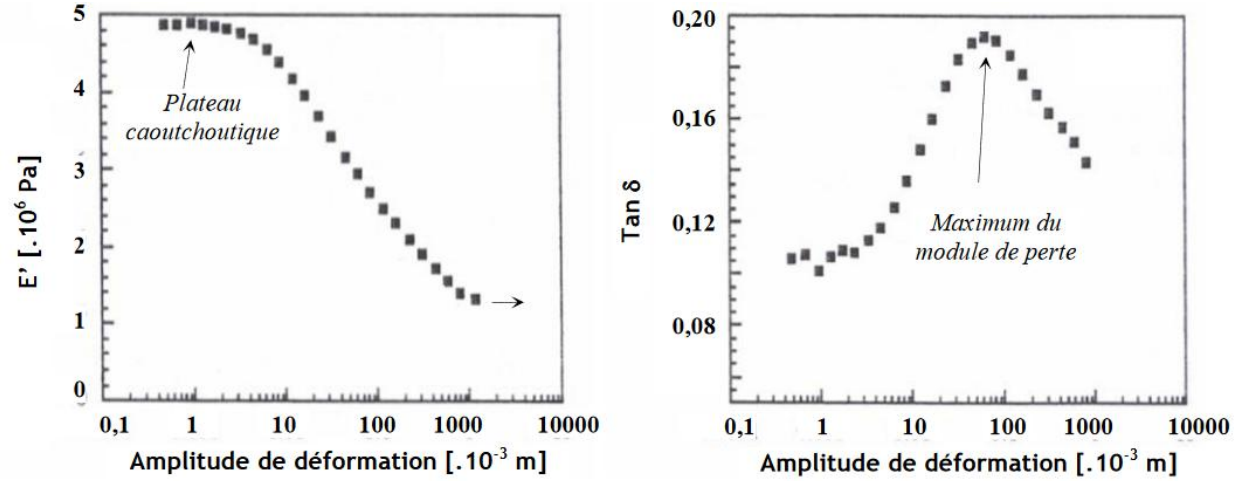


FIGURE 1.9 : ANALYSE DE L'EFFET PAYNE - EVOLUTION DE PROPRIETES MECANIQUES (A) MODULE ELASTIQUE E' ET (B) TAN δ EN FONCTION DE L'AMPLITUDE DE DEFORMATION [1.13]

L'effet Mullins est un autre phénomène caractéristique du comportement mécanique des caoutchoucs. Leonard Mullins remarque en 1969 que si plusieurs cycles de chargement/déchargement sont réalisés successivement, une dissipation, assimilée à de l'endommagement [1.14], est observée. Ainsi, les courbes contrainte-déformation mesurées lors des tractions consécutives ne se superposent pas, comme le montre la figure 1.10. La dissipation correspond à l'hystérèse entre les deux courbes. Il est possible de retrouver l'état initial du matériau en le chauffant puis en le laissant reposer.

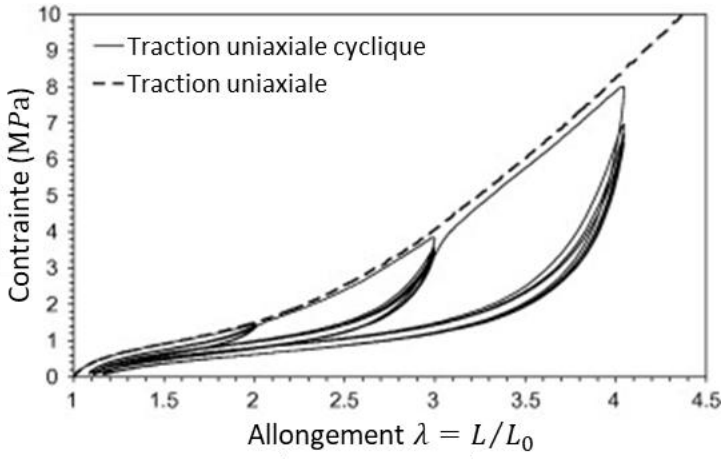


FIGURE 1.10 : ILLUSTRATION DE L'EFFET MULLINS. LES COURBES CONTRAINTE-DEFORMATION MESUREES LORS D'ESSAIS DE TRACTION CONSECUTIFS NE SE SUPERPOSENT PAS [1.15]

Un autre phénomène dissipatif est observé, notamment pour les élastomères chargés en noir de carbone [1.16], lorsque des agrégats de charge se forment et adhèrent à la matrice élastomère. L'élongation lors du chargement peut provoquer la rupture de ces structures et la décohésion de leurs interfaces avec la matrice caoutchoutique, générant une dissipation d'énergie dans le matériau.

Les élastomères sont par ailleurs des matériaux viscoélastiques dont les caractéristiques varient selon la fréquence de sollicitation et la température. Ainsi, lors d'essais de fluage (respectivement de relaxation), la matière s'accommode à la contrainte imposée (respectivement la déformation imposée), rendant ainsi les contributions élastiques et visqueuses de la réponse mécanique, dépendantes non seulement de la déformation et de la vitesse de déformation mais également du temps.

Dans l'étude du comportement mécanique des matériaux viscoélastiques, les modèles rhéologiques jouent un rôle central pour représenter de manière simplifiée mais fidèle les réponses observées expérimentalement. Parmi ces modèles, le modèle de Maxwell et le modèle de Kelvin constituent deux approches simples pour modéliser la dépendance temporelle de la contrainte ou de la déformation sous sollicitation mécanique [1.17].

Le modèle de Maxwell offre un premier modèle du comportement en relaxation de contrainte. Il est constitué d'un ressort (modélisant l'élasticité, E) et d'un amortisseur (modélisant la viscosité, η) associés en série (figure 1.11 (A)). Lors d'un essai de relaxation de contraintes, la contrainte résultante décroît alors exponentiellement avec le temps selon la loi :

$$\sigma(t) = \sigma_0 \times \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

avec $\sigma(t)$ la contrainte en fonction du temps et $\tau = \eta/E$ le temps de relaxation caractéristique du matériau.

Cette décroissance traduit la capacité du matériau à dissiper progressivement l'énergie mécanique stockée initialement. Toutefois, ce modèle ne conserve aucune contrainte

résiduelle à long terme, ce qui limite sa pertinence pour des matériaux solides qui conservent une certaine rigidité après relaxation.

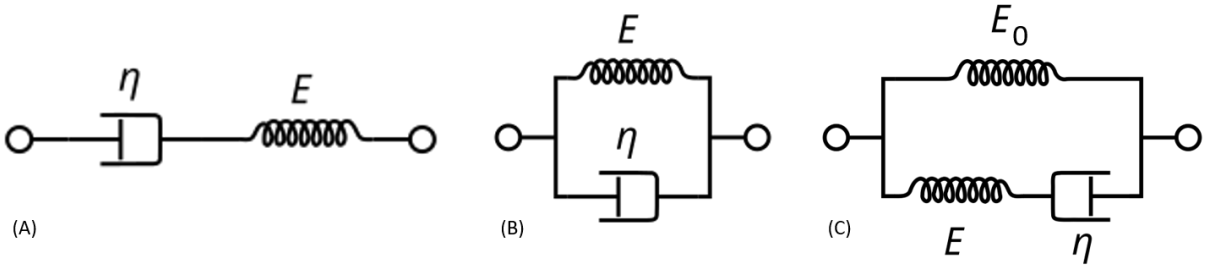


FIGURE 1.11 : PRESENTATION DES MODELES DE MAXWELL (A), DE KELVIN-VOIGT (B) ET DE ZENER (C)

Le modèle de Kelvin-Voigt, composé d'un ressort et d'un amortisseur associé cette fois-ci en parallèle (figure 1.11 (B)), est mieux adapté à la description du fluage. Lorsqu'une contrainte constante est appliquée, la déformation croît progressivement vers une valeur limite asymptotique selon la loi :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \times \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right]$$

Ce comportement est typique de matériaux qui présentent une résistance immédiate à la déformation (réponse élastique instantanée), suivie d'une évolution lente (comportement visqueux). Le modèle de Kelvin est donc utile pour représenter des matériaux qui ne s'écoulent pas indéfiniment, comme certaines mousses polymériques ou matériaux organiques semi-solides [1.17]. Néanmoins, ce modèle ne permet pas de simuler la relaxation de contrainte, car il prédit une contrainte infinie lors de l'application d'un échelon de déformation.

Afin de représenter simultanément les comportements de fluage et de relaxation de manière plus réaliste, le modèle de Zener combine un ressort (de raideur E_0) en parallèle avec une branche de Maxwell (de raideur E et de viscosité η) [1.17]. En fluage, le matériau présente une déformation initiale rapide suivie d'une croissance asymptotique, décrite par :

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left\{\frac{1}{E + E_0} + \frac{1}{E_0}\left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right)\right]\right\}$$

avec $\tau_0 = \eta/(E + E_0)$, tandis qu'en relaxation, la contrainte décroît vers une valeur résiduelle non nulle selon :

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left[E_0 + E \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right]$$

Ainsi, le modèle de Zener rend compte à la fois de la dissipation d'énergie (comportement visqueux) et de la restauration partielle de l'énergie élastique, ce qui le rend plus pertinent pour la modélisation des matériaux polymères.

Ces modèles rhéologiques considèrent que les modules d'élasticité liés aux éléments de type « ressort » sont indépendants de la déformation. Or les élastomères sont des matériaux non-linéaires. Un des modèles les plus couramment utilisés pour représenter cette caractéristique

est celui de Mooney-Rivlin pour les matériaux hyperélastiques. Ce modèle sera présenté en détail dans le chapitre 3.

Enfin, on observe pour les élastomères comme pour les autres familles de polymères des effets similaires de la température et de la fréquence de sollicitation sur les composantes élastiques et visqueuses de leur réponse : ainsi, solliciter un élastomère à haute fréquence équivaut à le solliciter à une température plus basse. William, Landel et Ferry (WLF) ont introduit et modélisé le principe de l'équivalence temps-température [1.18]. Celui-ci permet de prédire le comportement de l'élastomère en fonction de la fréquence à une température de référence T_0 simplement à partir d'une série d'essais effectuée à différentes températures sur un intervalle de fréquence restreint.

La suite du chapitre est consacrée à un bref état de l'art rappelant les principales caractéristiques des contacts statique et glissant entre un élastomère et un solide. Nous qualifierons improprement ce solide, de « rigide », non pas parce qu'il présente un module d'élasticité infiniment grand mais parce que ce dernier est supérieur de plusieurs ordres de grandeur à celui de l'élastomère.

5. Le contact statique entre un élastomère et une surface rigide

a. Modèles de mécanique du contact sur une surface lisse et rugueuse

L'un des objectifs des théories de la mécanique du contact entre deux solides est l'estimation de la forme et de la taille de leur surface d'interaction. Le premier modèle permettant de comprendre les mécanismes physiques à l'interface entre deux solides en contact statique seulement soumis à une charge normale a été développé par Hertz [1.19]. Elle se restreint à des contacts non-adhésifs entre surfaces lisses et simplement soumises à des déformations élastiques. Elle se place dans le cadre de la mécanique des milieux continus, isotropes et homogènes, c'est-à-dire ayant des propriétés indépendantes de la direction de sollicitation et identiques partout dans le volume du matériau.

Cette théorie repose sur la loi de Hooke et sur les travaux de Boussinesq concernant le déplacement des points de la surface d'un massif élastique semi-infini soumis à une force normale concentrée. A titre d'illustration, nous considérons un contact circulaire de diamètre $2a$ entre deux sphères de rayon R_1 et R_2 , Hertz suppose que, (voir figure 1.12), dans cette géométrie axisymétrique, la distribution de pression est semi-circulaire et donnée par :

$$p(r) = p_{max}\sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}}$$

où r représente la distance d'un point quelconque du contact ($r \leq a$) au centre du contact.

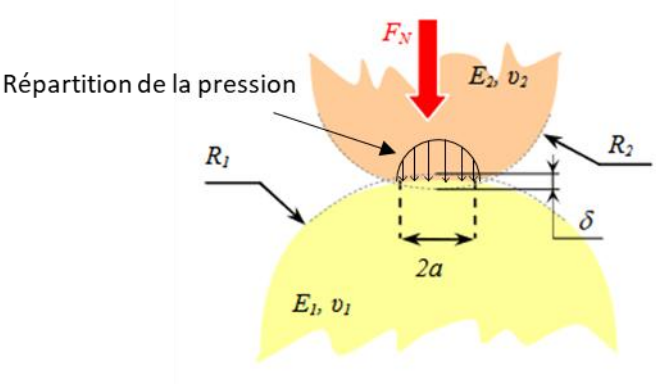


FIGURE 1.12 : CONTACT ENTRE DEUX SPHERES LISSES, THEORIE DE HERTZ [1.19].

Il obtient ainsi l'expression du rayon de contact, a , de l'écrasement maximal δ au centre du contact et de la déformation élastique en fonction des propriétés élastiques des matériaux, de leurs géométries et force normale, F_N . Pour un contact entre deux sphères, nous utiliserons les grandeurs R^* et E^*, caractérisant respectivement le rayon de courbure réduit et le module de Young réduit défini comme suit :

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\upsilon_1^2}{E_1} + \frac{1-\upsilon_2^2}{E_2}$$

ce qui donne pour l'enfoncement :

$$\delta \approx \frac{a}{R^*}$$

et pour le rayon de contact :

$$a = \left[\frac{3.F_N.R^*}{4.E^*}\right]^{1/3}$$

Les contacts impliquant les élastomères sont adhésifs et ne peuvent, par conséquent, qu'être partiellement modélisés par la théorie de Hertz. Ce n'est qu'au début des années 1970 que les interactions à l'échelle moléculaire, responsables de l'adhésion, sont intégrées dans les théories de mécanique du contact. L'une des premières approches est due à Bradley [1.20] qui montre que la force nécessaire pour séparer les deux solides indéformables est égale à $2.\pi.\omega.R^*$ avec ω le travail d'adhésion par unité de surface de Dupré.

Plus tard, P. Kendall en collaboration avec R. Johnson et W. Roberts développent une théorie qui reprend les travaux de H. Hertz, en y incluant les phénomènes adhésifs [1.21]. Ce modèle s'applique à des solides présentant une grande élasticité et une adhésion importante. C'est pourquoi il est bien adapté aux contacts impliquant des élastomères.

Tout comme la théorie de Hertz, cette approche n'est valide que pour des surfaces lisses, pour des déformations élastiques et en l'absence de frottement à l'interface. Comme illustré à

la figure 1.13, la répartition de pression est identique à celle prédite par la théorie de Hertz au sein du contact, mais une contrainte de traction supplémentaire apparaît aux bords du contact en raison de forces adhésives supposées être localisées sur la périphérie du contact.

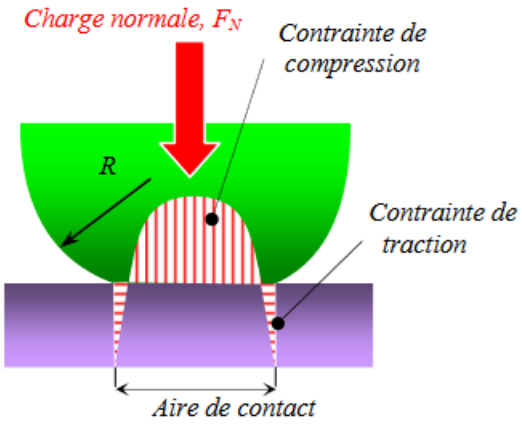


FIGURE 1.13 : CONTACT ENTRE DEUX SOLIDES ELASTIQUES ADHESIFS, THEORIE DE JKR [1.22].

Il en résulte une nouvelle équation permettant de calculer le rayon de contact :

$$a = \left[\frac{3R^*}{4E^*}\left(F_N + 2F_0 + 2\sqrt{F_0(F_N + F_0)}\right)\right]^{1/3}$$

Avec $F_0 = \frac{3}{2}.\pi.\omega.R^*$, ω étant l'énergie de Dupré (J/m^2), il s'agit de l'énergie gagnée par unité de surface lors de la séparation de deux surfaces en contact.

Ainsi, en connaissant le module de Young des deux solides en contact, leurs géométries, la force normale appliquée, et en mesurant le rayon de contact, l'énergie d'adhésion peut être déterminée dans le cadre des hypothèses du modèle JKR.

La théorie DMT, pour Derjaguin, Muller et Toporov, reprend l'approche de JKR, en intégrant les interactions à longue portée [1.23]. La force d'arrachement est alors égale à $F_0 = 2.\pi.\omega.R^*$ en reprenant les notations précédentes.

Tous ces modèles présentés précédemment font l'hypothèse de surfaces lisses. Pour un contact avec un solide rugueux non-adhésif, les travaux pionniers de Greenwood et Williamson complètent ceux de Hertz en 1966 [1.24]. Ils utilisent les hypothèses suivantes : les sommets des aspérités sont de forme sphérique et l'écrasement de chaque microcontact entre aspérités est régi par loi de Hertz. La hauteur des aspérités est une variable aléatoire de densité de probabilité $\Phi(z)$ pour une répartition gaussienne ou exponentielle.

Ainsi, le nombre de sommets en contact est :

$$n = N\int_d^\infty \Phi(z_s)dz_s$$

Avec N le nombre de sommets par unité de surface.

Le rayon de contact de chaque microcontact de Hertz s'écrivant $a = [(z_s - \delta).\beta]^{1/2}$ avec δ le déplacement lors de l'écrasement, et β le rayon de courbure moyen au sommet de chaque aspérité, on en déduit l'aire réelle :

$$A_{reelle} = n.\pi.a^2 = N.\pi.\beta \int_d^{\infty} (z_s - \delta).\Phi(z_s)dz_s$$

Suite aux travaux de Persson et al. [1.25][1.26], ce modèle a été modifié en intégrant des distributions de rugosité différentes. Ce modèle prédit que la taille moyenne d'un spot de contact est une constante topographie et que l'aire réelle de contact est proportionnelle à la charge normale appliquée.

b. Contact glissant entre un élastomère et une surface rigide

Les premiers travaux sur les mécanismes de frottement furent présentés par Léonard de Vinci, lors d'une expérience montrant l'existence d'une force nécessaire pour mettre en mouvement un objet sur un plan incliné. A partir de ces premières expériences, De Vinci a conclu à l'existence d'un coefficient de frottement universel de 0,25. Ces travaux repris par Guillaume Amontons deux siècles plus tard puis par Coulomb, ont permis d'approfondir l'origine physique du frottement en intégrant les interactions mécaniques entre les aspérités. Il en résulte les lois de frottement dites de Amontons-Coulomb :

- La force de frottement est proportionnelle à la charge normale, le coefficient de frottement, défini comme le ratio de la force de frottement sur la force normale, est donc indépendant de la charge.
- Pour une charge donnée, la force de frottement est indépendante de l'étendue et ne dépend que de la nature des surfaces en contact

Par la suite, Charles Coulomb mène de plus amples études expérimentales et complète ces observations avec une troisième loi :

- Le coefficient de frottement est indépendant de la vitesse de glissement

Dans les années 1950, un nouveau modèle, développé par Bowden et Tabor, permet d'expliquer partiellement le lien entre le frottement et l'adhérence de deux surfaces en contact [1.27]. La force de frottement se décompose en deux contributions : une force d'adhésion et une force de déformation comme le montre la figure 1.14.

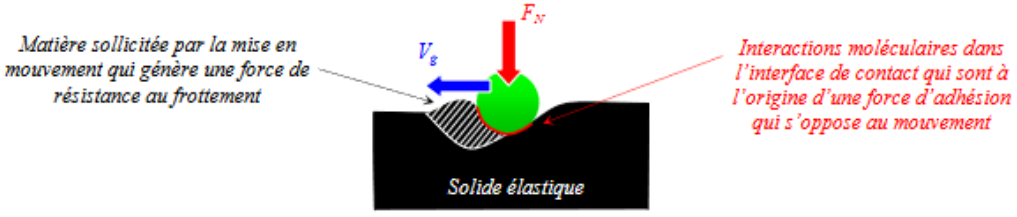


FIGURE 1.14 : ILLUSTRATION ADAPTEE [1.22] DU MODELE DE BOWDEN & TABOR

La composante adhésive est attribuée aux interactions moléculaires à courte distance dans la zone interfaciale induisant une contrainte de cisaillement interfaciale. La rugosité des surfaces joue alors un rôle important, en réduisant l'aire réelle de contact et par conséquent cette composante adhésive. La force de déformation quant à elle, est associée au comportement mécanique des surfaces et à la déformation élastique des solides.

Les élastomères chargés ou non, présentant des propriétés adhésives et mécaniques spécifiques comme nous l'avons expliqué dans les paragraphes 4 et 5.a, n'obéissent pas aux lois classiques de la tribologie telles que celles de Coulomb. Cela est, en partie dû, au couplage fort et complexe de la contribution adhésive interfaciale et de la contribution viscoélastique volumique à la dissipation par frottement.

A titre d'illustration, la figure 1.15 présente l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement pour un contact caoutchouc/verre issue des travaux de Barquins et Roberts [1.28] : la dépendance du coefficient de frottement à la vitesse de glissement pour une force normale constante est en désaccord avec les prédictions et les travaux de Coulomb.

Cette figure montre également que lorsque la charge normale augmente, le coefficient de frottement diminue, ce qui est également contradictoire avec la première loi de Coulomb.

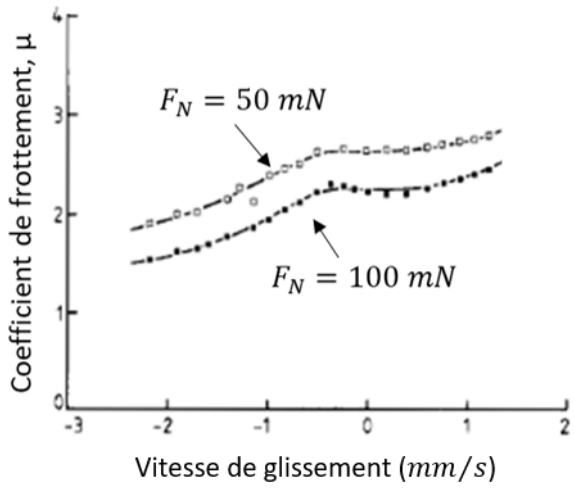


FIGURE 1.15 : TRAVAUX DE BARQUINS ET ROBERTS MONTRANT L'AUGMENTATION DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT D'UN CONTACT CAOUTCHOUC/VERRE EN FONCTION DE LA VITESSE DE GLISSEMENT (ADAPTE DE [1.7])

Ce travail fait écho à celui de Schallamach en 1958, qui montre que la force de frottement diminue à température croissante, en raison de l'abaissement de la dissipation visqueuse, et augmente avec la vitesse [1.29]. Un autre phénomène inhérent aux caoutchoucs est également observé par Schallamach en 1971 [1.30] : lors du frottement d'un caoutchouc sur du PMMA à très faible vitesse et sous très faible chargement, des perturbations locales, induisant un glissement non homogène du contact, apparaissent au sein de la zone de contact comme illustré sur la figure 1.16. Des ondes, perpendiculaires au sens du glissement (déplacement du frotteur de gauche à droite, sur la figure 1.16) sont visibles à l'interface et se propagent dans le sens opposé à celui du déplacement du frotteur. Ce phénomène de

propagation n'est pas purement du glissement mais plutôt une succession de décollement-recollement de plis à l'interface caoutchouc/PMMA.

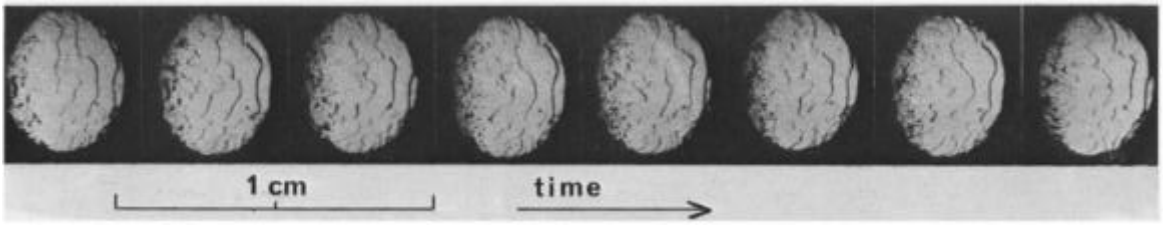


FIGURE 1.16 : ILLUSTRATION DES ONDES DE SCHALLAMACH, PERPENDICULAIRES AU SENS DU GLISSEMENT, LE FROTTEUR SE DEPLAÇANT DE GAUCHE A DROITE [1.30]

6. La stratégie de recherche

Afin de contribuer à l'optimisation des performances des para-athlètes, ce travail de recherche s'attache à répondre à deux questions principales :

- Comment augmenter transitoirement l'accroche entre le gant et la main courante pour des contacts rapides ?
- Comment augmenter le rendement des boyaux en diminuant le frottement avec la piste d'athlétisme pour des conditions cinématiques étendues, en régime stationnaire ?

Bien que ces deux objectifs soient en apparence antinomiques, la stratégie adoptée sera néanmoins identique pour ces deux axes de recherche. Avec l'aide de notre partenaire industriel Hutchinson, fournisseur d'élastomère pour fabriquer des revêtements de gants et des boyaux adaptés aux besoins des para-athlètes olympiques français, la démarche s'appuie d'une part sur une simulation expérimentale en laboratoire des conditions cinématiques contrôlées et représentatives du contact tribologique considéré (soit gant/main courante, soit pneu/piste d'athlétisme) et d'autre part, sur la mise en place, de mesures spécifiques (efforts d'impact dans la phase de boxage, vitesse, accélération) effectués lors de séances d'entraînement afin de « quantifier » le ressenti des sportifs.

Concernant le contact entre le gant et la main courante, l'objectif est d'améliorer la transmission de l'effort de boxage tout en maintenant une résistance à l'usure acceptable pour le sportif, nous focaliserons nos investigations sur la formulation de l'élastomère. Cette partie sera détaillée dans le chapitre 2 et reposera sur les travaux de Marcou et al. [1.31], qui ont analysé le contact entre le gant et la main courante. Dans ce travail, l'idée étant d'imiter le contact réel, différents matériaux, dont du silicone, du polyuréthane et du caoutchouc naturel, frottent sur un disque en rotation recouvert de l'élastomère actuellement utilisé pour recouvrir la main courante. La figure 1.17 montre ainsi que le coefficient de frottement présente une forte variabilité en fonction de la nature du matériau élastomérique.

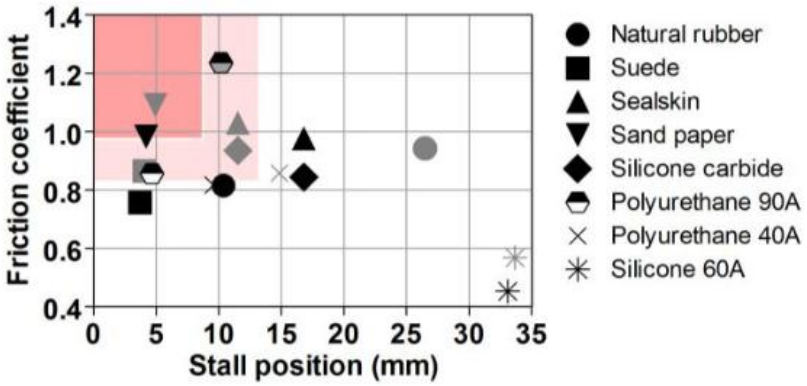


FIGURE 1.17 : COEFFICIENT DE FROTTEMENT DE DIFFERENTS MATERIAUX APRES FROTTEMENT SUR UN DISQUE RECOUVERT DE CAOUTCHOUC SOUMIS A UNE CHARGE DE 200 N. POUR UN MEME MATERIAU, LES COULEURS GRISES SONT ASSOCIEES A UN CONTACT UN CONTACT SEC ET LES POINTS NOIR A UN CONTACT MOUILLE [1.31]

Concernant le contact entre le pneu et le sol, les matériaux pneu et piste seront caractérisés indépendamment, avant d'être associés. Leurs caractérisations topographiques, mécaniques et tribologiques permettront une meilleure compréhension des mécanismes de frottement mis en jeu, ce qui fait l'objet du chapitre 3. Le challenge réside ici dans le fait que les propriétés tribologiques des élastomères chargés sont optimisées pour des contacts avec des surfaces rigides et non pour des contacts avec un autre élastomère, comme c'est le cas dans les courses en fauteuil.

Enfin, le chapitre 4 présentera la mise en place des mesures physiques sur fauteuil roulant et l'analyse associée. Ces essais permettront, en situation d'entraînement, une optimisation des performances sportives en minimisant la résistance au roulement. Les mesures acquises *in operando* auprès des athlètes leur permettront également d'améliorer leurs gestuelles, après concertation avec les entraineurs.

7. Bibliographie :

[1.1] G. Clanet, « Pour les JO de 2024, sportifs et scientifiques font équipe », paru en ligne sur « Le journal du CNRS », 17/06/2019.

[1.2] International Paralympic Committee, « Results – Men's 800 m T53 », paru en ligne sur « paralympic.org/rio-2016 », 16/09/2016.

[1.3] S. Robert, « Athlétisme : le fauteuil et ses réglages », Collection Les cahiers des experts, 2019.

[1.4] I. Rice, J. Dysterheft, A. Bleakney et R.A. Cooper, « The influence of glove type on simulated wheelchair racing propulsion : a pilot study », International Journal of Sports Medicine, 37, 2016.

[1.5] Y. Vanlandewijck, D. Theisen et D. Daly, « Wheelchair propulsion biomechanics : Implications for wheelchair sports », Sports medicine, 31, pp 339-367, 2001.

[1.6] A.D. Moos, N.E. Fowler et V.L. Goosey-Tolfrey ,« The intra-push velocity profile of the over-ground racing wheelchair sprint start », Journal of Biomechanics, 38, pp 15-22, 2005.

[1.7] G. Petitet et M. Barquins, « Matériaux caoutchouteux », Presses polytechniques et universitaires romandes, pp 55-56, 84, 417-418, 2008.

[1.8] F. Grappe, R. Candau, B. Barbier, M.D. Hoffman, A. Belli et J.D. Rouillon, « Influence of tyre pressure and vertical load on coefficient of rolling resistance and simulated cycling performance. », Ergonomics, 42, pp 1361-1671, 1999.

[1.9] R. Candau, F. Grappe, M. Ménard, B. Barbier, G. Millet, M.D. Hoffman, A. Belli et J.D. Rouillon, « Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling », Medicine and science in sports and exercise, 31, 1999.

[1.10] L. Andena, S. Aleo, F. Caimmi, S. Mariani, F. Briatico-Vangosa et A. Pavan, « A 3D numerical model for the optimization of running track performance », Procedia Engineering, 147, pp 854-859, 2016.

[1.11] Y. De Zélicourt, « Caoutchoucs: méthodes d'obtention et propriétés », Mise en œuvre et fabrication des pièces en caoutchouc, Techniques de l'ingénieur, article en ligne AM7705, 2020.

[1.12] A.R. Payne, « The dynamical properties of carbon black-loaded natural rubber vulcanizates », Journal of Applied Polymer Science, 6, pp 57-63, 1962.

[1.13] S. Marceau, « Architecture multi échelle et propriétés mécaniques de nanocomposites », Thèse, Université de Savoie, 2003.

[1.14] L. Mullins, « Softening of rubber by deformation », Rubber Chemistry and Technology, 42, pp 339-362, 1969.

[1.15] J. Diani, B. Fayolle, P. Gilormini, "A review on the Mullins effect", European Polymer Journal, 45 (3), pp 601-612, 2009.

[1.16] E.M. Dannenberg, « The effects of surface chemical interactions on the properties of filler-reinforced rubbers », Rubber Chemical Technology, 48, pp 410-444, 1975.

[1.17] D. Mazuyer, « Introduction à la viscoélasticité linéaire », Cours Matériaux: Propriétés mécaniques, Structure, Ecole Centrale de Lyon, 2023.

[1.18] M. L. Williams, R. F. Landel et J. F. Ferry, "The temperature dependance of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids", J. Am. Chem. Soc., 77, pp 3701-3707, 1955.

[1.19] V.H.H. Hertz, « Über die Berührung fester elastischer Körper », Journal für die reine und angewandte Mathematik, 92, pp 156-171, 1881.

[1.20] Bradley, « The cohesive force between solid surfaces and the surface energy of solids », The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 13, pp 853–862, 1932.

[1.21] K.L. Johnson, K. Kendal et A.D. Roberts, « Surface energy and the contact of elastic solids », Proc. R. Soc. Lond. A Math. Phys. Sci., 324, pp301–313, 1971.

[1.22] F. Deleau, « Comportement tribologique et vibroacoustique d'un contact élastomère/verre », Thèse ECL 2009-03, Ecole Centrale de Lyon, 2009.

[1.23] B.V. Derjaguin, V.M. Muller et Yu.P. Toporov, « Effect of contact deformations on the adhesion of particles », Journal of Colloid and Interface Science, 53, pp 314-326, 1975.

[1.24] J.A. Greenwood et J.B.P Williamson, « Contact of nominally flat surfaces », Proc. R. Soc. Lond., A295, pp 300-318, 1966.

[1.25] A.W. Bush, R.D. Gibson, T.R. Thomas, "The elastic contact of a rough surface", Wear, 35 (1), pp 87-111, 1975.

[1.26] B.N.J. Persson, « Contact mechanics for randomly rough surfaces », Surface Science Reports, 61, pp 201-227, 2006.

[1.27] F.P. Bowden et D. Tabor, « Friction et Lubrification », Traduit par Fric C., Editions Dunod, 1959.

[1.28] M. Barquins et A.D. Roberts, « Rubber friction variation with rate and temperature some new observations », Journal of Physic, D: Applied Physics, pp 547-563, 1985.

[1.29] A. Schallamach, « Friction and abrasion of rubber », Wear, 1, pp 384-419, 1958.

[1.30] A. Schallamach, « How does rubber slide ? », Wear, 17, pp 301-312, 1971.

[1.31] F. Marcou, G. Masson, F. Martel, D. Rancourt, C. Smeesters, F. Berrigan, J. Laroche et E. Langelier, « Enhancing friction between gloves and pushrims for wheelchair racing », Conference: 2013 Meeting of the American Society of Biomechanics, 2013.

Chapitre II : Analyse tribologique du contact gant/main courante

1. Introduction

Suite aux discussions menées avec les membres de la Fédération Handisport, le contact entre le gant et la main courante apparaît comme un axe-clé d'amélioration de la performance, en particulier concernant la transmission de l'effort. Le levier identifié est le contrôle de l'adhérence du gant sur la main courante. Afin d'analyser ce contact, les caractéristiques du mouvement de boxage de la main courante ont été retranscrites en laboratoire. Ces essais de simulation expérimentale du boxage ont été réalisés avec des échantillons, fournis par Hutchinson, de formulation variée, et ont permis d'identifier les caractéristiques tribologiques, en termes de frottement et de tenue à l'usure des différentes formulations. Enfin, ces résultats obtenus à l'échelle du laboratoire sont confrontés aux retours des athlètes sur piste. Cette démarche basée sur un dialogue entre les échelles du laboratoire et du terrain a permis en particulier d'identifier les leviers d'optimisation de formulation.

2. Simulation expérimentale du contact gant/main courante en laboratoire

a. Les caractéristiques du boxage de la main courante

La gestuelle pour propulser et entraîner à vitesse constante le fauteuil roulant de compétition est un mouvement très précis. Lors du départ, une fois les premières poussées effectuées, le fauteuil atteint très rapidement une vitesse moyenne de 30 km/h, voire au-delà pour les courses rapides de type sprint, ce qui correspond à une vitesse de rotation de la roue de 80 tr/min. Cette gestuelle a été divisée en plusieurs phases dans le cadre des travaux de Valandewijck et al. [2.1].

Ainsi, l'athlète commence par optimiser sa recherche de vitesse au niveau des bras en prenant de l'élan (figure 2.1, phase 1). Ses bras sont alors derrière lui, avant d'être amenés jusqu'à l'impact avec la main courante, aux alentours d'un angle de 70° (figure 2.1, phase 2). L'enjeu de cette deuxième phase dite d'impact est d'éviter le rebond sur la main courante afin de ne pas perdre l'énergie cinétique fournie lors de la phase précédente. Cette phase est traumatisante pour les articulations de l'athlète. L'épaisseur des plaques de caoutchouc, collées sur les gants, va influer sur l'absorption du choc, permettant de diminuer le traumatisme au niveau du poignet de l'athlète. Ensuite vient la phase principale de poussée pendant laquelle l'athlète accompagne la main courante en lui transmettant de la vitesse (figure 2.1, phase 2.3). Pour cela, le gant ne doit pas glisser sur la main courante afin de transmettre une

force tangentielle maximale entraînant la main courante. L'athlète accompagne cette dernière jusqu'à l'extension complète de son coude, et finit son mouvement par une phase de rotation (figure 2.1, phase 4). Lors de cette phase, l'athlète vient donner une rotation au niveau de son poignet afin de ne pas freiner la main courante au moment de s'en désolidariser.

Enfin, la phase de retour permet à l'athlète de remonter ses bras, avant de repartir sur le cycle de propulsion suivant (figure 2.1, phase 5).

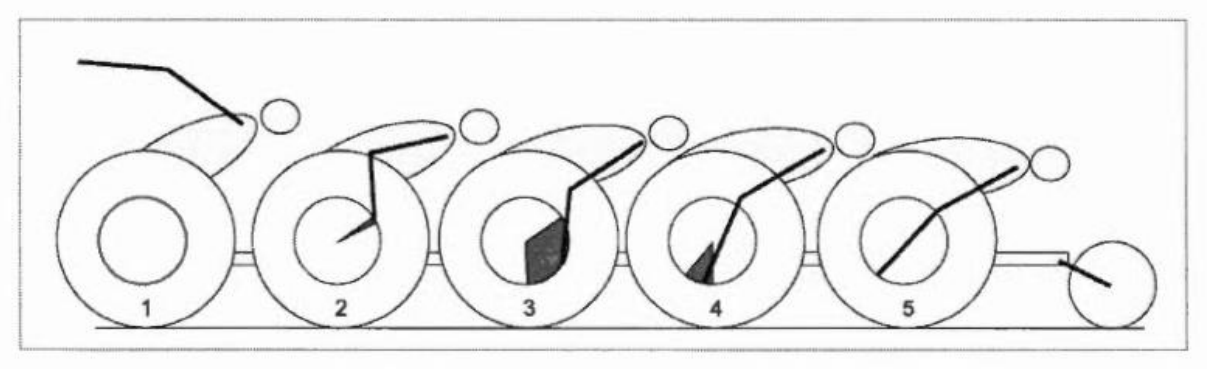


FIGURE 2.1 : ILLUSTRATION D'UN CYCLE DE PROPULSION : L'ATHLETE ENGRANGE DE LA VITESSE AU NIVEAU DES BRAS (1), PUIS LE CONTACT SE CREE PAR UN IMPACT ENTRE LE GANT ET LA MAIN COURANTE (2), AVANT QUE L'ATHLETE PASSE DANS UNE PHASE D'ENTRAINEMENT DE LA MAIN COURANTE (3). IL VIENT ENSUITE FINIR SON MOUVEMENT PAR UNE ROTATION DU POIGNET (4) AVANT DE RELACHER LA MAIN COURANTE (5) [2.1]

Pour résumer, plusieurs sollicitations interviennent lors de cette gestuelle : on observe tout d'abord l'impact, avec des efforts de contact pouvant aller jusqu'à 300 N, répartis sur une surface de contact du gant de l'ordre d'une vingtaine de centimètres carrés. Cela correspond à une pression de contact d'environ 0,15 MPa. Puis l'élastomère recouvrant le gant est sollicité en cisaillement, la main de l'athlète cherchant à emmener la roue avec elle lors d'une phase durant 0,25 s. Enfin vient une sollicitation en torsion qui termine le mouvement. Cette dernière sollicitation étant négligeable dans le cycle de poussée global, nous avons choisi de la négliger. Rappelons également que toutes ces sollicitations sont cycliques, l'athlète réalisant ce cycle de propulsion plus d'une fois par seconde.

b. Reproduction du contact en laboratoire

Pour tenter de reproduire ce contact, nous avons utilisé le tribomètre rotatif LORRY. Le contact est réalisé entre un disque en granite poli et l'échantillon d'élastomère, collé sur support et relié à un bras mécanique, comme le montre la figure 2.2.

Le disque en granite (granite bleu de Guéret) a été utilisé pour sa capacité à garder une rugosité constante tout au long des essais [2.2]. Celle-ci est mesurée et caractérisée par une valeur moyenne arithmétique $R_a = 0{,}95 \pm 0{,}33\ \mu m$ [2.3]. Il est mis en rotation par un servomoteur brushless pouvant aller jusqu'à 6000 tours par minute. Le contact est réalisé à un rayon de 10,25 cm du centre du disque. L'échantillon est lui mis en mouvement par un actionneur piézoélectrique (P-602.8SL de l'entreprise PI) sur l'axe $\vec{z}$ (voir figure 2.2),

permettant d'appliquer une force normale maximale de 400 N. Cet actionneur possède une plage de débattement de $\pm 0.5\ mm$ sur l'axe $\vec{z}$. Il permet de contrôler la durée de la mise en contact, la fréquence de ce contact et la force normale appliquée. Celle-ci est pilotée par une boucle de contrôle afin d'obtenir une force normale stable tout au long de l'essai avec une tolérance inférieure à 5% de la valeur ciblée. La mesure est réalisée grâce à un capteur de force triaxial (Kistler), positionné au plus proche de l'échantillon testé, entre celui-ci et l'actionneur piézoélectrique. Ce capteur permet de mesurer des forces maximales de $\pm\ 1\ kN$ pour les forces tangentielles F_x et F_y, et de $\pm\ 2\ kN$ pour la force normale F_N, ce qui est largement supérieur aux efforts mis en jeu dans ce contact.

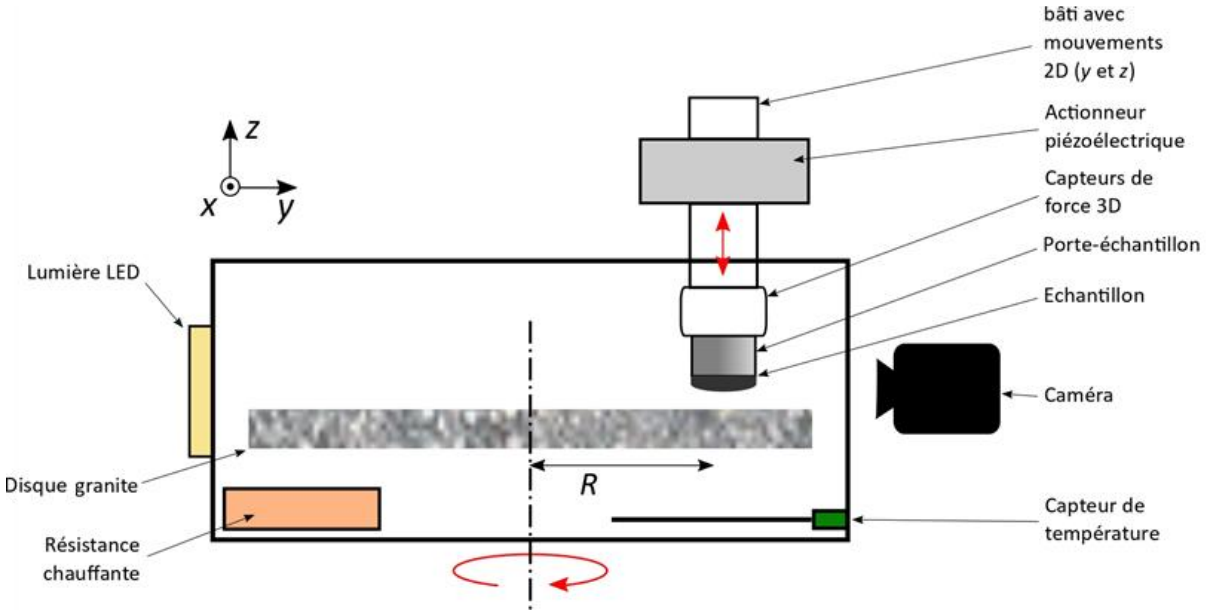


FIGURE 2.2 : SCHEMA REPRESENTATIF DU TRIBOMETRE ROTATIF LORRY [2.3]

L'environnement est également contrôlé puisqu'une résistance chauffante ainsi qu'une sonde de température sont disposées dans l'enceinte du tribomètre. Lors de ces travaux, les essais se sont déroulés à température ambiante, entre 19°C et 23°C. Une caméra optique est placée dans le plan de contact, afin de visualiser latéralement l'échantillon lors d'un essai de frottement.

Les capacités techniques de ce tribomètre, résumées au tableau 2.1, sont adaptées à la simulation du contact réel lors d'un cycle de boxage d'un fauteuil roulant.

	Force normale max (N)	*Zone de contact max (mm^2)*	*Pression de contact max (MPa)*	*Vitesse linéaire max (m/s)*	*Temps de contact (s)*
Contact réel	300	2 000	0,15	10	0,25
Tribomètre LORRY	400	150	2,7	50	0,5

TABLEAU 2.1 : COMPARAISON DES PARAMETRES EXPERIMENTAUX ENTRE LE CONTACT REEL ET LE CONTACT REALISABLE SUR LE TRIBOMETRE LORRY

3. Formulation des matériaux

a. Stratégie d'optimisation de la formulation

Les discussions avec les athlètes ont permis d'identifier plus précisément les axes d'amélioration du contact entre le gant et la main courante lors de la phase de propulsion. Le problème majeur rencontré est la perte d'adhérence lors de l'impact sur la main courante. En raison de conditions météorologiques ou par manque de précision dans la gestuelle, le gant glisse sur la main courante sans l'entraîner, l'effort généré par l'athlète est alors perdu pour cette poussée, ce qui a des conséquences lourdes sur le résultat d'une course.

L'élastomère de référence est le caoutchouc utilisé avant ces travaux par une grande majorité des athlètes pour revêtir leurs gants. Il s'agit d'un caoutchouc élaboré avec une matrice de caoutchouc naturel (NR) combinée à du styrène-butadiène rubber (SBR), et chargé en particules de noir de carbone sans additif spécifique permettant d'optimiser l'adhérence ou le frottement de l'élastomère. Afin d'améliorer la performance du contact gant/main courante, il a été décidé de modifier la formulation de cette plaque d'élastomère recouvrant le gant de l'athlète.

Cette nouvelle formulation doit donc répondre à des exigences d'adhérence et de frottement :

- le gant ne doit pas glisser mais bien entraîner la main courante, et ce, grâce à un coefficient de frottement augmenté par rapport à l'existant,

- une autre contrainte est liée à l'usure : le taux d'usure doit être limité, afin d'éviter un changement de revêtement de gant lors d'une compétition. En effet, le collage du revêtement sur le gant reste fastidieux avec la potentielle présence de bulles d'air coincées à l'interface, ce qui gêne l'interaction avec la main courante.

- enfin, le faciès d'usure est également un critère de décision : différents types d'usure peuvent apparaître sur le gant, certains plus gênants que d'autres lors de l'interaction avec la main courante.

Ces nouvelles formulations fournies sous forme de plaques moulées par notre partenaire industriel Hutchinson, seront testées d'une part en laboratoire, et d'autre part, sur piste en conditions réelles par les athlètes.

b. Paramètres de formulation

L'analyse bibliographique réalisée au premier chapitre montre que différents constituants des élastomères chargés influent sur leurs propriétés. Dans le cadre de ce chapitre sur le contact gant/main courante, nous avons choisi de regarder l'influence de trois éléments : la matrice élastomère, les noirs de carbone et les résines tackifiantes.

i. Choix des matrices élastomères

Il existe deux grandes catégories de caoutchouc : le caoutchouc naturel (Natural Rubber, NR) et les caoutchoucs synthétiques. Dans le domaine industriel, les caoutchoucs synthétiques sont les plus utilisés, pour des raisons économiques, de facilité de production mais aussi afin de contrôler plus rigoureusement les propriétés d'usage du matériau [2.4].

Parmi les caoutchoucs synthétiques, le polyisoprène synthétique (IR) est celui se rapprochant le plus du caoutchouc naturel. En effet, le polyisoprène est le polymère naturel présent dans l'hévéa, l'arbre à partir duquel le latex est extrait par incision, puis transformé en caoutchouc. Tout comme le caoutchouc naturel, il possède d'excellentes propriétés élastiques et une bonne résistance à la fatigue. La résilience de ce matériau, c'est-à-dire sa capacité à absorber l'énergie lors d'une déformation rapide, lui donne également une caractéristique intéressante. Ce polymère synthétique est également connu pour ses bonnes performances contre l'usure [2.5].

