



HAL
open science

Etude du frottement pneumatique-glace : grattage de la glace et frottement élastomère-glace

Valerie Lenoel Deloye

► **To cite this version:**

Valerie Lenoel Deloye. Etude du frottement pneumatique-glace : grattage de la glace et frottement élastomère-glace. Glaciologie. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2001. Français. NNT : . tel-00763522

HAL Id: tel-00763522

<https://theses.hal.science/tel-00763522>

Submitted on 11 Dec 2012

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

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

TS 01/GRE1/0202/D
double

TS 01/GRE1/0202
Double

dsr



Université Joseph Fourier - Grenoble I

THÈSE

pour obtenir le grade de :
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I
Spécialité SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR

Etude du frottement pneumatique - glace : grattage de la glace et frottement élastomère - glace

VALÉRIE LENOËL DÉLOYE

Laboratoire d'accueil : Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
54 rue Molière - BP96 - 38240 Saint Martin d'Hères
Tél (33) 04 76 82 42 00 - Fax (33) 04 76 82 42 01

Equipe d'accueil : Rhéologie des glaces et modélisation des calottes polaires

Ecole Doctorale : Mécanique et Energétique

Date de la soutenance : 29 novembre 2001

Composition du jury :

| | | |
|-------------|-------------|--------------------|
| M. Jack | LANIER | Président |
| M. Jean | DENAPE | Rapporteur |
| M. Denis | MAZUYER | Rapporteur |
| M. Philippe | MANSUY | Examineur |
| M. Jacques | MEYSSONNIER | Directeur de thèse |



TS 01/0201/0202
DOUBLE

Université Joseph Fourier - Grenoble I

THÈSE

pour obtenir le grade de :
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I
Spécialité SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR

Etude du frottement pneumatique - glace : grattage de la glace et frottement élastomère - glace

VALÉRIE LENOËL DÉLOYE

Laboratoire d'accueil : Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
54 rue Molière - BP96 - 38240 Saint Martin d'Hères
Tél (33) 04 76 82 42 00 - Fax (33) 04 76 82 42 01

Equipe d'accueil : Rhéologie des glaces et modélisation des calottes polaires

Ecole Doctorale : Mécanique et Energétique

Date de la soutenance : 29 novembre 2001

Composition du jury :

| | | |
|-------------|-------------|--------------------|
| M. Jack | LANIER | Président |
| M. Jean | DENAPE | Rapporteur |
| M. Denis | MAZUYER | Rapporteur |
| M. Philippe | MANSUY | Examineur |
| M. Jacques | MEYSSONNIER | Directeur de thèse |



Avant propos

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre le département de recherche de la Manufacture Française des Pneumatiques Michelin situé à Clermont Ferrand et le Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE) situé à Saint Martin d'Hères. Chacun a su apporter sa compétence dans son domaine de recherche.

Traçons l'historique de cette thèse, débutée en octobre 1998. L'objectif initial consistait à déterminer les mécanismes prépondérants du frottement gomme-glace, à la fois par la voie expérimentale et la modélisation. Les orientations pour mener ce travail restaient très ouvertes. Cette étude fondamentale n'inclut aucun plan d'expérience sur pneu. Une machine tournante permettant la mesure du frottement gomme-glace devait être conçue et réceptionnée avant le premier trimestre 1999. A cause d'importants retards dans certaines phases du développement et de nombreux problèmes survenus au cours de la réalisation de ce prototype expérimental, la livraison au LGGE n'a été effectuée qu'en février 2000. Le protocole expérimental n'a pu être définitivement arrêté qu'en septembre 2000. Des expériences ont été effectuées jusqu'en mai 2001. Parallèlement au développement de cette machine tournante, nous avons étudié le grattage de la glace avec des moyens expérimentaux plus rapides à mettre en place. Le pendule SRT a été utilisé pour tester des inclusions solides et du papier abrasif jusqu'en mars 1999. Un banc de mesure particulier a été conçu en avril 1999 pour observer l'effet d'indenteurs de tailles diverses entre $50\ \mu\text{m}$ et $1\ \text{mm}$ et évaluer trois coefficients de frottement différents sur la glace. Des expériences effectuées jusqu'en mars 2000 ont permis d'étudier le grattage de la glace par du papier abrasif et des clous.