Tout comme le caoutchouc naturel ou le polyisoprène (IR), le polybutadiène (BR) possède lui aussi une très bonne résilience. Sa caractéristique principale reste néanmoins son excellente résistance à l'usure. Il est donc très souvent associé à un second caoutchouc afin d'améliorer l'usure tout en gardant les caractéristiques mécaniques souvent meilleures du second caoutchouc. C'est notamment le cas pour les pneumatiques dans l'industrie automobile qui souvent constitués d'un mélange BR/SBR [2.5].

Le SBR, pour Styrène-Butadiène Rubber, est le caoutchouc le plus consommé dans le monde. Il est le résultat d'une copolymérisation entre les monomères de styrène et de butadiène. Ce caoutchouc principalement reconnu pour offrir un compromis entre élasticité, résistance à l'abrasion et tenue au vieillissement thermique est majoritairement utilisé dans la fabrication des pneus de voiture. Le désavantage de ce polymère est sa résilience, moins bonne que celles des autres élastomères cités, qui peut néanmoins être compensée par l'ajout de charges renforçantes. Enfin, sa bonne tenue à l'eau peut être un avantage dans notre problématique lorsque les athlètes courent sous la pluie [2.5]. Pour une course effectuée dans de telles conditions, le caoutchouc butyle (IIR) présente également des propriétés pertinentes, notamment sa très faible perméabilité, qui limite la pénétration de l'eau au sein du matériau.

En revanche, ses performances mécaniques restent inférieures à celles de l'IR ou du SBR, tant en termes de résistance à la traction que de résilience et de résistance à l'abrasion [2.5].

Le tableau ci-dessous permet de résumer les propriétés mécaniques évoquées pour chaque élastomère :

	NR	*IR*	*BR*	*SBR*	*IIR*
Dureté (Shore A)	30-95	30-95	40-80	40-90	35-80
Résistance traction max (psi)	4000	3500	2500	3000	2500
Allongement max (%)	750	750	500	600	700
Résilience	Excellente	Excellente	Excellente	Bonne	Mauvaise
Résistance à l'usure	Excellente	Excellente	Excellente	Très bonne	Bonne

TABLEAU 2.2 : COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES DIFFERENTS ELASTOMERES UTILISES AU COURS DE LA THESE [2.4][2.5]

ii. Choix des charges de renfort

Les charges de renfort sont des matériaux ajoutés aux caoutchoucs pour améliorer leurs propriétés mécaniques, physiques et parfois chimiques. Les deux charges principalement utilisées dans l'industrie sont les noirs de carbone et la silice. Cette dernière est utilisée depuis le début des années 1990, notamment dans l'industrie automobile pour les pneus. L'ajout de cette charge au mélange induit une réduction de la résistance au roulement, participant à la création des « pneus verts » : une faible résistance au roulement permet de réduire la consommation de carburant du véhicule, diminuant ainsi l'impact écologique d'une voiture [2.6], en termes d'émission de gaz à effet de serre.

Le noir de carbone est quant à lui préféré à la silice pour obtenir une meilleure résistance mécanique, en particulier à l'abrasion. Les matrices élastomères ayant de faibles propriétés de résistance à l'usure, notre choix s'est porté sur ces charges de renfort au détriment de la silice [2.6][2.7].

Plusieurs noirs de carbone sont commercialement disponibles. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons opté pour deux charges, différant principalement par leur taille : le noir de

carbone GP (pour Grande Particule) sont des particules d'environ 200 nm tandis que le noir de carbone PP (pour Petite Particule) a une taille comprise entre 20 et 30 nm.

Les avantages offerts par les charges GP, noir de carbone dit « semi-renforçant », sont une dispersion facilitée dans le mélange final. La charge PP, noir de carbone à « haut pouvoir renforçant », conduit à des améliorations significatives de la résistance à la déchirure, la résistance à l'abrasion et une augmentation de la dureté. Néanmoins, lors de la phase de mélangeage, ces petites particules sont plus difficiles à disperser, ayant tendance à s'agglomérer entre elles, rendant le mélange hétérogène ce qui peut grandement affecter les propriétés mécaniques visées [2.8].

iii. Choix des résines tackifiantes

L'un des enjeux de la nouvelle formulation du revêtement du gant est l'adhésion sur la main courante. L'ajout d'une résine tackifiante au mélange nous a semblé pertinent afin d'augmenter ses propriétés d'adhérence.

Plusieurs types de résines existent mais les plus utilisées sont dites hydrocarbonées. Elles sont formulées à partir d'un polymère thermoplastique résultant de la polymérisation d'hydrocarbures insaturés. Il s'agit d'un type de résine versatile, permettant d'améliorer fortement l'adhérence, à faible coût. Cette résine présente également une bonne compatibilité avec les divers caoutchoucs envisagés comme matrice élastomère. Parmi les nombreuses résines hydrocarbonées existantes dans le commerce, 6 ont été sélectionnées par notre partenaire industriel Hutchinson. Nous les nommerons de *a* à *f* dans la suite de ce chapitre. Celles-ci, issues de différents fournisseurs, sont associées à une matrice élastomère en fonction de leurs compatibilités.

La nature de la résine, ainsi que sa proportion dans le mélange global seront ici les deux paramètres d'intérêt.

c. Choix de formulation

A partir des différents constituants évoqués précédemment, 17 échantillons présentés dans le tableau 2.3, ont pu être mélangés avec succès.

	Matrice élastomère					Noir de carbone		Résine tackifiante					
	NR	SBR	IIR	IR	BR	GP	PP	a	b	c	d	e	f
Ref	?	?											
IIR_0			X			X		0 %					
IIR_{a1}			X			X		7,5 %					
IIR_{a2}			X			X		15 %					
IIR_b			X			X			15 %				
IIR_c			X			X				15 %			
IR_0				X		X					0 %		
IR_{d1}				X		X					6,2 %		
IR_{d2}				X		X					16,5 %		
IR_e				X		X						6,2 %	
IR_f				X		X							6,2 %
IR_{d3}				X		X					15 %		
IR_{d4}				X			X				15 %		
IR_BR1_d				80 %	20 %	X					15 %		
IR_BR2_d				60 %	40 %	X					15 %		
SBR_d		100 %			0 %	X					15 %		
SBR_BR1_d		80 %			20 %	X					15 %		
SBR_BR2_d		60 %			40 %	X					15 %		

Echantillons utilisés pour mettre en évidence l'influence de la matrice élastomère

Echantillons utilisés pour mettre en évidence l'influence de la charge renforçante

Echantillons utilisés pour mettre en évidence l'influence du taux massique d'une résine tackifiante

Echantillons utilisés pour mettre en évidence l'influence de la nature d'une résine tackifiante

TABLEAU 2.3 : COMPOSITION CHIMIQUE DES ECHANTILLONS TESTES SUR TRIBOMETRE

L'échantillon Ref n'est pas formulé par Hutchinson. Sa composition n'est donc pas connue avec précision mais le site de revente informe qu'il s'agit d'un élastomère ayant pour matrice élastomérique un mélange de NR et de SBR. Aucune mention de charges de renfort ou de résine tackifiante n'est indiquée, malgré leur probable incorporation au mélange.

Les pourcentages indiqués dans les colonnes de la matrice élastomère se réfèrent uniquement à la composition de la matrice. Ainsi, par exemple, la matrice élastomère de l'échantillon IR_BR1_d est composé à 80% d'IR, et à 20% de BR, mais non pas l'échantillon lui-même. En revanche, les pourcentages des colonnes associées à la résine tackifiante se réfèrent au mélange total. En reprenant l'exemple de l'échantillon IR_BR1_d, 15% de la masse totale de l'échantillon est donc composé de la résine *d*.

Les échantillons composés à 15% de résine sont également constitués de 55% de matrice élastomère, et d'environ 20% de charges de renfort. Les 10 % restants correspondent à divers additifs permettant de faciliter le mélangeage ou la vulcanisation.

4. Résultat type d'un essai tribologique de référence

a. Choix des conditions expérimentales d'un essai tribologique de référence

Afin de simuler le contact gant/main courante, un essai de référence sur le tribomètre LORRY décrit dans la première partie de ce chapitre a été défini : il consiste à réaliser un contact entre l'échantillon et le disque d'une durée de 0,5 s à une fréquence de 1 Hz. La vitesse de rotation du disque est de 5 cm/s, ce qui conduit à une longueur glissée de 2,5 cm par cycle. Cette longueur qui devrait être idéalement nulle est supérieure à celle du contact réel, permettant ainsi de tester les échantillons dans des conditions plus sévères, et ainsi de mieux les discriminer. Les 0,5 secondes de repos permettent de garder le même ratio 50/50 entre la phase de poussée et la phase de retour que lors de la propulsion réelle fournie par un athlète. Ce choix présente également l'avantage d'éviter des échauffements locaux trop importants ou une relaxation incomplète du matériau entre deux cycles de contact. La force normale appliquée est de 15 N, ce qui correspond à une pression de contact moyenne d'environ 0,1 MPa, soit du même ordre de grandeur que celle à laquelle est soumise le contact réel.

Le nombre de cycles effectués lors d'un essai varie en fonction de la nature de l'échantillon. Pour ceux présentant un coefficient de frottement relativement faible, inférieur à 1, un essai de 500 cycles suffit à atteindre une stabilisation temporelle des forces de frottement. En revanche, d'autres échantillons nécessitent jusqu'à 1500, voire 2500 cycles avant d'atteindre cette stabilisation.

b. Protocole expérimental

Les différents échantillons présentés dans la partie 3 de ce chapitre sont fabriqués par notre partenaire industriel Hutchinson. Ils sont réalisés par moulage en compression dans des moules de plaques mesurant 13x21 cm^2, de 2 mm d'épaisseur, comme illustré à la figure (2.3 (A)). A l'aide d'un emporte-pièce, une pastille de 18 mm de diamètre est ensuite découpée dans cette plaque (figure 2.3 (B)). Cette pastille échantillon est alors collée sur le porte-échantillon (figure 2.3 (C)).

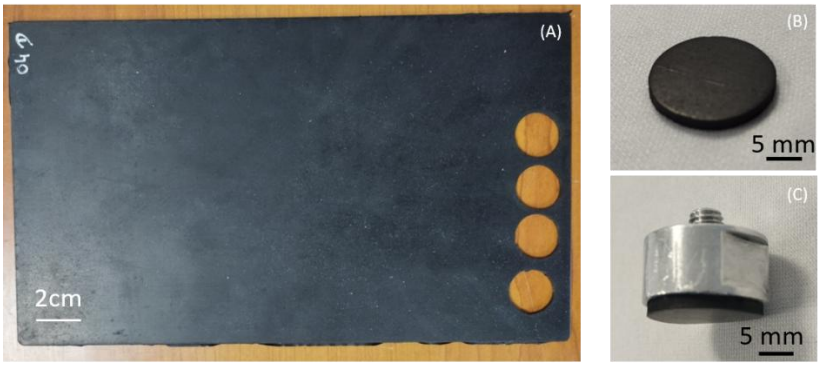


FIGURE 2.3 : PREPARATION D'UN ECHANTILLON POUR UN ESSAI TRIBOLOGIQUE. A) LA PLAQUE FOURNIE PAR HUTCHINSON EST DECOUPEE AFIN D'OBTENIR UNE PASTILLE DE 18MM DE DIAMETRE (B). CETTE PASTILLE EST ENSUITE COLLEE SUR LE PORTE-ECHANTILLON (C) LUI-MEME VISSE SUR LE BRAS MECANIQUE DU TRIBOMETRE

Avant collage, les deux surfaces doivent être nettoyées avec soin. L'essuyage de l'échantillon est réalisé via un chiffon imbibé à l'éthanol. Le porte-échantillon est quant à lui trempé dans un bain d'acétone quelques minutes pour dissoudre les traces de colles de l'essai précédent, avant d'être également nettoyé par un chiffon imbibé d'éthanol. Le collage se fait ensuite à l'aide d'une colle cyanoacrylate, adaptée aux caoutchoucs. Une attention particulière est apportée lors de cette opération afin de ne pas piéger d'air à l'interface entre l'échantillon et le porte-échantillon.

Le disque en granite est également nettoyé entre chaque essai : par frottement successif avec une gomme en contact sur le disque en rotation afin d'enlever la majorité des débris d'usure produits lors de l'essai précédent, et avec une lingette d'acétone, puis d'éthanol afin d'obtenir des conditions initiales identiques pour chaque essai.

Avant de démarrer l'essai, l'échantillon est approché du disque en granite, à l'arrêt, afin que le débattement de l'actionneur piézo-électrique soit suffisant pour obtenir la force normale souhaitée. Une fois cette distance réglée, l'échantillon s'arrête en position de repos : il n'est pas en contact avec le disque avant de lancer l'essai.

Lorsque l'échantillon positionné et les conditions expérimentales entrées dans le code de pilotage LabVIEW, l'essai commence : l'échantillon vient en contact avec le disque, qui va simultanément se mettre à tourner à la vitesse choisie ici de 5 cm/s.

c. Protocole de mesure

Lors de l'essai, les forces dans les trois directions sont mesurées. La force normale F_N selon $\vec{z}$ est asservie. L'acquisition des forces F_x et F_y s'effectue tout au long de l'essai à une fréquence de 1000 Hz. La force tangentielle F_T est définie de la façon suivante :

$$F_T = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

avec F_x et F_y les forces mesurées suivant les axes $\vec{x}$ et $\vec{y}$.

Outre l'évolution du frottement, l'usure est également une caractéristique d'intérêt : la perte de masse est ainsi mesurée par pesée de l'ensemble échantillon+porte-échantillon avant et après essai grâce à une balance Mettler Toledo MS205DU d'une précision de 0,01 mg. Chaque pesée est effectuée 5 fois, puis sa valeur moyennée, afin de diminuer l'incertitude des mesures. Les faciès d'usure sont caractérisés via des observations et des mesures optiques réalisées sur le microscope numérique Keyence VHX-6000 avec un stitching en 3 dimensions. Ce procédé consiste à réassembler plusieurs images microscopiques capturées à différentes altitudes ainsi qu'à diverses positions en x et y afin de reconstituer une image globale.

d. Un exemple de mesure de frottement

Cette partie a pour vocation d'expliciter le post-traitement effectué à l'issue des essais tribologiques. Par souci de clarté, tous les résultats présentés dans cette partie sont issus des essais effectués sur l'échantillon IIR_0, dont la matrice élastomère est du butyle, chargé en noir de carbone GP, sans ajout de résine.

i. Evolution temporelle instantanée d'un cycle de frottement

L'acquisition des données étant effectué à une fréquence de 1000 Hz et la durée d'un cycle étant d'une seconde, 1000 points sont enregistrés par cycle de frottement. La figure 2.4 illustre pour un cycle, l'évolution temporelle du coefficient de frottement, défini par le rapport de la force tangentielle F_T sur la force normale F_N asservie à 15 N :

$$\mu = \frac{F_T}{F_n}$$

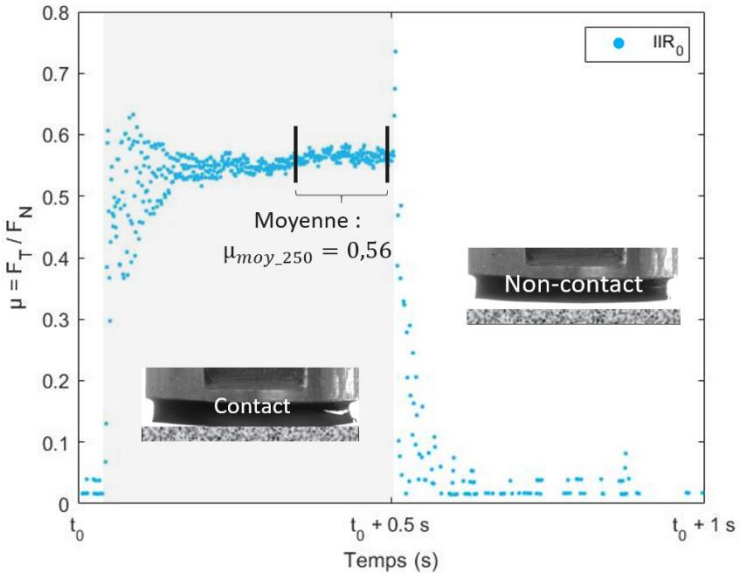


FIGURE 2.4 : ANALYSE D'UN CYCLE DE FROTTEMENT EN FONCTION DU TEMPS POUR L'ECHANTILLON IIR_0. SUR UN CYCLE D'UNE SECONDE, DEMARRANT A t_0, LORS DE LA PHASE DE CONTACT, LE FROTTEMENT SE STABILISE APRES QUELQUES DIXIEMES DE SECONDE, LE PARAMETRE μ_{moy} EST DONC DEFINI COMME LA MOYENNE DES μ ENTRE $t_1 = 0.35\ s$ DU CYCLE ET $t_2 = 0.49\ s$ DE CE MEME CYCLE. CETTE PHASE DE CONTACT EST SUIVI D'UNE PHASE DE NON-CONTACT DE DUREE EQUIVALENTE

Lors de la mise en contact de l'échantillon avec le disque en granite, le coefficient de frottement augmente brusquement, 3 dixièmes de seconde après la consigne, avant de se stabiliser au bout de 0,2 s. Suit une décroissance rapide mais non instantanée vers une valeur nulle lors de la phase de retrait de l'échantillon. Chaque cycle i est caractérisé par une valeur de coefficient de frottement moyen, noté μ_{moy_i}, valeur calculée en moyennant les coefficients de frottement sur la période allant de 0,35 s à 0,49 s d'un cycle. Ainsi, pour le 250ème cycle de l'échantillon IIR_0, nous obtenons $\mu_{moy_250} = 0{,}56$.

ii. Evolution temporelle moyenne du frottement en fonction du nombre de cycles

L'évolution du frottement moyen en fonction du nombre de cycles est présentée à la figure 2.5.

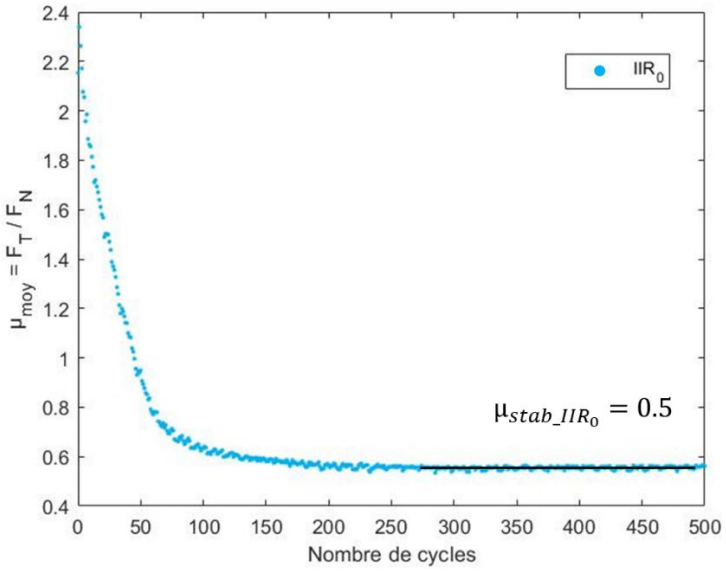


FIGURE 2.5 : VARIATION DU FROTTEMENT MOYEN AVEC LE NOMBRE DE CYCLES POUR L'ECHANTILLON IIR_0 SOUS F_N ASSERVIE A 15N. LE FROTTEMENT DIMINUE RAPIDEMENT AVANT DE SE STABILISER A UNE VALEUR PLATEAU, $\mu_{stab_IIR_0} = 0,5$.

Cette évolution du coefficient de frottement dépend de la formulation de l'échantillon. Néanmoins, pour chaque échantillon, une tendance similaire est observée : le coefficient de frottement moyen diminue rapidement pour atteindre une valeur plateau, le coefficient stabilisé μ_{stab}. Ce dernier est calculé en moyennant les dernières valeurs μ_{moy} mesurées. Sur l'exemple choisi ici, pour l'échantillon IIR_0, une moyenne des coefficients des cycles 275 à 500 a été effectuée, permettant d'obtenir une valeur μ_{stab} égale à 0,5.

e. Un exemple de mesure d'usure

Dans la suite de ce chapitre, nous mettrons en évidence l'importance du contrôle de l'usure dans l'évaluation de la performance des revêtements de gants. Après la mesure du coefficient de frottement présentée précédemment, une analyse quantitative, basée sur la perte de masse après essai, ainsi qu'une analyse qualitative, portant sur le faciès d'usure, ont été réalisées.

i. Taux d'usure et perte de masse

Avant expérience, pour l'échantillon IIR_0, la moyenne des 5 pesées sur la balance de précision fournit un poids total de 9393,85 mg.

Après essai, la vis du porte-échantillon est nettoyée à l'éthanol afin d'éviter une pollution dû à la présence de graisse dans le filetage. La surface de l'échantillon est également nettoyée avec un chiffon imbibé d'éthanol afin d'enlever les débris potentiellement présents en surface. Néanmoins, une attention particulière est apportée lors de cette étape afin d'éviter d'accentuer l'usure en arrachant de la matière pendant le nettoyage. Une fois ce nettoyage effectué, 5 nouvelles pesées sont effectuées. Pour l'échantillon IIR_0, la moyenne de ces 5 pesées donne un poids échantillon/porte-échantillon de 9393,82 mg. Ainsi la perte de masse correspondante est ici de 0,03 mg, soit un taux d'usure de $6 \times 10^{-5}\ mg/cycle$. Nous verrons dans la suite de ce chapitre que des pertes de masses beaucoup plus conséquentes peuvent être mesurées selon la composition de l'échantillon.

ii. Faciès d'usure

Une fois la pesée effectuée, les faciès d'usure sont observés au microscope numérique. Comme nous pouvons le voir sur la figure 2.6 dans la zone entourée en blanc, l'échantillon IIR_0 ne présente pas une usure très prononcée. L'endommagement est également hétérogène à la surface de l'échantillon et est localisé dans la zone centrale. Cette aire apparente d'usure vaut 104 mm^2.

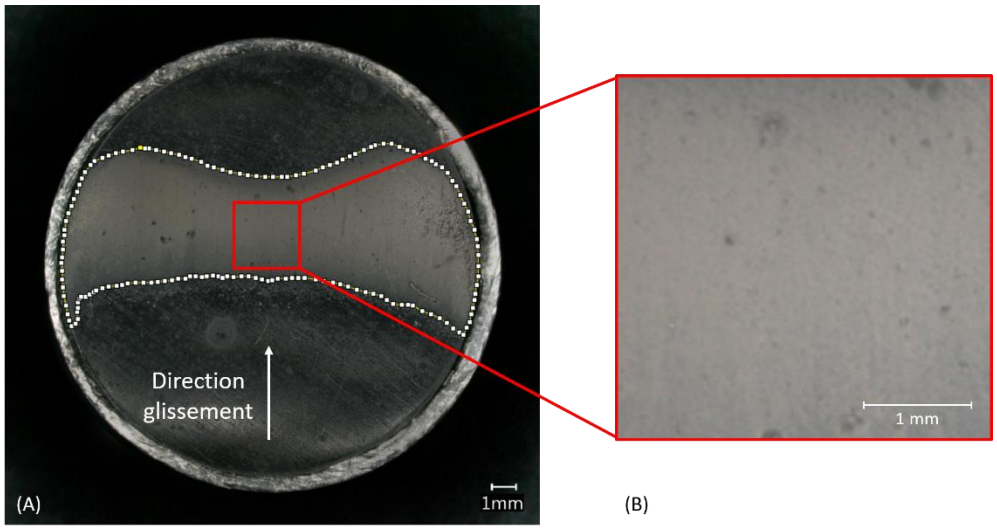


FIGURE 2.6 : FACIES D'USURE DOUCE DE L'ECHANTILLON IIR_0 APRES 500 CYCLES DE FROTTEMENT. LA ZONE USEE ENTOUREE EN BLANC CORRESPOND A UNE AIRE DE 104 MM².

Comme nous le verrons par la suite, l'observation visuelle du faciès d'usure constitue une étape importante dans l'analyse. Dans le cas de l'échantillon IIR_0, dont l'usure est très faible (usure douce caractérisée par l'absence de stries d'abrasion, de cratères et de zones fondues, comme précisé dans la suite de ce chapitre), cette étape reste secondaire. En revanche, elle devient essentielle pour les formulations plus avancées. En effet, au-delà de la simple perte de masse, le type d'usure qui apparaît sur le gant à l'issue de l'essai peut, selon sa nature, être plus ou moins gênant pour l'athlète. Cet aspect sera davantage exploré lors de la comparaison entre les résultats des essais en laboratoire et les retours des athlètes. De même que pour la perte de masse, des faciès d'usure plus importants seront étudiés dans la suite de ce chapitre.

5. Influence de la formulation sur le frottement

a. Influence de la matrice élastomère

Afin de souligner l'influence de la matrice élastomère sur le coefficient de frottement, trois échantillons formulés avec les mêmes renforts de noir de carbone mais sans résine tackifiante ont été sélectionnés. Il s'agit des échantillons Ref, IIR_0 et IR_0 qui se distinguent uniquement par la nature de leur matrice élastomère : un mélange de NR et SBR pour l'échantillon Ref, une matrice de polyisoprène pour IR_0 et une matrice de butyle pour IIR_0. La figure 2.7 montre l'évolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles pour chacun de ces 3 échantillons.

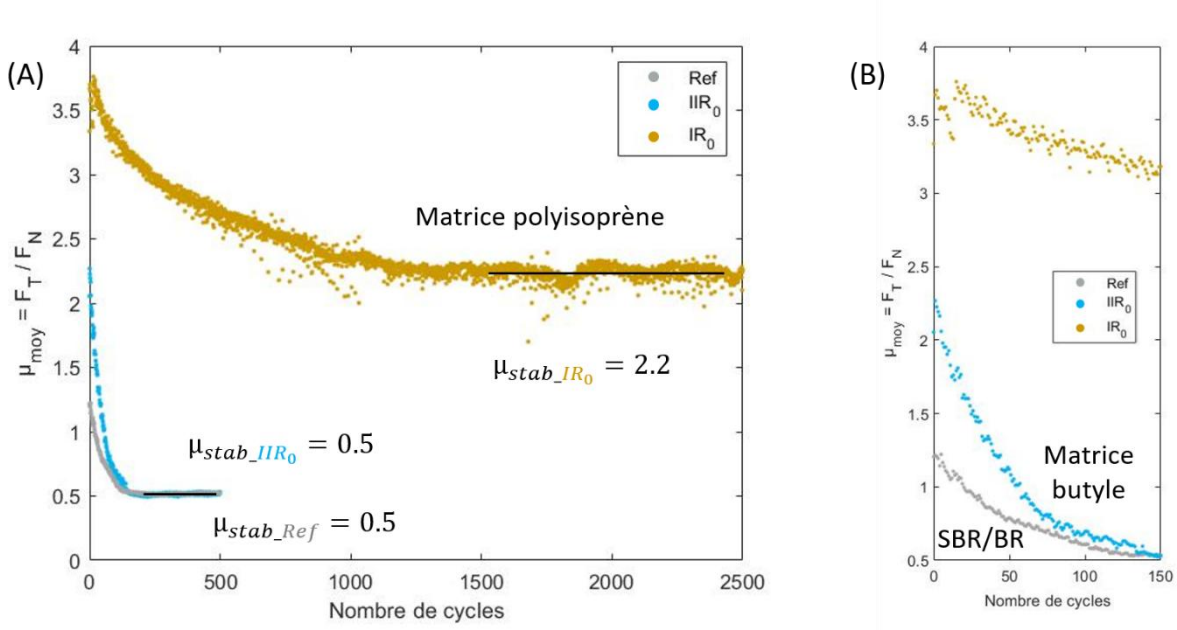


FIGURE 2.7 : EVOLUTION DU FROTTEMENT MOYEN EN FONCTION DU NOMBRE DE CYCLES (A), PERMETTANT DE SOULIGNER L'INFLUENCE DE LA MATRICE ELASTOMERE SUR LE FROTTEMENT. UN ZOOM SUR LE COMPORTEMENT LORS DES PREMIERS CYCLES EST PROPOSE EN (B).

L'évolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles présente une tendance similaire pour les trois échantillons étudiés : une diminution progressive à partir d'une valeur initiale, jusqu'à atteindre un régime stabilisé. Toutefois, des différences notables apparaissent tant au niveau des valeurs initiales que du comportement dynamique selon la nature de la matrice élastomère.

Comme le montre la figure 2.7(B), le coefficient de frottement enregistré sur les dix premiers cycles diffère en fonction de la formulation. La matrice polyisoprène affiche la valeur initiale la plus élevée (3,5), suivie de la matrice à base de butyle (2,3), puis de l'échantillon de référence SBR/BR (1,2). En plus de ces écarts de niveau, le profil d'évolution initial diffère selon les échantillons. Alors que les matrices butyle et SBR/BR présentent une décroissance immédiate du coefficient de frottement dès les premiers cycles, la formulation à base de polyisoprène se distingue par une légère augmentation du COF durant les 30 premiers cycles (correspondant aux 30 premières secondes), avant de suivre à son tour une phase décroissante. Ce comportement transitoire a également été observé par Zhang et al. [2.9] pour des élastomères de type FKM (Fluroroélastomère) et EPDM (Ethylène-Porpylène-Diène Monomère), et est généralement attribué à une phase de rodage de l'interface tribologique.

Après cette phase initiale, une diminution progressive du coefficient de frottement est observée jusqu'à stabilisation. Pour les matrices de référence et butyle, la transition vers l'état stabilisé se produit rapidement, en quelques centaines de cycles. En revanche, la matrice polyisoprène requiert environ 1500 cycles pour atteindre cet état stabilisé, ce qui justifie une durée d'essai plus longue pour cet échantillon. Cette stabilisation plus lente peut être liée à une usure plus prononcée : la perte de matière génère des débris qui contaminent l'interface de contact, retardant ainsi la mise en place d'un régime de frottement stable. Cette usure sera étudiée dans la suite du chapitre.

Pour la matrice polyisoprène, le coefficient de frottement stabilisé atteint une valeur de 2,2, soit un niveau plus de quatre fois supérieur à celui des matrices butyle et de référence, toutes deux autour de 0,5. Ces résultats mettent en évidence l'influence déterminante de la nature de la matrice élastomère sur le comportement tribologique. En particulier, la formulation à base de polyisoprène apparaît nettement plus performante en termes d'adhérence, suggérant son intérêt pour les revêtements de gants.

Afin d'étudier l'effet de l'ajout de polybutadiène (BR) dans une matrice à base de styrène-butadiène (SBR), trois formulations élastomères ont été testées dans des conditions tribologiques identiques. Tous les échantillons sont chargés avec du noir de carbone GP et contiennent 6,2 % de résine tackifiante *d*, la seule variable étant la composition de la matrice polymère. L'échantillon SBR_d est constitué à 100 % de SBR, tandis que SBR_BR1_d et SBR_BR2_d contiennent respectivement 20 % et 40 % de BR.

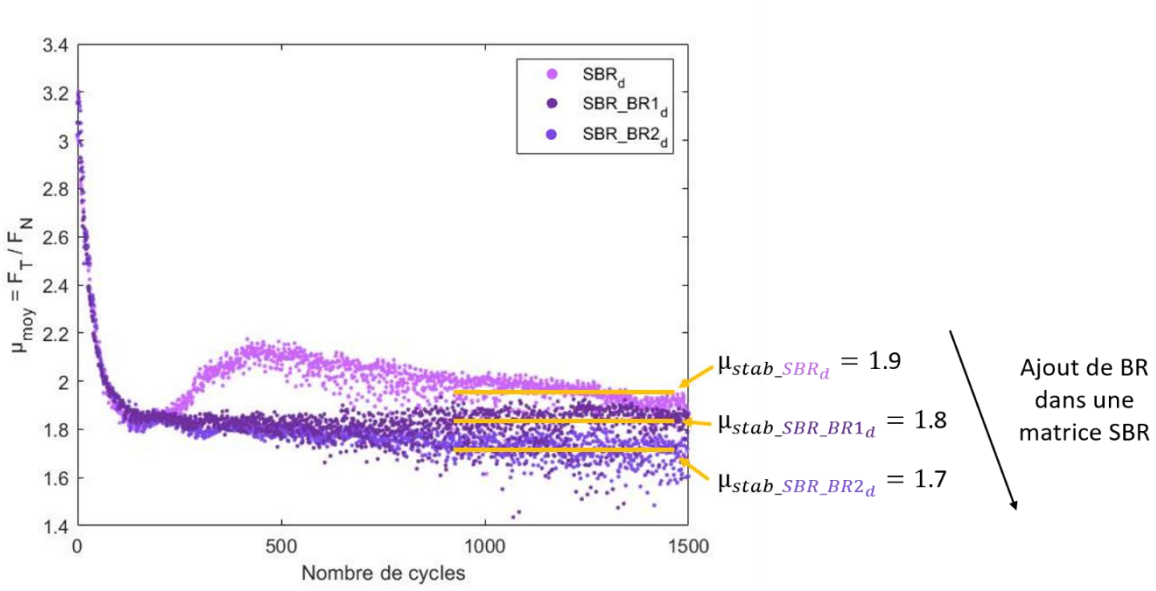


FIGURE 2.8 : EVOLUTION DU FROTTEMENT MOYEN EN FONCTION DU NOMBRE DE CYCLES, PERMETTANT DE SOULIGNER L'INFLUENCE DE L'AJOUT DE BR DANS UNE MATRICE SBR SUR LE FROTTEMENT

Comme le montre la figure 2.8, les trois échantillons présentent une même tendance générale similaire à celle observée pour les échantillons de référence et de butyle : une diminution du coefficient de frottement au cours des premiers cycles, suivie d'une stabilisation progressive. Pour l'échantillon SBR_d, on observe néanmoins une légère remontée du coefficient autour du 200ème cycle, avant une nouvelle baisse conduisant à un plateau. La valeur finale stabilisée varie toutefois en fonction de la teneur en BR. L'échantillon SBR_d affiche la valeur stabilisée la plus élevée (1,9), suivie de SBR_BR1_d (1,8) et enfin de SBR_BR2_d (1,7).

Ces résultats montrent que l'ajout de BR dans la matrice élastomère permet de réduire le frottement stabilisé. Ce constat est cohérent avec les observations de Sae-oui et al. [2.10], qui ont montré que l'ajout de BR dans un mélange SBR/BR réduit l'angle de perte. Ce comportement est par ailleurs cohérent avec le rôle traditionnellement attribué au BR dans les formulations industrielles : il est principalement utilisé pour améliorer la résistance à l'abrasion

de l'élastomère, sans nécessairement donner une meilleure performance en termes de résistance au roulement.

L'ensemble de ces résultats montre que la matrice élastomère joue un rôle prépondérant dans la réponse en frottement de l'échantillon : il est donc possible de contrôler l'évolution du frottement en modifiant la formulation de la matrice.

b. Influence de la charge de renfort

Afin d'étudier l'influence des charges de renfort, deux échantillons ont été testés dans les même conditions. Leurs compositions sont identiques (matrice élastomère à 100% de polyisoprène, 15% de résine tackifiante *d*), à l'exception du chargement en noir de carbone : l'échantillon IR_{d3} est chargé avec des noirs de carbone GP (particules de grande taille), tandis que l'échantillon IR_{d4} est formulé avec les noirs de carbone PP (particules de petite taille).

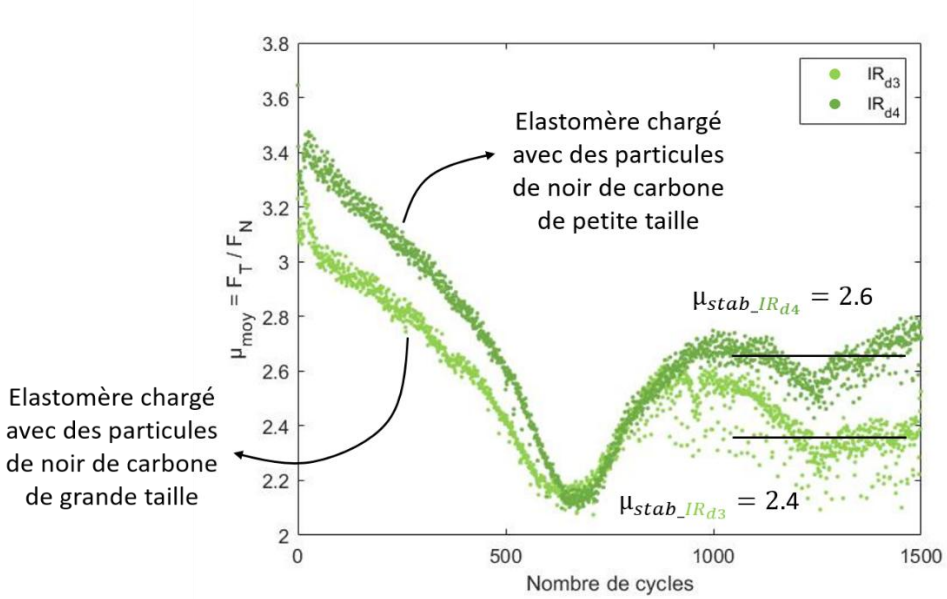


FIGURE 2.9 : EVOLUTION DU FROTTEMENT MOYEN EN FONCTION DU NOMBRE DE CYCLES, PERMETTANT DE SOULIGNER L'INFLUENCE DE DES CHARGES RENFORÇANTES SUR LE FROTTEMENT

La figure 2.9 montre l'influence du type de noir de carbone sur le comportement en frottement des élastomères. Les tendances d'évolution sont similaires pour les deux échantillons. Lors des tout premiers cycles, le coefficient de frottement augmente légèrement, comme observé pour l'échantillon IR_0 de la figure 2.7. Puis, le frottement diminue fortement avant d'augmenter à nouveau aux alentours de 700 cycles, de diminuer de nouveau et finalement d'augmenter aux environs de 1200 cycles. La périodicité de ces changements semble diminuer en cours d'essai. Ces fluctuations peuvent être attribuées à l'abondance de débris générés par l'usure, particulièrement élevée pour les formulations à base de polyisoprène, comme cela sera discuté par la suite.

L'échantillon IR_{d4}, formulé avec des noirs de carbone PP, présente un coefficient de frottement plus élevé que l'échantillon IR_{d3}, contenant des noirs GP. Cette observation doit toutefois être nuancée au regard de la variabilité importante des mesures. Par ailleurs, l'augmentation du frottement observée pourrait être davantage liée au pouvoir renforçant de la charge qu'à la seule taille des particules. Aucune analyse statistique de la taille des agrégats n'a été réalisée. De plus, l'interaction charge/matrice peut jouer un rôle déterminant dans la dissipation d'énergie au sein du contact. Ces aspects moléculaires n'ont pas été étudiés dans le cadre de ce travail.

c. Influence de la résine tackifiante

Parmi les divers additifs présents dans un élastomère, les résines tackifiantes semblent indiquées pour répondre à la problématique soulevée lors des discussions avec les athlètes, sur le manque d'adhérence lors de la poussée. Plusieurs résines de chimie différente ont donc été sélectionnées : celles-ci diffèrent, entre autres, de par leurs propriétés de compatibilité avec les matrices élastomères.

i. Variation du taux massique, pour une résine adaptée à chaque matrice

Afin d'observer l'influence de l'ajout de résine tackifiante dans un mélange élastomérique, la réponse en frottement a été mesurée pour la matrice de butyle (IIR) avec : 0%, 7,5% et 15% de résine *a* (respectivement les échantillons IIR_0, IIR_{a1} et IIR_{a2}). Des essais similaires ont été réalisés pour les échantillons avec la matrice de polyisoprène (IR) associée à la résine *d,* respectivement les échantillons IR_0, IR_{d1} et IR_{d2}, avec respectivement 0%, 6,2% et 16,5% de la masse du mélange. Il est important de préciser que la nature de la résine a été choisie pour être compatible avec la chimie de chaque matrice élastomère.

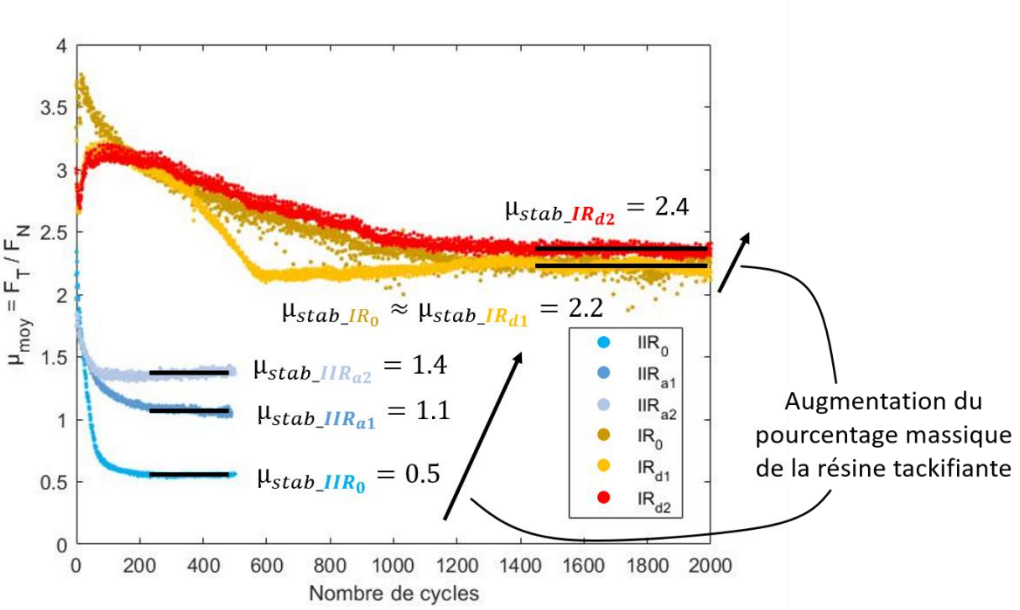


FIGURE 2.10 : EVOLUTION DU FROTTEMENT MOYEN EN FONCTION DU NOMBRE DE CYCLES, PERMETTANT DE SOULIGNER L'INFLUENCE DU POURCENTAGE MASSIQUE DE RESINE TACKIFIANTE DANS LES MELANGES A BASE D'IIR ET D'IR SUR LE FROTTEMENT

Comme le montre la figure 2.10, l'ajout de résine *a* sur une base IIR révèle l'influence de cet agent : plus le pourcentage massique de résine *a* augmente, plus le coefficient de frottement stabilisé augmente, passant de 0,5 à 1,4 lorsque le mélange atteint 15% de résine.

Pour l'ajout de résine *d* sur les mélanges à base IR, l'effet est moins perceptible. En effet, le frottement mesuré pour la matrice IR_0 étant déjà supérieur à 1, l'apport relatif de la résine tackifiante est plus limité. Ces observations suggèrent ainsi que l'efficacité d'une résine tackifiante est d'autant plus perceptible que le niveau de frottement initial du mélange est faible (inférieur à 1). Néanmoins, l'échantillon avec 16,5% de résine *d* présente tout de même le coefficient de frottement le plus élevé. La différence pour le frottement stabilisé entre un mélange sans résine, et un mélange avec 6,2% de résine est trop faible pour être visible sur cet essai.

ii. Variation de la nature de la résine, à taux massique constant

Pour différencier l'influence des résines entre-elles, six chimies différentes ont été testées. La première famille consiste en trois résines ajoutées dans une proportion de 15% de la masse volumique, dans un élastomère base IIR, et la deuxième famille est composée de trois autres résines adaptées pour un mélange avec une base IR, toujours à 15% de la masse volumique du mélange. Comme nous le montre la figure 2.11, nous confirmons la forte dépendance des résultats avec la base élastomère.

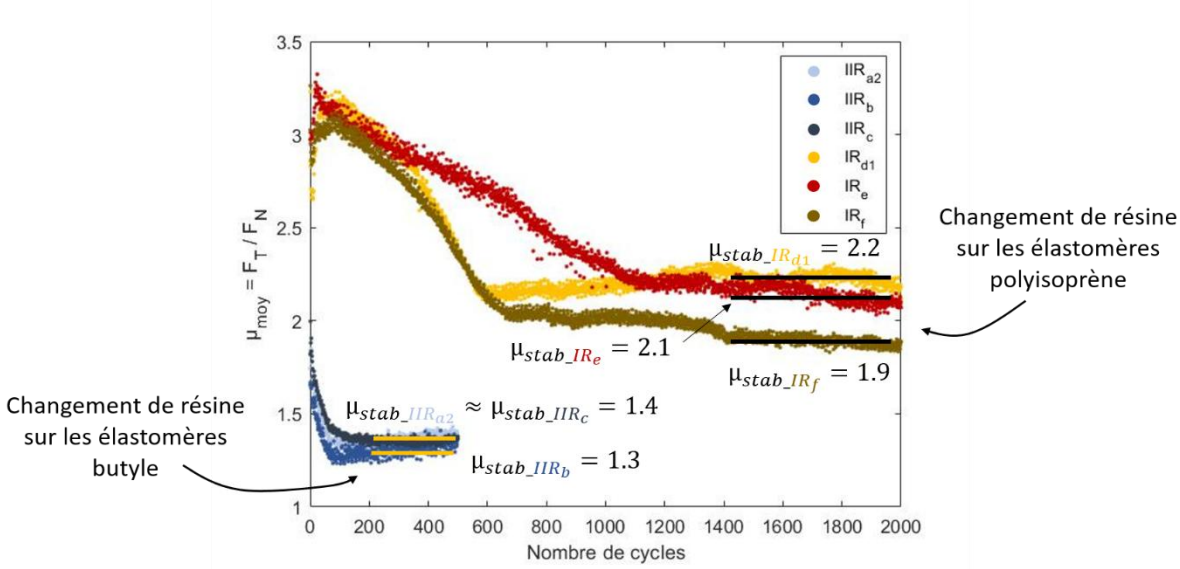


FIGURE 2.11 : EVOLUTION DU FROTTEMENT MOYEN EN FONCTION DU NOMBRE DE CYCLES, PERMETTANT DE SOULIGNER L'INFLUENCE DU TYPE DE RESINE TACKIFIANTE, A TAUX MASSIQUE EQUIVALENT SUR LE FROTTEMENT

Concernant les résines *a, b* et *c* ajoutées dans le mélange à base d'IIR, leur influence directe sur le frottement reste négligeable. Le coefficient se stabilise entre 1,3 et 1,4 pour les trois résines tackifiantes. Pour la deuxième famille, le type de résine génère une différence sur le niveau de frottement : les résines *d* et *e* semblent avoir un pouvoir tackifiant relativement similaire, en revanche, la résine *f* n'améliore pas le frottement.

d. Conclusions sur l'influence de la formulation sur le frottement

La matrice élastomère gouverne au premier ordre les propriétés en frottement d'un caoutchouc. Comme remarqué dans la figure 2.7, le coefficient de frottement stabilisé peut ainsi varier du simple au quadruple, en fonction de la formulation de la matrice élastomère.

Le type de noir de carbone utilisé modifie également le niveau de frottement, mais à un niveau moindre, de l'ordre de la dizaine de pourcents.

La résine tackifiante est un élément-clé de la modification des propriétés en frottement des caoutchoucs avec une base élastomère à faible niveau de frottement tels que l'IIR. Pour cette base, l'addition de 15% de résine permet de multiplier son coefficient de frottement stabilisé par trois. Ce constat est moins vrai pour les élastomères possédant une matrice caractérisée par un fort coefficient de frottement initial tel que le polyisoprène (IR). Les différences de niveau de frottement sont principalement visibles sur la modification du taux massique de la résine. En revanche, la nature de la résine ne permet pas une différentiation très marquée entre les échantillons.

Ainsi, comme présenté au chapitre 1, le frottement résulte d'une contribution de déformation associée à une contribution d'adhésion. Ces résultats montrent que la contribution de déformation, pilotée par les propriétés viscoélastiques de la matrice, est prépondérante pour

ces conditions tribologiques cycliques de phases de contact/non-contact. La deuxième contribution essentielle, l'adhésion, est quant à elle, contrôlée et contrôlable par l'ajout de concentration croissante de résine tackifiante.

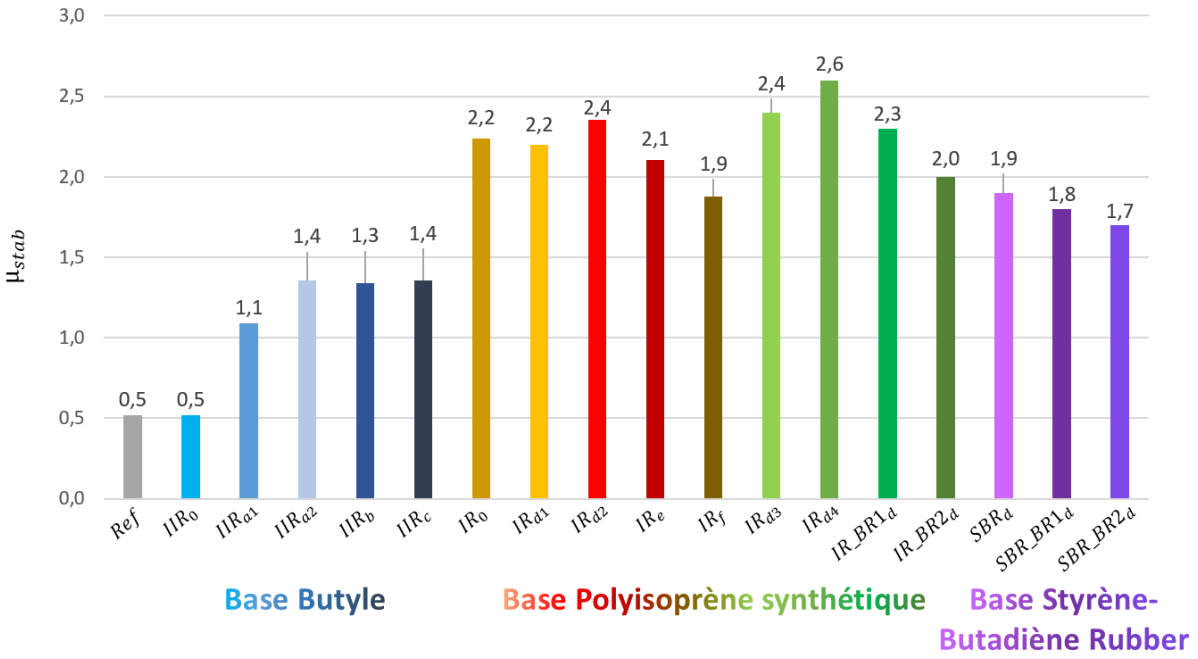


FIGURE 2.12 : COMPARATIF DES COEFFICIENTS DE FROTTEMENT STABILISES

L'histogramme présenté en figure 2.12 permet d'avoir une vue d'ensemble des propriétés en frottement des différents échantillons dans des conditions de sollicitations tribologique proche de celles du gant en contact avec la main courante du fauteuil. Chaque donnée de l'histogramme correspond au coefficient de frottement stabilisé à la fin de chaque essai en laboratoire.

En termes d'aide à la formulation optimisée pour un frottement renforcé, les constats suivants peuvent être établis. L'échantillon de référence présente le frottement le moins élevé, et n'est donc pas adapté pour notre problématique. Les échantillons avec une base IIR ne sont pas non plus de très bons candidats, même si l'ajout d'une résine tackifiante rend le mélange beaucoup plus performant. Le meilleur niveau de frottement est obtenu avec la matrice IR. Pour cette matrice, la résine *d* permet de donner un léger avantage sur les autres mélanges (les échantillons de couleur verte sur l'histogramme 12 sont des échantillons contenant une base IR et la résine *d* est présente à un taux massique de 15%).

L'ajout de BR dans la matrice élastomère n'a pas un effet positif sur le niveau de frottement. Que ce soit sur une base IR ou sur la base SBR, l'ajout de BR fait toujours baisser le niveau de coefficient de frottement stabilisé.

Enfin, les échantillons avec une base SBR contenant également la résine tackifiante *d*, présentent un niveau de frottement légèrement inférieur à l'IR, mais largement supérieur aux échantillons de référence et de base IIR.

6. Influence de la formulation sur la tenue en usure

A l'issue des essais tribologiques d'impact glissant, les échantillons répondant au mieux au cahier des charges en réponse en frottement sont ceux à base d'IR, avec une résine *d* à 15% du taux massique. Néanmoins, les échantillons avec une base SBR présentent également de très bons niveaux de frottement et sont reconnus dans la littérature pour leur très bonne résistance à l'usure. Le comparatif des formulations sur la tenue en usure sera donc concentré sur les échantillons suivants : IR_{d3}, IR_{d4}, IR_BR1_d, IR_BR2_d, SBR_d, SBR_BR1_d, SBR_BR2_d.

Les différences de formulation apportées entre ces échantillons (le changement de noir de carbone, l'ajout de BR en différentes proportions) ont comme objectif initial de diminuer l'usure.

a. Influence sur la perte de masse

La figure 2.13 présente un comparatif de la perte de masse de ces échantillons après un essai de référence, réalisé sur une durée de 2500 cycles, correspondant à une longueur glissée de 62,5 m. La perte de masse est mesurée selon le protocole décrit précédemment.

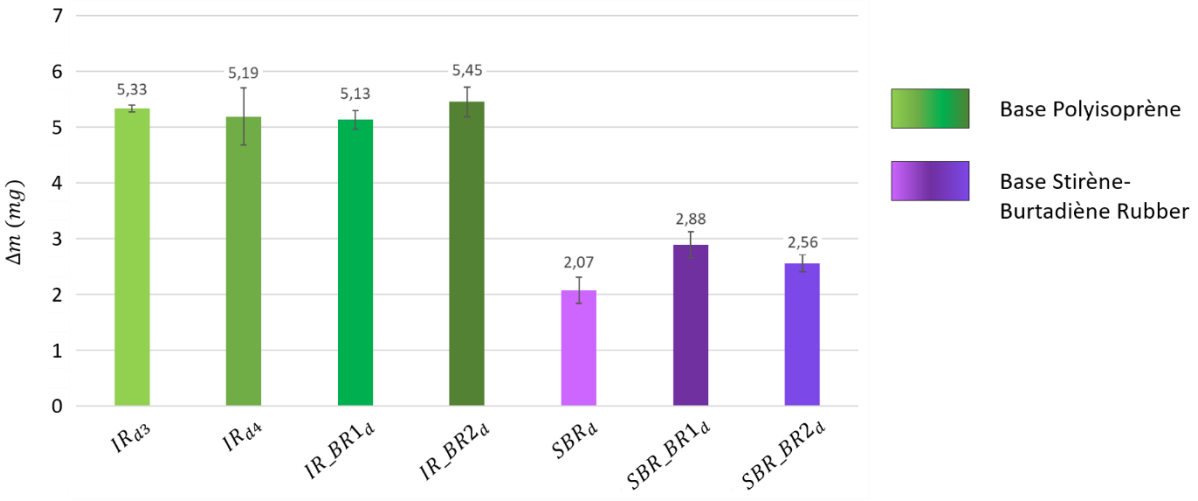


FIGURE 2.13 : COMPARAISON DES PERTES DE MASSES APRES UN ESSAI DE 2500 CYCLES, POUR LES ECHANTILLONS A BASE D'IR ET DE SBR, AVEC UN AJOUT DE BR

Comme nous l'avons vu précédemment pour les propriétés en frottement, l'influence de la matrice élastomère joue un rôle clé sur la perte de masse. Cette perte de masse due à l'usure est diminuée de moitié en présence de matrice SBR.

L'ajout de BR n'influence que peu la perte de masse, ni pour une base IR, ni pour une base SBR. Le changement de particules de noir de carbone n'induit pas non plus d'effet significatif, les pertes de masse des échantillons IR_{d3} et IR_{d4} restant sensiblement les mêmes.

Le phénomène d'endommagement de l'échantillon est également visible en observant l'interface de contact grâce à la caméra placée dans le plan du contact entre le caoutchouc et

le disque en granite. La figure 2.14 illustre cette observation pour l'échantillon IR_{d3} après 1500 cycles, soit 37,5 m de longueur glissée. Des débris d'usure sont visibles à l'interface et en sortie de contact.

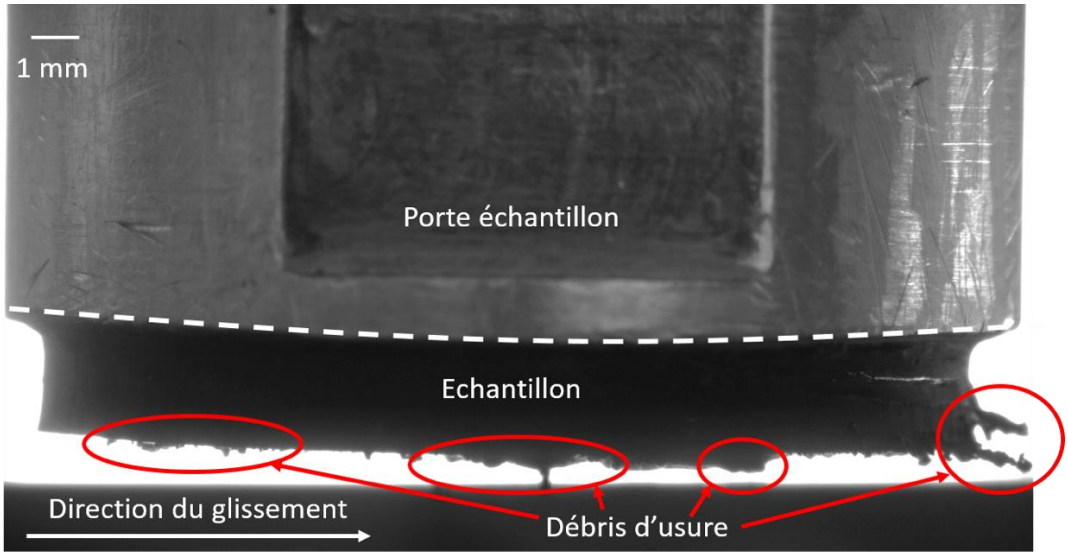


FIGURE 2.14 : VISUALISATION DE DEBRIS A L'INTERFACE ENTRE L'ECHANTILLON ET LE DISQUE EN GRANITE LORS D'UN ESSAI AVEC L'ECHANTILLON IR_{d3} APRES 1500 CYCLES.

Ces débris d'usure correspondent à un arrachement de matière sur le caoutchouc. Ils sont en grande partie responsables de la perte de masse mesurée précédemment. Afin de comprendre l'origine de ces débris, les faciès d'usure des échantillons ont également été analysés.

b. Analyse des faciès d'usure

En complément de la mesure de la perte de masse, les faciès d'usure sont des éléments à considérer lors de la formulation de l'élastomère. En effet, la morphologie de ces faciès peut différer selon la composition du caoutchouc, et provoquer une gêne pour l'athlète lors d'une course ou sur l'ensemble d'une compétition. Dans le cas des élastomères, quatre principaux faciès d'usure sont identifiés : les cratères, les stries, les rouleaux et les rides [2.5][2.11].

Associé à un taux d'usure faible, le cratère est un faciès d'usure prépondérant lors des usures dites douces. Cette usure est reconnaissable par l'observation de trous d'un diamètre moyen d'une centaine de micromètres à la surface de l'élastomère, comme illustré sur la figure 2.15 (A) Il s'agit d'une usure typique de celle rencontrée sur les pneumatiques [2.12].

Lorsque les conditions sont plus sévères, des stries d'usure peuvent apparaitre. Comme cela est visible sur la figure 2.15 (B), il s'agit de bandes formées parallèlement au glissement et d'une longueur pouvant atteindre le centimètre. Ce faciès d'usure résulte de déchirures locales [2.13].

En-deçà d'une pression apparente de contact de 0,6 MPa, des rouleaux d'usure (figure 2.15 (C)) peuvent également se former dans un premier temps [2.5]. Ces rouleaux résultent en général d'un compactage des débris d'usure adhérant à la surface usée, dont la longueur varie de la centaine de micromètres au millimètre.

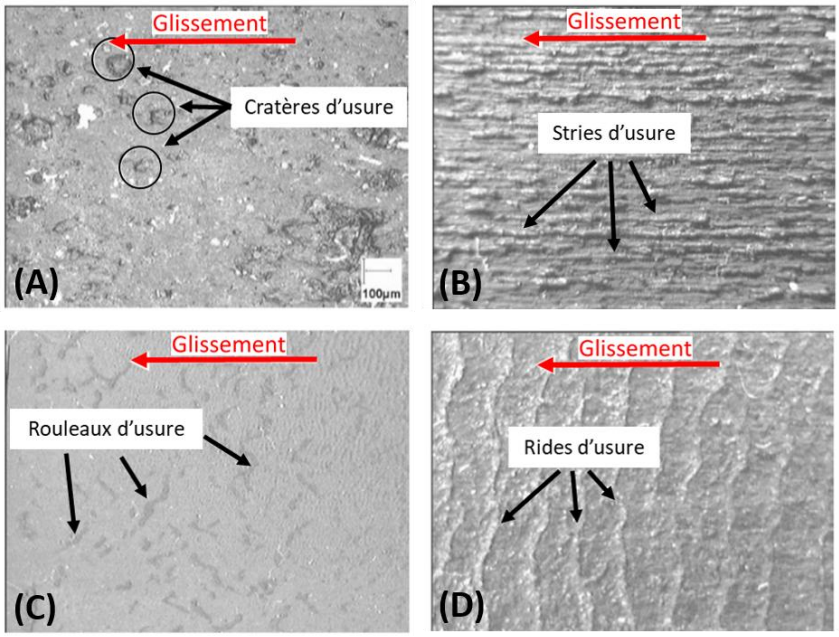


FIGURE 2.15 : ILLUSTRATION DES 4 PRINCIPAUX FACIES D'USURE OBSERVES SUR LES ELASTOMERES EN MICROSCOPIE : CRATERES (A), STRIES (B), ROULEAUX (C) ET RIDES D'USURE (D). LES MICROSCOPIES DES STRIES, DES RIDES ET DES ROULEAUX D'USURE NE POSSEDENT PAS D'ECHELLE, LEURS DIMENSIONS CARACTERISTIQUES VARIANT DE LA CENTAINE DE MICROMETRES AU MILLIMETRE. (D'APRES [2.5]) LES RIDES D'USURE AINSI QUE LES CRATERES SERONT LES DEUX FACIES QUE NOUS RETROUVERONS DANS LES ESSAIS REALISES SUR LE TRIBOMETRE LORRY.

Enfin le faciès d'usure le plus répandu est la ride d'usure. Les rides sont orientées perpendiculairement à la direction du glissement et présentent une forme en « dents de scie » asymétriques avec une pente abrupte face au glissement, et une pente plus douce à l'arrière. Elles résultent de la coalescence de micro-arrachement locaux [2.14][2.15]. Elles peuvent atteindre une longueur allant jusqu'à plusieurs centimètres et une hauteur de l'ordre de quelques millimètres pour les plus grosses. Dans le cas d'un faciès d'usure associant cratères et rides, il a été montré que la majeure partie de la perte de masse est attribuable aux rides, tandis qu'environ 10 % seulement provient des cratères [2.11][2.12]. Pour caractériser cette usure, les paramètres géométriques présentés sur la figure 2.16 seront analysés.

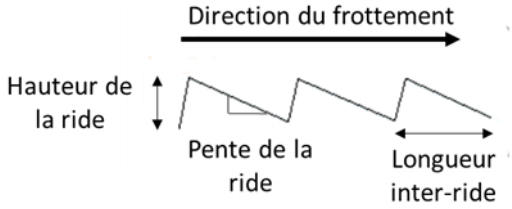


FIGURE 2.16 : PRESENTATION DES PARAMETRES UTILISES POUR CARACTERISER GEOMETRIQUEMENT UNE RIDE D'USURE

Cette forme d'usure est très répandue, notamment sur les pneumatiques. Il s'agit également de l'usure présente sur plusieurs des échantillons testés pour les revêtements de gants.

Concernant les échantillons testés sur le tribomètre LORRY, les mesures de perte de masse ont mis en évidence que l'ingrédient de la formulation le plus important pour piloter l'usure est la matrice élastomère. Comme cela est détaillé en annexe 1, les faciès d'usure des échantillons issus d'une même matrice élastomère présentent des caractéristiques très similaires. C'est pourquoi, la comparaison des faciès d'usure se focalisera sur des échantillons caractéristiques, IR_{d3} et SBR_d.

La figure 2.17 présente deux observations microscopiques de surfaces d'échantillon après un essai de référence (longueur glissée de 62.5 m).

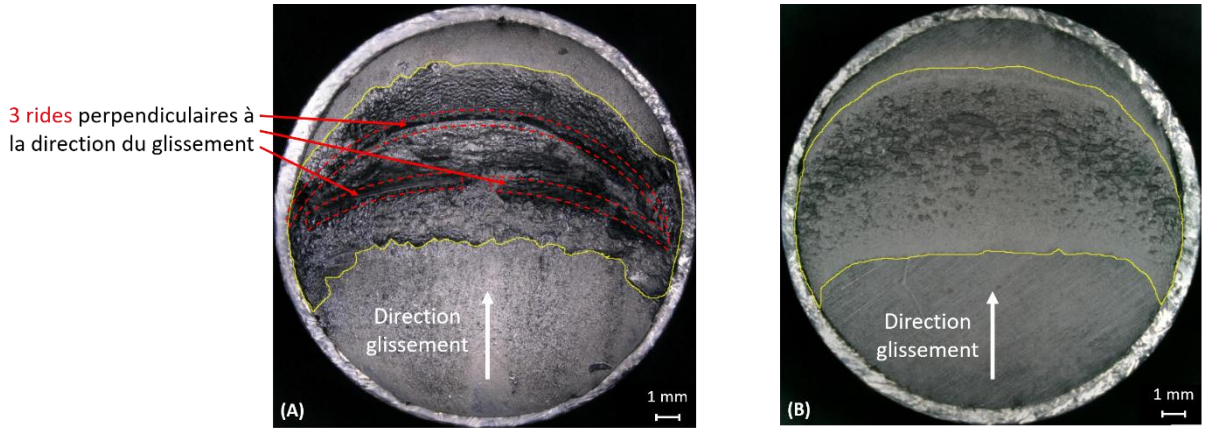


FIGURE 2.17 : IMAGES EN MICROSCOPIE OPTIQUE DE L'ECHANTILLON IR_{d3} (A) ET DE L'ECHANTILLON SBR_d (B) APRES UN ESSAI DE REFERENCE. LES ZONES USEES ENTOUREES EN JAUNE ONT DES TAILLES DU MEME ORDRE DE GRANDEUR ENTRE LES DEUX ECHANTILLONS.

L'échantillon IR_{d3} (figure 2.17 (A)) présente visuellement une usure beaucoup plus marquée que l'échantillon SBR_d (figure 2.17 (B)), notamment avec des rides d'usures visibles dans la zone frottée. L'aire de la zone frottée est néanmoins semblable pour les deux échantillons : $A_{IR_{d3}} = 143\ mm^2$ et $A_{SBR_d} = 139\ mm^2$.

Pour l'échantillon IR_{d3}, des cratères d'usure sont observables. Toutefois, la littérature ayant mis en évidence la contribution limitée de ce faciès à la perte de masse, l'analyse se concentrera plus particulièrement sur les rides d'usure, qui constituent le mécanisme prédominant, sans approfondir l'analyse des cratères [2.12]. Sur cet échantillon, 3 rides d'usure sont nettement visibles : la plus grande à l'arrière du contact, soulignée en jaune sur la microscopie de la figure 2.18, et les deux autres de longueur plus petite à iso-distance de l'avant du contact. La distance entre ces rides, annotée « longueur inter-ride » sur la figure 2.16 est de 2,9 mm sur cet échantillon. L'ordre de grandeur de cette longueur inter-ride est toujours aux alentours de 3 mm quel que soit l'échantillon ayant une base élastomère IR. Ces observations sont cohérentes avec celles de la littérature [2.16][2.17].

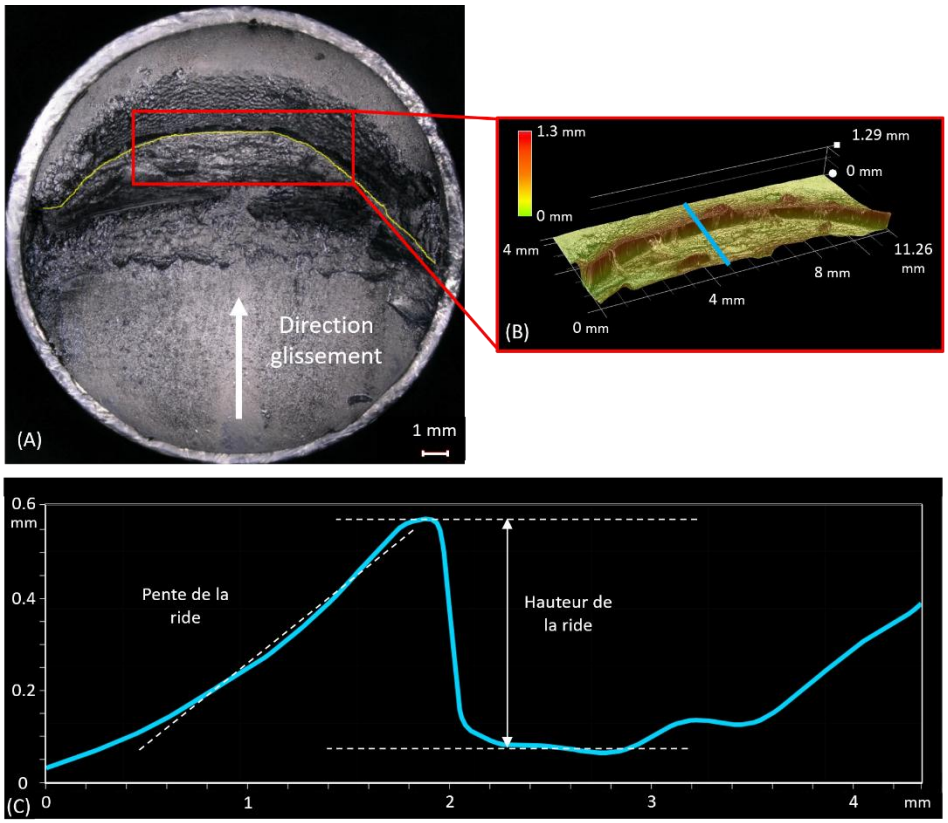


FIGURE 2.18 : FACIES D'USURE DE L'ECHANTILLON IR_{d3} APRES UN ESSAI DE REFERENCE DE 2500 CYCLES. LA PLUS LONGUE RIDE EST SOULIGNEE EN JAUNE SUR LA MICROSCOPIE (A). UN STITCHING EN 3 DIMENSIONS EST REALISE SUR LA PARTIE CENTRALE DE CETTE RIDE (B), PUIS UNE COUPE EST REALISEE SUR CETTE IMAGE AFIN D'OBTENIR LE PROFIL (C) PERMETTANT DE MESURER LES CARACTERISTIQUES DE LA RIDE D'USURE PRINCIPALE.

Cette grande ride est visible sur toute la surface de l'échantillon sur un arc de cercle long de 21 mm. Afin d'approfondir la compréhension du faciès d'usure, un stitching en 3 dimensions a été réalisé sur le microscope numérique, en se concentrant sur la partie centrale de cette plus grande ride d'usure. La figure 2.18 (B) présente une vue zoomée de cette ride, où la forme de « dent de scie » est bien visible.

Afin d'obtenir la hauteur et la pente de la ride, plusieurs coupes ont été réalisées le long de cette ride. Sur la figure 2.18 (B), une coupe est représentée, à laquelle on associe un profil présenté dans la partie (C) de cette même figure. La moyenne des mesures réalisées sur 5 profils le long de cette ride d'usure, donne les résultats suivants : une hauteur moyenne de la ride de 533 μm et une pente moyenne de 41,3 %.

Comme souligné précédemment et montré à la figure 2.19, le faciès d'usure de l'échantillon SBR_d est très différent de celui de l'échantillon IR_{d3} . Sur cet échantillon, deux types d'usure sont présents : à l'avant du contact, on observe des cratères d'usure et à l'arrière du contact, des rides d'usure.

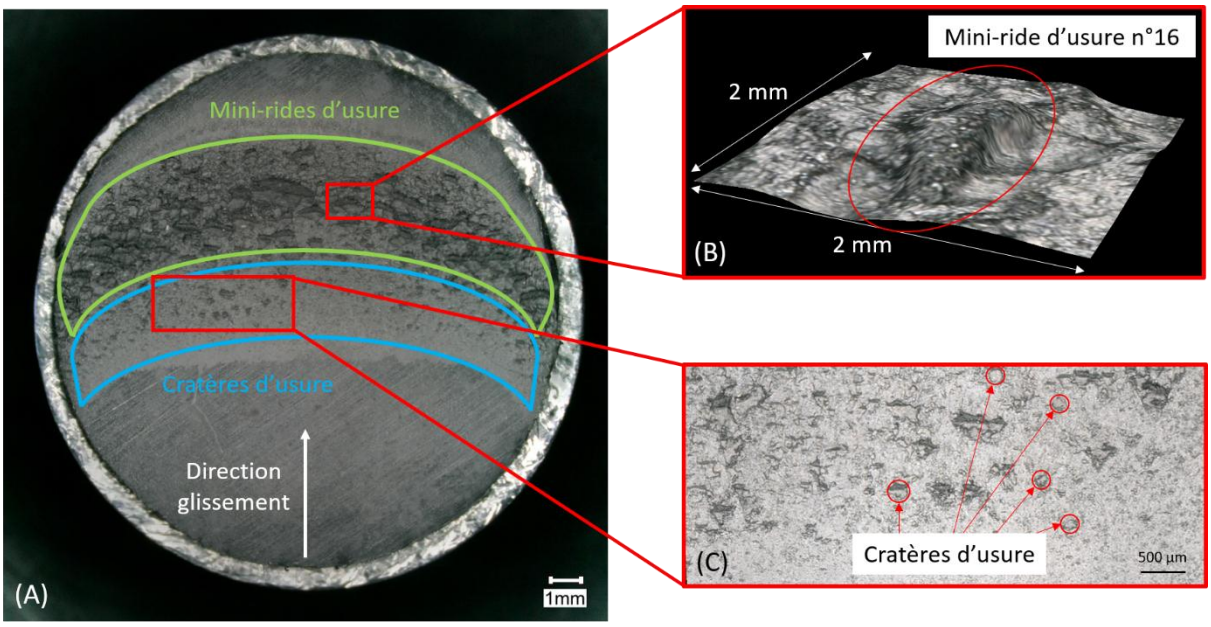


FIGURE 2.19 : FACIES D'USURE DE L'ECHANTILLON SBR_d APRES UN ESSAI DE REFERENCE DE 2500 CYCLES. DEUX ELEMENTS CARACTERISTIQUES DE L'USURE SONT PRESENTS SUR CET ECHANTILLON : DES CRATERES D'USURE A L'AVANT DU CONTACT, PUIS DES RIDES DE PETITE TAILLE A L'ARRIERE DU CONTACT.

Concernant les cratères d'usure, les mêmes caractéristiques d'usure que celles mentionnées par Petitet lors de ses travaux sont observées [2.12]. Le diamètre moyen d'un cratère est de l'ordre de la centaine de micromètres, et la profondeur n'excède pas les 20 μm. Néanmoins, les travaux de Petitet ont montré le très faible enlèvement de matière associé à ces cavités. L'origine de la perte de masse mesurée sur la figure 2.13, se localise donc au niveau des rides d'usure visibles à la suite de ces cratères, dans le sens du frottement.

34 rides d'usure ont été dénombrées sur cet échantillon. Afin d'obtenir un ordre de grandeur de la longueur de ces rides, une moyenne a été effectuée sur les 34 rides identifiées : la ride moyenne possède une longueur de 896 μm et une largeur de 225 μm.

Afin de caractériser plus en détail la morphologie des rides de l'échantillon SBR_d, un focus a été réalisé sur la ride numéro 16. Cette ride étant la plus proche d'une ride moyenne au regard de sa longueur et de sa largeur. Comme précédemment pour la ride de l'échantillon IR_{d3}, la pente et la hauteur présentées par la suite seront des moyennes de 5 coupes réalisées sur la ride numéro 16. Une pente moyenne de 38,4% a été mesurée, et une hauteur moyenne de 273 μm.

La pente est donc très semblable à celle observée sur l'échantillon IR_{d3}.Cependant, la hauteur de la ride observée sur l'échantillon SBR_d est moindre. Cette ride étant uniforme sur le diamètre de l'échantillon, cela induit une perte de masse plus faible pour SBR_d, comme mentionné sur la figure 2.13.

En conclusion, les faciès d'usure observés sont représentatifs des endommagements traditionnellement observés sur les élastomères. Les analyses qualitative et quantitative réalisées sont cohérentes : les faciès d'usure caractéristiques de modes d'endommagement sévères sont associés à une perte de masse plus conséquente. Le rôle de la matrice est

également clairement visible : la matrice SBR conduit à des usures réduites, aussi bien en termes de faciès que de perte de masse, comparativement à la matrice polyisoprène. Ces résultats confirment les observations de la littérature en soulignant la meilleure tenue à l'usure abrasive des élastomères à base SBR [2.18][2.19].

7. Retour des athlètes en compétition

A l'issue des essais en laboratoire, de réelles différences de comportement tribologiques ont été révélées entre les échantillons, que ce soit en termes de frottement, ou d'usure. Certains de ces échantillons ont ainsi été fournis aux athlètes afin d'obtenir un retour d'expérience sur le terrain sous sollicitations réelles. Plusieurs visites sur leur lieu d'entrainement ont également été programmés tout au long de ces travaux afin de faciliter les échanges sur les échantillons testés.

a. Validation des essais laboratoire sur la piste

Pour valider la pertinence des essais mis en place au laboratoire, cinq échantillons ont été envoyés sous forme de plaque aux athlètes. Après avoir découpé ces plaques aux bonnes dimensions pour les coller sur leurs gants, les athlètes ont testé ces échantillons à l'entrainement puis en compétition. Les échantillons fournis sont les suivants : IIR_0, IIR_{a1}, IIR_{a2}, IR_0 et IR_{d2}.

Afin d'objectiver le ressenti des athlètes, un questionnaire a été conçu et fourni (Annexe 2). Ce questionnaire a été envoyé à 5 athlètes, ainsi qu'à l'entraineur de l'équipe de France, lui-même ancien athlète de niveau international. Les tests ont été réalisés lors d'une semaine d'entrainement de l'équipe de France à Dubaï dans des conditions sèches et chaudes. Il est demandé aux athlètes de noter sur une échelle de 1 à 10, la performance du caoutchouc sur trois items, le grip, l'usure et la facilité de collage sur le gant. La note de la plaque de référence, précédemment utilisée par les athlètes étant de 5, une note de 6 à 10 correspond donc à une amélioration de la performance. La figure 2.20 présente les résultats en termes de performances de grip pour les cinq échantillons fournis, mis en parallèle avec les résultats obtenus sur le tribomètre LORRY en laboratoire.

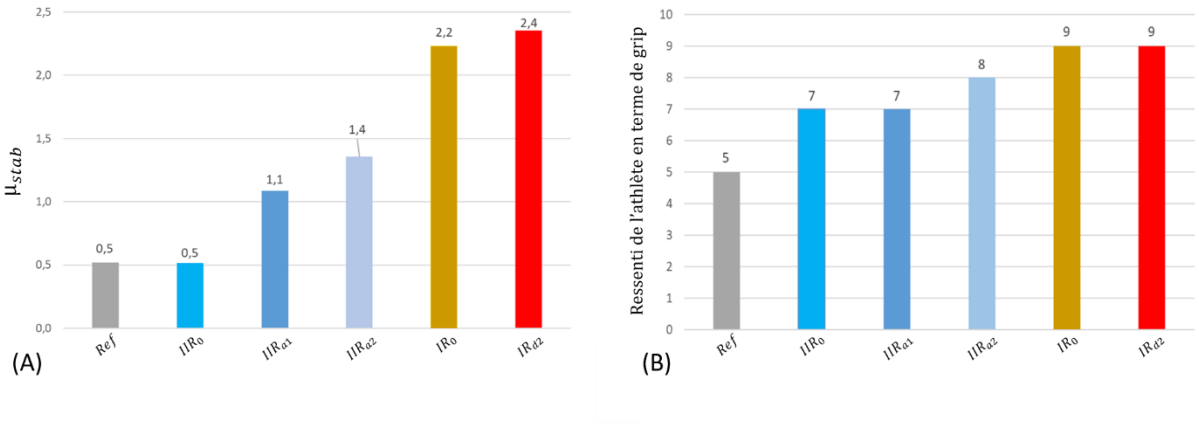


FIGURE 2.20 : CORRELATION ENTRE LE FROTTEMENT MESURE SUR LE TRIBOMETRE LORRY (A) ET LE RESSENTI EN TERME DE GRIP PAR LES ATHLETES AYANT TESTE LES ECHANTILLONS SUR LE TERRAIN (B). LES ECHANTILLONS A BASE D'IR POSSEDE UN MEILLEUR FROTTEMENT STABILISE QUE LES ECHANTILLONS A BASE IIR ET QUE L'ECHANTILLON DE REFERENCE. LES ATHLETES RESSENTENT CETTE AMELIORATION ENTRE LES DIFFERENTS ECHANTILLONS

Une bonne corrélation est observée entre les essais effectués en laboratoire et le ressenti des athlètes. Ces derniers donnent la meilleure note (9/10) aux deux échantillons avec une base de polyisoprène IR. Cela correspond à l'échelle laboratoire, aux deux échantillons ayant les niveaux de frottement les plus élevés parmi les 5 fournis. Les athlètes sont également capables de différencier la proportion de résine ajoutée dans le mélange puisque l'IIR_{a2}, avec 15% de résine *a* obtient une meilleure note (8/10) que l'IIR_0 et l'IIR_{a1}, tous deux à 7/10. La seule différence se situe donc au niveau de l'échantillon IIR_0 qui obtient une note de 7, bien qu'en laboratoire, le coefficient de frottement stabilisé soit égal à celui de la plaque de référence.

Le résultat global est donc satisfaisant et permet de valider notre approche en laboratoire. Le coefficient de frottement stabilisé traduit bien le ressenti de l'athlète en termes de grip.

Concernant l'usure, le retour effectué est le suivant : « l'usure laisse des petits déchets de caoutchouc qui peuvent perturber la poussée (légère perte de grip) ». Ce commentaire, accompagné de la photo de la figure 2.21 vient également corréler nos observations en laboratoire. Cette photo correspond à l'échantillon IR_0 collé sur le gant de Denis Lemeunier, entraîneur de l'équipe de France de la section fauteuil roulant de compétition en para-athlétisme, et ancien athlète de haut niveau. La photo a été prise après plusieurs entraînements, pour une distance de 40 km parcourus en fauteuil.

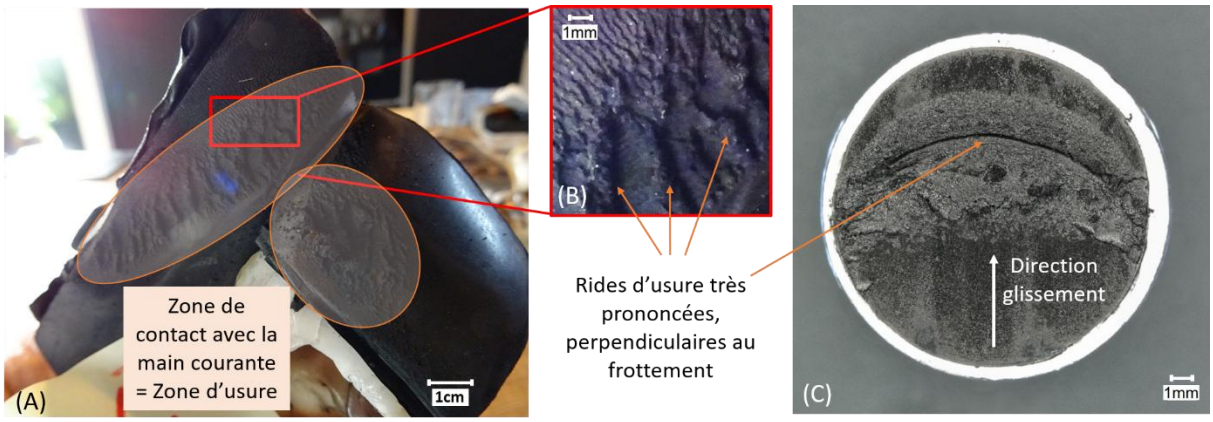


FIGURE 2.21 : PHOTO DU GANT DE DENIS LEMEUNIER PRISE APRES 40KM D'ENTRAINEMENT (A). L'ECHANTILLON IR_0 COLLE SUR LE GANT PRESENTE UNE USURE IMPORTANTE AVEC LA PRESENCE DE RIDES PERPENDICULAIRES AU SENS DE GLISSEMENT (B). IL S'AGIT DU MEME FACIES D'USURE QUE CELUI OBSERVE EN LABORATOIRE REPRESENTANT L'ECHANTILLON IR_0 APRES UN ESSAI DE 2500 CYCLES (C)

Confirmant les observations effectuées en laboratoire, des rides d'usures perpendiculaires au frottement sont visibles sur le gant. De plus, les rides observées sur le gant ont des caractéristiques géométriques du même ordre de grandeur que celles des rides d'usure issues des essais en laboratoire : une longueur allant jusqu'au centimètre, et une hauteur de crête de quelques millimètres.

La corrélation pour les faciès d'endommagement, entre les essais sur le tribomètre et les essais sur le terrain est donc très satisfaisante et valide également la démarche proposée.

b. Retour d'expérience des athlètes

La première campagne d'essais menée avec les athlètes a permis de valider la démarche scientifique utilisée en laboratoire en discriminant les différents échantillons et en classant leur « performance » en situation d'entraînement conformément aux résultats obtenus en laboratoire. Mais de nouvelles informations sont également ressorties de ces essais. Les athlètes ont par exemple pu estimer la durée de vie des échantillons à base d'IR à 40-60 km. Ils qualifient cette usure de « très rapide », et ajoutent qu'après ces distances, « le grip devient moins bon ».

Pour pallier cette problématique, compte-tenu des mesures effectuées en laboratoire et des résultats obtenus, l'échantillon SBR_d a été proposé aux athlètes lors d'une nouvelle campagne d'essais. Le ressenti concernant le grip est toujours très satisfaisant pour les athlètes, ce qui confirme nos essais effectués en laboratoire montrant un coefficient de 1,9 (comparé au coefficient de 0,5 pour l'échantillon de référence). Le faciès d'usure après plusieurs kilomètres d'entrainement est également semblable à celui observé en laboratoire. Néanmoins, cette usure est beaucoup plus facile à gérer au quotidien pour les athlètes : « le peluchage est moins important que pour les précédentes plaques (correspondant aux échantillons IR_0 et IR_{d2}) et peut être enlevé au papier de verre entre les courses ». L'usure de l'échantillon SBR_d est qualifié d'assez rapide, mais le désagrément qui en résulte peut être plus facilement contourné

par l'athlète, ce qui rejoint les observations faites en laboratoire (les rides d'usure de faible hauteur, visible à la figure 2.19).

c. Aide au choix des matériaux

Ces travaux permettent de proposer aux athlètes des matériaux adaptés à chacun, en optimisant les caractéristiques jugées importantes dans le contact gant/main courante. L'objectif est donc d'identifier le caoutchouc ayant le meilleur comportement en frottement, sans que l'usure ne devienne une gêne rédhibitoire pour l'athlète. Ce compromis dépend de nombreux critères qui sont détaillés dans la suite.

Une contrainte forte imposée par l'athlète est de ne pas avoir à changer le revêtement du gant pendant une compétition. Cela s'explique par le temps du collage assez long et la difficulté d'avoir un collage homogène, sans bulle d'air. Ainsi, selon les distances et le nombre de courses sur lesquels s'aligne l'athlète en compétition, le gant aura plus ou moins le temps de s'user. Le temps d'échauffement et des entrainements entre les courses est aussi à prendre en compte dans la comptabilisation des kilomètres parcourus pendant une compétition.

Le type d'handicap de l'athlète, et la force de boxage qu'il est capable de générer entrent également en compte lors du choix du revêtement. Les athlètes français concourant en fauteuil roulant sont classés dans deux catégories de handicap : les T53 et les T54. La différence entre ces deux catégories se situe dans l'usage des muscles du tronc et des abdominaux. Les athlètes T53 ont un tronc très peu fonctionnel, voire inactif, tandis que les athlètes classés en T54 ont un contrôle partiel de leur tronc, leur permettant généralement de développer une force de boxage plus importante. Cela entraine une sévérisation des conditions tribologiques appliquées au contact et une usure du caoutchouc plus importante et plus rapide.

A l'issue des essais effectués sur les plaques à base de butyle et de polyisoprène, l'entraîneur français Denis Lemeunier résumait : « Je dirais que pour un sprinter ou un T53, les n°4 et/ou n°5 (correspondant aux échantillons IR_0 et IR_{d2}) sont bien voire très bien (cf Brice Chesnais et Paul Singer) ».

Néanmoins, ces échantillons n'ont pas convaincu tous les athlètes, notamment Julien Casoli, athlète classé T54 spécialiste 800 m, 1500 m et 5000 m. L'échantillon SBR_d lui a donc été proposé compte tenu de son handicap et des longues distances pratiquées. Ce nouvel échantillon, avec une usure plus facilement éliminable entre les courses lui convient mieux, et a donc été adopté.

8. Conclusions

Ce chapitre s'est intéressé au contact entre le gant et la main courante en se focalisant en particulier sur le contrôle de l'adhérence, levier important de l'amélioration de la performance. L'objectif de ce chapitre était d'identifier des formulations d'élastomère capables de répondre au cahier des charges propre au boxage de la main courante. La stratégie mise en place, avec

des essais tribologiques laboratoire reproduisant les principales caractéristiques de l'impact glissant réel, a permis d'analyser à la fois le niveau de frottement et la tenue à l'usure de différentes formulations d'élastomères en jouant sur leurs compositions notamment la nature et la proportion des différents composants : matrice/résine tackifiante/charges.

Nous avons ainsi pu montrer que le niveau de frottement dépend de la concentration de la résine tackifiante mais surtout de la composition chimique de la matrice. Ces choix de formulation se répercutent également sur la tenue à l'usure des élastomères chargés. Ces résultats ont été validés par les athlètes lors d'entrainements et de courses en compétition. Ceci démontre la pertinence de l'approche et de la méthodologie proposées comme outil d'aide à la formulation. De plus, ce travail a permis d'identifier des clés physico-chimiques de contrôle de l'adhérence.

9. Bibliographie :

[2.1] Y. Vanlandewijck, D. Theisen et D. Daly, « Wheelchair propulsion biomechanics: Implications for wheelchair sports », Sports Medicine, 31, pp 339-367, 2001.

[2.2] D. Wang, X. Chen, X. Xie, H. Stanjek, M. Oeser et B. Steinauer, « A study of the laboratory polishing behavior of granite as road surfacing aggregate », Construction and Building Materials, 89, pp 25-35, 2015.

[2.3] C. Chanal, J. Galipaud, B. Moreaux, J-L. Loubet et P. Sotta, « Characterization of oxidative processes associated to low-severity tire tread wear », Wear, 566-567, 2025.

[2.4] Y. De Zélicourt, « Applications des caoutchoucs hors pneu », Données statistiques et économiques, Techniques de l'ingénieur, article en ligne AM8605, 2020.

[2.5] G. Petitet et M. Barquins, « Matériaux caoutchouteux », Presses polytechniques et universitaires romandes, pp 61-62, 342-345, 2008.

[2.6] R. Zafarmehrabian, S. Taghvaei, M.H.R Ghoreishy et M. Davallu, « The effects of silica/carbon black ratio on the dynamic properties of the tread compounds in truck tires », E-Journal of Chemistry, 9, pp 1102-1112, 2012.

[2.7] J-B. Donnet, R.C. Bansal et M-J Wang, « Carbon Black », Science and Technology Second Edition, pp 289, 1193.

[2.8] B. Adoté Sitour, « Effet de taille dans les polymères nano-renforcés : caractérisation multi-échelles et modélisation », Thèse, Université de Technologie de Compiègne, 2018.

[2.9] T. Zhang, J. Su, Y. Shu, F. Shen et L. Ke, « Fretting Wear Behavior of Three Kinds of Rubbers under Sphere-On-Flat Contact », Materials, 14, 2021.

[2.10] P. Sae-oui, K. Suchiva, C. Sirisinha, W. Intiya, P. Yodjun et U. Thepsuwan, « Effects of Blend Ratio and SBR Type on Properties of Carbon Black-Filled and Silica-Filled SBR/BR Tire Tread Compounds », Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2017, 2017.

[2.11] C. Chanal, « Étude expérimentale et compréhension des mécanismes d'usure douce d'élastomères renforcés modèles », Thèse, Université de Lyon, 2025.

[2.12] G. Petitet, J-L Loubet, H. Zahouani, D. Mazuyer, « A Contribution to the Understanding of Elementary Wear Mechanisms of Rubber Filled Compounds », Rubber Chemical Technology, 78, pp 312-320, 2015.

[2.13] A. Schallamach, « Abrasion of rubber by a needle », J. Polym. Sci., 9, pp 385-404, 1952.

[2.14] A. Schallamach, « Abrasion pattern on rubber », Rubber Chemistry and Technology, 23, pp 230-241, 1953.

[2.15] A.K. Bhowmick, « Ridge Formation during the Abrasion of Elastomers », Rubber Chemistry and Technology, 55, pp 1055-1062, 1982.

[2.16] Y. Uchiyama et Y. Ishino, « Pattern abrasion mechanism of rubber », Wear, 158, pp 141-155, 1992

[2.17] N.S.M. El-Tayeb et R.Md. Nasir, « Effect of soft carbon black on tribology of deproteinised and polyisoprene rubbers », Wear, 262, pp 350-361, 2007

[2.18] P. Thavamani, D. Khastgir et A.K. Bhowmick, « Microscopic studies on the mechanisms of wear of NR, SBR and HNBR vulcanizates under different conditions », Journal of Materials Science, 28, pp 6318-6322, 1993

[2.19] H. Liang, Y. Fukahori, A.G. Thomas et J.J.C. Busfield, « The steady state abrasion of rubber: Why are the weakest rubber compounds so good in abrasion? », Wear, 268, pp 756-762, 2010.

Chapitre III : Analyse du contact pneu/piste d'athlétisme :

Effet de la topographie et de la mécanique des matériaux

1. Introduction

Le deuxième axe d'amélioration identifié lors des discussions avec la fédération handisport est la diminution de la dissipation au sein du contact entre le pneu et la piste d'athlétisme. Afin de mieux analyser cette interaction pneu/piste, une analyse mécanique de la cinématique en compétition du contact entre le pneu et la piste est réalisée. Elle conduit à proposer une stratégie de simulation expérimentale de ce contact en laboratoire en combinant une piste d'athlétisme et un élastomère représentatif de la bande de roulement du boyau. Les propriétés morphologiques et mécaniques de ces deux corps seront étudiées individuellement puis reliées à leur réponse tribologique.

2. Simulation expérimentale du contact pneu/piste d'athlétisme en laboratoire

a. Analyse cinématique du contact réel

Pour les Jeux Paralympiques de Paris 2024, les athlètes concourant en fauteuil roulant ont la possibilité de s'aligner sur six courses, allant du 100 m au marathon. Selon la longueur de la course, les cinématiques varient singulièrement.

Pour les épreuves dites de sprint (100 m et 400 m), l'athlète adopte une cadence de boxage élevée (de l'ordre de 100 à 120 poussées par minute) et des poussées brèves et puissantes, visant l'explosivité. Il atteint sa vitesse maximale, pouvant aller jusqu'à 8 m/s, en quelques secondes [3.1][3.2]. Pour les courses de fond (5000 m et marathon aux Jeux Paralympiques), économiser l'énergie et la répartir sur la durée de l'effort est une des compétences clés à maîtriser pour viser la performance. Cela se traduit par une cadence plus basse (pouvant descendre à 50 poussées par minute lors des phases où l'athlète reste dans l'aspiration du concurrent qui le précède) et une poussée plus ample et relâchée pour optimiser l'endurance [3.2]. Les athlètes atteignent plus progressivement leur vitesse de croisière, et modèrent l'intensité du boxage pour maintenir l'effort sur la distance [3.3].

Entre ces deux catégories extrêmes, se situent les courses de demi-fond (800 m et 1500 m) avec une cinématique de course intermédiaire : les athlètes accélèrent dans un premier temps pendant une quinzaine de secondes pour atteindre environ 80 à 90% de leur vitesse maximale,

puis adoptent une cadence de boxage plus modérée pour maintenir cette vitesse stable mais économiser leurs forces en vue du sprint final [3.3].

Ainsi, à titre d'exemple des vitesses que peuvent atteindre un athlète en fauteuil roulant en compétition, le record de France de la catégorie T53 en 800 m détenu par Pierre Fairbank en 1''32'28, correspond à une vitesse moyenne de 31,2 km/h, avec une vitesse maximale aux alentours de 32 km/h $(i.e.\ 8{,}9\ m/s)$. Pour les pneus des fauteuils roulants montés sur des roues de 28 pouces de diamètre, soit 700 mm, cette vitesse linéaire correspond à une vitesse de rotation de 243 tr/min.

En raison de la compression du pneu, celui-ci glisse sur une longueur u à l'interface avec la piste. Cette longueur glissée peut être estimée à partir de la différence entre l'arc de cercle du pneu non déformé d et la longueur du contact réel du pneu $2l$ [3.4]. Ces grandeurs, d et $2l$, sont représentées sur la figure 3.1.