Le Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement m'a accueillie pendant ces trois années et je tiens à exprimer toute ma gratitude à son directeur, Dominique Raynaud, pour les moyens techniques et scientifiques qu'il a mis à ma disposition. Le LGGE dépend du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et de l'Université Joseph Fourier (UJF), avec un effectif d'une centaine de personnes. Les axes de recherche sont très variés, mais toujours en relation avec la glaciologie ou l'environnement : archives glaciaires et paléoclimat, climat actuel et modélisation de l'atmosphère, pollution locale et régionale, modélisation des calottes polaires, rhéologie des glaces polaires, interactions glace / structure, bilans de masse et dynamique glaciaire. Les moyens de recherche sont la modélisation et l'expérimentation dans huit chambres froides pouvant atteindre une température de -50°C .

L'équipe adhérence du Centre de recherche de la Manufacture Française des Pneumatiques Michelin, dirigée par Pierrick Travert, m'a fourni tous les moyens financiers nécessaires.

Je remercie l'Association Nationale de la Recherche Technique d'avoir grandement contribué au financement de mes travaux de recherche, par l'attribution d'une bourse Cifre (Conventions industrielles de formation par la recherche).

J'exprime mes plus vifs remerciements à Jacques Meyssonier, chercheur au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, pour avoir encadré mon travail de thèse. Ses conseils constants m'ont été d'une aide inestimable et ont grandement contribué à ma formation d'ingénieur de recherche et développement.

Je tiens à remercier tout particulièrement Emmanuel Billette, Vincent Estenne et Philippe Mansuy, du Centre de recherche de Michelin de Ladoux à Clermont Ferrand, pour avoir suivi l'avancement de mes travaux et orienté mes recherches.

Je remercie Jack Lanier qui me fait l'honneur de présider ce jury. Je tiens à remercier Jean Denape et Denis Mazuyer pour le temps qu'ils ont consacré en tant que rapporteurs.

J'adresse un remerciement particulier aux techniciens du Laboratoire de Glaciologie, pour leur aide précieuse qui a rendu ce travail expérimental possible.

Enfin, un grand merci à mon mari, François, ainsi qu'à mes parents, qui m'ont soutenue et encouragée pendant toute la durée de ce projet.

Table des matières

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Introduction | 1 |
| 1 Généralités sur les pneus et la glace | 3 |
| 1.1 Coefficient de frottement | 3 |
| 1.1.1 Définitions et notations | 3 |
| 1.1.2 Modèle de contact élastique de Boussinesq (1885) et Hertz (1896) | 4 |
| 1.1.3 Modèle de frottement de Bowden et Tabor (1950) | 4 |
| 1.2 Propriétés des matériaux | 5 |
| 1.2.1 Propriétés des polymères | 5 |
| 1.2.2 Propriétés de la glace | 10 |
| 1.3 Fonctionnement d'un pneu | 15 |
| 1.3.1 Différentes performances d'un pneu | 15 |
| 1.3.2 Architecture d'un pneu | 15 |
| 1.3.3 La performance adhérence d'un pneu | 17 |
| 1.3.4 Répartition de la contrainte normale sous un pneu | 17 |
| 1.4 Frottement d'un pneu sur neige et glace | 19 |
| 1.4.1 Composantes du frottement sur la glace | 19 |
| 1.4.2 Ordres de grandeurs du coefficient de frottement pneu-glace | 19 |
| 1.4.3 Techniques d'évaluation de performances sur la glace | 19 |
| 1.4.4 Pendule SRT | 23 |
| 1.4.5 Mesures de laboratoire avec un patin ou un pneu | 24 |
| 2 Etude bibliographique du frottement sur la glace | 25 |
| 2.1 Introduction | 25 |
| 2.2 Fonte de la glace générée par le frottement | 26 |
| 2.2.1 Mécanisme général selon Bowden et Hugues (1939) | 26 |
| 2.2.2 Approfondissement du modèle par Evans <i>et al.</i> (1976) | 27 |

| | | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3 | Frottement contrôlé thermiquement | 31 |
| 2.3.1 | Modèle initial de Ettles (1985) | 31 |
| 2.3.2 | Application à la glace par Ettles (1986b) et Akkok <i>et al.</i> (1987) | 33 |
| 2.3.3 | Extensions du modèle par Dorémieux (1990) | 35 |
| 2.4 | Zone sèche dans l'aire de contact | 37 |
| 2.4.1 | Zones sèche et humide dans l'aire de contact (Hayhoe et Shapley, 1989) | 37 |
| 2.4.2 | Origine du frottement sec sur la glace selon Makkonen (1994) | 38 |
| 2.4.3 | Modélisation de la zone sèche par un flux rétroactif par Douce (1993) | 39 |
| 2.5 | Frottement dû uniquement au cisaillement visqueux (Oksanen, 1983) | 39 |
| 2.5.1 | Modèle de frottement de Oksanen (1983) | 39 |
| 2.5.2 | Résultats du modèle de Oksanen (1983) | 43 |
| 2.5.3 | Résultats expérimentaux de Oksanen (1983) | 43 |
| 2.5.4 | Comparaison entre des expériences et la théorie de Oksanen (1983) | 43 |
| 2.6 | Echauffement de la glace dû au frottement | 45 |
| 2.6.1 | Echauffement de la glace sous un patin sans partage du flux thermique | 45 |
| 2.6.2 | Echauffement sous un pneu avec partage du flux thermique | 49 |
| 2.7 | Frottement lubrifié | 50 |
| 2.7.1 | Différents modes de lubrification | 50 |
| 2.7.2 | Interprétation de performances par l'index de criticité (Veith, 1996a,b) | 50 |
| 2.7.3 | Influence des propriétés viscoélastiques de l'élastomère | 51 |
| 2.7.4 | Mécanique des fluides dans l'interface | 51 |
| 2.7.5 | Modèles macroscopiques d'une couche liquide établie | 54 |
| 2.8 | Mesures du frottement sur la glace | 55 |
| 2.8.1 | Frottement gomme-glace à faible vitesse | 55 |
| 2.8.2 | Observations de la surface de glace sous un élastomère (Roberts, 1981) | 55 |
| 2.8.3 | Influence d'impuretés dans la glace sur le frottement gomme-glace | 57 |
| 2.8.4 | Effet de la sculpture du pneu sur le frottement | 58 |
| 2.8.5 | Influence des propriétés de l'élastomère sur le frottement sur la glace | 58 |
| 2.8.6 | Observations du frottement de différents matériaux sur glace ou neige | 58 |
| 2.9 | Conclusion sur l'étude bibliographique | 58 |
| | GRATTAGE DE LA GLACE | 61 |
| 3 | Etude du grattage de la glace avec le pendule SRT | 63 |

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1 | Introduction | 63 |
| 3.2 | Etat de l'art | 63 |
| 3.2.1 | Performances d'un pneu clouté | 63 |
| 3.2.2 | Pneus cloutés ou lamellisés | 65 |
| 3.3 | Frottement de patins SRT avec des inclusions solides dans la gomme | 67 |
| 3.3.1 | Eprouvettes SRT avec des inclusions solides | 67 |
| 3.3.2 | Rodage des éprouvettes SRT | 67 |
| 3.3.3 | Protocole expérimental avec les inclusions solides et le SRT | 69 |
| 3.3.4 | Observations avec les inclusions solides et le SRT | 69 |
| 3.3.5 | Résultats expérimentaux avec les inclusions solides et le SRT | 69 |
| 3.3.6 | Conclusion sur les mesures avec les inclusions solides et le SRT | 71 |
| 3.4 | Frottement de papiers abrasifs sur la glace avec le SRT | 73 |
| 3.4.1 | papiers abrasifs utilisés | 73 |
| 3.4.2 | Protocole expérimental avec les papiers abrasifs et le SRT | 73 |
| 3.4.3 | Observations avec les papiers abrasifs et le SRT | 75 |
| 3.4.4 | Résultats expérimentaux avec les papiers abrasifs et le SRT | 76 |
| 3.4.5 | Conclusion sur les mesures avec les papiers abrasifs et le SRT | 77 |
| 4 | Etude du grattage de la glace avec la piste rectiligne | 79 |
| 4.1 | Présentation du dispositif expérimental | 79 |
| 4.1.1 | Principe de la mesure avec la piste rectiligne | 79 |
| 4.1.2 | Caractéristiques de l'appareillage | 81 |
| 4.1.3 | Conditions de test avec la piste rectiligne | 81 |
| 4.2 | Protocole expérimental avec la piste rectiligne | 82 |
| 4.2.1 | Préparation des essais avec la piste rectiligne | 82 |
| 4.2.2 | Essais avec du papier abrasif sur la piste rectiligne | 83 |
| 4.2.3 | Essais avec des clous sur la piste rectiligne | 83 |
| 4.3 | Trois coefficients de frottement différents obtenus avec la piste rectiligne | 83 |
| 4.3.1 | Coefficient de frottement intégré, $\mu_{intégré}$ | 83 |
| 4.3.2 | Coefficient de frottement moyen, μ_{moyen} | 85 |
| 4.3.3 | Coefficient de frottement instantané, $\mu_{instantané}$ | 91 |
| 4.4 | Observations qualitatives avec la piste rectiligne | 93 |
| 4.4.1 | Vibrations de la piste rectiligne | 93 |
| 4.4.2 | Mouvements verticaux du patin | 93 |