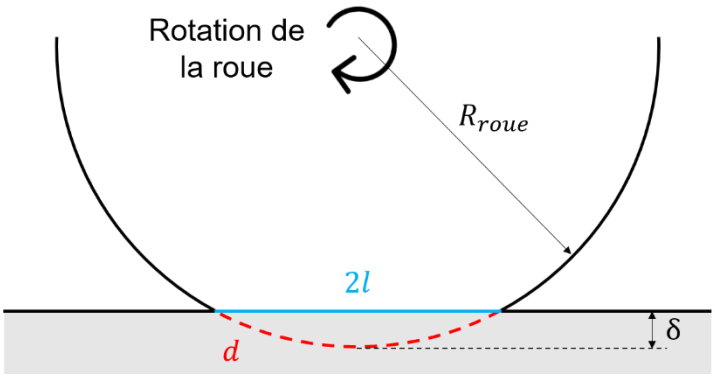


FIGURE 3.1 : SCHEMA DE LA ZONE DE CONTACT ENTRE UN PNEU ET LE SOL. UNE LONGUEUR GLISSEE EST CREEE DUE A LA DEFORMATION DU PNEU, CETTE LONGUEUR EST LA DIFFERENCE ENTRE D ET 2L. (ADAPTE DE [3.4])

Pour estimer la longueur du contact réel $2l$ en contact statique, une simulation du contact a été réalisée en plaçant la roue arrière d'un vélo de diamètre 700 mm de diamètre sur un échantillon rectangulaire de piste d'athlétisme. Dans le milieu du cyclisme, il est courant d'approximer la pression de contact par la pression de gonflage, cette dernière étant utilisée pour estimer la taille de la zone de contact sous une charge donnée [3.5]. Actuellement, les athlètes gonflent leurs pneus entre 3 et 4 $bars$, mais cette valeur atteignait jusqu'à 9 $bars$ avant nos travaux. Un athlète handisport-fauteuil de haut niveau pèse aux alentours de 60 kg. En faisant l'hypothèse que le poids se répartit sur les deux roues arrières, que la roue avant ne supporte que peu de poids, et en ajoutant les 10 kg du fauteuil, nous obtenons un poids soutenu par chaque roue arrière de 35 kg, soit une force normale de 343 N par pneu arrière. Pour une pression de 3 $bars$, cela correspond à une aire apparente de contact de 11,4 cm^2.

Pour reproduire une pression de contact comparable à celle d'un fauteuil de course, la roue de vélo a été lestée avec un poids de 30 kg, soit la moitié du poids de l'athlète réparti sur les deux roues arrière. Une feuille de papier pression a été intercalée à l'interface sol-pneu : elle contient des microcapsules qui éclatent sous effet de la charge libérant un colorant, ce qui permet de capturer et cartographier précisément la zone de contact. Cette empreinte, visible en figure 3.2, donne une longueur $2l = 101\ mm$, pour une aire apparente de 14 cm^2, ce qui représente un ordre de grandeur cohérent avec les estimations précédentes.

Cette différence entre l'aire mesurée (14 cm^2) et l'aire théorique (11,4 cm^2) s'explique notamment par l'hypothèse faite dans nos calculs, selon laquelle la pression de contact est égale à la pression de gonflage. Cela reste une approximation qui suppose une pression uniforme, ce qui n'est pas rigoureusement exact. En pratique, la déformation réelle du pneu, la flexibilité de la carcasse et la variation locale de pression génèrent des écarts.

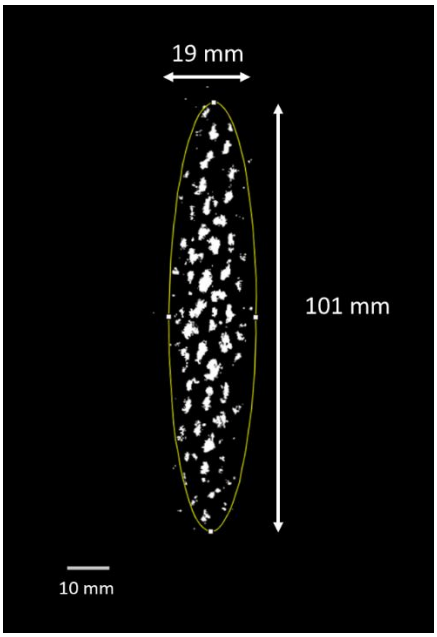


FIGURE 3.2 : SURFACE DE CONTACT ENTRE UN PNEU DE VELO ET UNE PISTE D'ATHLETISME, OBTENUE A PARTIR DE LA TECHNOLOGIE DU PAPIER PRESSION. EN BLANC, EST REPRESENTEE LA ZONE EN CONTACT ET UNE ELLIPSE JAUNE DONT LES DIMENSIONS SONT INDIQUEES, EST AJUSTEE SUR LE CONTACT

La distance d est un arc de cercle de longueur :

$$d = 2R_{roue}\arcsin(\frac{l}{R_{roue}})$$

La longueur glissée u correspond donc à la différence entre d et $2l$. En utilisant le développement limité d'ordre 2 de la fonction $arcsinus$, l'équation suivante est obtenue :

$$u = 2R_{roue}\arcsin\left(\frac{l}{R_{roue}}\right) - 2l \approx \frac{l^3}{3R_{roue}^2}$$

Dans notre cas, avec $l = 50{,}5\ mm$ et $R_{roue} = 350\ mm$, nous obtenons une longueur glissée $u = 0{,}35\ mm$.

Pour une vitesse $v_{fauteuil}$ de $8{,}9\ m/s$, un point du pneu restera donc avec le sol pendant le temps caractéristique suivant :

$$t_c = \frac{2l}{v_{fauteuil}} = 11.10^{-3}\ s$$

La vitesse de glissement v_g est alors calculée par le ratio de la longueur glissée sur le temps de contact déterminé précédemment :

$$v_g = \frac{u}{t_c} = 31{,}8\ mm/s$$

Avec cette valeur de vitesse de glissement, nous pouvons introduire un paramètre permettant de quantifier le taux de glissement : le « Slide-Roll Ratio », abrévié SRR, est le rapport entre la vitesse de glissement, et la vitesse d'entrainement, correspondant à la vitesse du fauteuil divisée par deux dans notre cas :

$$SRR = \frac{v_g}{v_e} \approx 0{,}72\ \%$$

b. Reproduction du contact pneu/piste en laboratoire

Afin de reproduire les cinématiques appliquées au contact pneu/piste, le tribomètre LUG (illustré sur la figure 3.3), développé au LTDS [3.6], a été utilisé au cours de ces travaux de thèse. Il permet la mesure simultanée des efforts de contact et des moments pour une cinématique de contact contrôlée avec un mouvement simultané et indépendant entre un disque (qui représentera ici le sol) et élastomère en forme de tonneau (qui représentera le pneu). La polyvalence du tribomètre permet également de tester différents échantillons.

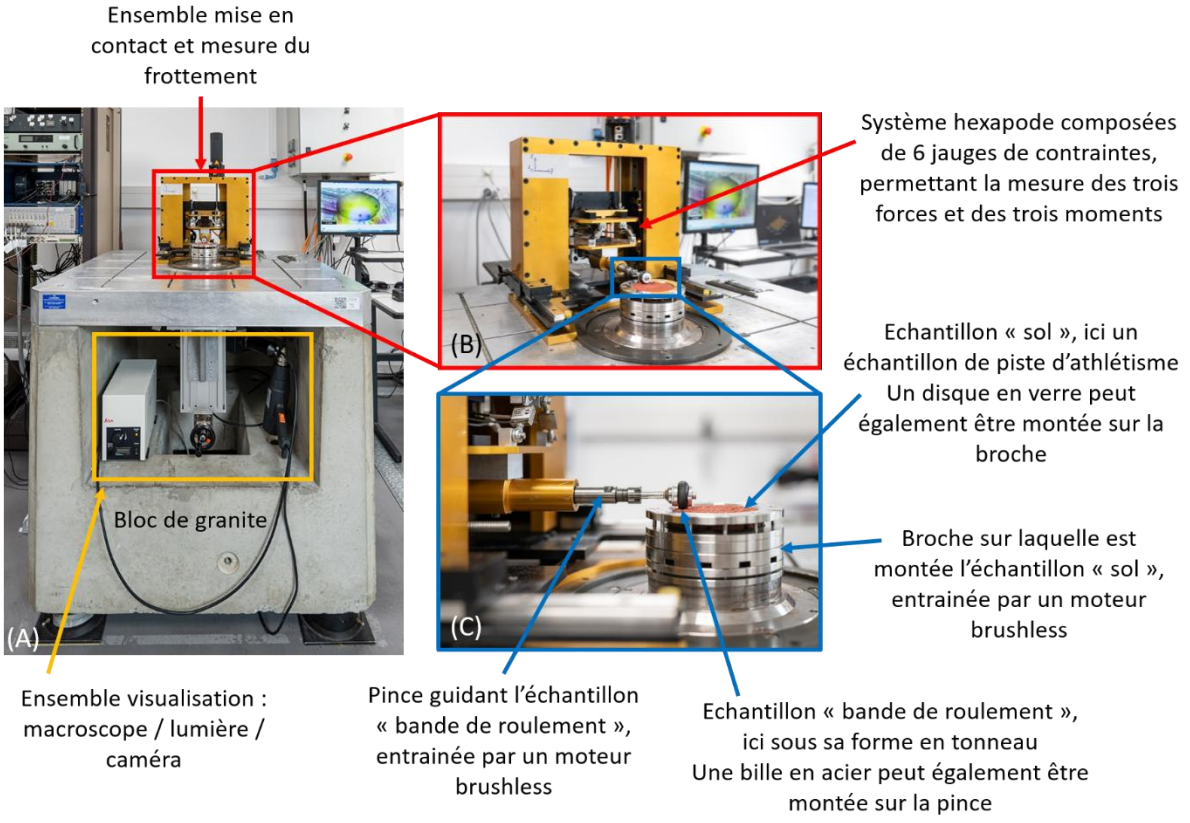


FIGURE 3.3 : ILLUSTRATION DU TRIBOMETRE LUG (A), DE SON SYSTEME DE MESURE DES FORCES ET DES MOMENTS (B), ET DE SA CONFIGURATION POUR LE CONTACT BANDE DE ROULEMENT/PISTE D'ATHLETISME (C)

Le premier solide représente le sol : selon les essais, un disque en silice transparent ou un disque de piste d'athlétisme sera monté sur le tribomètre. Ces échantillons d'un diamètre de 90 mm sont fixés sur un support circulaire, lui-même monté sur une broche verticale de haute précision. Cette broche est entraînée par un moteur synchrone brushless (Kollmorgen, AKM64L-ANCNR-00), permettant des vitesses de rotation comprises entre 0.001 et 3500 tr/min, soit une vitesse linéaire maximale de 14,7 m/s. La vitesse et la position de la broche

sont mesurées à haute fréquence (environ 1650 Hz) à l'aide d'un encodeur haute résolution de marque Renishaw, offrant une précision de 0,001°.

Le second solide représentant la bande de roulement du pneu ou une bille en acier pour des essais plus fondamentaux, est monté sur un axe motorisé. L'axe est mis en rotation par un second servomoteur brushless (Kollmorgen, AKM22E-ANBNR-00) allant jusqu'à une vitesse de 8000 tr/min. Compte-tenu du diamètre des échantillons utilisés, compris ici entre 10 et 20 mm, cela correspond à une vitesse linéaire maximale de 10 m/s.

Le contrôle simultané et indépendant de chacun des deux moteurs entraînant les deux solides à la vitesse souhaitée donne accès à des cinématiques de contact variées, allant du roulement pur (les vitesses des deux solides au centre du contact sont égales) au glissement (un des solides est à l'arrêt), en passant par des combinaisons multiples de roulement et de glissement. Un système de 6 jauges de contraintes (FSB101, TEI) disposées en configuration hexagonale permettent de mesurer des forces tangentielles et normale jusqu'à 50 N, ainsi que les trois moments autours des trois axes $\vec{x}$, $\vec{y}$ et $\vec{z}$. Les forces, les déplacements et les vitesses sont enregistrés sur un ordinateur grâce à une carte d'acquisition 16 $bits$ (NI PCI-6221) de National Instruments. Ces données peuvent ensuite être extraites pour analyse et post-traitement. La mise en contact des deux solides est réalisée grâce au déplacement vertical du support de l'échantillon représentant la bande de roulement. Ce déplacement est effectué via un troisième moteur brushless (Kollmorgen, AKM24D-ANBNR-00). Celui-ci est asservi via un régulateur PID, afin d'appliquer et mesurer une force normale constante tout au long de l'essai.

Un bloc dédié à la visualisation du contact est également installé sur le tribomètre et utilisé lorsque le disque est transparent. Ainsi, des observations in-situ in operando du contact peuvent être menées grâce à un macroscope optique (LEICA Z16 APO A). Celui-ci est fixé sur une plateforme motorisée permettant d'ajuster la position verticalement et horizontalement. Une lampe à mercure haute pression, émettant une lumière blanche, est utilisée avec une caméra (LEICA K3C) sélectionnée pour une optimisation du contraste sur les images. La résolution spatiale est de 2.4 x 2.4 $\mu m/pixel$ pour des images de 3072 x 2048 pixels, pour une fréquence d'acquisition de 15 images par seconde. Comme nous pouvons le voir dans le tableau 3.1, le tribomètre LUG possède des capacités, en particulier de contrôle de la cinématique des deux solides en contact, qui lui permettent de reproduire les conditions réelles du contact pneu/piste.

	Force normale max (N)	*Zone de contact max (mm^2)*	*Pression de contact max (MPa)*	*Vitesse d'entrainement (m/s)*	*Vitesse de glissement (m/s)*
Contact réel	345	1500	0,8	4,9	0,03
Tribomètre LUG	50	25	2	10	10

TABLEAU 3.1 : ***COMPARAISON DES PARAMETRES EXPERIMENTAUX ENTRE LE CONTACT REEL ET LE CONTACT REALISABLE SUR LE TRIBOMETRE LUG***

3. Caractérisation topographique et mécanique d'une piste d'athlétisme

La figure 3.2 illustre parfaitement la complexité de l'interface entre un pneu et la piste d'athlétisme avec des spots de contact distribués au sein du contact apparent. La piste d'athlétisme olympique, conçue, fabriquée et installée par l'entreprise Mondo S.A., possède des caractéristiques propres et imposées sur lesquelles ni les athlètes, ni les chercheurs ne peuvent agir. Toutefois, son analyse est essentielle pour mieux comprendre et maîtriser son interaction avec le pneu. En effet, des éléments tels que la texture de la surface et les propriétés viscoélastiques de cette piste influencent directement les aires de contact, les forces de contact, l'adhérence et le comportement dynamique du pneu.

a. Présentation d'une piste d'athlétisme

L'installation d'une piste d'athlétisme dans un stade doit respecter un cahier des charges rigoureux défini par la fédération internationale d'athlétisme World Athletics. Parmi les nombreuses contraintes, trois exigences clés se distinguent : une épaisseur de piste comprise entre 12 et 14 mm, une déformation de surface entre 0,6 et 2,6 mm, et une réduction de force située entre 35 % et 50 %. Cette dernière valeur provient d'un essai qui simule l'impact du pied humain sur la surface. Il consiste à enregistrer la force de réaction générée lors de la chute d'un poids standardisé de 20 kg, puis à la comparer à celle d'une surface de référence rigide. Ce test permet de quantifier la capacité d'amortissement de la piste, exprimée en pourcentage. Ces réglementations sont détaillées dans l'annexe 3.

Une collaboration a été établie entre World Athletics et l'entreprise Mondo S.A. afin d'équiper les stades accueillant les grandes compétitions internationales, telles que les Jeux Olympiques et les Championnats du Monde. Dans le cadre de ces travaux de thèse, Mondo a fourni deux échantillons de piste : la Mondotrack WS (abrégée WS) et la Sportflex Super X 720 K39 (abrégée SSX). La piste WS, utilisée lors des Jeux Olympiques et Paralympiques de Tokyo en 2021, intègre les technologies les plus proches de celle des Jeux de Paris en 2024. Quant à la piste SSX, elle est couramment installée en France dans divers stades et salles pour des compétitions nationales et internationales de moindre envergure. Elle équipe notamment la halle Stéphane Diagana de Lyon, où plusieurs essais ont été réalisés dans le cadre de ces travaux et qui seront détaillés dans le chapitre 4.

Les pistes d'athlétisme fabriquées par Mondo reposent sur un concept multicouche, combinant deux couches aux propriétés complémentaires. Ces couches sont assemblées par un processus de vulcanisation, garantissant une homogénéité optimale et une durabilité accrue dans le temps [3.7].

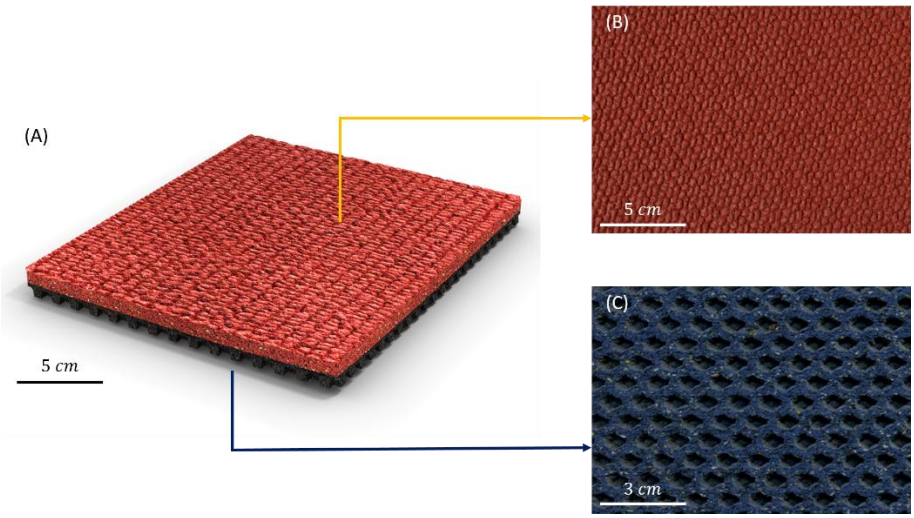


FIGURE 3.4 : EXEMPLE DE PISTE D'ATHLETISME SSX CONSTITUEE DE DEUX COUCHES (A), UNE COUCHE SUPERIEURE A LA STRUCTURE TRIDIMENSIONNELLE SPECIFIQUE (B), ET UNE COUCHE INFERIEURE ALVEOLAIRE (C) AFIN DE RESTITUER UNE PARTIE DE L'ENERGIE DISSIPEE DANS LA PISTE LORS D'UNE FOULEE

Comme le montre la figure 3.4, la couche inférieure de la piste présente une structure en nid d'abeilles composée d'alvéoles allongées. Cette géométrie permet d'absorber efficacement les chocs, réduisant ainsi le risque de blessures chez les athlètes valides, tout en stockant et en restituant l'énergie. La forme hexagonale des alvéoles contribue également à améliorer la stabilité des athlètes et à optimiser la propulsion du pied lors de la course [3.8][3.9]. Lors de l'impact du pied sur la surface, les cellules remplies d'air se compressent pour absorber les forces d'impact et les vibrations, transformant une grande partie de l'énergie cinétique fournie en énergie stockée. Lorsque le pied quitte la surface, l'air comprimé permet aux cellules de reprendre leur forme initiale, générant une poussée qui propulse l'athlète vers le haut et l'avant.

La couche supérieure possède également une géométrie brevetée, la 3D Omni-Directional Tesselation [3.10]. Cette surface est caractérisée par une structure tridimensionnelle composée de reliefs et de dépressions alternés, formant un réseau interconnecté. Ce design permet un drainage efficace de l'eau pour assurer une adhérence optimale même sur piste mouillée.

Cette présentation succincte d'une piste d'athlétisme met en évidence une conception réalisée et optimisée pour la performance des athlètes valides. Si certaines caractéristiques, comme le drainage de l'eau, peuvent également profiter aux athlètes en fauteuil roulant, d'autres, telles que la présence d'alvéoles dans la couche inférieure, peuvent s'avérer défavorables. Afin d'approfondir la compréhension des interactions entre le pneu et la piste, la morphologie de la surface de la piste et ses propriétés mécaniques en volume ont été plus particulièrement caractérisées.

b. Analyse topographique de la piste d'athlétisme

Lors d'une course en fauteuil roulant, le contact sur piste diffère significativement de celui du pied. Cette section sera consacrée à l'analyse de la topographie de surface des deux pistes disponibles afin de mieux identifier la zone de contact entre les roues du fauteuil et le sol. Deux outils ont été utilisés pour caractériser la surface des deux pistes d'athlétisme à différentes échelles :

- un interféromètre optique Brüker GT-K1, dont le principe de fonctionnement est basé sur l'interférométrie de Michelson et utilisé ici en lumière verte. Cet outil permet une haute précision (résolution latérale inférieure à 0,5 μm dans les conditions d'utilisation) sur une petite zone 0,1x0,1 mm^2. La résolution verticale est quant à elle inférieure à 1 nm. Cette grande résolution verticale induit un temps d'analyse plus conséquent que le microscope numérique.
- le microscope numérique présenté précédemment au chapitre 2 fournit des images topographiques d'une taille plus importante dans un délai plus rapide. La mesure est reconstruite en 3D grâce à un balayage vertical. Ce balayage vertical ajuste progressivement la mise au point sur différents plans de la surface, puis à chaque plan focal, une image est prise. En analysant la netteté de chaque pixel sur l'ensemble de la série, il est possible de déterminer à quelle profondeur ce pixel est le plus net, donc où il se situe dans l'espace. Ce processus permet de reconstruire une image 3D fidèle de la surface observée, d'une taille significative, de 3x3 cm^2, pour une surface plus représentative des aires de contact considérées. Le grossissement x30 a été choisi comme compromis entre la résolution verticale suffisante pour capter les aspérités de la surface, tout en conservant un champ d'observation suffisamment large pour intégrer la topographie réelle de la zone de contact.

L'analyse topographique s'appuie sur des paramètres statistiques caractéristiques des surfaces. Classiquement, on définit la rugosité moyenne arithmétique S_a et quadratique S_q, par les expressions suivantes :

$$S_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \quad et \quad S_q = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2}$$

Pour les deux pistes étudiées, les valeurs de S_a mesurées avec un grossissement de x30, sur une zone de 3x3 cm^2, se révèlent très proches. La piste SSX présente une rugosité moyenne de $343{,}5 \pm 43\ \mu m$, tandis que la piste WS affiche une valeur de $348{,}6 \pm 20\ \mu m$.

Néanmoins, ce paramètre d'ordre faible ne traduit pas toute la complexité des topographies de surfaces des deux pistes. En particulier, sur la couche supérieure, des directions préférentielles sont clairement visibles, comme le montre la figure 3.5 ((A) et (B), respectivement pour les pistes SSX et WS). Sur cette figure, l'axe vertical correspond au sens de la piste. Lors de la pose d'une piste d'athlétisme, la couche inférieure alvéolée est installée de manière à aligner les alvéoles dans ce sens longitudinal, en cohérence avec la direction des appuis et des sollicitations mécaniques lors de la foulée. Le chevauchement des aspérités irrégulières de la piste SSX va conférer une direction privilégiée assez marquée dans le sens de la piste, correspondant aux lignes bleues sur la figure 3.5 (A). En revanche, pour la piste WS (figure 3.5 (B)), trois directions distinctes sont identifiées, mais aucune ne correspond à l'orientation des alvéoles de la couche inférieure. Ces directions sont orientées à 25°, 50° et 80°, par rapport à la verticale (c'est-à-dire la direction de la course des athlètes valides ou non - cf. figure 3.5) respectivement pour les lignes jaunes, vertes et bleues.

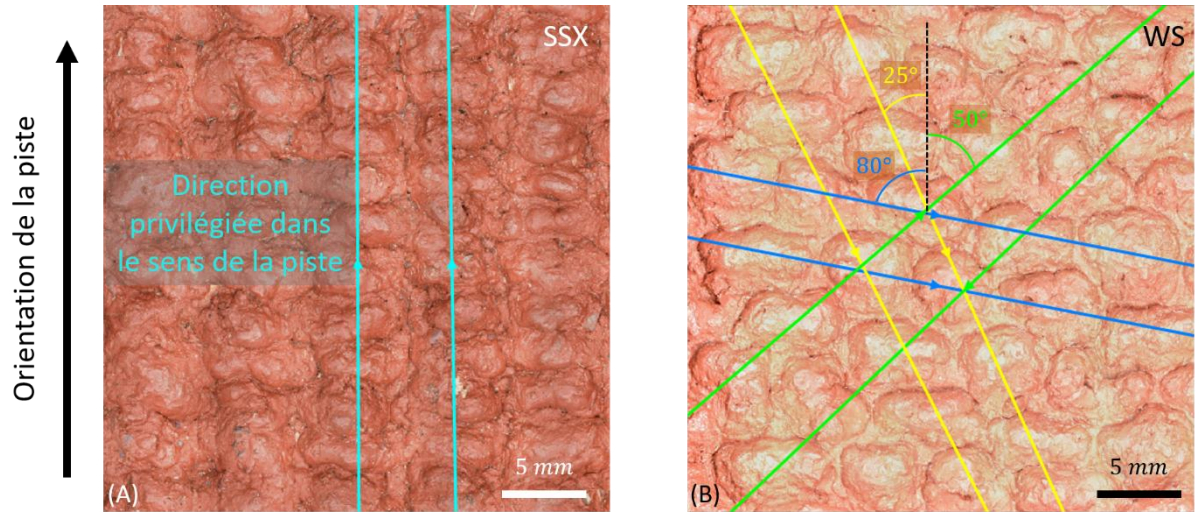


FIGURE 3.5 : ANALYSE DE LA DISPOSITION DES ASPERITES DE LA COUCHE SUPERIEURE DES PISTES SSX (A) ET WS (B) ORIENTEES SELON DES DIRECTIONS PRIVILEGIEES

Afin de caractériser plus précisément ces directions préférentielles, d'autres paramètres de rugosité sont utilisés. Par exemple, le paramètre de Skewness permet d'évaluer la symétrie des hauteurs par rapport à une ligne moyenne [3.11]. Ce coefficient d'asymétrie est le moment d'ordre 3 de la distribution de hauteur des aspérités, et se calcule de la manière suivante :

$$R_{sk} = \frac{1}{nR_q^3}\sum_{i=1}^{n} y_i^3$$

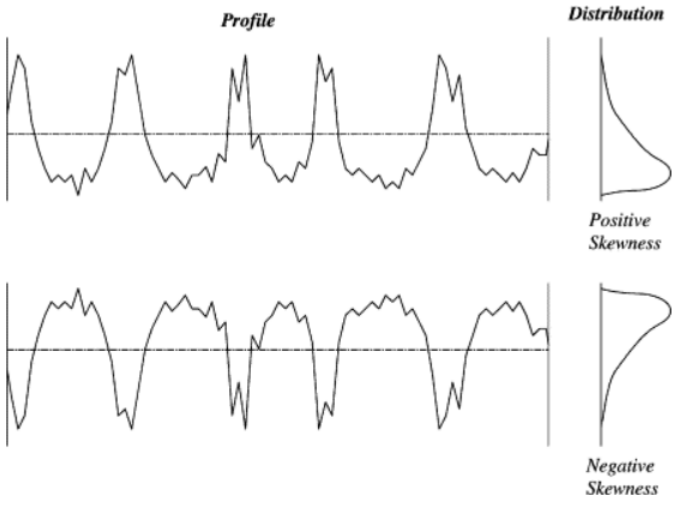


FIGURE 3.6 : DEFINITION DU PARAMETRE DE SKEWNESS [3.11]

Un profil dont la répartition des hauteurs est symétrique, avec autant de pics que de vallées, présente une dissymétrie nulle. Si ce sont les pics qui prédominent, le skewness est positif comme dans le cas représenté sur le graphe du haut de la figure 3.6. En revanche, si le profil comporte des vallées profondes, il est négatif (graphe au bas de la figure 3.6).

Le paramètre de Kurtosis permet quant à lui de mesurer l'aplatissement de la distribution des hauteurs d'un profil [3.11]. Ce coefficient d'aplatissement est le moment d'ordre 4 de la distribution de hauteur des aspérités, calculé comme ci-dessous :

$$R_{ku} = \frac{1}{nR_q^4}\sum_{i=1}^{n} y_i^4$$

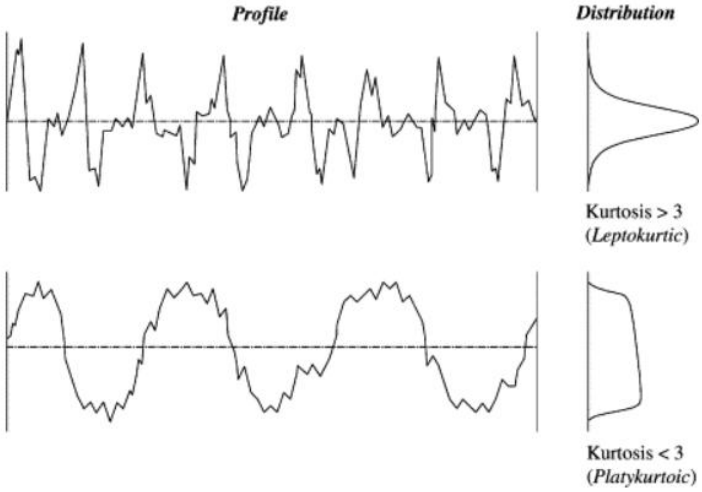


FIGURE 3.7 : DEFINITION DU PARAMETRE DE KURTOSIS [3.11]

Si ce paramètre est élevé (supérieur à 3), cela indique que la distribution des aspérités se resserre autour de sa valeur moyenne. En revanche, plus le kurtosis est faible (inférieur à 3) plus la distribution de hauteur des aspérités s'aplatit.

Afin de compléter cette analyse sur les directions privilégiées conférées aux pistes par le gaufrage de la couche supérieure, la fréquence des aspérités R_f est un bon indicateur : il correspond au nombre de sommets dénombrés par unité de longueur. Le tableau 3.2 recense les caractéristiques mesurées pour chaque direction privilégiée relevée dans la figure 3.5 :

	Skewness	Kurtosis	Fréquence des aspérités (cm^{-1})
SSX_{bleue}	*-0,91*	*2,96*	*4,05*
WS_{jaune}	*-0,63*	*2,79*	*2,47*
WS_{verte}	*-0,65*	*2,57*	*2,04*
WS_{bleue}	*-0,70*	*3,07*	*2,30*

TABLEAU 3.2 : RECAPITULATIF DES PARAMETRES DE RUGOSITE POUR CHACUNE DES DIRECTIONS PRECEDEMMENT IDENTIFIEES SUR LES DEUX PISTES D'ATHLETISME ETUDIEES

Le paramètre du Skewness est négatif pour les deux pistes, on observe ainsi plus de sommets que de vallées sur ces deux pistes. Néanmoins, on remarque que le paramètre est plus faible pour la piste SSX que pour la piste WS, ce qui traduit un ratio sommet/vallée plus important pour la piste SSX. Ce résultat est en parfaite cohérence avec l'observation visuelle : les aspérités se chevauchant, cela réduit la largeur des vallées.

Concernant l'aplatissement des sommets, pour les deux pistes, le paramètre de Kurtosis est inférieur à 3. Néanmoins, la valeur pour la piste SSX est en moyenne plus proche de 3 que celles de la piste WS, indiquant que la distribution de hauteurs des aspérités de la piste WS est plus aplatie que celle de la piste SSX. La seule valeur supérieure à 3 pour la piste WS correspond à la direction bleue, correspondant à une orientation de 80°, et donc quasiment

perpendiculaire à la direction de la foulée pour un athlète valide ou des roues du fauteuil dans notre cas.

Enfin, la fréquence des aspérités confirme le résultat fourni par le paramètre du Skewness. Un nombre moindre de vallées se traduit par une fréquence des aspérités plus élevée.

L'analyse topographique, conduite ici à partir des paramètres topographiques classiques, montre un agencement des aspérités différent entre les deux pistes d'athlétisme. Si le paramètre de Kurtosis donne un premier aperçu de l'aplanissement des aspérités, une description plus approfondie d'une aspérité type a été réalisée : visuellement, les bosses présentes sur la piste SSX sont de forme elliptique et assez irrégulières avec une tendance au rapprochement, tandis que la piste WS possède des bosses plus indépendantes les unes des autres.

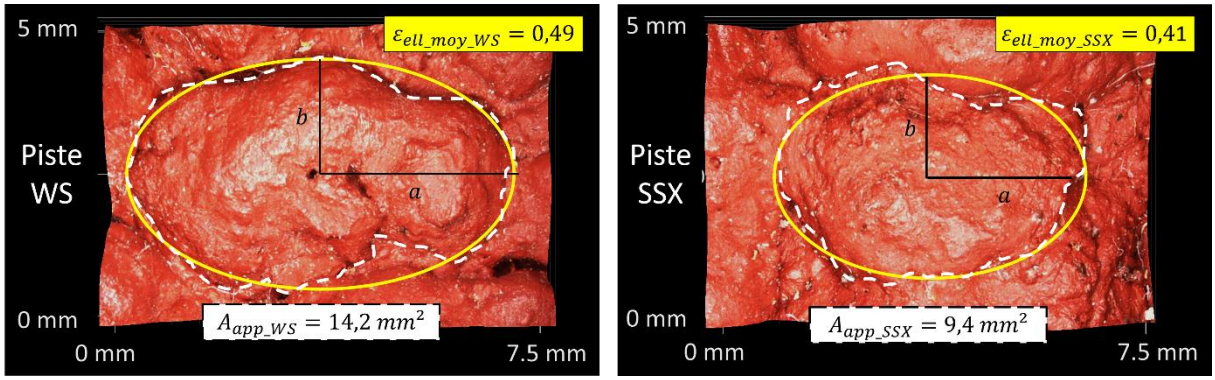


FIGURE 3.8 : VISUALISATION MOTIF CARACTERISANT LA TEXTURE DES PISTES DES PISTES WS (A) ET SSX (B). UN AJUSTEMENT ELLIPTIQUE EST EFFECTUE SUR CHACUN D'ENTRE EUX POUR QUANTIFIER LA DIFFERENCE GEOMETRIQUE DES ASPERITES DES DEUX PISTES

Pour analyser individuellement les motifs donnant la texture des pistes, 15 d'entre elles ont été manuellement détourées à l'aide du logiciel ImageJ, permettant ainsi de mesurer leur aire projetée, comme illustré par les contours en pointillés blancs sur la figure 3.8. Les résultats obtenus montrent que les motifs de la piste WS ont une aire moyenne de 14,2 $\pm$ 2,3 mm^2, soit une valeur supérieure à celle des motifs de la piste SSX, dont l'aire moyenne n'atteint que 9,4 $\pm$ 3,6 mm^2. L'écart-type plus élevé sur la piste SSX met en évidence une plus grande variabilité de la taille de ces motifs, en comparaison avec la piste WS.

Pour compléter cette analyse sur la forme des motifs, des ajustements elliptiques ont été réalisés (en jaune sur la figure 3.8). À partir de ces ellipses, les longueurs des demi-axes ont été extraites afin de calculer leur ellipticité selon la formule suivante :

$$\varepsilon_{ell} = 1 - \frac{b}{a}$$

où b représente le demi petit-axe et a le demi grand-axe.

Ainsi, lorsque les deux demi-axes sont presque identiques, l'ellipticité tend vers 0, indiquant une forme quasi-circulaire. À l'inverse, une ellipticité proche de 1 traduit une forme très allongée. Les résultats obtenus confirment l'impression visuelle donnée par les images topographiques et optiques : les motifs de la piste SSX apparaissent légèrement plus circulaires, avec une ellipticité moyenne de 0,41 $\pm$ 0,14, tandis que celles de la piste WS présentent une ellipticité plus marquée à 0,49 $\pm$ 0,07.

Bien que les deux revêtements présentent des rugosités moyennes très proches, leur analyse topographique fine révèle des organisations d'aspérités distinctes : la piste SSX privilégie une orientation longitudinale avec des sommets plus circulaires, tandis que la piste WS est formée d'aspérités plus larges et allongées, réparties selon trois directions préférentielles

c. Analyse mécanique de la piste d'athlétisme

i. Caractérisation de l'élasticité de la piste d'athlétisme

Pour évaluer les propriétés élastiques moyennes des pistes d'athlétisme et malgré leur hétérogénéité de structure et de composition, des essais de compression ont été réalisés à l'échelle macroscopique grâce à une machine de traction/compression de la série Instron 5900. La force normale exercée est mesurée pour une déformation et une vitesse de déformation fixées. L'indenteur utilisé, est un poinçon cylindrique d'un rayon de 5 cm, qui exerce une charge répartie sur plusieurs motifs de la couche supérieure de la piste. Néanmoins, sa taille a été spécifiquement choisie pour rester inférieure à celle de l'échantillon testé, soit un carré de 15 cm de côté et d'une épaisseur de 13,5 mm. La figure 3.9 illustre la mise en place de cet essai.

Néanmoins, la sollicitation dans cette configuration ne peut être considérée ni comme strictement uniaxiale, ni comme une indentation d'un milieu semi-infini, en raison de la géométrie particulière de la piste d'athlétisme. Les modèles retenus permettent ainsi de comparer le comportement des deux pistes sur une base commune. En revanche, l'interprétation physique des paramètres identifiés doit être considérée avec prudence, les hypothèses sous-jacentes à ces modèles n'étant pas pleinement satisfaites.



FIGURE 3.9 : ILLUSTRATION DE LA MACHINE DE TRACTION, L'ECHANTILLON DE PISTE EST INDENTE PAR LE POINÇON CYLINDRIQUE (A), SUR LA VUE (B) EST REPRESENTE LE PERIMETRE DE L'INDENTEUR SUR UN ECHANTILLON DE PISTE SSX

Les essais ont été menés dans des conditions quasi-statiques afin de minimiser les effets visqueux du matériau. La vitesse de déformation retenue, fixée à 0,0025 mm/s, assure une sollicitation progressive permettant d'isoler plus précisément la contribution purement élastique de la réponse du matériau. L'évolution de la contrainte de compression (négative par convention) en fonction de la déformation est présentée à la figure 3.10. La relation permettant

de relier la déformation imposée lors de l'essai à l'allongement relatif utilisé dans le modèle théorique qui suit est donnée par :

$$\lambda = \frac{h}{h_0} = 1 + \varepsilon$$

λ est l'allongement relatif, h_0 l'épaisseur initiale de l'échantillon, h son épaisseur sous charge de compression, et $\varepsilon = (h - h_0)/h_0$ la déformation associée.

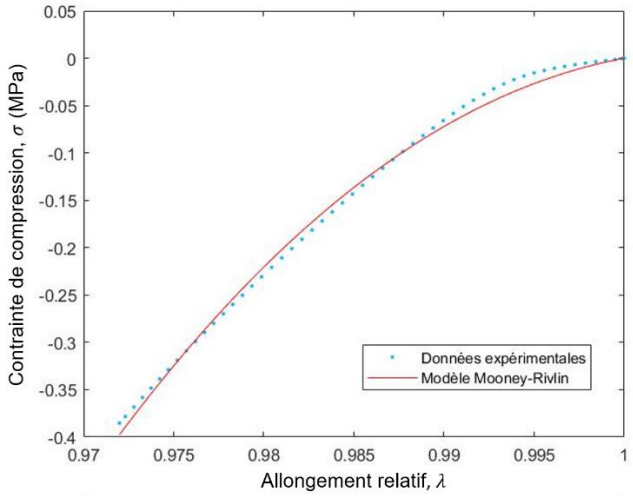


FIGURE 3.10 : EVOLUTION DE LA CONTRAINTE DE COMPRESSION EN FONCTION DE LA DEFORMATION DEFINI PAR L'EQUATION CI-DESSUS POUR UN ECHANTILLON DE LA PISTE WS. LE MODELE DE MOONEY-RIVLIN (COURBE CONTINUE ROUGE) DECRIT BIEN LES MESURES EXPERIMENTALES (POINTS BLEU). CET ACCORD PERMET DE DETERMINER UN MODULE D'ELASTICITE A TRES FAIBLE DEFORMATION.

Conformément à la littérature [3.12], un modèle de comportement mécanique élastique non-linéaire, de type Mooney-Rivlin, permet, en première approximation de décrire le comportement en compression d'un caoutchouc incompressible hyperélastique.

De tels matériaux se caractérisent par leur capacité à subir de grandes déformations réversibles tout en conservant leur intégrité structurelle. Ce modèle mécanique introduit une fonction d'énergie de déformation qui décrit la densité d'énergie stockée dans un matériau en réponse à une déformation en intégrant la non-linéarité des matériaux. Ce modèle s'appuie sur deux invariants principaux du tenseur des déformations, souvent notés I_1 et I_2, qui décrivent la déformation du matériau sous l'effet d'une contrainte mécanique. L'énergie de déformation W est alors définie par :

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3)$$

Avec C_1 et C_2, déterminées expérimentalement. Les invariants I_1 et I_2 sont définis de la manière suivante, avec $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ l'allongement relatif respectif dans les 3 directions de l'espace (1, 2, 3) :

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_3^2\lambda_1^2$$

L'hypothèse d'un matériau incompressible implique que le troisième invariant $I_3 = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 = 1$.

Dans le cas d'une compression uniaxiale, la déformation est appliquée uniquement dans une direction. Nous avons alors $\lambda = \lambda_1$ et $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2}$ afin de respecter l'hypothèse d'un matériau incompressible. Sous cette sollicitation, les invariants deviennent :

$$I_1 = \lambda^2 + 2\lambda^{-1}$$

$$I_2 = \lambda^{-2} + 2\lambda$$

La contrainte de Cauchy σ est calculée à partir de la dérivée de W par rapport à l'allongement λ. Dans le cas d'une compression uniaxiale, cette contrainte est donc donnée par :

$$\sigma = \frac{dW}{d\lambda} = 2C_1\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right) + 2C_2\left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right)$$

En dérivant la contrainte de Cauchy par rapport à l'allongement, nous obtenons un module d'élasticité E(λ) dépendant de l'allongement relatif :

$$E(\lambda) = \frac{d\sigma}{d\lambda} = 2C_1 + \frac{4C_1}{\lambda^3} + \frac{6C_2}{\lambda^4}$$

En faisant l'hypothèse des faibles déformations, nous obtenons un module d'élasticité pour de faibles déformations, correspondant à $\lambda \approx 1$:

$$E_0 = 6(C_1 + C_2)$$

L'ajustement de ce modèle aux données expérimentales mesurées lors de l'essai de compression pour la piste d'athlétisme WS, également présenté à la figure 3.10, et pour la piste SSX fournit les valeurs des paramètres C_1 et C_2 reportées dans le tableau 3.3 avec un coefficient de détermination de 0.99. Enfin, le module d'élasticité à faible déformation est ensuite calculé pour chacune des deux pistes à partir de l'équation ci-dessus.

	C_1 (MPa)	C_2 (MPa)	E_0 (MPa)
Piste WS	-58.71	59.3	3.54
Piste SSX	-63.9	65	6.60

TABLEAU 3.3 : RECAPITULATIF DES PARAMETRES ISSUS DU MODELE DE MOONEY-RIVLIN, AJUSTE AUX ESSAIS DE COMPRESSION EFFECTUES SUR CHACUNE DES PISTES

Les modules d'élasticité des deux pistes sont de l'ordre de quelques MPa, ce qui reste faible, même pour un élastomère, mais du même ordre de grandeur que ceux donnés dans la littérature [3.12]. On note également que la piste SSX est quasiment deux fois plus rigide que la piste WS.

ii. Caractérisation de la viscoélasticité de la piste d'athlétisme

La viscoélasticité, caractéristique des polymères à température ambiante, se manifeste par une réponse dépendante du temps : par exemple lors du relâchement de la contrainte après un essai de fluage, le matériau ne retrouve pas instantanément sa forme initiale en raison de la dissipation d'énergie liée à la composante visqueuse de son comportement mécanique.

Pour évaluer cette propriété et analyser la dépendance temporelle de la réponse du matériau, un essai de relaxation des contraintes est réalisé : une déformation constante est imposée et la diminution progressive de la contrainte sous cette déformation constante est mesurée. Lors d'un essai, 3 paliers de déformation sont imposés à 5,6%, 8,4% et 11,2%. Ces paliers de déformations correspondent respectivement à un enfoncement du poinçon cylindrique de 2,8, 4,2 et 5,6 mm. Chaque palier atteint en quelques secondes est maintenu respectivement, 10, 20 et 30 min pour permettre une relaxation complète de l'échantillon. La réponse expérimentale est ensuite confrontée à des modèles rhéologiques viscoélastiques.

Dans le cas des caoutchoucs, le modèle de Poynting présenté à la figure 3.11, est fréquemment employé [3.13].

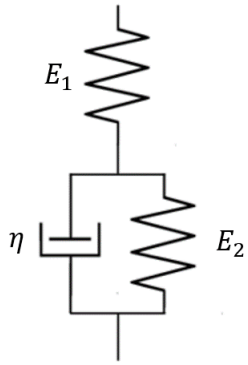


FIGURE 3.11 : LE MODELE DE POYNTING EST CONSTITUE D'UN RESSORT E_1 PLACE EN SERIE AVEC UN RESSORT E_2 ET UN AMORTISSEUR VISQUEUX η EN PARALLELE.

Un matériau polymère n'étant jamais parfaitement incompressible, nous avons retenu pour l'analyse un coefficient de Poisson fixé à $\nu = 0.49$. Ce léger écart à la valeur limite 0.5 a une conséquence importante : il modifie la fonction de relaxation du modèle standard viscoélastique en introduisant non plus un, mais deux temps caractéristiques de relaxation.

Dans ce cadre, l'évolution de la force normale appliquée par un poinçon plat de rayon R, suite à une série de déplacements imposés δ_i aux instants t_i, s'écrit :

$$F_N(t) = 2R[\delta_{n-1}G_\infty + (\delta_n - \delta_{n-1})G(t - t_n)]$$

où la fonction de relaxation est donnée par :

$$G(t) = G_\infty(Ae^{-\alpha t} + Be^{-\beta t} + 1)$$

La présence de deux constantes de temps $1/\alpha$ et $1/\beta$ traduit la double nature du processus de relaxation : une décroissance rapide liée à la réponse instantanée du ressort E_1, et une décroissance plus lente gouvernée par l'association ressort-amortisseur (E_2 et η). Le terme G_∞ correspond au module de cisaillement aux temps longs, c'est-à-dire à l'élasticité résiduelle après dissipation visqueuse.

Les paramètres adimensionnels A et B, les constantes de relaxation $1/\alpha$ et $1/\beta$, ainsi que la valeur asymptotique G_∞, s'expriment directement en fonction des constantes rhéologiques fondamentales du modèle standard viscoélastique (E_1, E_2, η) et du coefficient de poisson retenu.

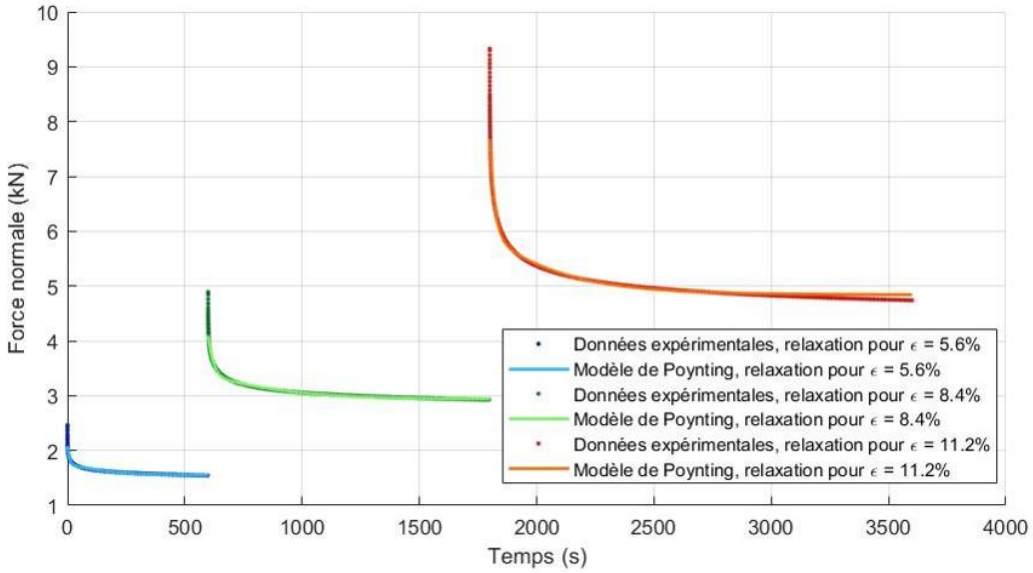


FIGURE 3.12 : EVOLUTION DE LA FORCE NORMALE EN FONCTION DU TEMPS POUR UN ECHANTILLON DE LA PISTE WS. LE MODELE DE POYNTING DECRIT DE MANIERE SATISFAISANTE LES 3 COURBES RELAXATIONS, IL EST DONC POSSIBLE D'EN DEDUIRE UN MODULE D'ELASTICITE EQUIVALENT, LE FACTEUR D'AMORTISSEMENT ET LES TEMPS DE RELAXATION CARACTERISTIQUES.

Un ajustement de ce modèle sur les courbes expérimentales est présenté à la figure 3.12. Celui-ci permet d'identifier quantitativement ces paramètres du modèle rhéologique de Poynting et d'évaluer leur cohérence vis-à-vis de la physique du matériau étudié. Les résultats sont reportés au tableau 3.4 où le module élastique équivalent E_{eq} est fourni par :

$$E_{eq} = \frac{1}{1/E_1 + 1/E_2}$$

Relaxation pour une déformation à	Echantillon WS				Echantillon SSX			
	$E_{eq}\ (MPa)$	$\eta\ (GPa.s)$	$1/\alpha\ (s)$	$1/\beta\ (s)$	$E_{eq}\ (MPa)$	$\eta\ (GPa.s)$	$1/\alpha\ (s)$	$1/\beta\ (s)$
$\varepsilon = 5{,}6\ \%$	2.9	0.67	6	150	3.8	0.74	6	120
$\varepsilon = 8{,}4\ \%$	5.0	1.9	8	180	5.9	2.5	8	180
$\varepsilon = 11{,}2\ \%$	6.2	4.5	12	190	7.5	4.5	11	220

TABLEAU 3.4 : RECAPITULATIF DES PARAMETRES ISSUS DU MODELE DE POYNTING, AJUSTE A L'EXPERIENCE DE RELAXATION EFFECTUEE

En s'intéressant à la relaxation correspondant à la plus faible déformation, de 5,6%, le module d'élasticité pour la piste WS est de 2,9 MPa, tandis que celui pour la piste SSX est de 3,8 MPa. Ces valeurs sont plus faibles que celles obtenues lors de l'essai d'indentation, tout en restant du même ordre de grandeur de quelques MPa pour les deux pistes. La piste SSX demeure plus rigide que la piste WS. La différence entre les valeurs obtenues à partir des essais de relaxation et celles issues de l'essai d'indentation synthétisées dans le tableau 3.3 s'explique par la dépendance particulière du module d'élasticité à la déformation prédite par le modèle de Mooney-Rivlin. Dans celui-ci, le module d'élasticité est calculé à partir de la dérivée de la contrainte relativement à la déformation qui décroît dès que la déformation est non nulle, puis

augmente de nouveau pour des niveaux de déformation intermédiaires à élevés. La courbe contrainte-déformation déduite de ce modèle présente donc un point d'inflexion.

Les valeurs du tableau 3.4 montrent donc bien une évolution du module d'élasticité en fonction de la déformation cohérente avec les prédictions du modèle de Mooney-Rivlin. On peut ainsi situer l'inflexion de la courbe contrainte-déformation à une déformation de l'ordre de 6 – 7% et de 9 – 10%, respectivement pour les pistes WS et SSX.

La composante d'amortissement du modèle de Poynting est représentée par la viscosité η, dont les valeurs, sont assez proches pour les deux pistes : respectivement 0,67 $GPa.s$ pour la piste WS, et 0,74 $GPa.s$ pour la piste SSX.

Les temps de relaxation extraits du modèle de Poynting mettent en évidence l'existence de deux cinétiques de relaxation : une cinétique rapide pilotée par un temps caractéristique de quelques secondes ($^1/_\alpha$ entre 6 et 12 s) et une cinétique plus lente contrôlée par un temps caractéristique compris entre 150 et 220 s (pour $^1/_\beta$). Le temps court reste quasi identique pour l'ensemble des conditions testées, tandis que le temps long tend à croître avec l'amplitude de la déformation imposée, indiquant un ralentissement de la relaxation lorsque la sollicitation augmente.

En conclusion, les deux pistes présentent une structure hétérogène multicouche constituée d'une sous-couche alvéolaire en nid d'abeille, assurant la fonction d'absorption des chocs et la restitution d'énergie, recouverte d'une couche de surface à la topographie drainante avec des directions privilégiées et des aspérités plus ou moins elliptiques et plus ou moins denses. D'un point de vue mécanique, l'analyse effectuée qui suppose les pistes homogènes mettent en évidence la non-linéarité des matériaux qui les constituent avec des propriétés élastiques (module de quelques MPa) et visqueuses (viscosité de l'ordre du $GPa.s$) typique des élastomères. La piste SSX est plus rigide que la piste WS et toutes présente des caractéristiques d'amortissement similaires.

4. Caractérisation topographique et mécanique d'une bande de roulement

Le matériau en contact avec la piste d'athlétisme est la bande de roulement du boyau. Afin de limiter la dissipation par frottement au sein de ce contact, une stratégie initiale basée sur le développement d'une nouvelle formulation de bande de roulement a été suivie. Dans l'industrie du pneumatique, la performance d'un pneu repose sur trois critères essentiels : la résistance au roulement, l'usure et l'adhérence. Pour trouver un équilibre optimal entre ces trois critères, les fabricants ajustent divers paramètres tels que la structure interne, la structuration du pneu mais aussi la composition chimique des matériaux utilisés.

a. Formulation et géométrie

i. Formulation

Dans le cadre de ce travail de thèse, deux formulations d'élastomères chargés ont été développées en modifiant le poids relatif des trois critères évoqués précédemment. Comme illustré sur la figure 3.13, l'échantillon I a été conçu pour assurer un compromis adhérence/résistance au roulement/usure, sans être « faible » sur aucun de ces trois piliers. En revanche, l'échantillon II a été spécifiquement formulé pour maximiser la résistance au roulement tout en conservant de bonnes propriétés d'adhérence, mais ce choix implique un de réduire sa durabilité en termes d'usure.

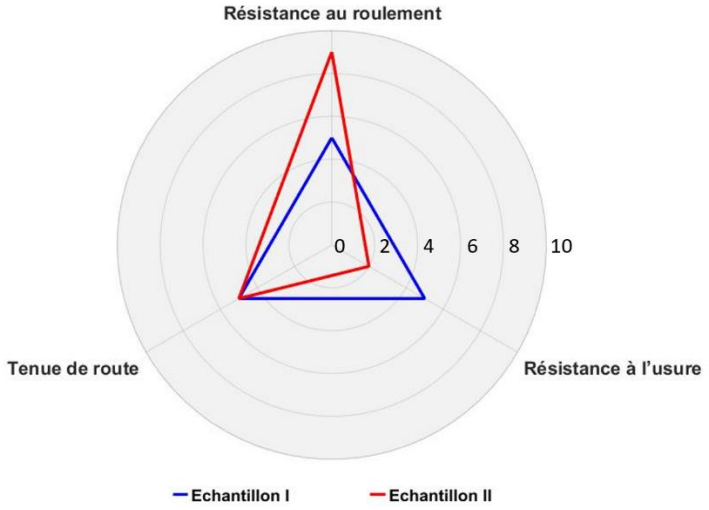


FIGURE 3.13 : CARACTERISTIQUES ATTENDUES POUR LES DEUX ECHANTILLONS FORMULES POUR LA BANDE DE ROULEMENT DU PNEU

Les formulations des deux échantillons sont donc totalement distinctes. L'échantillon I est constitué d'une matrice composée de NR, SBR et BR, chargée à 21 % en silice comme agent renforçant. Quant à l'échantillon II, il repose sur une base NR/BR, renforcée par du noir de carbone représentant 29 % de sa masse.

ii. Géométrie

Les échantillons précédemment formulés sont mis en forme par la société Hutchinson à l'aide d'un moule spécialement conçu pour cette étude. Ce procédé permet d'obtenir des cylindres de ¾ de pouces (19,05 mm) de diamètre, percés en leur centre d'un trou de 4 mm de diamètre et mesurant 10 mm de largeur.

Pour simuler la forme d'un pneu, chaque cylindre est comprimé entre deux rondelles en acier, ce qui lui confère une apparence de « tonneau », comme illustré dans la figure 3.14.

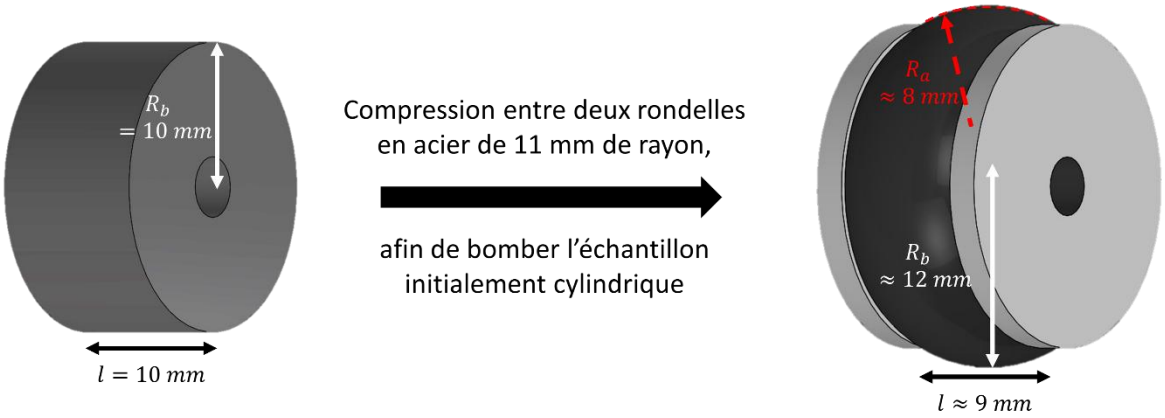


FIGURE 3.14 : ILLUSTRATION DE LA COMPRESSION DE L'ECHANTILLON AFIN D'OBTENIR UNE FORME BOMBEE, REPRODUISANT LA FORME D'UN PNEU

Cette géométrie spécifique génère deux rayons de courbures, R_a et R_b, dont les valeurs sont directement mesurées à l'aide d'un projecteur de profil avec lecture numérique (Mitutoyo PJ-PLUS). La compression n'étant pas parfaitement uniforme, le rayon R_a est calculé à partir de la moyenne de six mesures effectuées sur l'échantillon à des intervalles de 60°.

b. Topographie de surface

Afin de mieux comprendre les mécanismes d'interaction entre une piste d'athlétisme et le fauteuil roulant, il est essentiel de caractériser non seulement la surface de la piste mais également celle de la bande de roulement du pneu. En effet, la topographie de la surface du pneu gouverne également les propriétés du contact, notamment en termes d'aire. La section suivante est ainsi consacrée à l'analyse de la surface des échantillons de bande de roulement, afin de compléter la description du couple d'élastomères étudié.

Étant donné la taille réduite de l'échantillon, bien inférieure à celle d'une piste d'athlétisme, seule la caractérisation à l'aide de l'interféromètre optique Brüker GT-K1, présenté dans la partie précédente, a été retenue. Deux grossissements ont été utilisés pour analyser la surface de la bande de roulement : ×10 pour obtenir une vue macroscopique de la rugosité, et ×100 pour accéder à une échelle plus fine.

Les résultats montrent des valeurs de rugosité relativement cohérentes entre les deux échantillons et les deux grossissements. Pour l'échantillon I, la rugosité moyenne mesurée est de 437,8 ± 92,2 nm à ×10, et 294,0 ± 70,4 nm à ×100. Pour l'échantillon II, ces valeurs sont de 588,4 ± 93,6 nm à ×10, et 403,3 ± 108,0 nm à ×100. Cette proximité des valeurs, quel que soit le grossissement, indique une surface globalement homogène en termes de rugosité sur les deux échelles observées.

Si ces valeurs sont principalement le résultat de la surface du moule initial, elles sont toutefois modulées par la présence éventuelle d'agrégats des charges renforçantes.

c. Propriétés mécaniques

i. Module d'élasticité

Afin d'obtenir le module d'élasticité des caoutchoucs, des essais de compression ont été réalisés à une vitesse de 10 mm/min, avec une pré-charge de 0,5 N, sur un plot d'un diamètre de 28,45 mm, et de hauteur 12,9 mm. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.5 ci-dessous pour différents taux de déformation :

	$E_{5\%}$ *(MPa)*	$E_{10\%}$ *(MPa)*	$E_{20\%}$ *(MPa)*
Ech. I	4,51	4,64	4,99
Ech. II	3,75	3,79	4,00

TABLEAU 3.5 : PRESENTATION DES MODULES D'ELASTICITE DES DEUX ECHANTILLONS DE BANDE DE ROULEMENT

Les modules d'élasticité obtenus montrent une légère augmentation avec le taux de déformation, traduisant le comportement non strictement linéaire des caoutchoucs testés. L'échantillon I présente globalement des valeurs supérieures à celles de l'échantillon II, confirmant une rigidité plus marquée liée à sa formulation. Les valeurs à 10 % de déformation, plus représentatives du régime de sollicitation auquel est soumis le matériau en conditions réelles, seront retenues dans la suite de ce travail pour la comparaison entre formulations.

ii. Adhésion

Les échantillons étudiés étant adhésifs, une phase de caractérisation de ces propriétés d'adhésion a été réalisée en contact statique (sans vitesse de déplacement tangentiel) avec un disque en verre, lisse, de propriétés mécaniques connues, à l'aide du tribomètre LUG. Le disque en verre est revêtu d'une couche nanométrique de chrome, semi-réfléchissante, permettant la visualisation du contact et la mesure des aires de contact sous différentes forces normales.

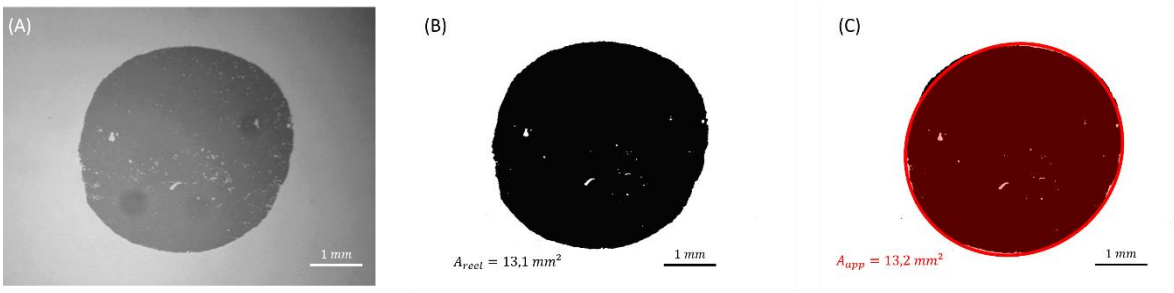


FIGURE 3.15 : PROCESSUS DE TRAITEMENT D'IMAGE SUR L'ECHANTILLON I SOUS UNE CHARGE NORMALE DE 4 N. L'IMAGE BRUTE (A), EST BINARISEE POUR CALCULER L'AIRE REELLE DE CONTACT EN NOIR (B). IL EST EGALEMENT POSSIBLE D'ASSIMILER CE CONTACT A UNE ELLIPSE (C), CETTE APPROXIMATION N'ENTRAINANT QU'UNE FAIBLE ERREUR

Du fait de la géométrie en forme de tonneau, la zone de contact correspond à une ellipse dont les caractéristiques géométriques sont extraites à l'aide du logiciel libre d'analyse d'images, ImageJ. La figure 3.15 illustre les différentes étapes de traitement de l'image pour en extraire les aires de contact :

- (A) : Image brute obtenue à travers le disque en verre lors du contact avec l'échantillon.
- (B) : Image binarisée après traitement. Un seuillage est appliqué correspondant à un niveau de gris sur une échelle de 0 à 255 : tous les pixels avec un niveau de gris inférieur à ce seuil apparaîtront en blanc après traitement, tandis que ceux ayant un niveau supérieur seront affichés en noir. L'aire de contact réelle est alors obtenue en mesurant la surface en noir sur l'image traitée. Celle-ci est préalablement corrigée des variations d'éclairage en uniformisant l'arrière-plan, le contraste et la luminosité sont également ajustés pour optimiser la visualisation du contact.
- (C) : Ajustement d'une ellipse (contour rouge) sur l'image initiale. L'aire apparente est ainsi délimitée par la frontière externe visible du contact.

L'aire réelle de contact est systématiquement inférieure à l'aire apparente, en raison de la présence de zones sans contact effectif localisées à l'intérieur du contact apparent. Cette différence provient notamment de la rugosité du caoutchouc, qui empêche un contact complet même lorsque la zone macroscopique paraît uniforme.

L'essai réalisé pour caractériser le comportement adhésif du contact est le suivant. L'échantillon est mis en contact avec le disque pour des forces normales variant de 1 N à 10 N, par paliers d'environ 30 s afin de s'affranchir d'un effet potentiel de relaxation. Cette augmentation de la force normale est suivie de la décroissance symétrique de la force normale, selon des paliers identiques. L'aire de contact apparente est alors mesurée sur chaque palier de force. Les résultats de cette expérience sont présentés sur la figure 3.16 pour l'échantillon I.

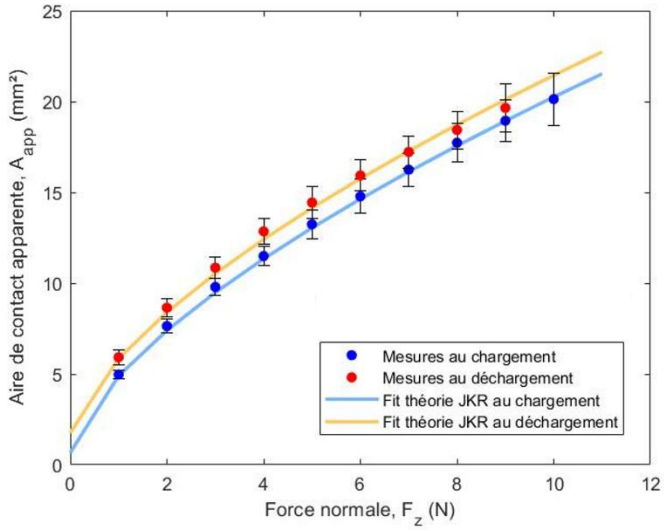


FIGURE 3.16 : EVOLUTION DE L'AIRE DE CONTACT APPARENTE EN FONCTION DE LA FORCE NORMALE POUR L'ECHANTILLON I. LE MODELE DE JKR S'AJUSTE TRES BIEN AUX DONNEES EXPERIMENTALES. UN MODULE D'ELASTICITE, AINSI QUE LE FORCE D'ADHESION AU CHARGEMENT ET AU DECHARGEMENT EN SONT DEDUITS.

L'aire apparente de contact augmente avec la force normale. De plus, les valeurs mesurées au chargement et au déchargement ne se superposent pas, traduisant ainsi une hystérèse

d'adhésion. Ces résultats expérimentaux peuvent être confrontés aux théories de mécanique du contact adhésif, et en particulier à la théorie JKR, précédemment mentionnée dans le chapitre 1, et souvent utilisée pour décrire l'adhésion d'un polymère [3.14]. Cette théorie donne une équation reliant le rayon de contact a, à la géométrie des solides en contact, leurs modules d'élasticité, et F_0 la force d'adhésion :

$$a = \left[\frac{3R^*}{4E^*}\left(F_N + 2F_0 + 2\sqrt{F_0(F_N + F_0)}\right)\right]^{1/3}$$

avec $F_0 = \frac{3}{2}.\pi.\omega.R_{eq}$, ω étant l'énergie de Dupré (J/m^2), l'énergie gagnée par unité de surface lors de la séparation de deux surfaces en contact.

Cette théorie est initialement développée pour un contact circulaire. Néanmoins, Johnson et Greenwood [3.15] ont montré que, pour des contacts légèrement elliptiques (avec un rapport $R_a/R_b < 5$), la différence entre le cas elliptique et le cas circulaire est suffisamment négligeable pour permettre l'utilisation d'un rayon de contact équivalent pour l'ellipse. Pour les échantillons considérés dans ce travail de thèse, les rayons R_a et R_b sont mesurés à l'aide de la méthode décrite dans la section 4.a.ii et sont respectivement de 8,2 mm et 12,4 mm. Avec un rapport $R_a/R_b \approx 0{,}7$ largement inférieur à 5, il est possible d'appliquer la théorie du contact circulaire en utilisant un rayon équivalent défini comme suit :

$$R^* = \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}\right)^{-1}$$

En outre, comme indiqué au chapitre 1, la théorie de JKR repose sur plusieurs hypothèses, dont celle d'un contact entre deux surfaces lisses. Cependant, comme discuté précédemment, les échantillons de caoutchouc présentent une rugosité multi-échelle. Afin de s'affranchir des effets de cette rugosité et de se rapprocher des conditions de surface lisse, les mesures d'aire de contact apparente A_{app} ont été utilisées dans la figure 3.16. Cette hypothèse est justifiée puisque l'écart entre l'aire apparente et l'aire réelle reste faible avec un ratio A_r/A_{app} proche de 1 (0.97 pour l'échantillon I et 0.96 pour l'échantillon II).

La figure 3.16 montre également l'évolution de l'aire de contact apparente en fonction de la charge normale appliquée prédite par le modèle de JKR décrit en début de cette section. Les deux tendances expérimentales suivies sont parfaitement décrites par les courbes théoriques caractéristiques de JKR avec un ajustement du module élastique et de la force d'adhésion lors du chargement et du déchargement. Ces valeurs sont reportées au tableau 3.6.

	E^* (MPa)	F_{0_charg} (mN)	$F_{0_decharg}$ (mN)	ω_{charg} (J/m^2)	$\omega_{decharg}$ (J/m^2)
Ech. I	4,7	41	92	0,88	3,9
Ech. II	3,8	16	69	0,35	1,5

TABLEAU 3.6 : RECAPITULATIF DES PARAMETRES ISSUS DU MODELE DE JKR, AJUSTE AUX MESURES EXPERIMENTALES PRESENTEES SUR LA FIGURE 3.16.

L'ajustement des courbes expérimentales avec le modèle JKR, en utilisant un rayon de contact équivalent adapté à la géométrie elliptique, montre une bonne adéquation entre théorie et expérience, aussi bien au chargement qu'au déchargement. En particulier, les valeurs de module élastique effectif E^* obtenues à partir du fit (3,8 MPa pour l'échantillon I et 4,7 MPa pour l'échantillon II) sont totalement cohérentes avec celles mesurées indépendamment lors des caractérisations mécaniques précédentes (pour un essai de compression à 10%, 4,64 MPa pour l'échantillon I et 3,79 MPa pour l'échantillon II), ce qui confirme la validité de l'approche et la représentativité du contact.

Concernant la force d'adhésion F_0, une hystérèse marquée est observée entre les phases de chargement et de déchargement. Cette différence reflète la dissipation d'énergie lors de la séparation des surfaces, typique des matériaux viscoélastiques. Elle traduit également l'influence de la rugosité multi-échelle du caoutchouc, qui favorise une plus grande résistance au décollement qu'à l'établissement du contact. Ce comportement est en accord avec les observations faites sur les contacts adhésifs souples [3.14].

iii. Relaxation des contraintes sous pression de contact

Comme indiqué précédemment lors de la caractérisation de la piste d'athlétisme, les caoutchoucs sont des matériaux viscoélastiques dont la relaxation influence fortement l'évolution de l'aire de contact. Afin d'étudier ce phénomène pour les matériaux représentant les bandes de roulement, des essais appelés « Stop and Go » ont été réalisés. Ces tests alternent des phases de glissement où seul le disque en verre tourne tandis que le caoutchouc reste immobile, et des phases d'arrêt pendant lesquelles les deux solides sont immobiles. Le caoutchouc reste en contact avec le verre sous une force normale constante pendant la durée de l'essai.

Un essai type se déroule selon les étapes suivantes :

- Mise en contact rapide entre l'échantillon de caoutchouc et le disque en verre ;
- Maintien du contact pendant 1 minute en condition statique sous une force normale de 3 N, permettant une première stabilisation du contact ;
- Mise en glissement du contact pendant 2 minutes ;
- Arrêt du glissement durant 30 secondes donnant lieu à une première phase de relaxation ;
- Reprise du glissement pendant 2 minutes ;
- Arrêt du glissement durant 3 minutes, donnant lieu à une deuxième phase relaxation ;
- Reprise du glissement pendant 2 minutes ;
- Arrêt du glissement durant 3 minutes, donnant lieu à une troisième phase de relaxation.

Ces temps de glissement sont choisis pour permettre de glisser au-delà de la distance critique nécessaire pour atteindre le niveau de frottement stationnaire. Trois vitesses de glissement du disque ont été testées : 1 mm/s, 10 mm/s et 100 mm/s. Tout au long de l'essai, les jauges de contraintes restent actives afin de contrôler la force normale appliquée et de mesurer la force tangentielle exercée.

La figure 3.17 présente l'évolution de la force tangentielle au cours d'un essai type pour l'échantillon I, aux trois vitesses de glissement choisies.

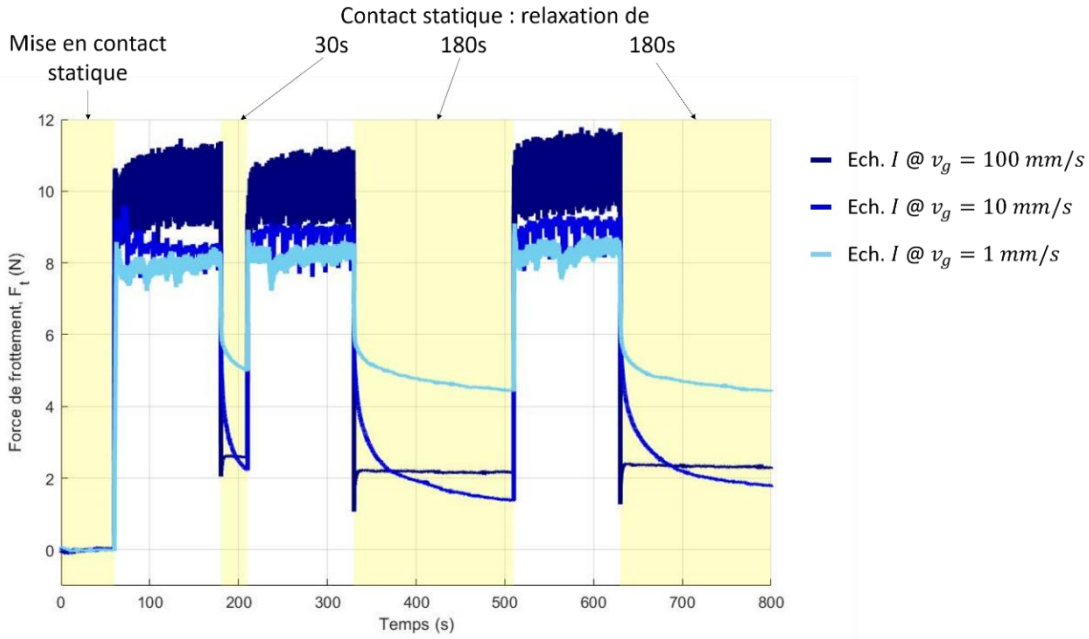


FIGURE 3.17 : EVOLUTION DE LA FORCE DE FROTTEMENT EN FONCTION DU TEMPS POUR L'ECHANTILLON I. LES TROIS COURBES DE COULEURS DIFFERENTES CORRESPONDENT A 3 VITESSES DE GLISSEMENT DIFFERENTES ET LES ZONES JAUNES CORRESPONDENT A UN CONTACT STATIQUE (AUCUN DES DEUX SOLIDES NE BOUGE).

Pour un échantillon glissant à une vitesse fixée, par exemple l'échantillon I glissant à une vitesse de 10 mm/s, on observe une augmentation progressive de la force de frottement au cours de chaque phase de glissement. Cela suggère une évolution du contact au cours du temps, potentiellement liée à l'usure de la surface ou à un échauffement local, ce qui est attendu lors d'un essai de glissement pur. Lors des périodes d'arrêt, la force diminue progressivement, traduisant une relaxation lente et continue du contact. Comme l'illustre la figure 3.18, ce comportement est reproductible à chaque cycle, et les courbes de relaxation adoptent des formes similaires, indiquant une cinétique de relaxation propre au matériau pour cette vitesse. La relaxation du frottement semble indépendante de l'histoire du glissement : quelle que soit la sollicitation précédente subie par l'échantillon, la relaxation suit une même cinétique caractéristique.
On distingue un effet de la vitesse de glissement : la force de frottement augmente avec la vitesse de glissement. Ce comportement est classique pour les élastomères, où la dissipation d'énergie dépend des conditions de sévérité de glissement. Concernant la relaxation lors des phases d'arrêt, celle-ci devient de plus en plus rapide à mesure que la vitesse de glissement augmente. Pour une vitesse de glissement de 100 mm/s, la décroissance du frottement est quasiment instantanée, avec une baisse brutale de la force dès l'arrêt de la rotation du disque. Le pic transitoire observé lors de cette diminution rapide de la rotation est vraisemblablement lié à l'asservissement du servomoteur pilotant la rotation du disque. L'analyse de la position angulaire met en évidence une rotation de 3.8° dans le sens opposé au mouvement initial. Ce phénomène est probablement imputable à un dépassement du régulateur PID lors de la phase d'arrêt du servomoteur.

Afin d'approfondir l'analyse du comportement observé lors des phases d'arrêt, la figure 3.18 présente un agrandissement des trois phases de relaxation extraites d'un même essai, pour l'échantillon I aux trois vitesses de glissement testées. Cette représentation met en évidence

la reproductibilité des courbes de relaxation : malgré des historiques de frottement différents, les trois courbes de relaxation obtenues pour chaque vitesse de glissement se superposent.

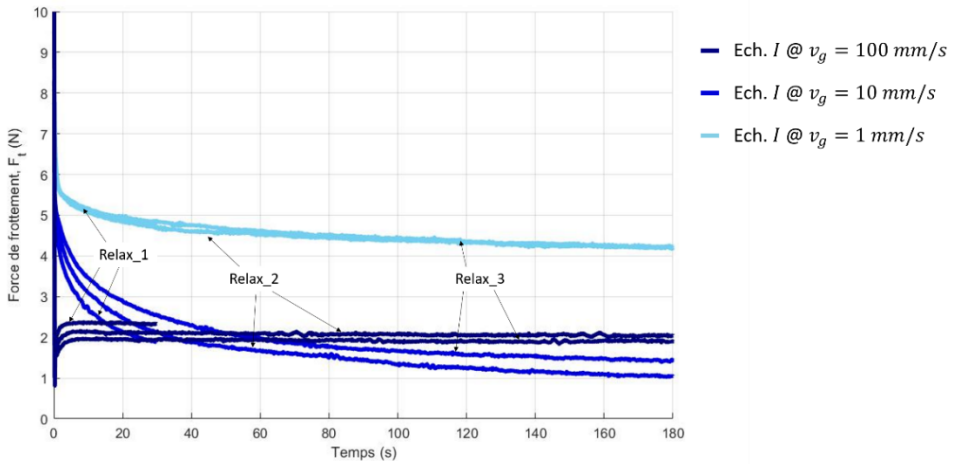


FIGURE 3.18 : SUPERPOSITION DES RELAXATIONS APRES UN GLISSEMENT EFFECTUE A UNE VITESSE CONTROLEE. LA VITESSE DU GLISSEMENT PRECEDENT LA RELAXATION INFLUENCE LA FORME DE LA COURBE DE RELAXATION

Dans la mesure où les relaxations observées sont peu influencées par l'historique de frottement mais dépendent principalement de la vitesse de glissement appliquée avant l'arrêt, une analyse plus approfondie a été menée afin de caractériser les mécanismes viscoélastiques responsables de cette relaxation. L'objectif était d'identifier des temps caractéristiques de relaxation propres à l'échantillon pour chaque condition de glissement. Dans un premier temps, des modèles viscoélastiques classiques tels que ceux de Poynting et de Zener ont été testés, mais se sont révélés inopérants pour décrire correctement la forme des courbes expérimentales. En conséquence, un modèle de Maxwell généralisé, basé sur la superposition de deux branches de relaxation, a été retenu :

$$F_T = F_R + A \times exp^{(-t/\tau_1)} + B \times exp^{(-t/\tau_2)}$$

La figure 3.19 présente l'ajustement de ce modèle sur les courbes expérimentales de l'échantillon I.

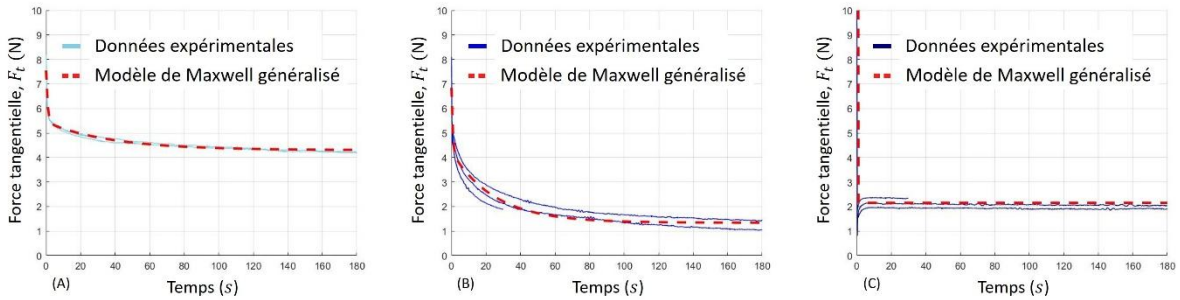


FIGURE 3.19 : EVOLUTION DE LA FORCE TANGENTIELLE DE L'ECHANTILLON I LORS DE LA RELAXATION APRES UN GLISSEMENT SUR UN DISQUE EN VERRE EN FONCTION DU TEMPS POUR DIFFERENTES VITESSES DE GLISSEMENT ANTERIEURE, 1 mm/s (A), 10 mm/s ET 100 MM/S (C). LE MODELE DE MAXWELL GENERALISE DECRIT DE MANIERE SATISFAISANTE LES COURBES DE RELAXATION POUR DES VITESSES DE GLISSEMENT DE 1 mm/s ET 10 mm/s. POUR L'ESSAI A 100 mm/s, L'ARTEFACT INDUIT PAR L'ASSERVISSEMENT DU MOTEUR DETERMINANT LA ROTATION DU DISQUE NE PEUT PAS ETRE RETROUVE AVEC CE MODELE. LES DEUX TEMPS DE RELAXATION CARACTERISTIQUES DU MODELE SONT PRESENTES DANS LE TABLEAU 3.7 CI-DESSOUS.

De ces ajustements, il est possible d'obtenir les temps caractéristiques de relaxation τ_1 et τ_2 du modèle de Maxwell généralisé qui sont résumés dans le tableau 3.7 :

	Après glissement @ $v_g = 1\ mm/s$		*Après glissement* @ $v_g = 10\ mm/s$		*Après glissement* @ $v_g = 100\ mm/s$	
	τ_1	τ_2	τ_1	τ_2	τ_1	τ_2
Ech. I	38.3	0.87	24.9	0.72	0.05	0.05
Ech. II	22.9	1.35	16.9	0.27	6.3	0.08

TABLEAU 3.7 : RECAPITULATIF DES PARAMETRES ISSUS DU MODELE DE MAXWELL GENERALISE, AJUSTE AUX RELAXATIONS DECRITES PRECEDEMMENT

On observe une diminution marquée de τ_1 et τ_2 pour les deux échantillons, lorsque la vitesse de glissement préalable à la relaxation augmente. Cela confirme que les relaxations deviennent plus rapides à mesure que la vitesse de glissement augmente, indiquant un comportement viscoélastique fortement dépendant de la vitesse appliquée. Comparativement à l'échantillon I, l'échantillon II présente des temps de relaxation initiaux plus courts, ce qui peut indiquer une réponse plus rapide aux sollicitations mécaniques.

5. Conclusions

A partir d'une analyse de la cinématique du contact pneu/piste en compétition, un protocole expérimental a été établi pour représenter de manière réaliste le contact pneu/piste à l'échelle du laboratoire. Ainsi, l'utilisation du tribomètre LUG s'avère pertinente, puisqu'elle permet de reproduire des conditions de sollicitation proches de celles rencontrées en situation réelle, tout en offrant un contrôle précis des cinématiques de contact et des forces appliquées.

La caractérisation des pistes WS et SSX a montré que celles-ci possèdent des propriétés globalement similaires, tant du point de vue topographique que mécanique. Les différences relevées restent modérées : la piste WS présente une rigidité légèrement inférieure et une organisation des aspérités distincte de celle de la piste SSX, mais sans changement d'ordre de grandeur, toutes ayant des modules d'élasticité de quelques MPa seulement. La présence d'aspérités de surface de dimensions très importantes au regard de la taille de l'échantillon de laboratoire, dont l'aire de contact est limitée à une quinzaine de mm^2 est également à souligner.

Du côté de la bande de roulement, deux formulations ont été étudiées. L'échantillon I a été conçu pour offrir un compromis équilibrant rigidité, adhérence et durabilité, tandis que l'échantillon II privilégie la limitation des pertes par roulement, quitte à compromettre la tenue à l'usure. La caractérisation mécanique a mis en évidence des différences de module relativement faibles entre les deux formulations, mais les essais d'adhésion et de relaxation ont révélé des écarts plus marqués. Une hystérèse d'adhésion significative a été observée dans les deux cas, traduisant la dissipation d'énergie inhérente au caractère viscoélastique

des matériaux, mais avec des amplitudes différentes selon les formulations. Par ailleurs, les essais de relaxation sous pression ont montré que l'échantillon I présente des temps caractéristiques plus longs, alors que l'échantillon II répond de manière plus rapide aux sollicitations, témoignant d'une sensibilité distincte aux conditions de glissement.

En définitive, ce chapitre a permis d'établir un cadre expérimental pour l'analyse du contact pneu/piste. Il met en évidence que, si les deux pistes et les deux formulations de bandes de roulement étudiées présentent des propriétés mécaniques et topographiques différentes, celles-ci restent globalement proches. Ces résultats constituent une base essentielle pour la compréhension des mécanismes de dissipation au sein du contact, et serviront de fondement aux développements présentés dans le chapitre suivant.

6. Bibliographie :

[3.1] J.W. Chow et W-S Chae, « Kinematic analysis of the 100-m wheelchair race », Journal of Biomechanics, 40, pp 2564-2568, 2007.

[3.2] A.P. Susanto, F.K. Fuss, K.G. Wong & M.S. Jaffa, « Performance analysis in wheelchair racing », Impact of Technology on Sport II, 116, pp 795-800, 2008.

[3.3] K.D. Coutts et R.W. Schutz, « Analysis of wheelchair track performances », Medicine and science in sports and exercise, 20, pp 188-194, 1988.

[3.4] Z. Mané, J-L. Loubet, C. Guerret, L. Guy, O. Sanseau, et al., « A new rotary tribometer to study the wear of reinforced rubber materials », Wear, 306, pp 149-160, 2013.

[3.5] G. Dell'Orto, F.M. Ballo, G. Mastinu, M. Gobbi et G. Magnani, « Racing bicycle tyres – Influence on mechanical characteristics of internal pressure, vertical force, speed and temperature », European Journal of Mechanics, 100, 2023.

[3.6] J. Le Rouzic, A. Le Bot, J. Perret-Liaudet et al., « Friction-Induced Vibration by Stribeck's Law: Application to Wiper Blade Squeal Noise », Tribology Letters, 49, pp 563–572, 2013.

[3.7] Mondo S.P.A., « A sports flooring », European Patent Office, EP2055833A1, 2007.

[3.8] L. Andena, S. Aleo, F. Caimmi, S. Mariani, F. Briatico Vangosa et A. Pavan, « A 3D Numerical Model for the Optimization of Running Tracks Performance. », Procedia Engineering, 147, pp 854-859, 2016.

[3.9] L. Andena, S. Aleo, F. Caimmi, F. Briatico Vangosa, S. Mariani, S. Tagliabue et A. Pavan, « Modelling the cushioning properties of athletic tracks », Sports Engineering, 21, pp 453-463, 2018.

[3.10] Mondo S.P.A., « A process for producing a covering of an elastomer material and product thereof», European Patent Office, EP1389519A1, 2002.

[3.11] E.S. Gadelmawla, M.M. Koura, T.M.A. Maksoud, I.M. Elewa et H.H. Soliman, « Roughness parameters », Journal of Materials Processing Technology, 123, pp 133-145, 2002.

[3.12] L. Andena, S. Aleo, F. Caimmi, S. Mariani, F. Briatico Vangosa et A. Pavan, « A 3D numerical model for the optimization of running trakcs performance », Procedia Engineering, 147, pp 854-859, 2016.

[3.13] L. Cheng, X. Xia, W. Yu, L.E. Scriven et W.W. Gerberich, « Flat punch indentation of viscoelastic material », Journal of Polymer Science, 38, pp 10-22, 2000.

[3.14] S. Mishima, H. Iikura et T. Ougizawa, « Study of adhesion between microspheres and rubber surfaces accompanied by meniscus formation and sedimentation », Applied Adhesion Science, 5, 2017.

[3.15] K.L. Johnson et J.A. Greenwood, « An approximate JKR theory for elliptical contacts », Journal of physics D : Applied Physiqucs, 38, 2005.

Chapitre IV : Analyse du frottement dans le contact pneu/piste d'athlétisme

1. Introduction

Au chapitre précédent, la caractérisation topographique et mécanique des échantillons, qu'il s'agisse de la bande de roulement ou du revêtement de piste, a révélé des différences modérées mais mesurables entre les matériaux étudiés. Le tribomètre LUG utilisé pour les caractérisations mécaniques du contact statique permet également de reproduire les sollicitations réelles se produisant au sein d'un contact pneu-piste d'athlétisme.

Dans ce chapitre 4, l'objectif est double. Sur le plan scientifique, il s'agira de mieux comprendre les mécanismes de frottement mis en jeu dans ce type de contact. Sur le plan industriel, l'enjeu est de contribuer au développement de boyaux optimisés pour le para-athlétisme. Pour atteindre ces objectifs, les essais tribologiques seront réalisés à l'aide du tribomètre et des échantillons décrits précédemment.

Pour ce faire, les travaux présentés débuteront par des essais de glissement pur en laboratoire, permettant d'isoler et de mieux comprendre les mécanismes fondamentaux du frottement. Par la suite, les conditions expérimentales seront progressivement rapprochées des situations réelles à travers des essais en régime de roulement-glissement, avant d'aboutir à des tests sur le terrain, réalisés en collaboration avec les athlètes de l'équipe de France. La figure 4.1 illustre cette démarche.

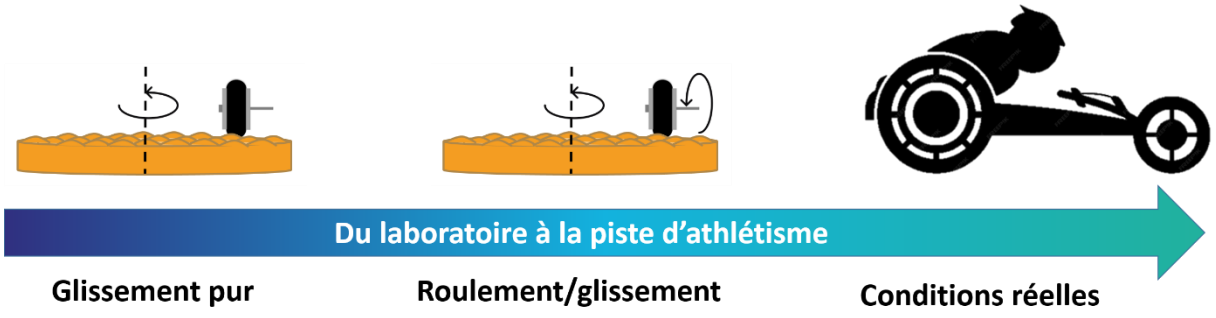


FIGURE 4.1 : ILLUSTRATION DE LA STRATEGIE EXPERIMENTALE UTILISEE POUR ANALYSER LE FROTTEMENT DU CONTACT ENTRE LE PNEU ET LA PISTE D'ATHLETISME

2. Influence de la formulation du pneu sur le frottement dans des conditions de glissement pur

a. Réponse tribologique du contact modèle pneu/disque en verre en glissement pur

i. Influence de la vitesse de glissement

L'essai de « Stop and Go » présenté précédemment dans la section 4.c.iii du chapitre 3 entre les échantillons de bande de roulement et un disque en verre, est repris ici afin d'analyser l'évolution du niveau de frottement avec la vitesse de glissement, et ce, à partir de la force tangentielle mesurée pendant la phase de glissement sous force normale constante, sans considérer la relaxation de la force de frottement lors de l'arrêt.

A titre d'exemple, la figure 4.2 illustre les résultats obtenus pour l'échantillon I. On y observe une augmentation de la force tangentielle de frottement lorsque la vitesse de glissement augmente, un comportement en accord avec les tendances rapportées dans la littérature [4.1].

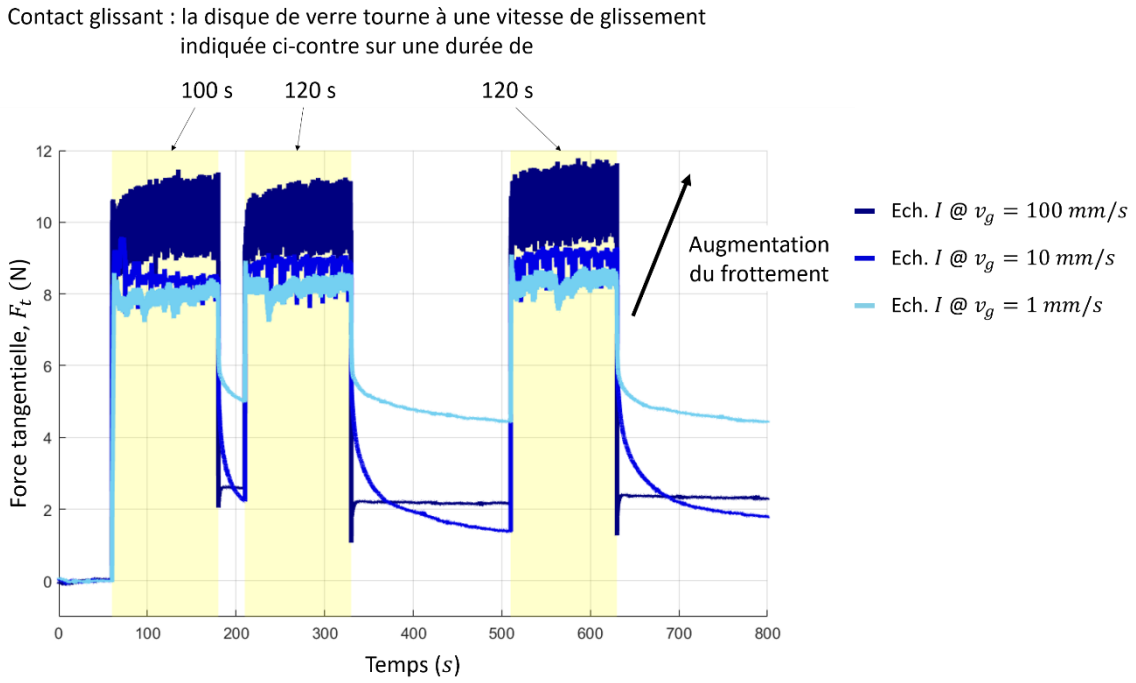


FIGURE 4.2 : EVOLUTION DE LA FORCE TANGENTIELLE EN FONCTION DU TEMPS POUR L'ECHANTILLON I, SOUS UN CHARGEMENT DE $3N$, SUR UN DISQUE EN VERRE. LES TROIS COURBES DE COULEURS DIFFERENTES CORRESPONDENT A TROIS VITESSES DE GLISSEMENT DIFFERENTES, ET LES ZONES EN JAUNE CORRESPONDENT AUX ZONES DE GLISSEMENT ETUDIEES.

Par ailleurs, l'augmentation de la vitesse de glissement s'accompagne d'une amplification des oscillations de la force de frottement. Ce phénomène est attribué au contrôle en asservissement de la force normale, dont la régulation devient plus difficile à maintenir à haute

vitesse de rotation, entrainant une oscillation de la même forme que celle de la force tangentielle.

Afin d'évaluer l'influence des phases d'arrêt sur le niveau de frottement, la figure 4.3 présente la superposition des trois phases de glissement successives de l'échantillon I pour une vitesse de glissement de 10 mm/s (la première d'une durée de 100 s, les deux suivantes de 120 s chacune). Sur l'ensemble des six superpositions réalisées, correspondant aux trois vitesses de glissement testées sur les deux échantillons, une excellente reproductibilité des forces de frottement est observée. Seul le cas de l'échantillon I à 100 mm/s montre une variabilité légèrement plus marquée (± 7 %), tandis que les cinq autres essais présentent une variation inférieure à 4% à la reprise du glissement. L'historique de glissement ne semble donc pas jouer un rôle prépondérant ici.