| | | |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.3 | Observation de la glace après le grattage du papier abrasif | 95 |
| 4.4.4 | Observation de la glace après le grattage des clous | 97 |
| 4.4.5 | Largeur de la trace d'un clou sur la glace | 99 |
| 4.5 | Discussion des résultats expérimentaux obtenus avec la piste rectiligne | 99 |
| 4.5.1 | Choc du pendule sur le patin | 99 |
| 4.5.2 | $\mu_{intégré}$ pour les papiers abrasifs et les clous | 101 |
| 4.5.3 | Trois différents μ avec les clous à -20 et -5 ° C | 103 |
| 4.6 | Conclusion pour les essais sur la piste rectiligne | 107 |
| FROTTEMENT ÉLASTOMÈRE - GLACE | | 109 |
| 5 | Présentation de la machine tournante | 111 |
| 5.1 | Présentation du dispositif expérimental | 111 |
| 5.1.1 | Caractéristiques de la machine tournante | 111 |
| 5.1.2 | Elaboration de la piste de glace | 115 |
| 5.1.3 | Capteur d'efforts bidirectionnel | 117 |
| 5.1.4 | Conclusion sur les modifications apportées à la machine tournante | 121 |
| 5.2 | Procédure d'acquisition et évaluation du frottement | 121 |
| 5.2.1 | Premier protocole expérimental | 121 |
| 5.2.2 | Elaboration d'un protocole expérimental définitif | 123 |
| 5.3 | Comparaison avec les conditions de frottement sous un pneu | 125 |
| 6 | Variations du frottement et observations qualitatives | 127 |
| 6.1 | Variation de μ en fonction des conditions expérimentales | 127 |
| 6.1.1 | Evolution du frottement avec le temps | 127 |
| 6.1.2 | Variation de l'effort tangentiel avec l'effort normal | 131 |
| 6.1.3 | Température ambiante, vitesse de glissement et effort normal | 133 |
| 6.1.4 | Mesures à basse vitesse | 137 |
| 6.2 | Observations qualitatives de la piste de glace | 139 |
| 6.2.1 | Usure de la piste de glace | 139 |
| 6.2.2 | Aspect de la surface de glace observé avec la loupe binoculaire | 141 |
| 6.2.3 | Usure prolongée de la piste de glace | 143 |
| 6.3 | Conclusion sur les variations du frottement et les observations qualitatives | 151 |
| 7 | Effet des différents paramètres sur le frottement | 153 |