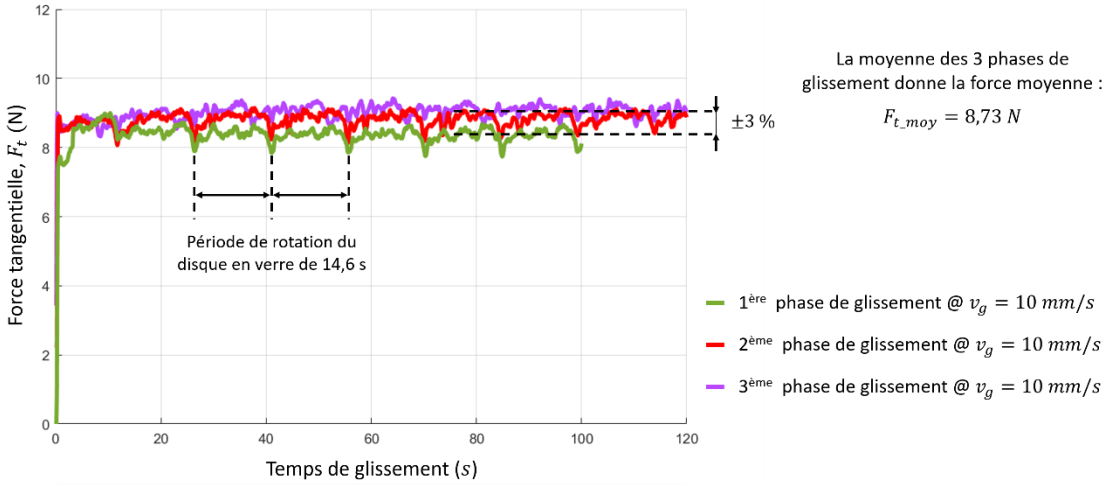


FIGURE 4.3 : EVOLUTION DE LA FORCE TANGENTIELLE EN FONCTION DU TEMPS DE GLISSEMENT POUR L'ECHANTILLON I, POUR UNE VITESSE DE 10 mm/s SOUS UNE FORCE NORMALE DE 3N, SUR UN DISQUE EN VERRE. CHAQUE COURBE CORRESPOND A LA FORCE TANGENTIELLE MESUREE DANS LES ZONES EN JAUNE DE LA FIGURE 4.2. CES TROIS COURBES SONT TRACEES EN FONCTION DU TEMPS ECOULE DEPUIS LE DEBUT DE CHAQUE PHASE DE GLISSEMENT AFIN DE FACILITER LEUR COMPARAISON

L'essai mené sur l'échantillon I, positionné à un rayon de 23,3 mm du centre du disque en verre, correspond à une vitesse de rotation de 4,1 tr/min pour une vitesse linéaire de 10 mm/s. Sur la figure 4.3, on observe une oscillation périodique de la force de frottement présentant une période d'environ 14,6 secondes, ce qui correspond à une rotation complète du disque en verre. Cette oscillation est probablement liée à une légère imperfection de l'alignement du disque, entraînant un défaut de planéité, et donc une variation cyclique du contact au cours de la rotation.

Les phases de glissement se superposant de manière satisfaisante, il est possible, pour chaque essai, de déterminer une force de frottement moyennée sur les trois phases de glissement correspondant à une vitesse de glissement et à un échantillon donné. Cette approche permet d'effectuer un comparatif entre les deux échantillons, résumé dans le tableau 4.1 ci-dessous :

	Moyenne des forces de frottement (N) à		
	@ $v_g = 1\ mm/s$	@ $v_g = 10\ mm/s$	@ $v_g = 100\ mm/s$
Ech. I	$8{,}1 \pm 0{,}2$	$8{,}7 \pm 0{,}2$	$10{,}1 \pm 0{,}6$
Ech. II	$7{,}9 \pm 0{,}4$	$9{,}0 \pm 0{,}5$	$10{,}5 \pm 0{,}4$

TABLEAU 4.1 : RECAPITULATIF DES FORCES DE FROTTEMENT MOYENNES MESUREES LORS DE L'ESSAI DE STOP&GO SOUS UN CHARGEMENT DE 3N, AUX TROIS VITESSES D'ENTRAINEMENT ETUDIEES, POUR LES DEUX ECHANTILLONS

Ce tableau permet de quantifier les observations issues de la figure 4.2, et met en évidence une augmentation de la force de frottement avec la vitesse de glissement, conformément aux tendances observées précédemment.

On remarque par ailleurs que les deux échantillons présentent des niveaux de frottement très proches pour une même vitesse, avec un écart inférieur à 4 %. Cependant, l'échantillon II se caractérise par un niveau de frottement légèrement plus élevé aux vitesses de 10 et 100 mm/s, pour lesquelles la différence entre les deux matériaux est la plus marquée.

Afin d'approfondir la compréhension des mécanismes de dissipation par frottement, la section suivante se concentre sur le comportement tribologique en régime de glissement, en analysant simultanément les évolutions des aires de contact et en réalisant des essais sous des forces normales plus élevées de manière à se rapprocher des pressions de contact réelles.

ii. Choix des conditions expérimentales

D'après les estimations réalisées dans le chapitre 3, la pression de contact dans le système étudié est supposée être proche de la pression de gonflage, soit comprise entre 0,3 et 1 N/mm^2 (environ 3 à 10 bars) [4.2]. À partir des aires de contact mesurées lors des essais statiques visant à caractériser l'adhésion des deux échantillons de bande de roulement (cf. figure 3.16, chapitre 3), une force normale de 10 N engendre une pression de contact de l'ordre de 0,5 MPa, ce qui est représentatif des conditions réelles.

Concernant la vitesse de glissement, les estimations précédentes ont montré que pour un fauteuil roulant se déplaçant à environ 30 km/h (soit la vitesse maximale du fauteuil), la vitesse de glissement locale dans le contact est de l'ordre de 30 mm/s. Cependant, à cette vitesse, les essais sur piste d'athlétisme menés en laboratoire entraînent une usure trop rapide de la piste d'athlétisme.

Afin de préserver l'intégrité des échantillons tout en maintenant des conditions tribologiques du même ordre de grandeur que celui des sollicitations réelles, les essais ont donc été menés à une vitesse de glissement de 5 mm/s, pendant une durée de 2 minutes et 30 secondes. Ce choix permet de maintenir la force normale à 10 N et de reproduire des conditions représentatives de la phase d'accélération du fauteuil, où la vitesse de glissement est inférieure à sa valeur maximale.

iii. Analyse simultanée de la zone de contact et du frottement en glissement pur

La figure 4.4 présente l'évolution de la force de frottement en fonction du temps pour les deux échantillons soumis à une force normale de 10 N et une vitesse de glissement de 5 mm/s. On observe dans les deux cas une augmentation rapide du frottement dès le début de la phase de glissement (après une phase stationnaire de 30 secondes), suivie d'une stabilisation progressive vers un régime quasi stationnaire. Comme précédemment mis en évidence lors de l'essai « Stop and Go », les oscillations de la force tangentielle sont attribuées à la fréquence de rotation du disque. Les deux essais étant réalisés à la même vitesse de glissement, et les échantillons positionnés à une distance identique du centre du disque, il est cohérent que la fréquence d'oscillation de la force tangentielle soit identique pour les deux essais.

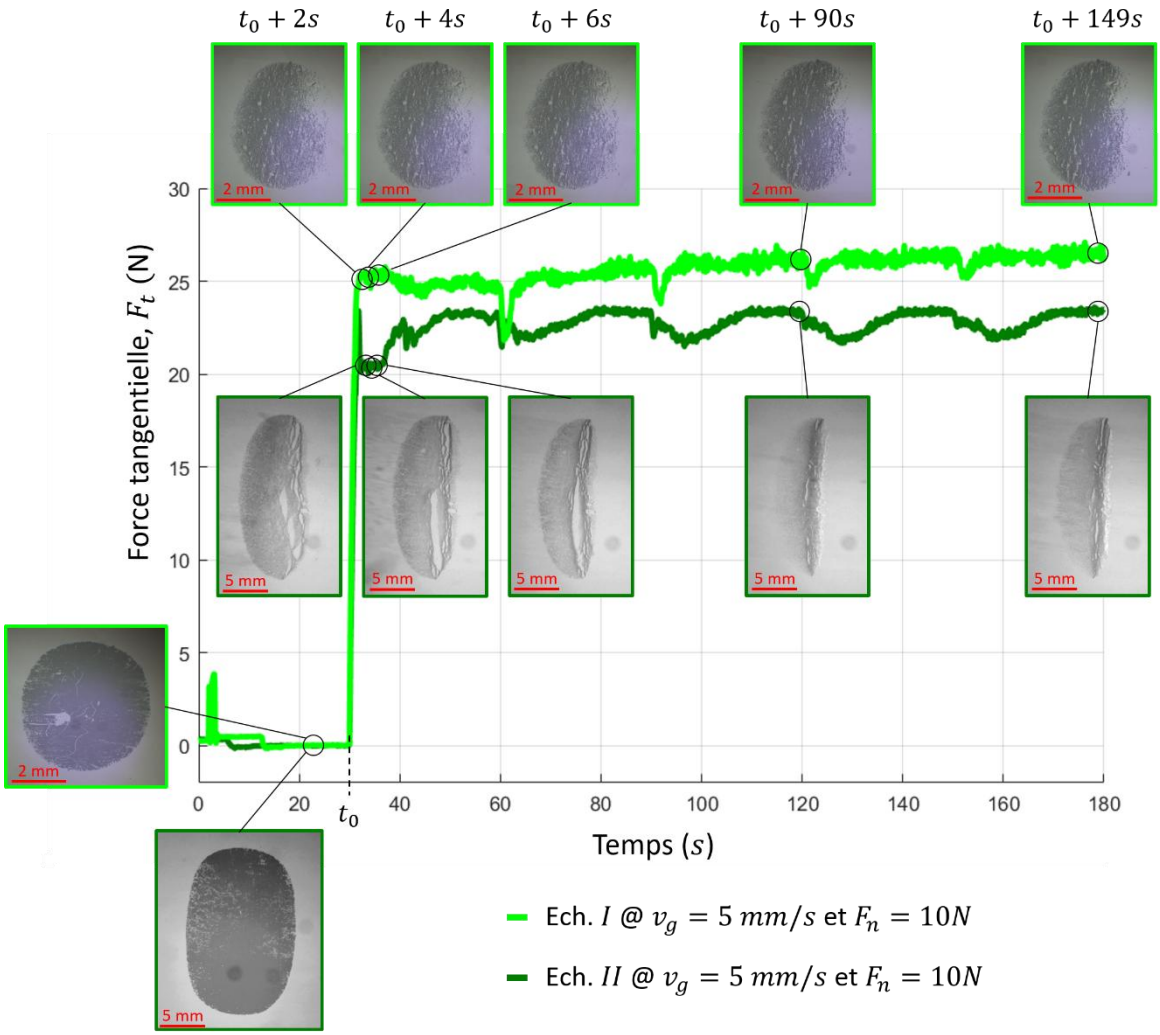


FIGURE 4.4 : EVOLUTION DE LA FORCE TANGENTIELLE EN FONCTION DU TEMPS POUR LES DEUX ECHANTILLONS, FROTTANT SUR UN DISQUE EN VERRE, A UNE VITESSE DE GLISSEMENT DE 5 mm/s, SOUS UNE FORCE NORMALE DE 10N. DES IMAGES DU CONTACT ONT ETE PRISES A DIFFERENTS MOMENTS DE L'ESSAI, SOULIGNANT LA DIFFERENCE DANS LA ZONE DE CONTACT DES DEUX ECHANTILLONS.

L'échantillon I présente, sur l'ensemble de la durée d'essai, une force de frottement globalement plus élevée que celle mesurée pour l'échantillon II. Après la phase transitoire

initiale, le frottement se stabilise autour de 25,6 N pour l'échantillon I, et de 22,8 N pour l'échantillon II.

Afin de mieux comprendre ces différences de comportement en frottement, les aires de contact ont été étudiées à différents instants de l'essai. Les images associées à la figure 4.4 montrent que les aires de contact statiques (correspondant aux photos prises avant t_0) présentent des formes initiales distinctes selon l'échantillon : une forme plus circulaire pour l'échantillon I en vert clair et plus elliptique pour l'échantillon II en vert foncé. Cette différence s'explique par les propriétés mécaniques propres à chaque matériau, en particulier leur élasticité, qui influencent la façon dont l'échantillon se déforme à la fois sous l'action du glissement et lors de la phase de serrage entre les rondelles en acier effectué par l'expérimentateur. Ainsi il n'est pas possible pour l'expérimentateur d'appliquer une compression strictement identique. Il en résulte des rayons de courbure différents, qui ne sont jamais strictement identiques pour les deux échantillons. Dans ce contexte, le choix a été fait de travailler avec des aires de contact en glissement comparables, plutôt que d'imposer des rayons de courbure identiques.

Outre la géométrie du contact, l'aire apparente de contact diffère également. En condition statique, l'échantillon I présente une aire apparente de 18.0 mm^2, contre 24.6 mm^2 pour l'échantillon II. Un ajustement du serrage entre les rondelles aurait permis d'obtenir des aires statiques plus proches, mais une fois le glissement engagé, les aires de contact diminuent essentiellement à cause de la réduction de leur petit axe parallèle à la direction du glissement, et deviennent similaires, de l'ordre de 13,2 mm^2 pour l'échantillon I et 10,7 mm^2 pour l'échantillon II (valeurs mesurées à $t_0 + 149\ s$). Cela correspond à une diminution de l'aire initiale de 56.5% pour l'échantillon II, contre 26,7% pour l'échantillon I lors du passage du contact statique au contact glissant.

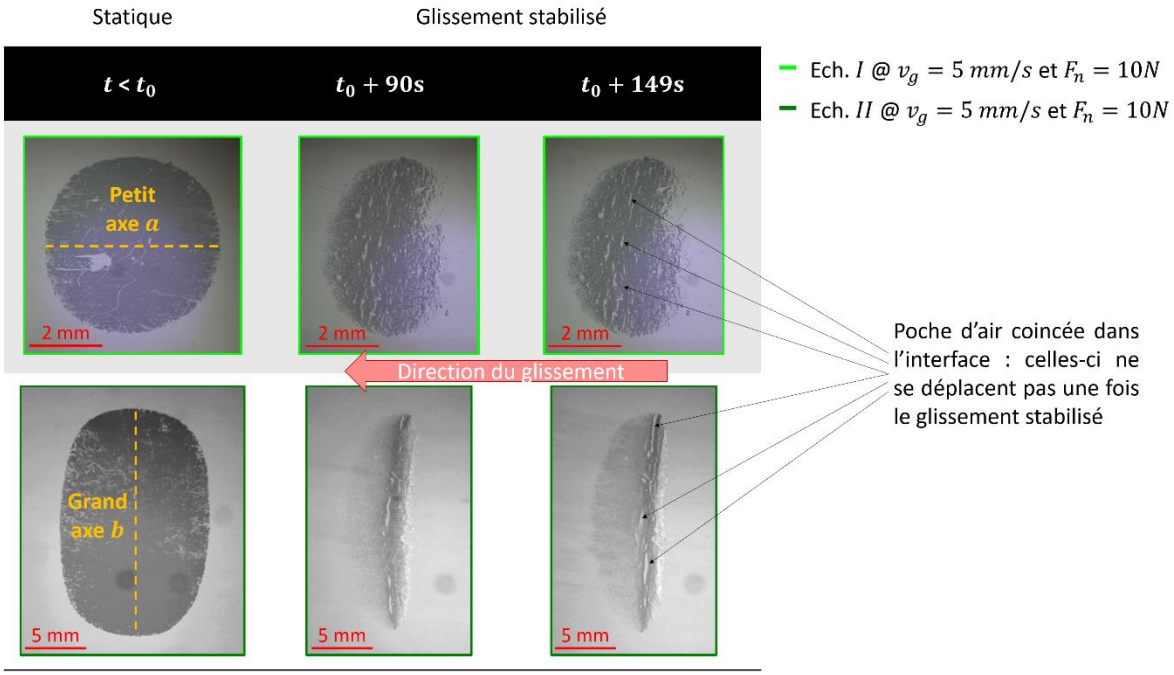


FIGURE 4.5 : ILLUSTRATION DES ZONES DE CONTACT DES DEUX ECHANTILLONS, DANS LES CONDITIONS D'ESSAI DECRITES PRECEDEMMENT. UNE REDUCTION DE L'AIRE DE CONTACT EST OBSERVEE, LORS DU GLISSEMENT. LA PRESENCE DE POCHES D'AIR DANS L'INTERFACE EST EGALEMENT VISIBLE.

De plus, la figure 4.5 détaillant des images prises en cours de l'essai en régime stabilisé, souligne l'hétérogénéité de la zone de contact. On distingue clairement, pour les deux échantillons, la présence de zones de non contact, en blanc sur les images. Ces cavités restent quasi stationnaires : leur position et leur forme évoluent très peu, une fois le glissement stabilisé, comme l'illustrent les images de la figure 4.5 acquises à t + 90 s et t + 149 s. La légère différence de positionnement des ondes s'explique par le fait que l'échantillon repasse plusieurs fois au même endroit du disque, sur le dépôt d'élastomère laissé à la surface du disque en verre à chaque tour, en glissement pur.

La mesure après traitement d'image donne une surface de ces zones d'air, de non-contact, de 4,4 mm^2 pour l'échantillon I et 1,0 mm^2 pour l'échantillon II. Cette observation montre une différence notable entre l'aire apparente de contact, obtenue par un contour manuel sous *ImageJ*, et l'aire réelle de contact, correspondant uniquement aux zones effectivement en contact. Ainsi, l'échantillon I présente une aire apparente de 13,2 mm^2, mais une aire réelle réduite à 8,8 mm^2, soit une différence de 33%. De manière similaire, l'échantillon II, bien que possédant une aire apparente plus petite (10,7 mm^2), présente une aire réelle plus grande de 9,7 mm^2, soit une différence de 9% entre l'aire apparente et l'aire réelle. On note que le ratio entre l'aire réelle et l'aire apparente de contact est significativement plus faible pour l'échantillon I que pour l'échantillon II. Cette distinction entre aire apparente et aire réelle est essentielle pour l'interprétation du comportement en frottement sur un disque en verre, puisqu'elle influe directement sur la contrainte de cisaillement calculée.

En rapportant la force de frottement mesurée à ces deux types d'aires, il est possible de déduire deux valeurs de contrainte de cisaillement τ : une contrainte apparente, basée sur l'aire apparente, et une contrainte réelle basée sur l'aire de contact réelle. En régime stabilisé, les contraintes apparentes, τ_{app}, sont similaires pour les deux échantillons ($\tau_{app_I} = 1{,}9MPa \sim \tau_{app_II} = 2{,}1\ MPa$). Cependant, la contrainte réelle, $\tau_{réelle}$, souligne une différence plus marquée : pour l'échantillon I, $\tau_{réelle_I} = 2{,}9MPa$ supérieure à $2{,}4\ MPa$ pour l'échantillon II. L'échantillon I présente ainsi une contrainte de cisaillement réelle plus élevée que l'échantillon II, bien que sa contrainte de cisaillement apparente soit similaire.

En s'écartant du régime stabilisé pour se concentrer sur la phase de mise en glissement, les images de la figure 4.6 révèlent des comportements nettement distincts entre les deux matériaux étudiés.

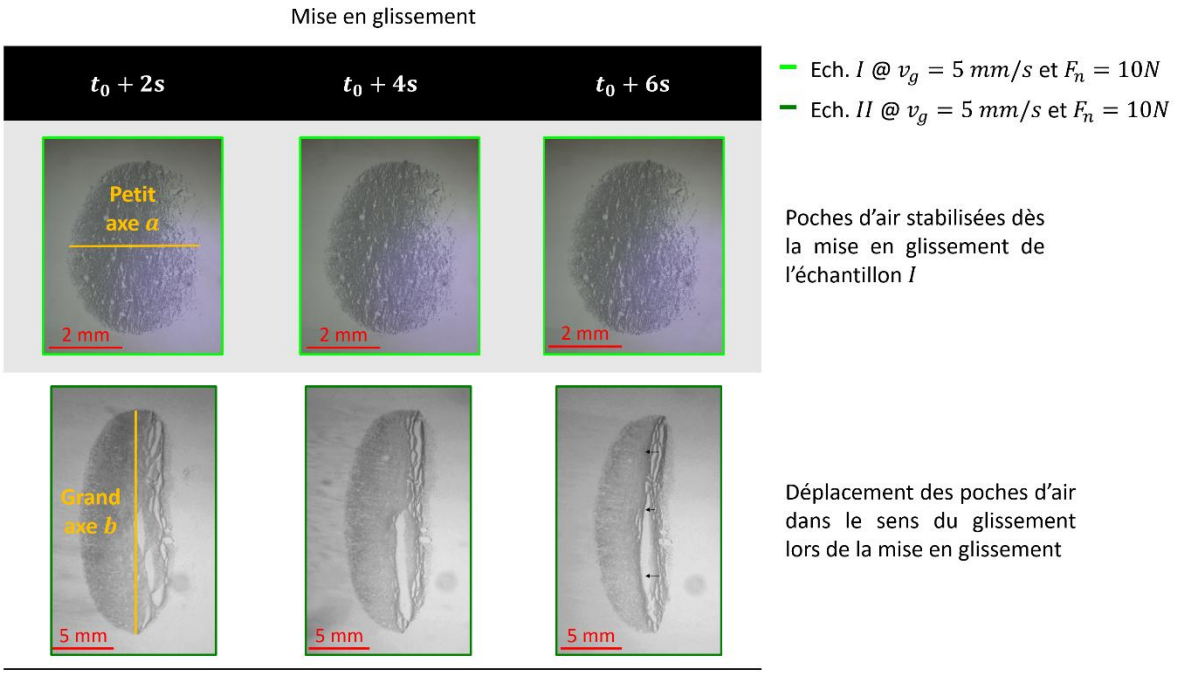


FIGURE 4.6 : ILLUSTRATION DES ZONES DE CONTACT DES DEUX ECHANTILLONS, DANS LES CONDITIONS D'ESSAI DECRITES PRECEDEMMENT, LORS DE LA MISE EN GLISSEMENT. L'ECHANTILLON I SE STABILISE TRES RAPIDEMENT, TANDIS QUE DES ONDES DE DEPLACEMENT SE DEPLACENT DANS LE CONTACT POUR L'ECHANTILLON II, RAPPELANT LES OBSERVATIONS DE SCHALLAMACH [4.3].

Pour l'échantillon I, les aires de contact apparente et réelle atteignent rapidement un état stable, et ce dès le début du glissement. On retrouve les mêmes zones de non-contact (zones claires sur les clichés), qui persistent tout au long de l'essai, même en régime stabilisé. L'analyse des images à t + 2 s, t + 4 s et t + 6 s montre que ces plis ne se déplacent pas au sein du contact : la surface réelle reste pratiquement identique à ces différents instants.

A l'inverse, l'échantillon II présente un comportement plus dynamique : les zones de non-contact évoluent au cours du temps, formant des ondes de décollement qui se déplacent à l'intérieur du contact au cours du glissement. Comme illustré sur la figure 4.6, la position de ces ondes varie clairement entre t + 2 s, t + 4 s et t + 6 s. La détermination précise de leur vitesse de déplacement reste toutefois difficile avec le dispositif expérimental utilisé, le tribomètre étant équipé d'une caméra haute résolution mais avec une fréquence d'acquisition comprise entre 10 et 12 images par seconde. Or, d'après les travaux de Schallamach [4.3], ces ondes se déplacent à une vitesse dépassant largement celle de la vitesse de glissement (de l'ordre de x10 par rapport à v_g), soit plus que la valeur seuil de 15 mm/s estimée en supposant un déplacement d'une demie taille de contact.

Même si la vitesse de déplacement de ces ondes ne peut être précisément caractérisée, il est néanmoins possible d'estimer leurs dimensions. Durant la phase de mise en glissement, on retrouve en moyenne 25 zones de non-contact significatives présentent une aire moyenne de 0,07 mm^2. Au total, ces zones de non-contact représentent environ 15% de l'aire apparente. On remarque néanmoins une grande variabilité entre les ondes, et entre les différents instants où sont prises les photos. Au cours du temps, les aires de non-contact tendent à fusionner entre elles, formant progressivement une zone d'air unique occupant une plus grande partie de la zone de contact, puis, s'échappant parfois du contact. En régime stabilisé, les zones de non-contact se stabilisent et sont moins nombreuses (elles ne peuvent alors plus être qualifiées d'ondes de déplacement). Celles-ci présentent une aire moyenne de 0,02 mm^2,

indiquant que les plus grandes ondes formées au début, ont disparus du contact, et ne restent dans le régime stabilisé que les plus petites ondes de l'avant du contact. En conséquence, la proportion de zones de non-contact diminue pour atteindre environ 5 % de l'aire de contact apparente.

Toutes les données relatives aux forces, aux aires de contact et donc aux contraintes sont résumées dans le tableau 4.2 suivant :

	$t < t_0$		$t_0 + 2s$		$t_0 + 4s$		$t_0 + 6s$		$t_0 + 90s$		$t_0 + 149s$	
Echantillon	*I*	*II*	*I*	*II*	*I*	*II*	*I*	*II*	*I*	*II*	*I*	*II*
Force de frottement (N)	*Na*	*Na*	23.8	21,3	24,7	20,5	24,9	20,5	26,5	23,5	26,9	23,4
Aire apparente (mm²)	18,0	24,6	13,0	14,8	13,1	13,8	13,2	12,2	13,1	11,2	13,2	10,7
Aire réelle (mm²)	16,0	23,6	8,9	12,6	8,9	12,4	9,0	10,3	8,8	10,1	8,8	9,9
Contrainte de cisaillement apparente (MPa)	*Na*	*Na*	1,8	1,4	1,9	1,5	1,9	1,.7	2,0	2,1	2,0	2,2
Contrainte de cisaillement réelle (MPa)	*Na*	*Na*	2,7	1,7	2,8	1,7	2,8	2,0	3,0	2,3	3,1	2,4

TABLEAU 4.2 : RECAPITULATIF DES VALEURS DE FORCES TANGENTIELLES, D'AIRE DE CONTACT ET DE CONTRAINTES DE CISAILLEMENT MESUREES LORS DE LA PHASE STATIONNAIRE D'UN ESSAI EN GLISSEMENT PUR A 5 mm/s ENTRE UN DISQUE EN VERRE ET LES DEUX ECHANTILLONS D'ELASTOMERES, I ET II.

Comme le rapporte la littérature [4.3][4.4], l'apparition de ces ondes de décollement est caractéristique d'un glissement entre un solide viscoélastique et une surface rigide. Ce phénomène ne se manifeste donc que dans des conditions bien spécifiques, liées à la combinaison particulière des propriétés mécaniques et d'adhérence des deux matériaux en contact. Dans un cas réel de contact pneu/piste d'athlétisme, un tel comportement ne peut a priori pas se produire, en raison de la déformabilité comparable des deux matériaux et de la nature plus complexe de leurs interfaces. Malheureusement, la piste d'athlétisme étant opaque, il n'est pas possible d'observer directement le contact ni de confirmer expérimentalement l'absence d'ondes de décollement lors du glissement réel.

b. Réponse tribologique en glissement pur sur une piste d'athlétisme

Après avoir étudié le comportement tribologique des échantillons de bande de roulement sur un disque en verre rigide et transparent, il est désormais nécessaire de confronter ces observations à des conditions plus représentatives des conditions réelles. L'objectif est ainsi de déterminer dans quelle mesure les tendances observées précédemment se maintiennent ou se modifient lorsque la contreface en contact avec l'élastomère chargé devient plus souple et rugueuse, comme dans le cas d'une piste d'athlétisme.

Dans la continuité des essais réalisés sur le disque en verre, les mêmes conditions expérimentales ont été reprises afin d'assurer la comparabilité des résultats : une force normale de 10 N et une vitesse de glissement de 5 mm/s ont été appliquées en faisant tourner le disque, et en laissant l'échantillon en caoutchouc statique. Cette fois, les tests ont été effectués sur deux disques de pistes d'athlétisme distincts, la piste SSX et la piste WS. Les

résultats obtenus avec le disque en verre sont également indiqués sur la figure 4.7 pour faciliter la comparaison avec les essais sur piste d'athlétisme.

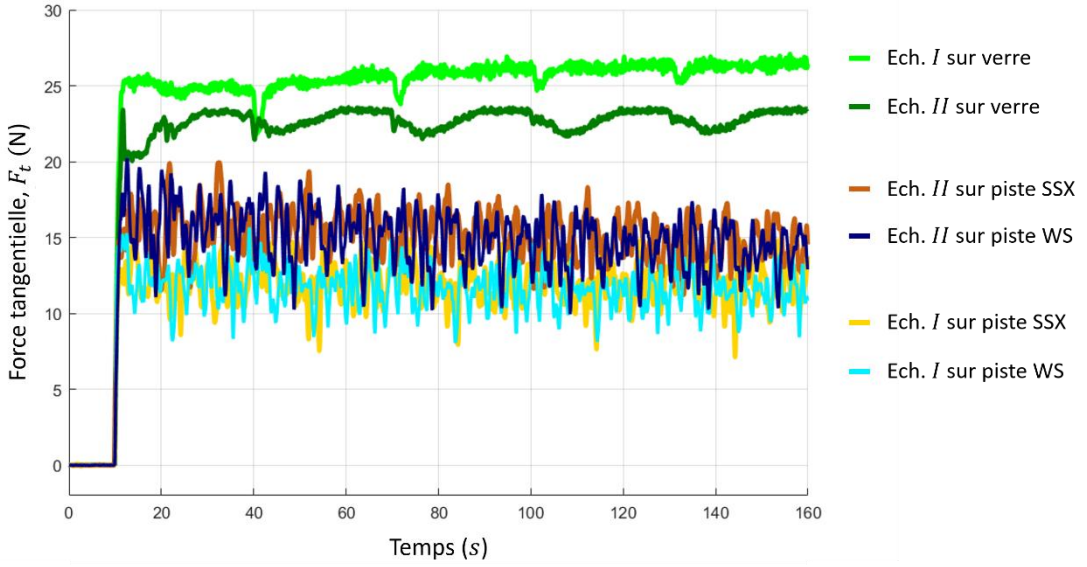


FIGURE 4.7 : EVOLUTION DE LA FORCE TANGENTIELLE EN FONCTION DU TEMPS POUR LES DEUX ECHANTILLONS, A UNE VITESSE DE GLISSEMENT DE $5\ mm/s$, SOUS UNE FORCE NORMALE DE $10N$. LES COURBES VERTES SONT LES MEMES QUE CELLES PRESENTEES A LA FIGURE 4.4, LES COURBES AJOUTEES CORRESPONDENT A UN CONTACT ENTRE UN ECHANTILLON ET UNE PISTE D'ATHLETISME. UNE FORCE TANGENTIELLE PLUS FAIBLE EST OBSERVEE POUR LES CONTACTS SUR PISTE D'ATHLETISME.

La figure 4.7 présente une comparaison directe des niveaux de frottement obtenus pour les essais réalisés sur le verre et ceux menés sur les pistes d'athlétisme SSX et WS. On observe une réduction nette de la force tangentielle pour les essais contre pistes. En régime stabilisé, la force tangentielle moyenne mesurée sur les pistes pour l'échantillon I est de 11,7 N, tandis que l'échantillon II atteint une valeur de 14,5 N. Ceci correspond respectivement à une baisse de 56% et de 38% par rapport au verre. Ce comportement peut s'expliquer par la rugosité des pistes, réduisant l'aire de contact réelle. Or, une partie du frottement étant dû à l'adhésion, réduire la zone de contact induit également une diminution de l'adhésion entre les deux solides [4.5].

Si la distinction entre le verre et les pistes d'athlétisme est nette, il est en revanche impossible de discriminer les deux revêtements SSX et WS entre eux dans ces conditions expérimentales. Les réponses en frottement sont quasiment superposables comme le montrent les courbes marron et bleu foncé, pour l'échantillon II sur la piste SSX et WS, ou les courbes orange et bleu clair respectivement pour l'échantillon I. Ce résultat confirme que, malgré les différences mécaniques et topographiques mesurées et discutées au chapitre 3, ces deux pistes ne présentent pas de comportement tribologique suffisamment distinct pour être différenciées en glissement pur avec le protocole expérimental choisi.

En revanche, il est tout à fait possible de différencier les deux échantillons de bande de roulement. Sur les pistes d'athlétisme, l'échantillon I présente systématiquement une force tangentielle plus faible que l'échantillon II, tendance inverse à celle observée sur le verre, où l'échantillon I montrait au contraire un frottement légèrement supérieur.

Concernant la différence de frottement entre un essai sur verre ou un essai sur piste, une explication plausible est que les phénomènes mis en évidence sur le verre, tels que les ondes

de décollement, ne peuvent pas se produire dans un contact piste/élastomère, ce qui change fondamentalement les mécanismes de frottement est donc la force tangentielle mesurée.

En analysant chaque courbe séparément, on constate que la périodicité associée à chaque tour du disque est bien visible, mais les fluctuations observées sont nettement plus importantes que celles mesurées sur le verre. Ces variations rapides de la force tangentielle résultent directement de l'interaction locale entre l'échantillon et les aspérités de la piste. La figure 4.8 illustre ce phénomène en présentant l'évolution de la force tangentielle de l'échantillon II lorsqu'il glisse sur la piste WS, sur un intervalle correspondant à un seul tour du disque. Il s'agit d'un extrait de la courbe bleu foncé de la figure 4.7. Une détection automatique des pics de frottement a également été réalisée afin d'évaluer si ces fluctuations pouvaient être corrélées à la rugosité du revêtement.

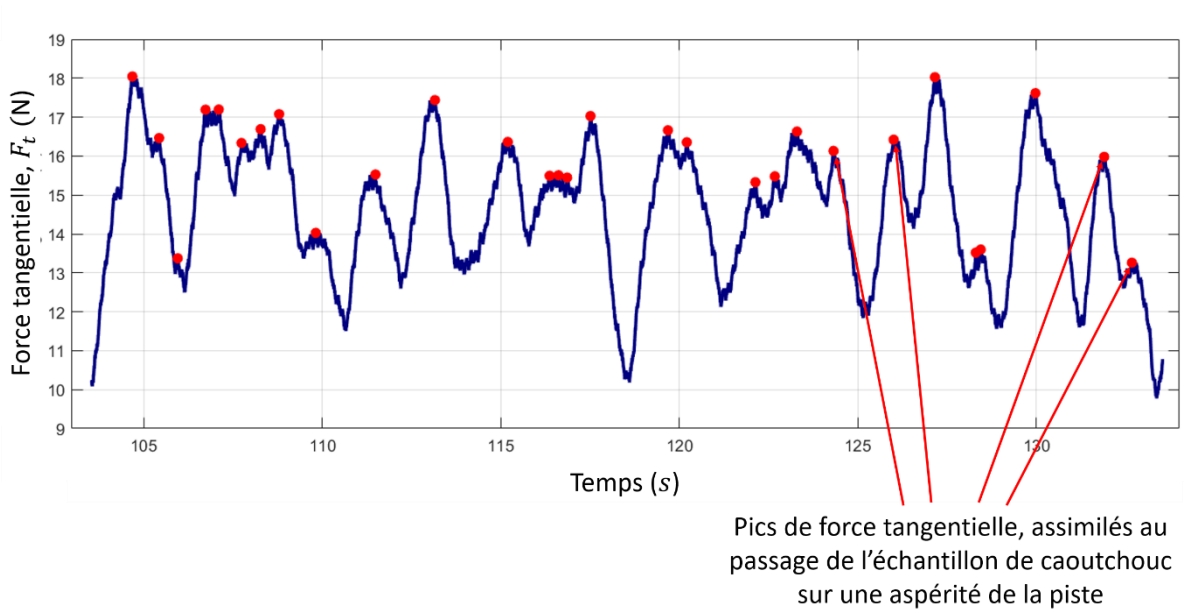


FIGURE 4.8 : EVOLUTION INSTANTANEE DE LA FORCE DE FROTTEMENT (EXTRAIT DE LA COURBE PRECEDENTE) LORS D'UN TOUR DE LA PISTE D'ATHLETISME POUR L'ECHANTILLON II GLISSANT SUR LA PISTE WS. ON DENOMBRE 29 PICS DE FROTTEMENT, POUVANT S'ASSIMILER AUX ASPERITES RENCONTRES PAR L'ECHANTILLON LORS D'UN TOUR SUR LA PISTE WS.

Sur l'exemple de la figure 4.8, 29 pics de frottement ont été identifiés sur un tour complet. En considérant que l'essai a été réalisé sur une piste ayant un rayon de 24,5 mm, on obtient une distance inter-pic moyenne donnée par :

$$d_{inter-pic} = \frac{2\pi r}{nb_{aspérités}} = \frac{2\pi \times 24{,}5}{29} = 5{,}5\ mm$$

L'inverse de cette valeur fournit la fréquence spatiale des pics, ici 1,8 cm^{-1}. En répétant cette analyse pour plusieurs segments de courbe et pour les deux échantillons, les fréquences spatiales moyennes obtenues sont d'environ 1,8 cm^{-1} pour la piste SSX, et 1,7 cm^{-1} pour la piste WS.

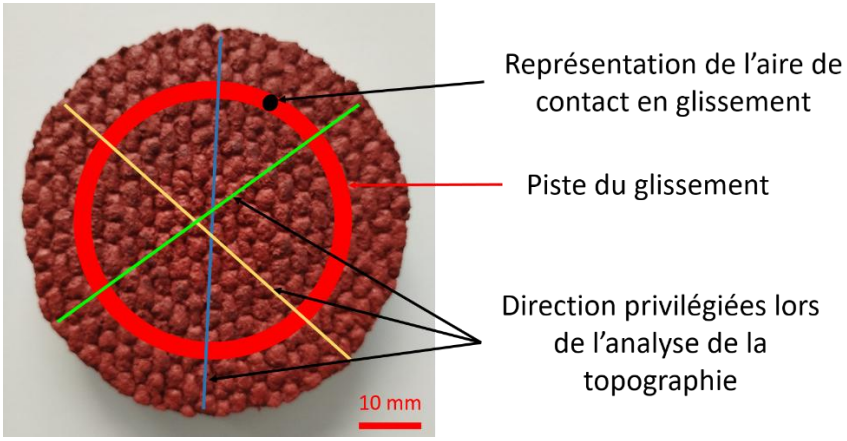


FIGURE 4.9 : DISQUE DE PISTE D'ATHLETISME SUR LEQUEL EST EFFECTUE LES ESSAIS PRECEDEMMENT PRESENTES. LE TRAIT ROUGE REPRESENTANT LA TRAJECTOIRE OU L'ECHANTILLON VIENT FROTTER SUR LA PISTE, L'ESTIMATION DE L'AIRE APPARENTE DE CONTACT A ETE REALISEE A PARTIR DES MESURES EFFECTUEES SUR UN DISQUE EN VERRE . LES TRAITS FINS BLEU, VERT ET JAUNE REPRESENTANT LES DIRECTIONS PREFERENTIELLES DE LA TEXTURE DE SURFACE DE LA PISTE DECRITES DANS LE CHAPITRE 3.

Afin de vérifier si ces pics de frottement peuvent être une signature tribologique de la topographie du revêtement, les valeurs précédentes ont été comparées aux fréquences spatiales mesurées au microscope numérique dans le chapitre 3. La figure 4.9 présente un disque de la piste WS, ainsi que les trois principales orientations identifiées sur la texture de la surface. En moyennant les fréquences mesurées dans ces directions pour la piste WS, et en prenant trois directions décalées de 60° pour la piste SSX, on obtient une fréquence spatiale des aspérités de 1,8 cm^{-1} pour la piste SSX, et de 1,9 cm^{-1} pour la piste WS. Ces valeurs, très proches de celles issues de l'analyse des pics de frottement, renforcent l'hypothèse selon laquelle chaque pic de force tangentielle correspond à la rencontre du caoutchouc avec une aspérité de la piste.

Enfin, l'anisotropie de la répartition des aspérités explique également que les pics ne se produisent pas à un intervalle parfaitement constant : selon la position angulaire de l'échantillon sur le disque, les aspérités pouvant être plus ou moins espacées. De plus, il est important de souligner que la zone de contact effective entre l'échantillon et le revêtement est du même ordre de grandeur que l'aire du sommet d'une aspérité individuelle. Ainsi, lors du glissement, le contact alterne continuellement entre le sommet d'une aspérité et l'espace interstitiel situé entre deux aspérités. À chaque remontée sur un sommet, la force tangentielle augmente, ce qui génère un pic de frottement sur la courbe. Cette oscillation verticale, provenant d'un frottement d'origine « topographique » est également observable par l'expérimentateur au cours de l'essai.

Ces résultats confirment donc que la texture du revêtement joue un rôle prépondérant dans les fluctuations instantanées de la force de frottement mesurée.

Au regard de ces observations, une hypothèse de travail peut être formulée pour la suite de l'analyse : l'échantillon serait en contact, en moyenne, avec une seule aspérité à la fois. Cette approximation est cohérente avec les dimensions très faibles de la zone de contact effective observées précédemment, et avec le fait que chaque pic de frottement semble correspondre à la rencontre instantanée de l'élastomère avec un sommet d'une aspérité de la piste. Ainsi, pour estimer la contrainte de cisaillement associée au glissement sur piste, il devient pertinent d'assimiler l'aire de contact réelle à l'aire moyenne d'une aspérité (telle que mesurée au chapitre 3). En rapportant la force tangentielle mesurée à cette aire d'aspérité, il est alors

possible d'obtenir une valeur représentative de la contrainte de cisaillement interfaciale produite lors du glissement sur les revêtements d'athlétisme.

En considérant les aires moyennes d'aspérités mesurées dans le chapitre 3, soit 9,4 mm^2 pour la piste SSX et 14,2 mm^2 pour la piste WS, il est possible d'estimer la contrainte de cisaillement associée aux forces mesurées. Pour la piste SSX, on obtient ainsi des contraintes moyennes d'environ 1,3 MPa pour l'échantillon I et 1,6 MPa pour l'échantillon II. Sur la piste WS, où les aspérités sont plus larges, les contraintes estimées sont plus faibles, de l'ordre de 0,8 MPa pour l'échantillon I et 1,0 MPa pour l'échantillon II.

Bien que ces valeurs demeurent approximatives, elles révèlent une tendance : la contrainte de cisaillement développée sur une piste d'athlétisme est jusqu'à deux fois plus faible que celle observée lors du glissement sur verre (2 MPa pour l'échantillon I et 2,2 MPa pour l'échantillon II).

En pratique, le contact entre un pneu et une piste qui porte sur plusieurs aspérités de la piste n'est pas un contact glissant mais résulte d'une combinaison de roulement et de glissement. La section suivante s'attache donc à étudier ce régime de roulement-glissement, afin d'évaluer l'impact de cette condition plus représentative sur le comportement tribologique des échantillons.

3. Influence de la formulation de l'échantillon sur le frottement en se rapprochant des conditions réelles

a. Réponse tribologique dans des conditions de roulement-glissement

i. Analyse du cas modèle en prenant le verre comme substrat

Comme cela a été présenté dans le chapitre 3, la vitesse maximale d'un fauteuil roulant en conditions réelles atteint environ 9 m/s. Par analogie, cette vitesse en conditions réelles correspond à la vitesse d'entraînement retenue pour les essais tribologiques réalisés. Toutefois, comme pour tout système en roulement, une partie du contact subit une phase de glissement. Dans le cas du fauteuil, la vitesse de glissement est de l'ordre de 32 mm/s, ce qui conduit à un « Slide-Roll Ratio » (SRR) d'environ 0,4% lorsque l'on rapporte cette vitesse à la vitesse d'entraînement.

L'objectif de cette section est d'approcher au mieux les conditions réelles de fonctionnement. Toutefois, deux ajustements ont été nécessaires pour adapter ces conditions aux capacités du tribomètre. Premièrement, la vitesse d'entraînement a été réduite afin d'éviter une usure excessive qui apparaîtrait en seulement quelques secondes aux vitesses réelles. Deuxièmement, le SRR associé au fonctionnement réel étant très faible, la force tangentielle obtenue serait trop faible et la résolution de la mesure des efforts de contact insuffisante pour distinguer les comportements tribologiques des différents matériaux. Il a donc été décidé de sévériser les conditions en augmentant volontairement le SRR de manière à accentuer les contrastes entre les échantillons et permettre une meilleure analyse comparative.

Nous avons donc choisi, dans un premier temps, d'explorer l'influence progressive de la vitesse de glissement tout en conservant une vitesse d'entraînement fixe de 5 mm/s,

cohérente avec les essais de glissement pur présentés précédemment. L'essai débute avec une vitesse de glissement nulle, puis celle-ci est augmentée par paliers de 0,2 mm/s, jusqu'à atteindre 1 mm/s. Ainsi, le SRR évolue de 0 % à 40 % au cours du test.

Pour imposer ces conditions, les deux solides, l'échantillon en caoutchouc et le disque (en verre ou piste), sont entraînés simultanément. Au début de l'essai, leurs vitesses respectives sont ajustées afin d'obtenir une vitesse linéaire de 5 mm/s au centre théorique du contact. En pratique, cela conduit à l'apparition d'une zone de traction sur l'extérieur du contact et d'une zone de compression vers l'intérieur. Ensuite, pour augmenter la vitesse de glissement ($v_{disque} - v_{échantillon}$) tout en maintenant constante la vitesse d'entraînement (moyenne des vitesses des deux solides), la vitesse du caoutchouc est progressivement augmentée tandis que celle du disque est proportionnellement réduite. Cela permet de conserver une vitesse d'entraînement constante tout en accroissant la différence entre les vitesses, donc le glissement dans le contact.

Chaque palier est maintenu pendant une minute, durée suffisante pour atteindre un régime stabilisé tout en limitant les effets d'usure. Les essais sont réalisés en « aller-retour » afin de vérifier la reproductibilité du comportement tribologique et de s'assurer que l'évolution du frottement n'est pas influencée par l'usure au cours de l'essai. La figure 4.10 présente l'évolution des vitesses de l'échantillon et du disque au cours de l'essai :

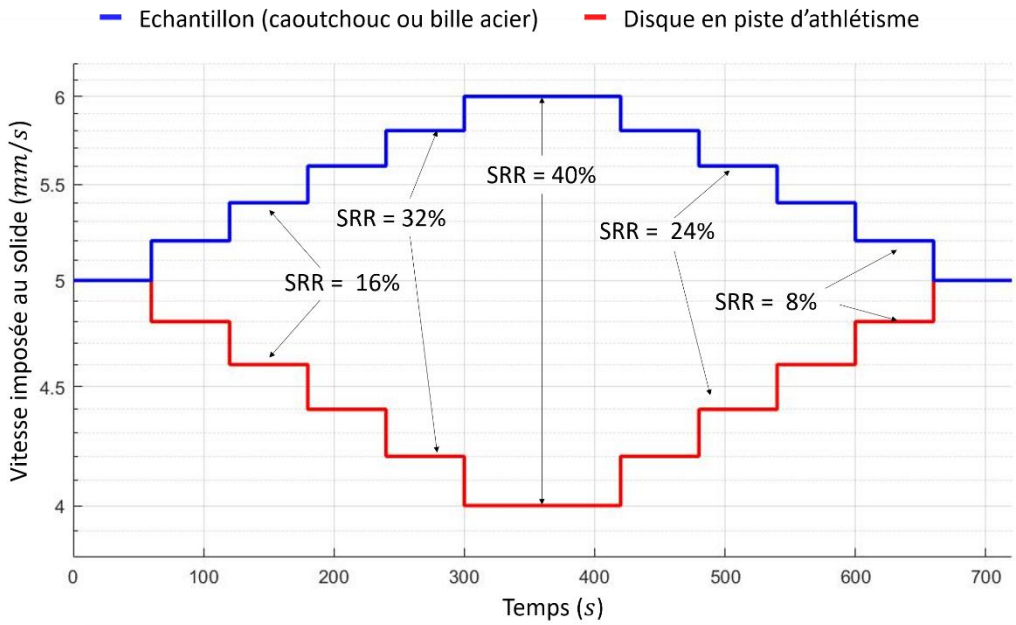


FIGURE 4.10 : EVOLUTION DES VITESSES DE L'ECHANTILLON ET DU DISQUE D'ATHLETISME EN FONCTION DU TEMPS, PERMETTANT DE REALISER UN ESSAI DE ROULEMENT-GLISSEMENT A VITESSE D'ENTRAINEMENT CONSTANTE.

La figure 4.11 montre les résultats obtenus sur le disque en verre pour les deux échantillons. Les points représentés correspondent à la force de frottement moyenne mesurée en régime stabilisé pour chaque palier de glissement.

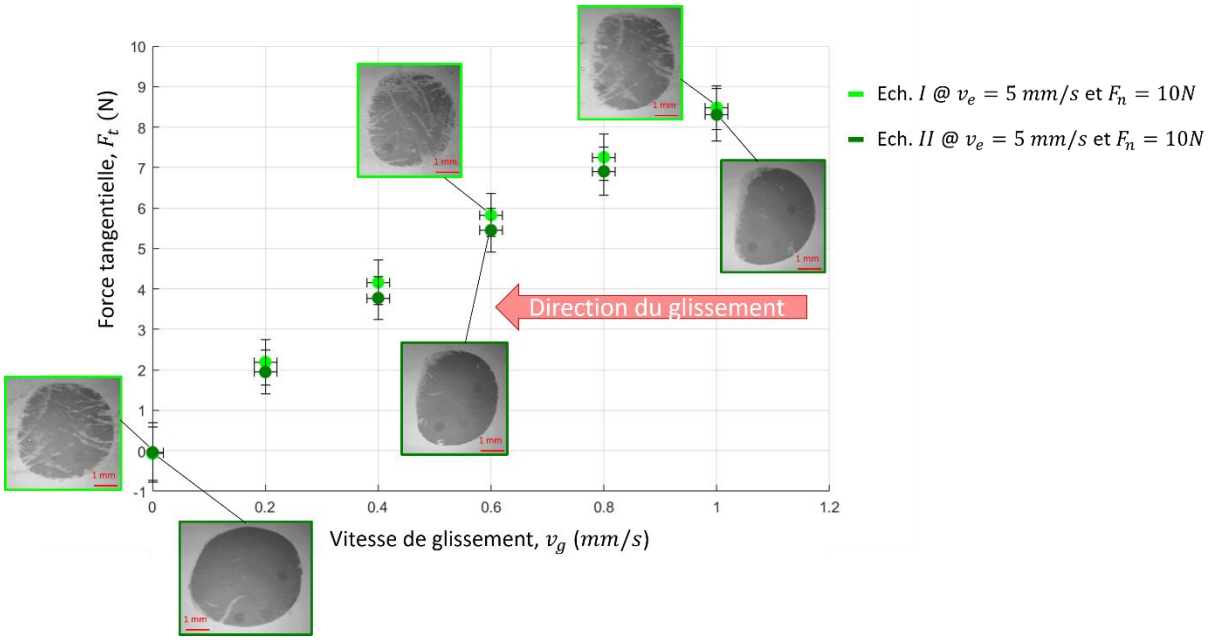


FIGURE 4.11 : EVOLUTION DE LA FORCE TANGENTIELLE EN FONCTION DE LA VITESSE DE GLISSEMENT POUR LES DEUX ECHANTILLONS SUR UN DISQUE EN VERRE, A UNE VITESSE D'ENTRAINEMENT DE $5\ mm/s$, SOUS UNE FORCE NORMALE DE $10N$. DES IMAGES DU CONTACT ONT ETE PRISES A DIFFERENTS INSTANTS DE L'ESSAI, SOULIGNANT LA DIFFERENCE DES FORMES DU CONTACT GLISSANT DES DEUX ECHANTILLONS.

Dans cet essai de roulement-glissement, l'augmentation progressive de la vitesse de glissement conduit à une augmentation de la force tangentielle, conformément à ce qui est attendu pour ce type de sollicitation. Pour les deux échantillons, cette augmentation présente une évolution quasi linéaire. Les forces tangentielles maximales mesurées restent nettement inférieures à celles obtenues en glissement pur, plus sévère (SRR=200%).

Comme lors des essais en glissement pur, l'échantillon II génère une force tangentielle légèrement plus faible que l'échantillon I pour une même vitesse de glissement lorsque le contact s'effectue sur un disque en verre. L'évolution de l'aire de contact observée sur la figure 4.11, montre que l'échantillon II se déforme davantage que l'échantillon I lorsque la vitesse de glissement augmente. Cette différence de déformation de la zone de contact est examinée plus en détail dans la figure 4.12.

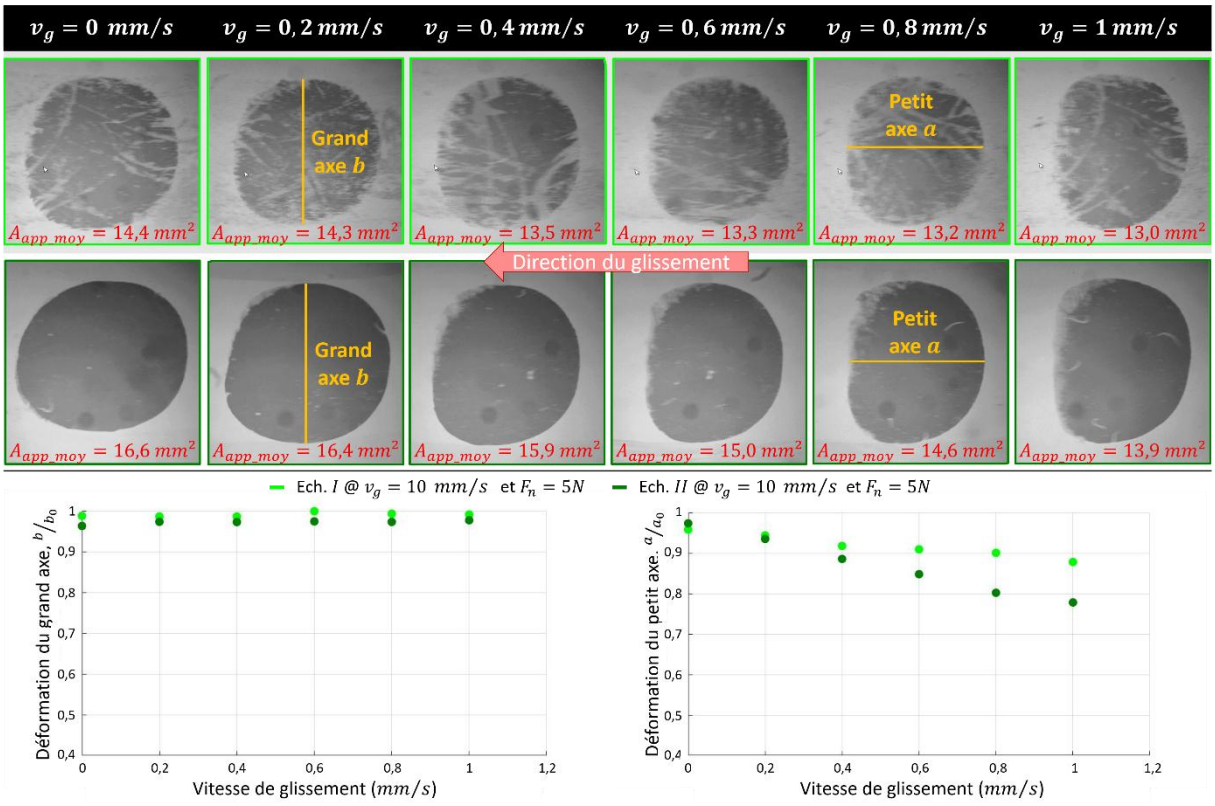


FIGURE 4.12 : ILLUSTRATION DES ZONES DE CONTACT DES DEUX ECHANTILLONS, DANS LES CONDITIONS D'ESSAI DECRITES PRECEDEMMENT, POUR LES DIFFERENTES VITESSES DE GLISSEMENT TESTEES. L'AIRE DE CONTACT DES DEUX ECHANTILLONS DIMINUE LORSQUE LA VITESSE DE GLISSEMENT AUGMENTE DE PAR LA REDUCTION DU PETIT AXE a. L'EVOLUTION DU GRAND AXE b ET DU PETIT AXE a PAR RAPPORT A LEUR VALEUR MESUREE EN CONTACT STATIQUE, RESPECTIVEMENT b_0 ET a_0 SONT REPRESENTES SUR LES GRAPHIQUES.

L'aire de contact étant déterminée par les longueurs des deux axes de l'ellipse, son évolution est directement liée à celle de ces paramètres géométriques. Comme l'illustre la figure 4.12, la déformation du petit axe varie de manière linéaire avec la vitesse de glissement. Il en résulte que, dans la gamme de vitesses étudiée, la diminution de l'aire de contact est proportionnelle à l'augmentation de la vitesse de glissement. Cette réduction est principalement liée à la diminution du petit axe de l'ellipse de contact, c'est-à-dire l'axe parallèle à la direction de glissement, comme cela a été observé dans la littérature [4.6]. Le grand axe, lui, demeure pratiquement constant pour les deux matériaux, se maintenant à environ 95 % de sa valeur mesurée dans les conditions statiques.

De plus, la déformation relative du petit axe est plus faible pour l'échantillon II que pour l'échantillon I à la même vitesse de glissement, ce qui est cohérent avec les observations réalisées lors des essais en glissement pur. Ainsi, pour une vitesse de glissement de 1 mm/s, la réduction de l'aire de contact apparente atteint 18% pour l'échantillon I et 25% pour l'échantillon II.

La contrainte de cisaillement moyenne au sein de la zone de contact est alors estimée à partir des forces de frottement mesurées et des aires de contact associées. Son évolution en fonction de la vitesse de glissement est tracée sur la figure 4.13.

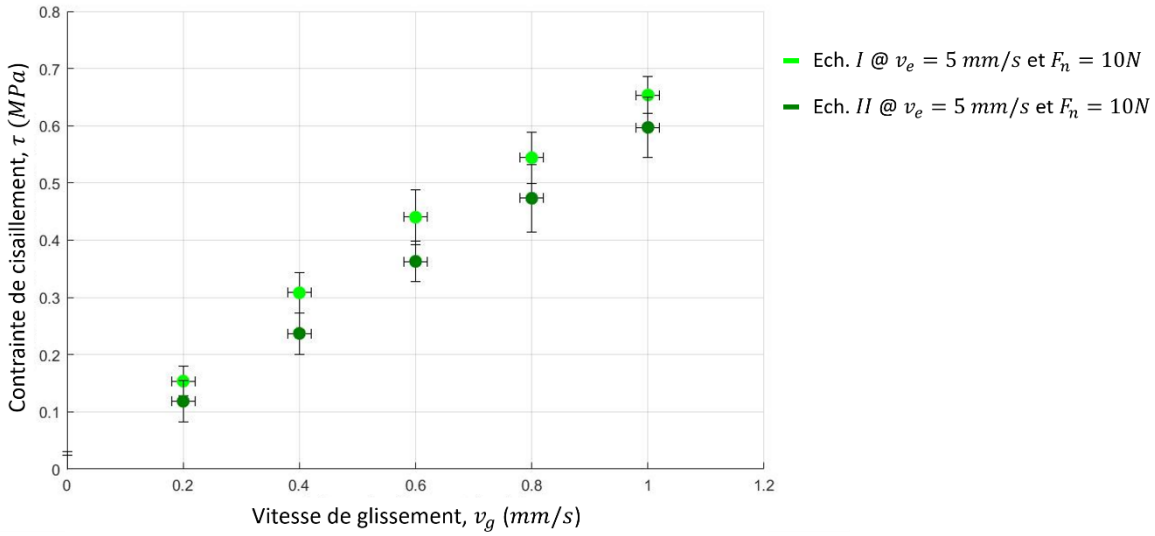


FIGURE 4.13 : EVOLUTION DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT EN FONCTION DE LA VITESSE DE GLISSEMENT DANS LES CONDITIONS D'ESSAI DECRITES PRECEDEMMENT.

La figure 4.13 confirme les tendances mises en évidence observée sur la force tangentielle mesurée en glissement pur. Bien que les deux échantillons présentent des déformations nettement différentes, les contraintes de cisaillement obtenues restent très proches. Les barres d'incertitude sont d'ailleurs suffisamment larges pour que les valeurs mesurées se recouvrent, rendant difficile toute distinction nette entre les deux matériaux sur la base de ce critère.

Ce protocole de roulement-glissement a également été appliqué aux contacts entre les pistes d'athlétisme et les échantillons I et II.

ii. Complexification de l'essai en intégrant la piste d'athlétisme comme substrat

La figure 4.14 présente l'évolution de la force de frottement des deux échantillons en fonction de la vitesse de glissement, pour les essais réalisés aussi bien sur le verre que sur les pistes d'athlétisme. Toutefois, contrairement aux résultats obtenus en glissement pur, la sévérité du glissement dans ce régime de roulement-glissement n'est plus suffisante pour discriminer clairement les deux formulations de caoutchouc. Si la distinction entre les essais menés sur verre et ceux effectués sur piste demeure nette, les forces mesurées pour les échantillons I et II se superposent sur l'ensemble des paliers de vitesse de glissement.

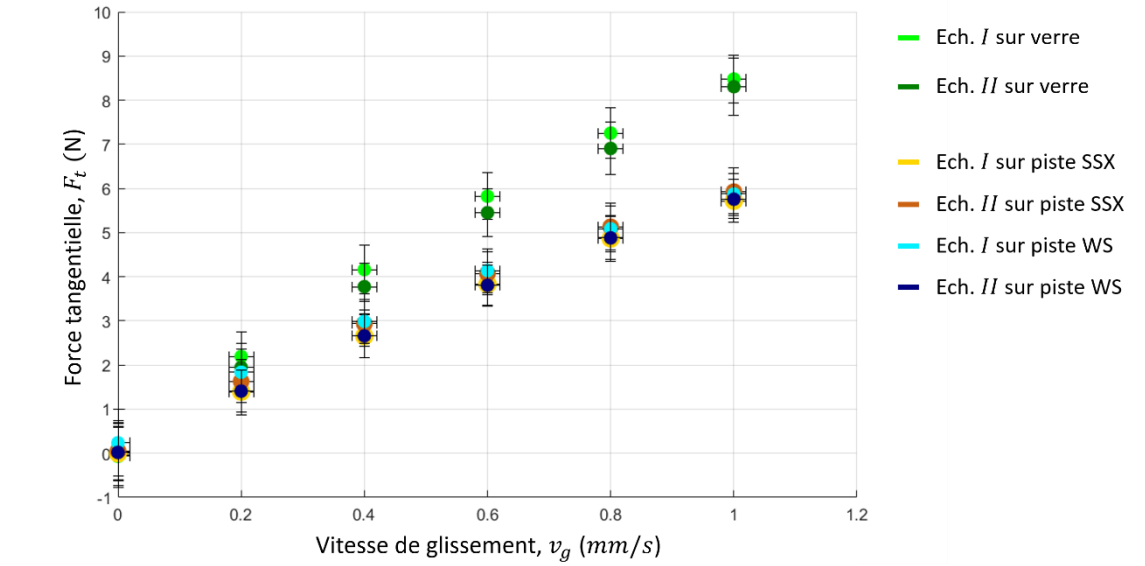


FIGURE 4.14 : EVOLUTION DE LA FORCE TANGENTIELLE EN FONCTION DE LA VITESSE DE GLISSEMENT POUR LES DEUX ECHANTILLONS I ET II, A UNE VITESSE D'ENTRAINEMENT DE 5 $\mathrm{mm/s}$, SOUS UNE FORCE NORMALE DE 10N. LES POINTS VERTS SONT LES MEMES QUE CEUX PRESENTES A LA FIGURE 4.11, LES POINTS AJOUTEES CORRESPONDENT A UN ESSAI ENTRE UN ECHANTILLON ET UNE PISTE D'ATHLETISME. DANS CES CONDITIONS EXPERIMENTALES, IL EST TRES DIFFICILE DE DISTINGUER UN ECHANTILLON DE L'AUTRE, ET UNE PISTE D'ATHLETISME DE L'AUTRE DU POINT DE VUE DE LEUR REPONSE TRIBOLOGIQUE.

La superposition des courbes des deux échantillons, que ce soit sur la piste SSX ou sur la piste WS, confirme que les différences topographiques et mécaniques entre ces deux revêtements ne sont pas suffisamment marquées pour permettre de les distinguer dans ce type d'essai. Par ailleurs, cet essai met également en évidence que l'écart de comportement entre les deux formulations de caoutchouc reste faible, et ne devient réellement perceptible que lorsque la sévérité de l'essai tribologique est élevée, comme c'est le cas en glissement pur.

b. Influence de la vitesse d'entrainement sur la réponse tribologique en roulement-glissement

Dans la continuité de la démarche adoptée dans ce chapitre, pour progressivement se rapprocher des conditions réelles, la partie suivante présente des essais de roulement-glissement effectués à une vitesse d'entraînement plus élevée. Des essais ont ainsi été conduits à 50 mm/s et à 500 mm/s. L'augmentation de la vitesse d'entrainement nécessite un réajustement des vitesses de glissement afin de conserver un taux de glissement significatif.

Les vitesses de glissement ont été choisies de manière à créer une zone de recouvrement entre les trois vitesses d'entraînement, permettant des points de comparaison directs. Elles ont également été choisies pour limiter les essais à un SRR de 20%, afin d'éviter que l'usure des pistes et des échantillons n'affecte les résultats.

Dans la mesure où l'objectif est désormais de se rapprocher au plus près des conditions réelles d'utilisation, seuls les résultats obtenus sur les pistes d'athlétisme sont présentés dans cette section. Les essais réalisés sur verre montrent, pour ces conditions, des tendances

semblables à celles observées sur piste. Par ailleurs, comme discuté précédemment, les deux pistes présentent un comportement tribologique si proche qu'il devient impossible de les distinguer expérimentalement. Ainsi, seule la piste WS est retenue dans cette section, les essais sur la piste SSX conduisant aux mêmes observations.

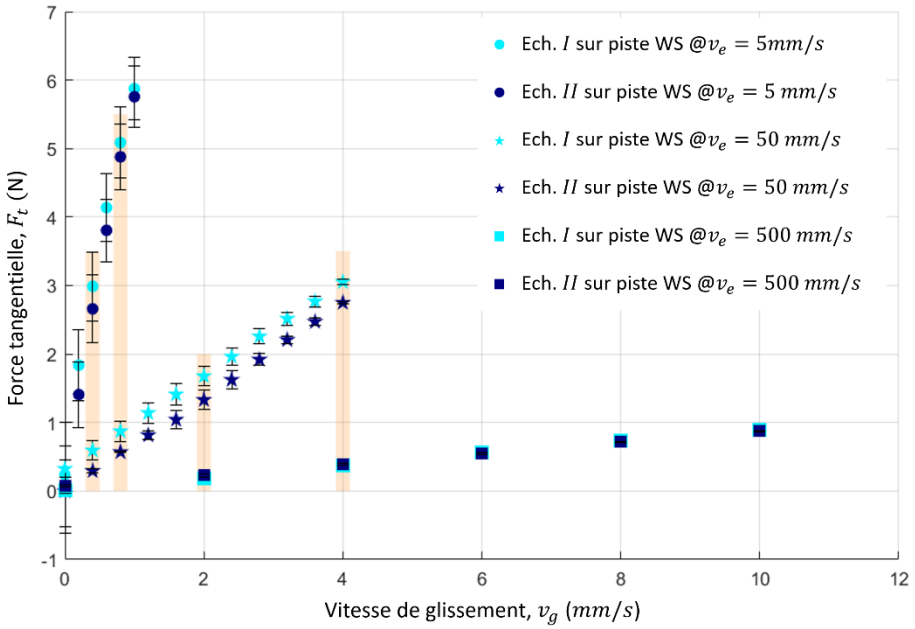


FIGURE 4.15 : EVOLUTION DE LA FORCE TANGENTIELLE DES DEUX ECHANTILLONS SUR LA PISTE WS POUR TROIS VITESSES D'ENTRAINEMENT DIFFERENTES, DIFFERENCIE PAR DES SYMBOLES DIFFERENTS.

La figure 4.15 reprend les résultats obtenus sur la piste WS présentés dans la figure 4.14 et intègre les résultats obtenus pour les essais réalisés aux vitesses d'entraînement de 50 mm/s et 500 mm/s, représentés respectivement par les symboles en forme d'étoiles et de carrés. Les zones surlignées en orange montrent clairement que, pour une vitesse de glissement donnée, l'augmentation de la vitesse d'entraînement conduit à une diminution du niveau de frottement. Ce comportement s'explique directement par la baisse du taux de glissement : lorsque la vitesse de glissement reste constante tandis que la vitesse d'entraînement augmente, le ratio entre les deux diminue, réduisant ainsi la sévérité de la cinématique du contact et donc la force tangentielle mesurée.

On observe également que les deux échantillons présentent des réponses très proches, confirmant que, dans ce régime de roulement-glissement à faible SRR, les différences de formulation des caoutchoucs influencent peu le comportement tribologique global.

Enfin, quelle que soit la vitesse d'entraînement considérée, la relation entre la force de frottement et la vitesse de glissement reste quasi linéaire, traduisant une réponse tribologique stable dans l'ensemble de ces conditions d'essai. Pour examiner directement les essais à différentes vitesses d'entraînement, ces mêmes résultats ont été tracés en fonction du SRR sur une échelle log-log, comme présenté dans la figure 4.16.

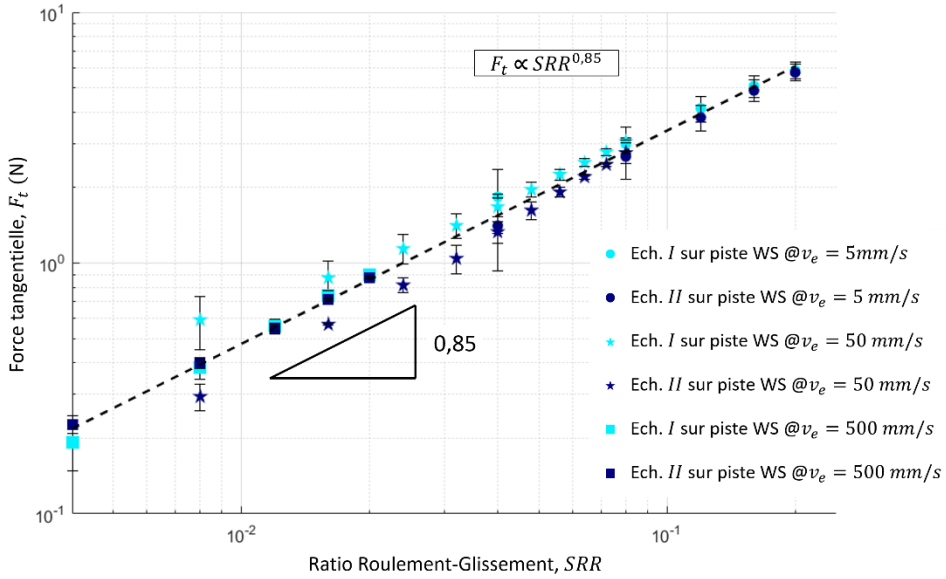


FIGURE 4.16 : EVOLUTION DE LA FORCE TANGENTIELLE EN FONCTION DU RATIO ROULEMENT-GLISSEMENT (SRR) POUR LES SIX ESSAIS PRESENTES A LA FIGURE 4.15, TRADUISANT LA SEVERITE DE L'ESSAI. LA FORCE TANGENTIELLE SE SUPERPOSE POUR LES DEUX ECHANTILLONS I ET II, INDEPENDAMMENT DE LA VITESSE D'ENTRAINEMENT, POUR UN MEME SRR.

En représentant les résultats en échelle log-log en fonction du SRR, la superposition des essais réalisés aux 3 vitesses d'entraînement testées apparaît clairement. A noter que cette superposition est valide pour ces 3 vitesses d'entrainement, mais que l'on ne peut pas généraliser à toutes les vitesses d'entrainement, comme le montrera la figure 4.20. Cette superposition montre néanmoins que la force tangentielle dépend principalement du rapport entre les deux vitesses, c'est-à-dire du SRR.

La courbe de tendance qui traverse l'ensemble des points des deux échantillons confirme également la très faible différence entre leurs comportements. Cette tendance suit une loi puissance $Y = aX^b$, avec $a = 23{,}9$ et $b = 0{,}85$.

c. Contribution de la piste dans le contact bande de roulement/piste d'athlétisme

i. Analyse de la contribution de la piste en fonction du SRR

Afin d'identifier plus clairement la part de la piste d'athlétisme dans la réponse en frottement, un essai complémentaire a été réalisé en remplaçant l'échantillon en caoutchouc en forme de «tonneau» par une bille en acier. Les conditions expérimentales sont identiques à celles utilisées précédemment, bien que l'aire de contact n'étant pas la même avec une bille en acier qu'un échantillon en caoutchouc, cela engendre une pression de contact différente. Comme la différence de comportement entre l'acier et le caoutchouc devient particulièrement marquée à fort SRR, la figure 4.17 sera présenté en échelle linéaire afin de mettre en évidence plus distinctement ces écarts.

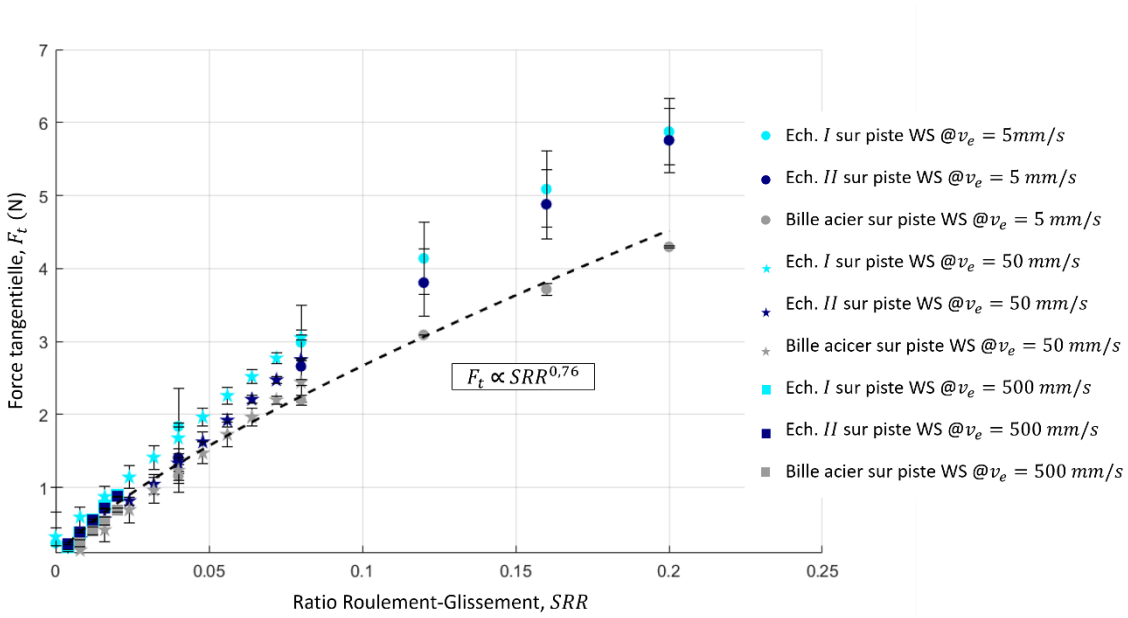


FIGURE 4.17 : PRESENTATION DES ESSAIS PRESENTES A LA FIGURE 4.16 EN ECHELLE LINEAIRE, ET AJOUT DES ESSAIS REALISES ENTRE UNE BILLE EN ACIER ET LA PISTE WS. CES NOUVEAUX ESSAIS METTENT EN EVIDENCE UN COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DISTINCT ENTRE LA PISTE ET UN SOLIDE RIGIDE, TEL QUE LA BILLE EN ACIER, OU UN SOLIDE MOU TEL QUE L'ELASTOMERE CONSTITUTIF DU PNEU.

La figure 4.17 montre que la force tangentielle mesurée pour le contact avec la bille en acier est inférieure à celle obtenue avec les échantillons I et II. Toutefois, cette force reste relativement élevée pour un matériau comme l'acier, qui présente intrinsèquement très peu d'adhésion, et un coefficient de frottement statique théorique plus faible [4.7]. L'ajustement par une loi puissance, réalisé de la même manière que précédemment, révèle également un comportement distinct : l'exposant s'éloigne de 1, indiquant une réponse moins linéaire que celle observée pour le caoutchouc. Par ailleurs, le coefficient pré-multiplicatif est réduit d'environ 35 %, passant de 23,9 pour les échantillons en caoutchouc à 15,5 pour la bille en acier.

Une seconde approche pour analyser l'écart de force tangentielle entre le frottement Acier/Piste et celui Bande de roulement/Piste consiste à examiner l'évolution du rapport entre ces deux grandeurs en fonction du SRR, comme illustré sur la figure 4.18. La force tangentielle de la bande de roulement correspond à la moyenne des valeurs mesurées sur les échantillons I et II.

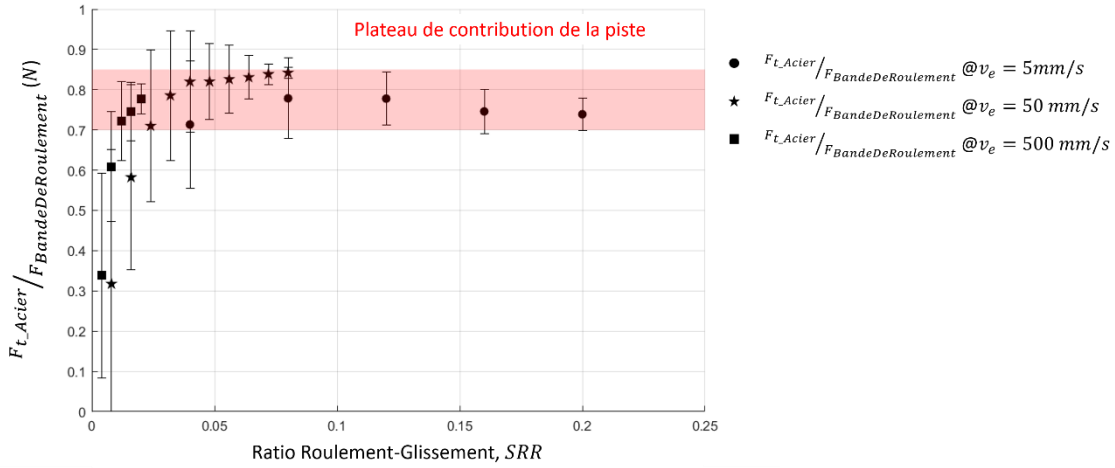


FIGURE 4.18 : EVOLUTION DU RAPPORT ENTRE LA FORCE TANGENTIELLE DE LA BILLE EN ACIER SUR LA FORCE TANGENTIELLE DES DEUX ECHANTILLONS REPRESENTANT LA BANDE DE ROULEMENT MOYENNE EN FONCTION DU SRR, LES TROIS MATERIAUX GLISSANT SUR UNE PISTE WS.

Cette figure met en évidence qu'après une zone d'accommodation à très faible SRR, la force tangentielle générée lorsque la bille en acier frotte sur la piste atteint plus de 80 % de celle mesurée avec l'échantillon de bande de roulement. On observe ainsi l'apparition d'un plateau dont le niveau est compris entre 70 % et 80 %.

Le ratio élevé observé, proche de 80 %, met en évidence une différence entre un contact mettant en jeu deux surfaces molles et un contact associant une surface rigide à une surface souple. Néanmoins, cet écart étant relativement faible, cela pourrait indiquer que la contribution de la piste d'athlétisme est néanmoins significative dans la réponse tribologique globale du contact.

Il est également pertinent d'examiner l'influence de la piste dans d'autres configurations. Les essais suivants visent à reproduire une phase d'accélération, dans laquelle le SRR reste fixé tandis que la vitesse d'entraînement augmente progressivement, la vitesse de glissement étant ajustée en parallèle afin de maintenir ce SRR constant.

ii. Analyse de la contribution de la piste pour un SRR fixé

Les essais suivants ont été réalisés en maintenant un SRR constant fixé à 10 %. Ce choix permet d'accentuer les différences de comportement entre les matériaux, tout en limitant l'usure de manière à pouvoir explorer une large gamme de vitesses d'entraînement.

La vitesse d'entraînement a ainsi été balayée de 0,5 mm/s jusqu'à 1000 mm/s. Pour chaque valeur, deux cinématiques ont été examinées : l'une où le disque tourne plus vite que l'échantillon, et l'autre où l'échantillon est celui qui tourne plus rapidement. Dans les deux cas, les vitesses de rotation des deux solides sont volontairement différentes afin d'imposer une vitesse de glissement ($v_{disque} - v_{échantillon}$). Par convention, celle-ci est considérée positive lorsque le disque tourne plus vite que l'échantillon, et négative dans le cas inverse. Chaque cinématique est maintenue pendant 60 secondes afin d'atteindre un régime stabilisé. Pour les paliers correspondant à des vitesses d'entraînement inférieures à 1 mm/s, la durée a été prolongée afin de garantir qu'au moins un tour complet du disque soit effectué.

Une fois la vitesse d'entrainement de 1000 mm/s atteinte, la séquence a été effectuée par palier de vitesse d'entrainement décroissante, en commençant par la configuration où l'échantillon tourne plus vite que le disque. Cette procédure permet de vérifier que l'usure générée au cours de l'essai ne modifie pas significativement la réponse tribologique.

La figure 4.19 présente l'évolution imposée des vitesses d'entraînement de l'échantillon et du disque au cours de ces essais, à taux de glissement constant.

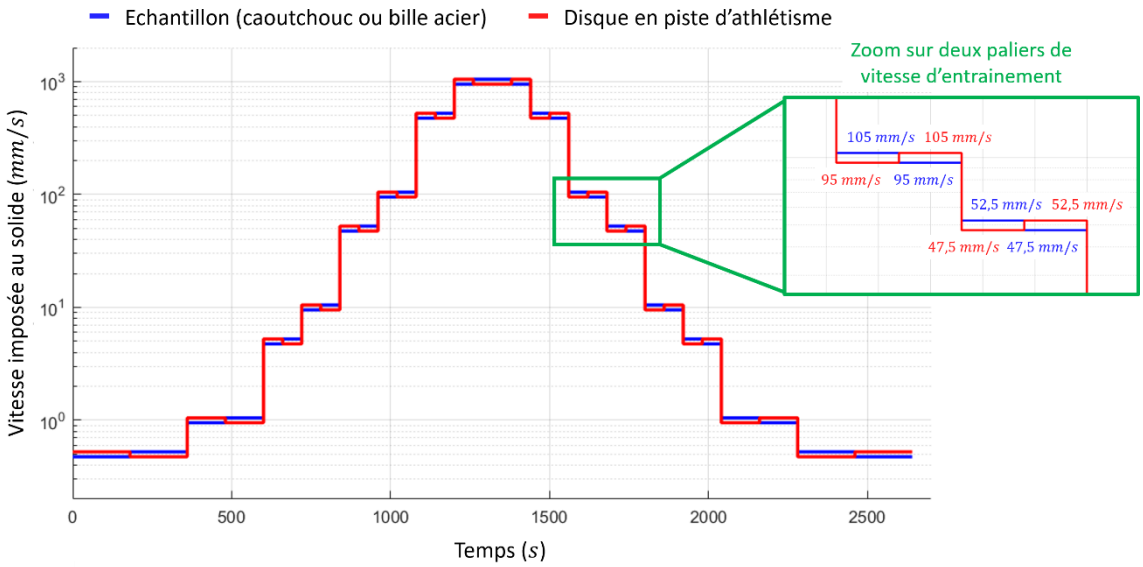


FIGURE 4.19 : EVOLUTION DES VITESSES DES ECHANTILLONS ET DU DISQUE CONSTITUE DE LA PISTE D'ATHLETISME EN FONCTION DU TEMPS, PERMETTANT DE REALISER UN ESSAI DE ROULEMENT-GLISSEMENT A TAUX DE GLISSEMENT CONSTANT.

La force tangentielle mesurée est dans un premier temps moyennée sur la durée du palier. Lorsque l'échantillon tourne plus vite que le disque, la force obtenue est positive. A l'inverse, elle devient négative lorsque le disque tourne plus vite que l'échantillon. Pour chaque vitesse d'entraînement, les valeurs issues de « l'aller » (vitesse d'entraînement croissante) et du « retour » (vitesse d'entraînement décroissante) sont ensuite moyennées afin de s'affranchir d'éventuelles dérives.

La figure 4.20 présente l'évolution de la force tangentielle pour les différents échantillons.

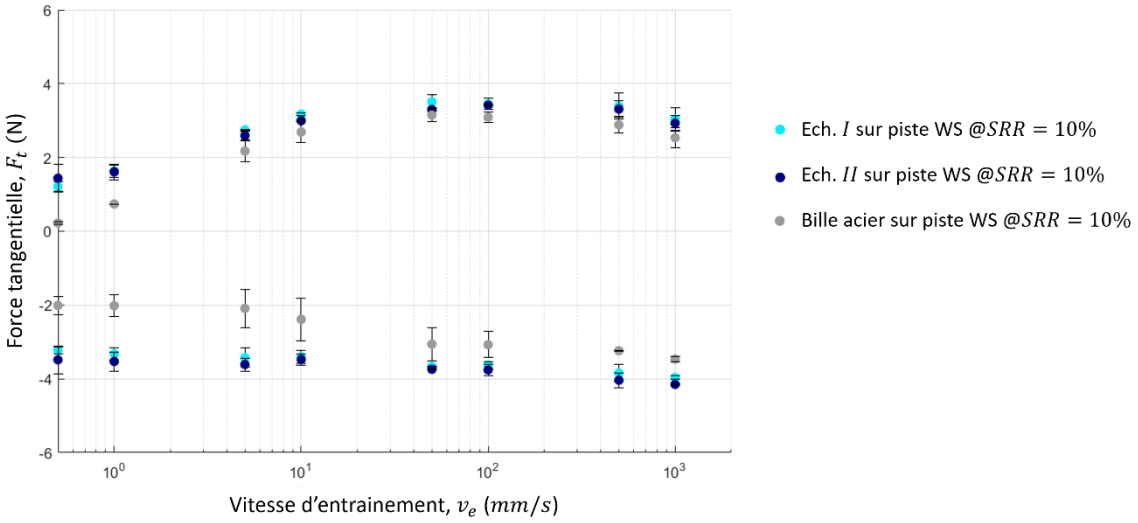


FIGURE 4.20 : EVOLUTION DE LA FORCE TANGENTIELLE POUR DES CONTACTS ENTRE DES BILLES EN CAOUTCHOUC OU EN ACIER ET LA PISTE WS, POUR UN TAUX DE GLISSEMENT DE 10%. CET ESSAI CONFIRME QUE LA DISSIPATION PAR FROTTEMENT AVEC LA BILLE EN ACIER EST PLUS FAIBLE QU'AVEC LES ECHANTILLONS I ET II, MAIS RESTE ELEVEE. UNE ASYMETRIE EN FONCTION DU SOLIDE LE PLUS RAPIDE EST EGALEMENT RELEVEE.

La force tangentielle évolue significativement en fonction de la vitesse d'entrainement, bien que les résultats obtenus à 50 mm/s et 500 mm/s sont très proches, pour les échantillons en caoutchouc. Cela confirme la similarité des forces de frottement mesurées lors des essais à différentes vitesses d'entraînement déjà observée à la figure 4.17. Par ailleurs, avec la bille en acier, la force tangentielle générée est systématiquement plus faible qu'avec les échantillons en caoutchouc, quelle que soit la cinématique de roulement–glissement. Ceci s'explique par une adhésion moindre et l'absence de dissipation visqueuse avec l'échantillon en acier.

Une dissymétrie notable apparaît également : la force tangentielle lorsque l'échantillon tourne plus vite que le disque n'est pas l'opposé de celle mesurée lorsque le disque est plus rapide (figure 4.21). Ce comportement, non intuitif, pourrait s'expliquer en décomposant de la force tangentielle totale en une contribution de roulement et une contribution de glissement.

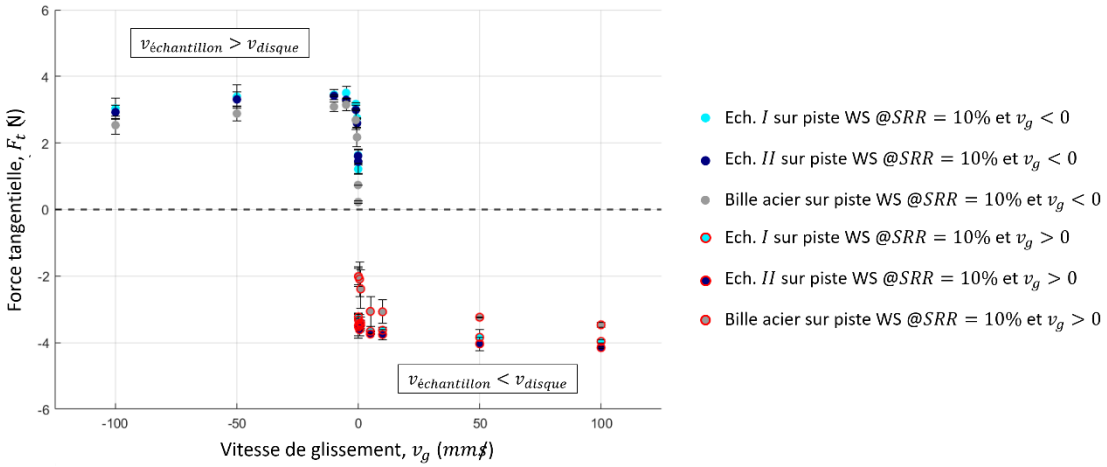


FIGURE 4.21 : EVOLUTION DE LA FORCE TANGENTIELLE EN FONCTION DE LA VALEUR ALGEBRIQUE DE LA VITESSE DE GLISSEMENT. CETTE REPRESENTATION MET EN EVIDENCE DE L'ASYMETRIE DE LA FORCE TANGENTIELLE RELATIVEMENT AU POINT DE VITESSE DE GLISSEMENT NULLE.

On observe clairement une asymétrie en fonction de la vitesse de glissement positive et négative. De plus, la force tangentielle mesurée avec la bille en acier reste inférieure à celle mesurée pour les échantillons I et II.

d. Décomposition des composantes de roulement et de glissement de la force tangentielle

On suppose que la force tangentielle résulte de l'addition de deux contributions indépendantes, une contribution de roulement ne dépendant que de la vitesse d'entraînement et une contribution de glissement ne dépendant que de la vitesse de glissement [4.8]. On peut donc écrire :

$$F_{t_{mesurée}}(v_e, v_g) = F_{t_{roulement}}(v_e) + F_{t_{glissement}}(v_g)$$

où la force mesurée $F_{t_{mesurée}}$ dépend à la fois de la vitesse d'entrainement et de la vitesse de glissement. La composante de glissement nulle à vitesse de glissement nulle et symétrique avec la vitesse de glissement, on obtient , autrement dit $F_{t_{glissement}}(-v_g) = -F_{t_{glissement}}(v_g)$. Dans ce cadre d'hypothèses, deux contributions peuvent être obtenues à partir des relations suivantes :

$$F_{t_{roulement}}(v_e) = \frac{F_t(v_e,v_g)+F_t(v_e,-v_g)}{2} \quad \text{et} \quad F_{t_{glissement}}(v_g) = \frac{F_t(v_e,v_g)-F_t(v_e,-v_g)}{2}$$

La figure 4.22 montre le résultat de la décomposition de la force tangentielle globale en deux contributions additives de roulement et de glissement en fonction de la vitesse de glissement.

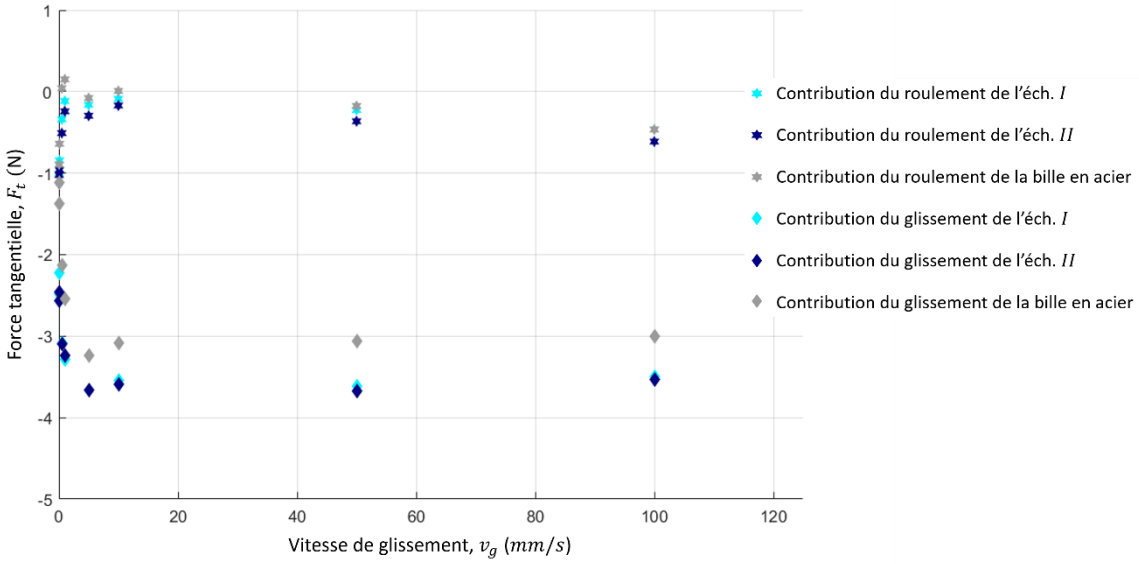


FIGURE 4.22 : EVOLUTION DES COMPOSANTES DE GLISSEMENT ET DE ROULEMENT DE LA FORCE TANGENTIELLE TOTALE MESUREE EN FONCTION DE LA VITESSE DE GLISSEMENT POUR DES ESSAIS A TAUX DE GLISSEMENT CONSTANT ET POUR LES DIFFERENTS COUPLES DE MATERIAUX TESTES.

La contribution liée au glissement domine très largement, la contribution de roulement restant proche de zéro. Toutefois, on observe que cette dernière augmente lorsque la vitesse d'entraînement augmente.

Enfin, l'écart de comportement entre les échantillons en caoutchouc et la bille en acier provient principalement de la composante de glissement de la force tangentielle totale.

e. Résumé des résultats obtenus en laboratoire

Pour conclure cette partie, l'ensemble des essais présentés dans ce chapitre montre que les échantillons I et II présentent des comportements extrêmement proches. Ces similitudes s'expliquent par la nature même du contact élastomère/élastomère entre la bande de roulement et la piste d'athlétisme. Par ailleurs, le niveau de frottement relativement élevé observé entre la bille en acier et la piste suggère que les propriétés mécaniques du revêtement jouent un rôle significatif dans la réponse tribologique du système. Dans ces conditions, modifier la formulation de la bande de roulement n'apparaît donc pas comme un levier majeur pour obtenir les quelques pourcents de performance supplémentaires recherchés par les athlètes français dans leur quête de médaille.

Cependant, comme cela a été souligné au fil du chapitre, ces essais de laboratoire souffrent d'une limite importante liée à l'échelle du contact simulé. La piste d'athlétisme utilisée lors des tests est à l'échelle réelle, tandis que les échantillons de caoutchouc cherchent à reproduire un pneu mais dans un format fortement réduit. À l'échelle réelle, un pneu interagit simultanément avec un ensemble d'aspérités de la piste, ce qui conduit à une zone de contact étendue et à un comportement potentiellement différent de celui observé sur le tribomètre. Il est donc probable que la réponse tribologique en conditions réelles ne soit pas strictement identique à celle mesurée en laboratoire.

La dernière partie de ce chapitre sera ainsi consacrée à des essais menés directement avec les athlètes, sur la piste elle-même, afin d'identifier d'éventuels leviers d'optimisation pour améliorer la performance des athlètes dans la cours en fauteuil.

4. Optimisation des boyaux en conditions réelles

Lors des discussions préliminaires avec les athlètes, une première question portait sur la possibilité d'optimiser le pneu, notamment sa formulation, afin d'améliorer les performances du fauteuil. La partie précédente semble indiquer que cette voie est finalement assez complexe et que les gains obtenus restent très faibles. Mais avant cela, une autre interrogation est rapidement apparue : quelle est la pression de gonflage optimale ?

Pour répondre à cette question, une série d'essais a été réalisée sur plusieurs paires de pneus et pour différentes pressions de gonflage. L'objectif était de déterminer un coefficient de résistance au roulement permettant de comparer les pneus entre eux et d'évaluer l'influence de la pression de gonflage utilisée sur la résistance au roulement.

a. Définition d'un protocole de mesure de résistance au roulement sur piste

Fortement inspirée par l'industrie pneumatique, la détermination du coefficient de résistance au roulement repose sur une méthode dite de « décélération » [4.9][4.10]. Son principe, illustré en figure 4.23, se déroule en trois étapes :

1. Phase d'accélération : l'athlète accélère sur une certaine distance afin d'atteindre une vitesse suffisante.

2. Adoption de la position aérodynamique : il cesse ensuite tout boxage de la main courante pour se placer en position aérodynamique.

3. Phase de décélération mesurée : l'athlète entre alors dans une zone dédiée, qu'il doit parcourir sans modifier sa posture. Deux temps sont chronométrés : celui nécessaire pour parcourir le premier mètre de la phase de décélération D_{init}, puis celui correspondant à la suite de la phase de décélération D.