| | | |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.1 | Influence du matériau constituant le patin sur le frottement | 153 |
| 7.1.1 | Effet de la formulation sur le frottement | 153 |
| 7.1.2 | Propriétés viscoélastiques des mélanges | 155 |
| 7.1.3 | Comparaison des mesures avec le pendule SRT et la machine tournante | 157 |
| 7.1.4 | Effet des propriétés thermiques du support sur le frottement | 158 |
| 7.1.5 | Frottement glace-glace | 161 |
| 7.2 | Influence de la géométrie du patin sur le frottement | 163 |
| 7.2.1 | Courbure de la piste et positionnement de la surface de contact | 163 |
| 7.2.2 | Effet de la forme d'éprouvettes de même formulation | 169 |
| 7.2.3 | Effets du sens et de la géométrie du patin selon le mélange | 169 |
| 7.2.4 | Effet d'une rainure proche du bord d'attaque | 172 |
| 7.2.5 | Mesures de frottement avec une longueur du patin variable | 173 |
| 7.3 | Etude des effets thermiques | 177 |
| 7.3.1 | Influence de l'échauffement du patin sur le frottement | 177 |
| 7.3.2 | Effet d'un changement d'état de la piste sur le frottement | 179 |
| 7.3.3 | Mesures de température de la surface de glace | 183 |
| 7.4 | Conclusion sur l'effet des paramètres sur le frottement | 187 |
| Conclusion générale | | 187 |
| A Notations | | 193 |
| B Propriétés physiques des matériaux | | 195 |
| C Ecoulement d'un fluide | | 197 |
| D Echauffement d'un substrat sous l'action un flux de chaleur | | 199 |
| E Annexe à l'étude bibliographique du frottement sur la glace | | 205 |
| F Annexe à l'étude expérimentale avec la machine tournante | | 223 |
| Bibliographie | | 243 |

Introduction

Le frottement sur glace peut présenter un aspect ludique, comme pour les sports d'hiver. Il est important dans de nombreux domaines d'application, comme les brise-glace ou la conception des structures marines. Le choix du matériau et la conception de la structure mécanique sont alors effectués avec l'objectif de diminuer le frottement structure-glace. En revanche, pour un manufacturier de pneus, le but est d'obtenir un frottement maximum, afin d'améliorer la tenue de route et de réduire la distance de freinage sur chaussée verglacée. Le frottement sur glace est fondamental pour l'adhérence lors de la conduite en hiver, car il s'agit alors d'une performance liée à la sécurité de l'utilisateur.

La législation interdit de plus en plus les pneus cloutés dans de nombreux pays. De ce fait, l'amélioration du frottement élastomère-glace est devenue d'une importance stratégique capitale pour les manufacturiers de pneus. Bien sûr, la conception d'un pneu complet tient compte de nombreux facteurs et il faut déterminer le meilleur compromis entre les différentes performances. Le choix est dicté par l'importance de chaque performance vis-à-vis de l'usage final du pneu. Le frottement d'un pneu sur la glace peut être évalué en conditions réelles, sur des circuits de test dans des pays à climat froid. Cependant, cette méthode rend impossible une évaluation tout au long de l'année, reste soumise aux variations météorologiques et coûte très cher. Afin de remédier à ces problèmes, divers dispositifs expérimentaux ont été développés pour tester les pneus en laboratoire (pneus dans des volants de test recouverts de glace à l'intérieur, éprouvettes d'élastomère sur des pistes glacées tournantes, etc.).

Ce sujet de recherche est pluridisciplinaire et fait appel à des compétences dans des domaines variés : matériaux, mécanique des interfaces, tribologie, thermique, informatique, etc. Nous soulignons ici le fait que les conditions de travail furent souvent difficiles. Une grande partie de ce travail est expérimentale et les manipulations en chambre froide sont extrêmement délicates.

L'objectif de ce travail est double.

D'une part, nous avons essayé d'améliorer la connaissance du grattage de la glace, i.e. l'effet d'un indenteur sur la surface de glace. Dans ce but, deux dispositifs expérimentaux (un pendule SRT et une piste rectiligne) ont été utilisés afin de faire varier les conditions de frottement, en termes de dimensions des indenteurs, d'effort normal, de vitesse et de température.

D'autre part, nous avons tenté de déterminer les mécanismes prépondérants lors du frottement élastomère-glace. Nous avons donc mis au point un protocole expérimental avec un nouveau dispositif expérimental du type pion-disque afin de mesurer des coefficients de frottement entre différents élastomères et la glace. Les conditions de frottement étaient variables en termes de géométrie de l'éprouvette, d'effort normal, de vitesse et de température.