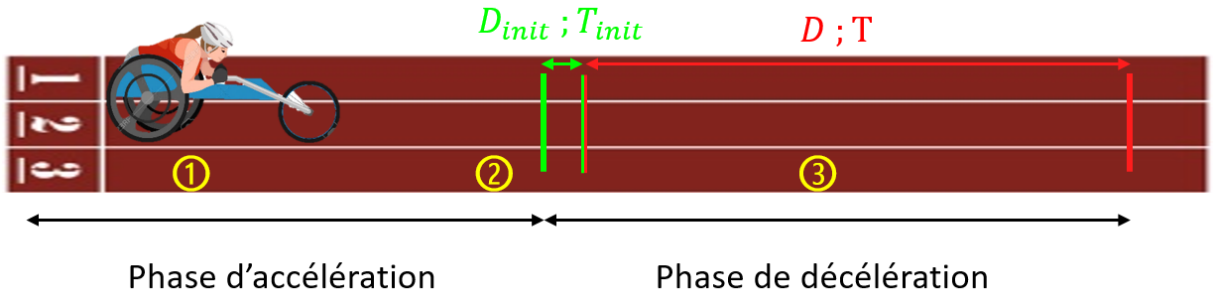


FIGURE 4.23 : ILLUSTRATION DE L'ESSAI DE DECELERATION. L'ATHLETE ACCELERE DANS LA PREMIERE PHASE, AVANT DE SE METTRE EN POSITION AERODYNAMIQUE DANS LA PHASE 2, PUIS DE DECELERER EN POSITION AERODYNAMIQUE DANS LA PHASE 3. LA VITESSE INITIALE EST PRISE SUR LA DISTANCE D_{init}, TANDIS QUE LE TEMPS DE LA DECELERATION EST PRIS SUR LA DISTANCE D.

Ainsi, en connaissant le temps nécessaire pour parcourir la distance D et la vitesse initiale mesurée en D_{init}, il est possible de déterminer le coefficient de résistance au roulement en utilisant la seconde loi de Newton.

Pour cet essai, deux forces sont prises en compte, la trainée aérodynamique F_x et la résistance au roulement F_r données respectivement par les relations suivantes :

$$F_x = \frac{1}{2}.\rho.AC_d.v^2 \quad \text{et} \quad F_r = C_r.m.g$$

La résistance liée aux roulements à billes entre la roue et l'essieu est supposée négligeable devant ces deux contributions.

Dans ces expressions, ρ est la densité de l'air, AC_d le produit de l'aire frontale effective par le coefficient de trainée aérodynamique, et v la vitesse du fauteuil. Pour la résistance au roulement, m désigne la masse totale (athlète + fauteuil), g l'accélération de la pesanteur, et C_r le coefficient de résistance au roulement, qui constitue la grandeur recherchée dans cette approche.

En appliquant la seconde loi de Newton, on obtient l'équation suivante :

$$m\frac{dv}{dt} = -C_r.m.g - \frac{1}{2}.\rho.AC_d.v^2$$

La résolution de l'équation différentielle ci-dessus donne en posant $\alpha = -C_r.g$ et $\beta = -\frac{\rho.AC_d}{2.m}$:

$$v(t) = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}.\tan(\sqrt{\alpha\beta}(t - K_1))$$

où K_1 une constante déterminée à partir de α, β et de la vitesse initiale v_0, elle-même dépendante de α, β, de la distance initiale D_{init} et du temps nécessaire pour la parcourir t_{init}.

Les mesures réalisées durant l'essai correspondent aux temps mis par l'athlète pour parcourir une distance prédéfinie. L'équation précédente a donc été intégrée afin d'obtenir l'expression de la distance :

$$D(t) = \frac{1}{2\beta}.\ln\left(\frac{1 + \tan\left(\sqrt{\alpha\beta}.t - \operatorname{atan}\left(\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}}.v_0\right)\right)^2}{1 + \frac{\beta}{\alpha}.{v_0}^2}\right)$$

La distance parcourue durant la phase de décélération dépend donc directement du temps associé, ainsi que des constantes α et β, liées respectivement à la résistance au roulement et à la traînée aérodynamique, et de v_0, déterminée à partir de la phase initiale.

Dans cette relation, la seule inconnue reste le coefficient de résistance au roulement $C_r = -\frac{\alpha}{g}$.

Pour ce qui concerne la traînée aérodynamique, un capteur présent sur le lieu de l'essai mesure la température et la pression atmosphérique, ce qui permet de calculer la densité de l'air. Le terme AC_d, correspondant au produit de l'aire frontale effective A et du coefficient de trainée aérodynamique C_d, est déterminé par une combinaison de mesures et d'estimations : l'aire effective est obtenue par traitement d'image à partir d'une photographie de l'athlète en position aérodynamique, tandis que le coefficient C_d est issu de données de la littérature [4.11][4.12].

Concernant la résistance au roulement, le coefficient C_r est la grandeur recherchée. La masse totale m (athlète + fauteuil) est fournie par l'athlète, et la pesanteur g est connue.

Au final, le coefficient de résistance au roulement est déterminé en minimisant l'erreur quadratique entre la distance de décélération mesurée expérimentalement et celle prédite par le modèle.

b. Données expérimentales spécifiques à l'essai mis en place

Les essais ont été réalisés avec Julien Casoli, athlète de l'équipe de France paralympique, au sein de la halle Stéphane-Diagana de Lyon, équipée d'une piste Mondotrack SSX. Les paramètres nécessaires à la détermination du coefficient de résistance au roulement C_r sont les suivants :

- La température intérieure est de 19°C et la pression atmosphérique de 1001 hPa, ce qui correspond à une densité de l'air ρ de 1,19 kg/m^3.
- L'aire frontale de l'athlète en position aérodynamique vaut 0,37 m² et le coefficient de traînée aérodynamique retenu est égal à 0,7, valeur intermédiaire entre celles généralement observées pour un cycliste et pour un fauteuil roulant de ville [4.11][4.12]. Le produit AC_d utilisé dans les calculs est donc de 0,26 m^2.
- La masse totale de l'athlète et de son fauteuil est de 66 kg.

Pour ce protocole, la distance D_{init} a été fixée à 1 m tandis que la distance de décélération D a été définie à 20 m. Ces longueurs ont été mesurées à l'aide d'un télémètre laser. Une bande adhésive a été placée au centre du couloir afin de matérialiser précisément les repères de mesure.

Les temps de passage ont été déterminés grâce aux images issues d'une caméra embarquée fixée sur le fauteuil. Orientée vers le sol, cette caméra filme les repères adhésifs placés sur la piste. Grâce à une fréquence d'acquisition de 60 Hz, il est possible d'extraire avec précision l'instant correspondant au franchissement de chaque marque au sol par le fauteuil.

Les essais ont également été enregistrés par une caméra latérale afin de vérifier a posteriori leur validité. Cette seconde vue permet notamment de confirmer que l'athlète conserve bien sa position aérodynamique tout au long de la phase de décélération, qu'il adopte correctement cette posture avant d'entrer dans la zone de mesure, et qu'il reste bien au centre du couloir, sans déviation susceptible de rallonger la distance parcourue.

Concernant les pneumatiques, Hutchinson ne fabriquant plus de boyaux, la structure a été fournie par l'entreprise FMB. Sur cette structure FMB, la bande de roulement de l'échantillon II testé en laboratoire a été montée. Pour évaluer l'influence de la formulation de la bande de roulement à l'échelle réelle, un second boyau FMB équipé de la meilleure formulation FMB a également été testé. Les boyaux précédemment utilisés par Julien Casoli ont aussi été intégrés à l'étude ; il s'agissait de boyaux Vittoria Pista Speed.

Enfin, des essais antérieurs ont montré que, du fait de l'angle de carrossage du fauteuil, le boyau n'était pas toujours sollicité sur sa bande de roulement, notamment dans les virages. Une dernière paire de boyaux a donc été testée : identique à la première configuration (structure FMB + bande de roulement Hutchinson II), mais avec la bande de roulement décalée de 5 mm lors du montage afin de compenser l'effet du carrossage.

Les quatre paires de boyaux évaluées sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

Paire de boyaux testée	Hutch. 1	Hutch. 2	FMB	Vittoria
Structure du boyau	FMB	FMB	FMB	Vittoria
Bande de roulement	Hutchinson Echantillon II	Hutchinson Echantillon II	FMB	Vittoria
Décentrage de la bande de roulement	Oui	Non	Non	Non

TABLEAU 4.3 : RECAPITULATIF DES PAIRES DE BOYAUX UTILISES LORS DES ESSAIS AVEC JULIEN CASOLI.

Chaque paire de boyaux a ensuite été testée à quatre pressions de gonflage différentes (3, 5, 7 et 9 bar). Pour garantir la fiabilité et la reproductibilité des résultats, chaque configuration a été répétée cinq fois.

c. Analyse de l'évolution du coefficient de résistance au roulement, selon le boyau utilisé, et sa pression de gonflage

Les résultats sont présentés dans la figure 4.24, où chaque point correspond à la valeur de C_r obtenue, moyennée sur les 5 répétitions de l'essai.

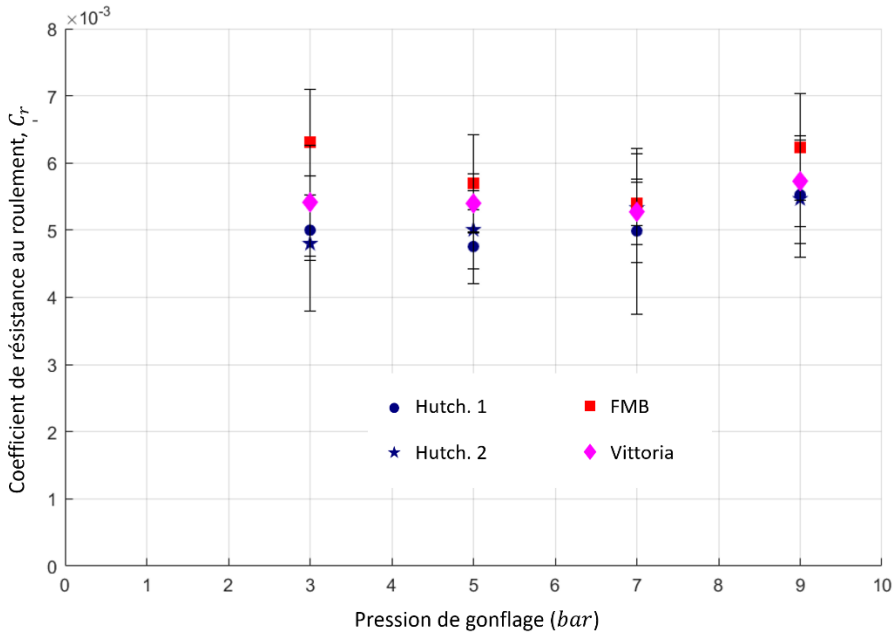


FIGURE 4.24 : EVOLUTION DU COEFFICIENT DE RESISTANCE AU ROULEMENT, SELON LA PRESSION DE GONFLAGE, ET LE TYPE DE BOYAU UTILISE.

Cette figure met clairement en évidence que plusieurs paramètres influencent la résistance au roulement en conditions réelles : la formulation de la bande de roulement, la structure du boyau et enfin la pression de gonflage.

En comparant les échantillons FMB et Hutch. 2, dont seule la formulation de la bande de roulement diffère (la structure du boyau étant identique), on observe une distinction nette : le boyau FMB présente systématiquement un C_r plus élevé que celui de Hutch. 2.

De même, lorsqu'on confronte les boyaux équipés de la bande de roulement Hutchinson aux boyaux Vittoria traditionnellement utilisés par les athlètes au moment de l'essai, on constate que les boyaux Hutchinson affichent encore les meilleures performances en termes de résistance au roulement, bien que l'écart avec les Vittoria soit plus modéré que celui observé avec l'échantillon FMB.

Enfin, la différence entre les deux versions du boyau Hutchinson, l'une avec bande de roulement décentrée, l'autre centrée, apparaît très faible. Cela s'explique par le fait que l'essai est réalisé en ligne droite, alors que l'effet du décentrage, lié à la déformation du boyau et au roulage sur le flanc, se manifeste principalement dans les virages.

En ce qui concerne la pression de gonflage, les quatre paires de boyaux présentent toutes une courbe en forme de parabole : le coefficient de résistance au roulement C_r diminue doucement à faible pression de gonflage jusqu'à atteindre un minimum, avant d'augmenter lorsque la pression devient trop importante. La position de ce minimum varie selon les

échantillons. Pour les boyaux Hutchinson, la pression optimale se situe entre 3 et 5 bar, tandis que les boyaux FMB et Vittoria offrent leurs meilleures performances autour de 7 bar.

Le coefficient de résistance au roulement gonflage n'évolue pas de la même manière en fonction de la pression dans ces essais que ceux que l'on retrouve dans la littérature présenté dans le chapitre 1. Néanmoins, les essais ne sont pas identiques puisque ceux présentés par Grappe et al. ont été réalisés sur un sol lisse et rigide, en comparaison d'une piste d'athlétisme rugueuse et souple [4.9].

Cette augmentation du C_r au-delà d'une certaine pression peut s'expliquer par le comportement mécanique de la piste : plus souple que les boyaux, elle peut se déformer et créer un léger bourrelet en amont de la zone de contact lorsque le boyau est trop gonflé. Ce bourrelet viendrait freiner l'avancement du fauteuil, en augmentant la résistance au roulement par une augmentation de l'aire de contact et du volume de matériau sollicité impliqué à l'interface pneu/piste. Cette hypothèse est illustrée à la figure 4.25.

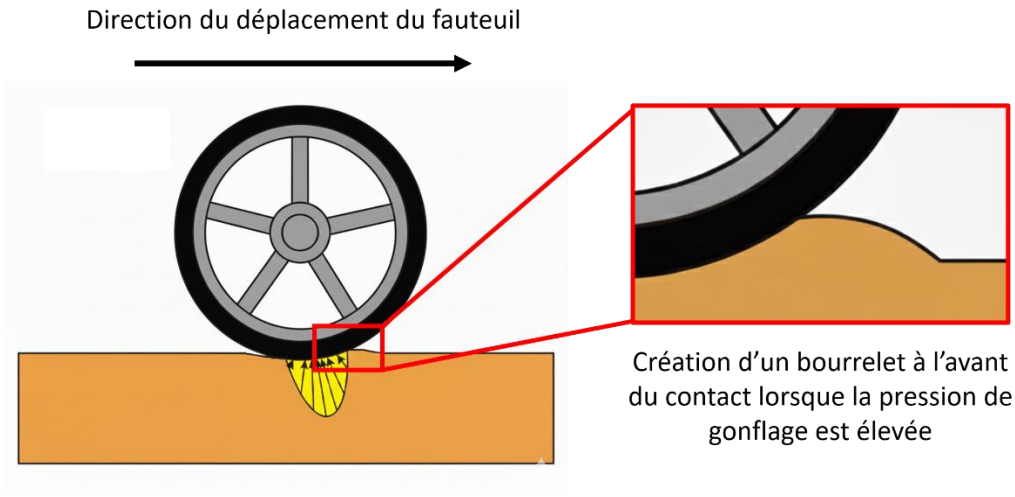


FIGURE 4.25 : SCHEMATISATION DE LA POSSIBLE CREATION D'UN BOURRELET A L'AVANT DU CONTACT EN CAS DE PRESSION DE GONFLAGE TROP ELEVEE. L'EXISTENCE DE CE BOURRELET EXPLIQUERAIT LA HAUSSE DU COEFFICIENT DE RESISTANCE AU ROULEMENT DANS CES CONDITIONS DE GONFLAGE.

Cette interprétation pourrait expliquer la différence de forme de la courbe observée avec celle proposée dans la littérature, et reste cohérente avec le comportement viscoélastique de la piste d'athlétisme réalisée en laboratoire, ainsi qu'avec les essais sur tribomètre, qui montrent la prédominance du contact avec la piste.

En conclusion de ces tests, d'un point de vue pratique, la combinaison optimale en compétition semble être l'utilisation d'un boyau correspondant à la bande de roulement de l'échantillon II, gonflé à 5 bar. Cette configuration donne un coefficient de résistance au roulement de 0,0047, tandis que les boyaux Vittoria et FMB, gonflés à 7 bar, présentent respectivement des C_r de 0,0053 et 0,0054.

5. Conclusions

Ce chapitre a permis d'examiner les mécanismes de frottement entre un pneu de fauteuil roulant et une piste d'athlétisme, en s'appuyant à la fois sur des essais contrôlés en laboratoire et sur des tests réalisés en conditions réelles avec des athlètes. Les travaux menés ont permis de dégager plusieurs conclusions, tant sur le plan scientifique qu'industriel et sportif.

Les essais en glissement pur ont tout d'abord montré l'influence déterminante de la contreface en contact avec l'échantillon en caoutchouc représentant la bande de roulement du pneumatique. Celui-ci génère en effet une force tangentielle nettement plus élevée lorsqu'il glisse sur un disque en verre que lorsqu'il glisse sur une piste d'athlétisme. Ces essais ont également montré que les deux revêtements de piste étudiés (SSX et WS) présentent un comportement tribologique pratiquement identique lorsqu'ils glissent sur un même échantillon d'élastomère. Sur le verre, bien que des différences marquées d'aire de contact aient été observées entre les échantillons, leurs niveaux de force tangentielle restent proches.

Afin de s'approcher des conditions réelles d'utilisation, des essais en roulement–glissement ont ensuite été menés. Cette configuration confirme la distinction nette entre frottement sur verre et frottement sur piste. En revanche, la réduction de la sévérité du contact propre au roulement–glissement atténue fortement les différences entre échantillons : la réponse tribologique demeure inchangée, indépendamment de la formulation (échantillon I ou II) et de la piste SSX ou WS. L'utilisation d'une bille en acier a permis d'isoler la contribution du revêtement : celui-ci représente la majeure partie du frottement total, soulignant le rôle prépondérant de la piste en termes de dissipation du contact.

Ce rôle prédominant du revêtement a également été confirmé par des essais sur le terrain, notamment à travers l'influence de la pression de gonflage. Une pression excessive conduit à une augmentation du coefficient de résistance au roulement, un comportement caractéristique de la piste d'athlétisme lié à sa grande souplesse.

Cependant, nous avons montré que la formulation de la bande de roulement peut affecter le comportement tribologique à l'échelle du boyau : ainsi, la paire intégrant la bande de roulement de l'échantillon II s'est révélée la plus performante parmi les quatre configurations testées avec l'athlète. Cette observation peut sembler en contradiction avec les résultats obtenus en laboratoire, où les deux formulations étudiées étaient difficiles à différencier. Toutefois, cette divergence peut s'expliquer par deux facteurs principaux. D'une part, les deux formulations testées au tribomètre possédaient des propriétés mécaniques très proches, tandis que celles des bandes de roulement FMB et Vittoria n'ont pas été caractérisées, il est donc possible que leurs propriétés diffèrent de manière plus marquée. D'autre part, les essais en laboratoire souffrent d'un problème d'échelle : l'échantillon est à échelle réduite alors que le la piste est à échelle réelle, ce qui modifie la physique du contact.

6. Bibliographie :

[4.1] F. Deleau, « Comportement tribologique et vibroacoustique d'un contact élastomère/verre », Thèse ECL 2009-03, Ecole Centrale de Lyon, 2009.

[4.2] G. Dell'Orto, F.M. Ballo, G. Mastinu, M. Gobbi et G. Magnani, « Racing bicycle tyres – Influence on mechanical characteristics of internal pressure, vertical force, speed and temperature », European Journal of Mechanics, 100, 2023.

[4.3] A. Schallamach, « How does rubber slide ? », Wear, 17, pp 301-312, 1971.

[4.4] M. Barquins, « Friction and wear of rubber-like materials », Wear, 160, pp 1-11, 1993.

[4.5] K.C. Ludema et D. Tabor, « The friction and visco-elastic properites of polymeric solids », Wear, 9, pp 329-348, 1966.

[4.6] M. Khafidh, N.V. Rodriguez, M.A. Masen et D.J. Schipper, « The dynamic contact area of elastomers at different velocities », Tribology Materials Surfaces & Interfaces, 10, pp 70-73, 2016.

[4.7] M. Latour, V. Piluso et G. Rizzano, « Experimental analysis on friction materials for supplemental damping devices », Construction and Buildings Materials, 65, pp 159-176, 2014.

[4.8] A. Dalavale Kaiser Pinto, « Friction of Ice/Rubber Interface: Thermal, Adhesive and Viscoelastic contributions », Thèse, Université de Lyon, 2025.

[4.9] F. Grappe, R. Candau, B. Barbier, M.D. Hoffman, A. Belli et J.D. Rouillon, « Influence of tyre pressure and vertical load on coefficient of rolling resistance and simulated cycling performance. », Ergonomics, 42, pp 1361-1671, 1999.

[4.10] R. Candau, F. Grappe, M. Ménard, B. Barbier, G. Millet, M.D. Hoffman, A. Belli et J.D. Rouillon, « Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling », Medicine and science in sports and exercise, 31, 1999.

[4.11] B.G. Golo, D.L. Bekele, G.C. Jarso et G.S. Tibba, « Design and numerical analysis of bicycle driver compartment area through CFD simulation », Results in Engineering, 24, 2024.

[4.12] J. Chua, F.K. Fuss et A. Subic, « Rolling friction of a rugby wheelchair », Procedia Engineering, 2, pp 3071-3076, 2010.

Conclusion générale

Cette thèse s'est inscrite au cœur du projet de recherche *Sciences*^{2024}, dont l'ambition est de mobiliser l'expertise des sciences dures pour optimiser la performance des athlètes français en vue des Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris. Sur le plan sportif, l'enjeu est crucial: gagner les quelques centièmes de seconde nécessaires pour transformer une place d'honneur en médaille d'or en optimisant la performance du fauteuil roulant de compétition. Scientifiquement, ce travail apporte une contribution à la tribologie des élastomères sur des surfaces rigides ou souples et rugueuses, en analysant les mécanismes d'adhésion, de frottement et d'usure dans des conditions de contacts d'impact glissant (représentant la phase de boxage entre le gant et la main courante) et de roulement-glissement sur des pistes d'athlétisme (représentant le contact entre le pneu et la piste). Enfin, sur le plan applicatif, la collaboration étroite entre la Fédération Française Handisport et le partenaire industriel Hutchinson a permis de traduire des résultats de laboratoire en solutions concrètes et personnalisées pour les para-athlètes, tout en offrant à l'entreprise une visibilité et des leviers d'innovation transférables à d'autres domaines industriels.

Contact gant/main courante

L'étude tribologique du contact gant/main courante a révélé que la formulation chimique de l'élastomère constitue un des leviers principaux pour optimiser la transmission de l'effort lors de la phase de boxage. Les essais réalisés sur le tribomètre LORRY ont démontré que le choix de la matrice régit le frottement au premier ordre, le polyisoprène (IR) offrant une adhérence quatre fois supérieure aux solutions de référence, tandis que l'ajout de résines tackifiantes permet d'ajuster ce grip au second ordre, notamment pour les matrices initialement peu adhérentes. Toutefois, un compromis entre performance et durabilité s'est avéré indispensable: en effet, si le polyisoprène (IR) maximise le frottement, il subit également une usure sévère caractérisée par une perte de masse importante et la présence de grandes rides (d'hauteur 500 μm). *A contrario*, la matrice SBR offre un meilleur équilibre avec un coefficient de frottement qui reste élevé (de l'ordre de 2) mais une usure moindre quantitativement (avec une perte de masse deux fois plus faible que celle du polysioprène), et visuellement (les rides étant également de hauteur deux fois plus faible). L'usure des gants constitue une problématique majeure, tant en raison de la perte progressive de fonctionnalité du revêtement que de la difficulté à procéder à son remplacement en cours de compétition. Le collage du revêtement sur le gant nécessite en effet une mise en œuvre complexe, suivie d'une phase de rodage indispensable, ce qui impose de conserver le même revêtement tout au long d'une compétition.

Pour valider ces résultats obtenus en laboratoire, cinq échantillons sélectionnés ont été fournis sous forme de plaques aux athlètes et à leur entraîneur pour être testés en conditions réelles d'entraînement et de compétition. Les sportifs ont également évalué ces matériaux via un questionnaire ciblant le « grip » et l'usure sur une échelle de 1 à 10. Les résultats ont démontré une excellente corrélation entre le coefficient de frottement stabilisé mesuré sur le tribomètre

LORRY et le ressenti de performance des athlètes, les formulations à base d'IR obtenant les meilleures notes de grip (9/10). De plus, l'examen des gants après utilisation a révélé des faciès d'usure identiques (rides perpendiculaires au frottement) à ceux obtenus avec tribomètre.

Cette convergence scientifique et sportive a permis de personnaliser les choix des plaques de gant selon le profil de l'athlète et sa spécialité: l'élastomère aura ainsi une matrice en IR pour fournir une adhérence maximale aux sprinteurs malgré une usure rapide, et en SBR pour les fondeurs, privilégiant un compromis entre un grip élevé et une usure plus facilement gérable au quotidien.

Contact pneu/piste d'athlétisme

L'analyse de l'interaction entre le pneu et la piste d'athlétisme a démontré que la performance ne dépend pas uniquement de la chimie du caoutchouc, mais d'une compréhension globale de l'interface incluant les propriétés mécaniques et topographiques du revêtement. Les caractérisations du chapitre 3 ont révélé que les pistes Mondo WS et SSX partagent une rugosité et une rigidité très proche. En revanche, la comparaison entre les pistes et les échantillons de bandes de roulement révèle que ces dernières sont plus rigides que les pistes. En parallèle, le développement de deux formulations de bande de roulement a permis d'opposer un échantillon aux caractéristiques équilibrée (I) à un échantillon (II) spécifiquement optimisé pour minimiser la résistance au roulement.

Les essais fondamentaux sur disque en verre au tribomètre LUG ont permis d'isoler les mécanismes d'adhésion et de visualiser le contact, mettant en évidence des comportements dynamiques distincts : l'échantillon II présente des ondes de décollement, tandis que l'échantillon I atteint un état stable quasi instantanément en frottement pur. Le passage du verre aux pistes d'athlétisme a toutefois souligné la prédominance du substrat dans la réponse tribologique. En utilisant une bille en acier, il a été démontré que 70 % à 80 % de la force tangentielle totale provient de la dissipation d'énergie au sein même de la piste, rendant la formulation chimique du caoutchouc moins discriminante en régime de roulement-glissement, dans des conditions de sévérité représentatives de la réalité.

Les essais sur le terrain, menés en collaboration avec l'athlète Julien Casoli, ont permis de valider le comportement de l'échantillon II en conditions réelles de course, tout en explorant des leviers de performance complémentaires à la formulation chimique, tels que la pression de gonflage et le décentrage de la bande de roulement. Bien que le décentrage de 5 mm n'ait montré qu'une influence mineure lors de ces tests effectués en ligne droite, l'analyse de la pression a révélé que la résistance au roulement suit une courbe parabolique où un gonflage excessif devient contre-productif. Ce phénomène s'explique par la souplesse de la piste d'athlétisme qui, face à un pneu trop rigide, se déforme pour créer un « bourrelet » de matière à l'avant de la zone de contact freinant ainsi l'avancement du fauteuil. Ces tests ont donc permis d'identifier la combinaison la plus performante pour la compétition : l'échantillon II gonflé à une pression optimale de 5 bars.

Des compétitions à une collaboration pérenne

A l'issue de ces travaux couplant campagnes d'essais en laboratoire et sur le terrain et identification des clés d'optimisation de deux systèmes tribologiques complexes, les athlètes de l'équipe de France ont pu bénéficier de nouveaux revêtements pour les gants, et de nouveaux boyaux développés par Hutchinson. Ainsi, avec les gants SBR_d, Julien Casoli a pu battre le record de France de 5000 m dans la catégorie T54 lors du meeting de Dubaï en février 2024, sa performance le rapprochant à moins d'une demi-seconde du record du monde détenu par Marcel Hug. Malheureusement, une blessure au poignet survenue quelques mois avant les Jeux Paralympiques l'a empêché de concrétiser cet objectif majeur de la saison.

En mai 2024, un second français s'est illustré sur la scène internationale, Pierre Fairbank est devenu double champion du monde de 400 m et 800 m dans la catégorie T53. Lors de ces deux sacres, il était équipé des gants IR, et des boyaux avec la bande de roulement Hutchinson décentré de 5 mm. Lors des Jeux Paralympiques de Paris 2024, il finira à la 4ème, 5ème et 6ème place sur respectivement le 800 m, 100 m et 400 m.

Bien que l'objectif de médaille aux Jeux n'ait pas été atteint, Pierre Fairbank ayant été le seul athlète sélectionné par la Fédération Handisport pour les Jeux Paralympiques de Paris 2024, de belles performances ont été réalisées par les athlètes de l'équipe de France. Les équipements développés dans le cadre de cette thèse ont par ailleurs reçu l'approbation de l'ensemble des athlètes impliqués. Dans cette continuité, un partenariat entre Hutchinson et les athlètes de l'équipe de France est actuellement en cours de mise en place, afin de permettre à l'équipe de France de para-athlétisme de continuer à bénéficier de ces produits.

Perspectives

Les perspectives ouvertes par ce travail sont multiples. Le passage des essais en laboratoire aux résultats en compétition s'est révélé particulièrement concluant, démontrant la pertinence de l'approche expérimentale développée. Néanmoins, une limite demeure dans la corrélation entre les essais de frottement en laboratoire et les résultats obtenus sur piste, en raison d'un effet d'échelle entre les échantillons d'élastomère testés et la piste d'athlétisme à échelle réelle. Il pourrait être pertinent de poursuivre les travaux en développant, en laboratoire, des surfaces de piste à échelle réduite, cohérentes avec celle des échantillons, afin d'améliorer la représentativité des résultats. Par ailleurs, la poursuite des essais sur le terrain reste indispensable pour valider les développements réalisés. Il serait intéressant de développer de nouveaux protocoles expérimentaux sur piste, intégrant notamment les phases de virage caractéristiques des pistes d'athlétisme, afin de quantifier de manière objective l'effet du décentrage de la bande de roulement, actuellement appréciée uniquement à travers le ressenti des athlètes.

Enfin, bien que cette thèse se soit concentrée sur une approche tribologique, l'amélioration de la performance du fauteuil roulant ne saurait se limiter à ce seul domaine. Des travaux complémentaires portant sur l'aérodynamique, ainsi que sur la conception globale du fauteuil, constituent des axes majeurs susceptibles d'apporter des gains de performance significatifs et complémentaires à ceux obtenus par l'optimisation des contacts. L'optimisation de la

gestuelle, en particulier lors de la phase de boxage, constitue également un axe de travail pertinent. De premiers essais, intégrant un capteur de force au niveau du gant afin d'évaluer l'efficacité de cette phase de propulsion, ont déjà été menés et mériteraient d'être approfondis.

Annexes

1. Annexe A : Comparaison des faciès d'usure

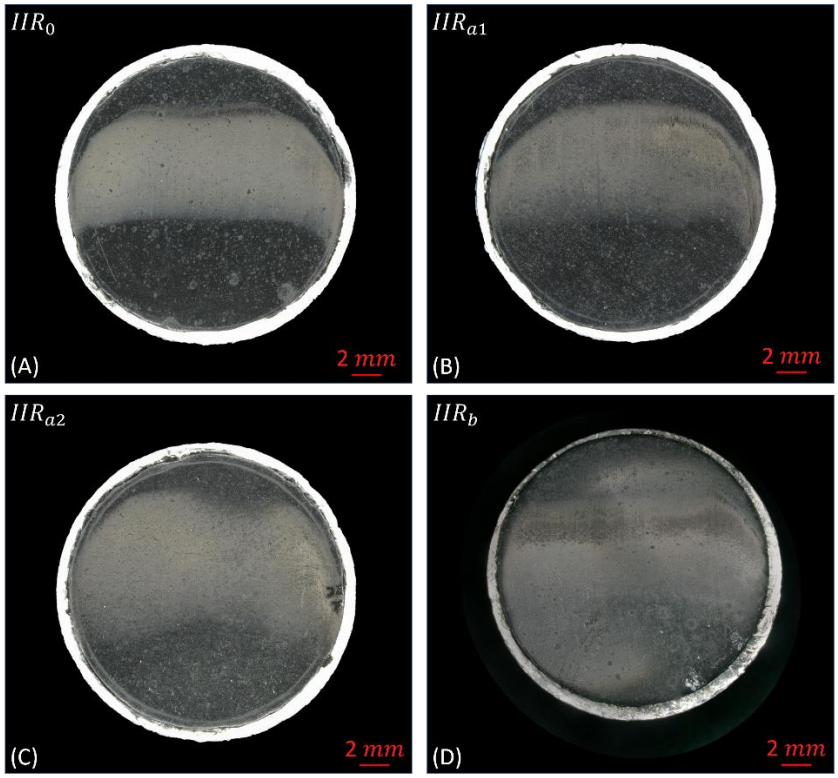


FIGURE A.1 : LES ECHANTILLONS A BASE DE BUTYLE PRESENTENT UN FACIES D'USURE DOUCE SIMILAIRE. L'AJOUT DE RESINE ((B), (C) ET (D)), QUELLE QUE SOIT SA TENEUR, N'ENTRAINE PAS DE MODIFICATION SIGNIFICATIVE DE CE FACIES D'USURE.

Les figures A.1 à A.3 présentent, pour chaque type de matrice élastomère (IIR, IR et SBR), plusieurs échantillons (trois à quatre) dont les faciès d'usure peuvent être comparés. Pour une même matrice, les faciès observés apparaissent très similaires, ce qui confirme que la nature de la matrice élastomère constitue le facteur prédominant. Les variations observées entre échantillons restent faibles et compatibles avec la variabilité expérimentale.

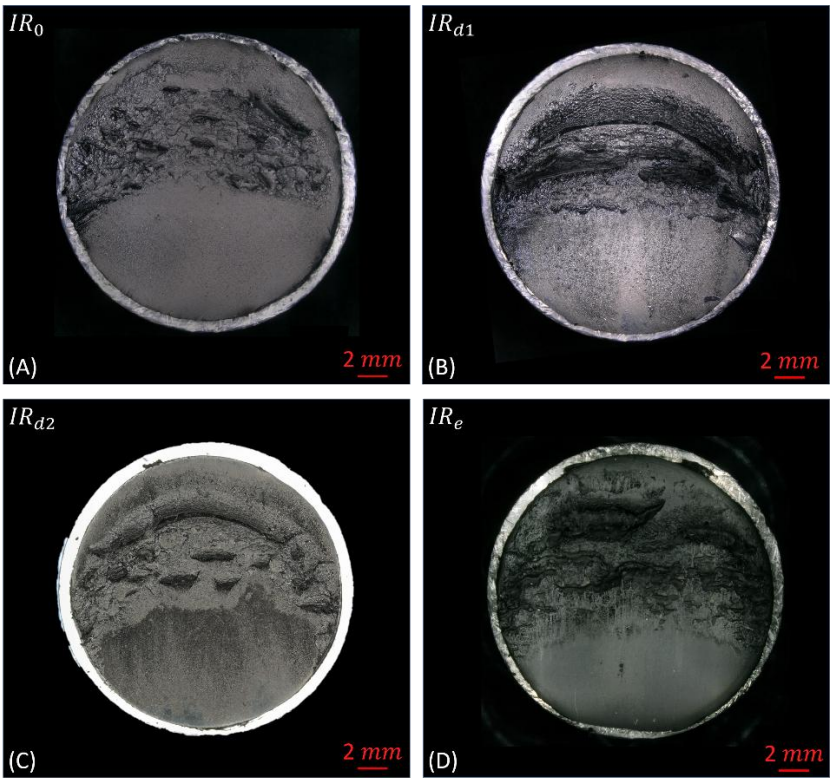


FIGURE A.2 : LES ECHANTILLONS A BASE DE POLYISOPRENE PRESENTENT EGALEMENT UN FACIES D'USURE SIMILAIRE : DES RIDES, ORIENTEES PERPENDICULAIREMENT A LA DIRECTION DU FROTTEMENT, SONT OBSERVEES SUR L'ENSEMBLE DES ECHANTILLONS, INDEPENDAMMENT DE LA TENEUR EN RESINE TACKIFIANTE.

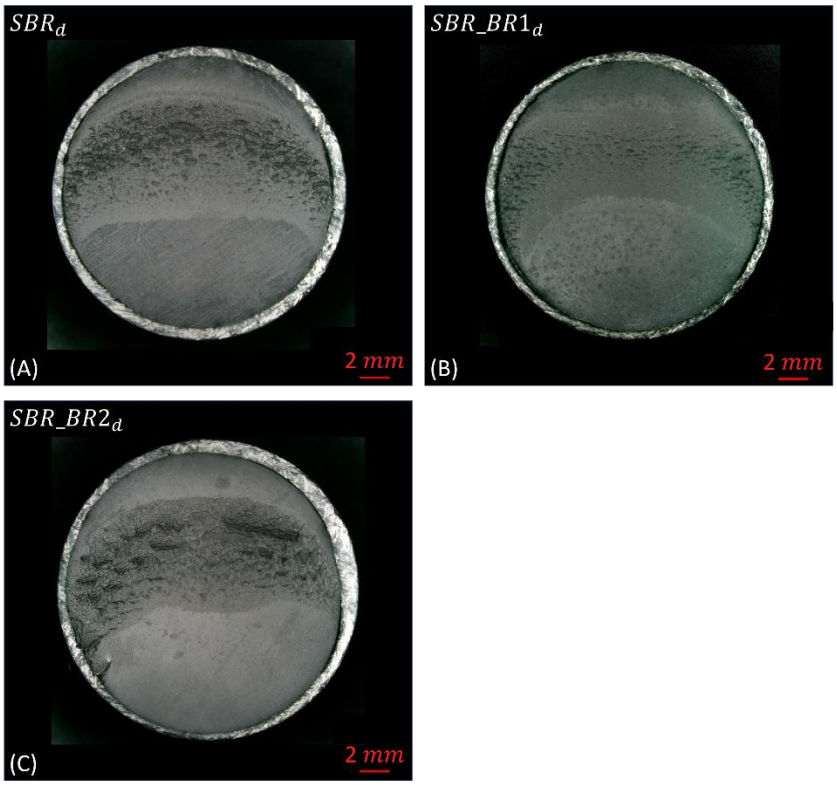


FIGURE A.3 : LES ECHANTILLONS A MATRICE MAJORITAIREMENT SBR PRESENTENT DES FACIES D'USURE COMPARABLES. L'AJOUT DE BR (20 % DANS (B) ET 40 % DANS (C)) INDUIT NEANMOINS UNE EVOLUTION PROGRESSIVE VERS DES RIDES D'USURE PLUS MARQUEES.

2. Annexe B : Questionnaire de satisfaction du revêtement des gants

Test des plaques de caoutchouc pour gants

A. Conditions

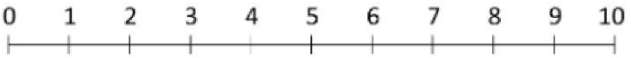
Nom de l'athlète : ……

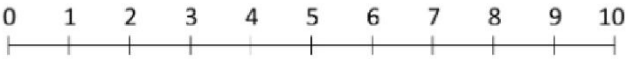
Condition météo : Intérieur / Extérieur / Soleil / Nuageux / Pluie / Précision : ……..

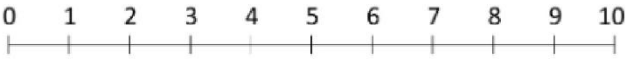
B. Ressenti

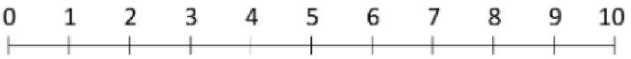
Veuillez noter votre ressenti concernant chaque propriété de la plaque, 5 correspondant à une performance égale au caoutchouc actuellement utilisé, 10 correspondant à une très nette amélioration par rapport aux performances du caoutchouc actuellement utilisé, et 0 correspondant à une perte importance de performance.

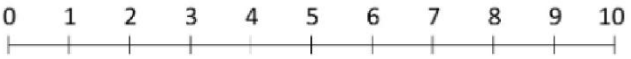
- Grip / Entrainement de la main courante

Plaque n° 1 : 

Plaque n° 2 : 

Plaque n° 3 : 

Plaque n° 4 : 

Plaque n° 5 : 

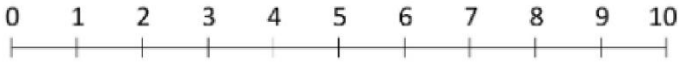
Commentaires : ……

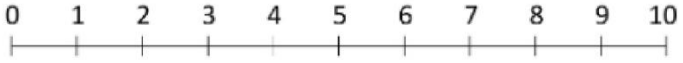
……

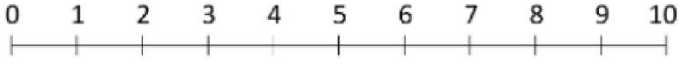
……

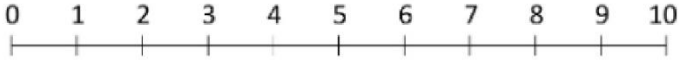
……

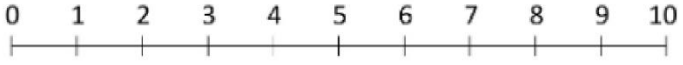
➢ Usure

Plaque n° 1 : 

Plaque n° 2 : 

Plaque n° 3 : 

Plaque n° 4 : 

Plaque n° 5 : 

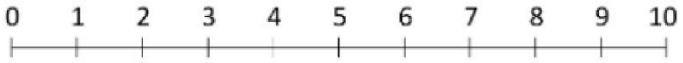
Commentaires : ……

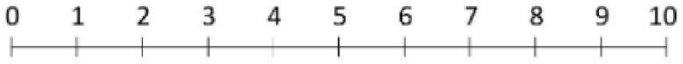
……

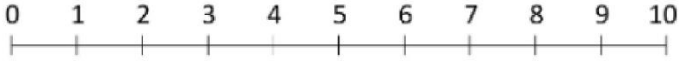
……

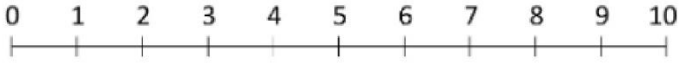
……

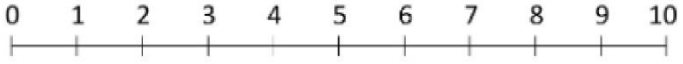
➢ Facilité de collage sur le gant (en précisant le type de gant en commentaire)

Plaque n° 1 : 

Plaque n° 2 : 

Plaque n° 3 : 

Plaque n° 4 : 

Plaque n° 5 : 

Commentaires : ……

……

……

……

C. Questions spécifiques

Si l'usure est un problème, à partir de quelle distance selon vous est-elle problématique ?

……

……

……

Seriez-vous prêt à utiliser ce caoutchouc en compétition ?

……

……

……

D. Commentaires personnels

……

……

……

……

……

……

……

……

3. Annexe C : Normes des pistes d'athlétisme

Les images suivantes sont extraites du manuel publié par l'IAAF, intitulé « Track and Field Facilities Manual », qui définit les normes auxquelles doivent répondre les pistes d'athlétisme.

3.1.3.4 Force Reduction

Requirement

The dynamic interaction between the athlete and the surface is significant to the performance and safety of the athlete. Therefore the ability of the surface to reduce force (absorb energy) is important. The force reduction shall be between 35% and 50%, at any surface temperature between 10°C and 40°C. If, at the time of measurement, the temperature of the surface is outside this range, it shall be permissible for the results obtained to be corrected for temperature, by interpolation from a graph of force reduction against temperature for the precise surfacing system installed, previously obtained by laboratory testing. If no graph is available then testing outside the surface temperature range shall not be undertaken.

Because of the fact that it is required to install greater thicknesses of synthetic surface at take-off areas and at the ends of runways, it is possible that results obtained in these areas may fall outside the above range.

Method

A full description of the apparatus and details of the method are given in EN 14808:2005, except that the low-pass filter shall have a 9th order Butterworth characteristic.

The 95% confidence limits of this method are calculated at plus or minus 1%.

At least one measurement shall be made for every 500m^2 of normal thickness synthetic surface, with a minimum of twelve (12) measurements over the facility. The test positions shall be as follows:

1. At the discretion# of the test laboratory in any lane around the first radius*
2. In the centre of lane 2 at the 130m mark on the back straight
3. In the centre of lane 5 at the 160m mark on the back straight
4. At the position of lowest thickness on the back straight*
5. At the discretion# of the test laboratory in any lane around the final radius*
6. In the centre of lane 1 at the 320m mark on the main straight
7. In the centre of lane 4 at the 350m mark on the main straight
8. In the centre of the outer lane at the 390m mark on the main straight
9. At the position of lowest thickness on the main straight*
10. At the discretion# of the test laboratory at any position (except the high-jump take-off point) over the semicircular area. Where there are two semicircular areas, a test shall be performed on each of them.
11. At the discretion# of the test laboratory at any position (except the reinforced areas) on each of the runways (Long Jump, Triple Jump, Pole Vault, Javelin Throw) and in the steeplechase lane.

#Whenever the selection of the test location is left at the discretion of the laboratory, that location must be close to the average thickness of the track as a whole.

**For the purposes of testing, the first radius is defined as 10m to 100m, the back straight as 110m to 200m, the final radius as 210m to 300m, and the main straight as 310m to 400m.*

If the area of synthetic surface is exceptionally large (for example 10- or 12-lane straights), any necessary additional tests shall be at locations selected by the test laboratory.

At each location, the temperature of the surface shall be measured with a needle temperature probe and recorded. Each test position shall be recorded on a plan of the facility with the results recorded in the report.

Note: If the surface temperature is outside the permitted range of 10°C to 40°C, temperature correction of the results may be employed on the basis of interpolation from laboratory results as described in the first paragraph. If no graph is available then testing outside the surface temperature range shall not be undertaken. However, it is sometimes possible to avoid the need for this, by conducting the testing at a different time of day. For instance, if the facility is in a hot region, testing early in the morning or in the evening can result in the surface temperature falling to within the above range.

3.1.3.5 Vertical Deformation

Requirement

The dynamic interaction between the athlete and the surface is significant to the performance and safety of the athlete. Therefore the ability of the surface to deform under load is important. Too high a deformation can affect the safety of the athlete through instability of the foot, while the inability of the surface to deform can cause injuries due to impact forces. The vertical deformation shall be between 0.6mm and

2.5mm, at any surface temperature between 10°C and 40°C. If, at the time of measurement, the temperature of the surface is outside this range, it shall be permissible for the results obtained to be corrected for temperature, by interpolation from a graph of vertical deformation against temperature for the precise surfacing system installed, previously obtained by laboratory testing.

Because of the fact that it is usual to install greater thicknesses of synthetic surface at take-off areas and at the ends of runways, it is possible that results obtained in these areas may fall outside the above range.

Method

A full description of the apparatus and details of the method are given in EN 14809: 2005.

The 95% confidence limits of this method are calculated at plus or minus 0.1mm.

At least one measurement shall be made for every 500m^2 of normal thickness synthetic surface, with a minimum of twelve (12) measurements over the facility. The test positions shall be as follows:

1. At the discretion# of the test laboratory in any lane around the first radius*
2. In the centre of lane 2 at the 130m mark on the back straight
3. In the centre of lane 5 at the 160m mark on the back straight
4. At the position of lowest thickness on the back straight*
5. At the discretion# of the test laboratory in any lane around the final radius*
6. In the centre of lane 1 at the 320m mark on the main straight
7. In the centre of lane 4 at the 350m mark on the main straight
8. In the centre of the outer lane at the 390m mark on the main straight
9. At the position of lowest thickness on the main straight*
10. At the discretion# of the test laboratory at any position (except the high-jump take-off point) over the semicircular area. Where there are two semicircular areas, a test shall be performed on each of them.
11. At the discretion# of the test laboratory at any position (except the reinforced areas) on each of the runways (Long Jump, Triple Jump, Pole Vault, Javelin Throw) and in the steeplechase lane.

#Whenever the selection of the test location is left at the discretion of the laboratory, that location must be close to the average thickness of the track as a whole.

*For the purposes of testing, the first radius is defined as 10m to 100m, the back straight as 110m to 200m, the final radius as 210m to 300m, and the main straight as 310m to 400m.

If the area of synthetic surface is exceptionally large (for example 10- or 12-lane straights), any necessary additional tests shall be at locations selected by the test laboratory.

At each location, the temperature of the surface shall be measured with a needle temperature probe and recorded. Each test position shall be recorded on a plan of the facility with the results recorded in the report.

Note: If the surface temperature is outside the permitted range of 10°C to 40°C, temperature correction of the results may be employed on the basis of interpolation from laboratory results as described in the first paragraph. If no graph is available then

testing outside the surface temperature range shall not be undertaken. However, it is sometimes possible to avoid the need for this, by conducting the testing at a different time of day. For instance, if the facility is in a hot region, testing early in the morning or in the evening can result in the surface temperature falling to within the above range.