Ce mémoire est divisé en sept chapitres.

Le chapitre 1 apporte quelques définitions indispensables. Nous détaillons les comportements mécaniques des deux matériaux, élastomère et glace. Nous faisons quelques rappels sur le fonctionnement général d'un pneu. Nous montrons la nécessité de la recherche sur le frottement pneu-glace pour améliorer la sécurité des usagers.

Le chapitre 2 expose l'état de l'art sur le frottement pneu-glace. Nous présentons les théories qui expliquent le frottement d'un élastomère sur la glace, ainsi que quelques valeurs expérimentales trouvées dans la littérature. Nous listons les paramètres matériaux qui influencent ce frottement. Nous citons aussi quelques études sur le frottement entre d'autres matériaux et la glace.

Les deux chapitres suivants concernent des observations effectuées sur le grattage de la glace. Au chapitre 3, après une courte étude bibliographique, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus avec le pendule SRT. Le chapitre 4 décrit les résultats obtenus avec un banc de mesure conçu au LGGE.

Les trois chapitres suivants exposent les résultats de l'étude expérimentale du frottement élastomère-glace. La machine tournante est présentée au chapitre 5. Les choix effectués lors de l'élaboration du protocole expérimental sont expliqués. Le chapitre 6 présente les variations du frottement avec les conditions expérimentales et les observations qualitatives de la piste de glace. L'effet de différents paramètres sur le frottement est donné au chapitre 7.

Les notations et propriétés des matériaux sont regroupées dans les annexes A et B. Les annexes C et D reprennent quelques notions utiles sur l'écoulement des fluides et l'échauffement d'un substrat sous un flux de chaleur. L'annexe E complète l'étude bibliographique du frottement sur glace. L'annexe F présente des résultats obtenus avec la machine tournante.

Chapitre 1

Généralités sur les pneus et la glace

Des ouvrages complets permettent d'approfondir les connaissances dans les domaines des élastomères (e.g. Moore, 1972; Grosch, 1996), du pneu (e.g. Moore, 1975) et de la glace (e.g. Lliboutry, 1965; Petrenko et Whitworth, 1999).

1.1 Coefficient de frottement

1.1.1 Définitions et notations

Les efforts transmis à travers un contact entre deux solides sont partagés en deux composantes, F_n et F_t , respectivement l'effort normal et l'effort tangentiel à la surface de contact.

L'aire de contact nominale A_n est en général différente de l'aire de contact réelle A_r , à cause des rugosités de surface des deux matériaux.

Les contraintes normale et tangentielle nominales dans le contact sont définies respectivement par $\sigma_n = F_n/A_n$ et $\sigma_t = F_t/A_n$. Ce sont des moyennes spatiales des contraintes normale et tangentielle locales σ_{nl} et σ_{tl} au niveau de l'interface.

Les lois du frottement résultent des approches phénoménologiques de Amontons (1663-1705) et Coulomb (1736-1806). Elles sont très simples et vérifiées dans la majorité des systèmes solides en contact. Elles énoncent que, pour mettre un solide en mouvement ou durant un mouvement établi, le quotient de l'effort tangentiel par l'effort normal ne dépend ni de l'aire nominale du contact, ni de l'effort normal, ni de la vitesse. Ce quotient, noté μ dans l'ensemble du mémoire, est appelé *coefficient de frottement dynamique*.

Selon les auteurs, μ est défini soit comme F_t/F_n , soit comme $\delta F_t/\delta F_n$, soit comme σ_t/σ_n , soit à aire nominale constante, soit à effort normal constant.

Si la vitesse de glissement V est nulle, le coefficient de frottement dit statique est noté $\mu_{statique}$ et F_t est l'effort tangentiel seuil nécessaire à la mise en mouvement relatif des solides. Si V est non nul, le coefficient de frottement dit dynamique est noté μ et F_t est l'effort tangentiel requis pour maintenir le mouvement relatif. En général, pour un contact sec ou lubrifié, μ est inférieur à $\mu_{statique}$.

Pour le frottement d'un élastomère, les lois d'Amontons et Coulomb ne sont plus vérifiées car une déformation élastique intervient à la surface de contact (Ohhara, 1996). μ dépend alors fortement de paramètres tels que l'effort normal, la vitesse de glissement et la température.

1.1.2 Modèle de contact élastique de Boussinesq (1885) et Hertz (1896)

Boussinesq (1885) et Hertz (1896) ont considéré une aspérité sphérique de rayon de courbure R , en contact à effort tangentiel nul avec un plan lisse d'un même matériau de module d'Young E et de module de Poisson ν . Les solides sont soumis à de petites déformations sans dépasser leur limite élastique. Pour un effort normal F_n , le rayon r de la zone de contact entre cette aspérité et le plan est donné par la loi de Hertz dans le régime élastique :

$$r^3 = \frac{3F_n R}{4E^*} \text{ avec } E^* = \frac{E}{1 - \nu^2}. \quad (1.1)$$

La contrainte normale moyenne σ_n qui s'exerce sur la surface est

$$\sigma_n = \frac{F_n}{\pi r^2} = \left[\frac{F_n (4E^*)^2}{\pi^3 (3R)^2} \right]^{1/3}. \quad (1.2)$$

La contrainte normale maximale σ_{n0} au centre du contact est

$$\sigma_{n0} = \frac{3F_n}{2\pi r^2} = \left(\frac{6F_n E^{*2}}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3}. \quad (1.3)$$

La géométrie du contact sphère-plan crée une dépendance non linéaire particulière entre l'aire de contact réelle et l'effort normal dans le régime élastique.

1.1.3 Modèle de frottement de Bowden et Tabor (1950)

Le modèle mécanique de Bowden et Tabor (1950) définit le frottement dynamique entre deux solides présentant des rugosités microscopiques. Ces deux solides peuvent être localement séparés par un troisième corps constitué des particules abrasées de chacun des deux solides. Le contact est formé d'une population clairsemée de microcontacts entre les aspérités des surfaces. Le frottement de deux matériaux résulte de trois processus physiques fondamentaux : le cisaillement des microjonctions adhésives, le labourage des surfaces par les aspérités et le cisaillement du troisième corps entre les aspérités.

Bowden et Tabor (1950) ont considéré une aspérité en frottement avec un demi-espace à surface lisse formé d'un même matériau élastique plastique non-écrouissable (de *contrainte seuil en tension* Y). Tant que les matériaux restent dans le domaine élastique, le modèle de Hertz s'applique. Le demi-espace commence à se plastifier en son point le plus sollicité lorsque la contrainte normale maximale σ_{n0} au centre du contact atteint la valeur σ_{nY} et est complètement plastifié lorsque σ_{n0} vaut $3\sigma_{nY}$. L'application du critère de Von Mises ou du critère de Tresca (qui conduisent dans ce cas à la même relation) montre que $\sigma_{nY} = 1,60 Y$. La *dureté du matériau* H relie l'effort normal F_n à l'aire réelle A_r par $H = F_n/A_r$. Dans le domaine plastique, le rayon de contact est donc

$$r^2 = \frac{F_n}{\pi H}. \quad (1.4)$$

Dans le cas d'un contact multiple, Bowden et Tabor (1950) ont supposé que tous les contacts ont atteint le seuil de plasticité. L'aire réelle est alors reliée linéairement à l'effort normal par $F_n = A_r H$. Le coefficient de frottement est $\mu = \tau/H$, où $\tau = F_t/A_r$ est la contrainte de cisaillement.

1.2 Propriétés des matériaux

1.2.1 Propriétés des polymères

1.2.1.1 Structure et propriétés mécaniques des polymères

Un polymère est formé par un enchevêtrement de *macromolécules* (i.e. longues chaînes moléculaires). La *température de transition vitreuse* T_g d'un polymère marque un changement brutal de son comportement mécanique, et en particulier une variation importante de son module d'Young.

On distingue trois types de polymères :

- Les polymères *amorphes* sont caractérisés par des enchevêtrements (i.e. nœuds physiques) entre les macromolécules : le mouvement de chaque chaîne dans un tube représentant l'ensemble des autres chaînes (*théorie de la reptation*) est favorisé par l'augmentation de la température. Ces polymères sont *thermoplastiques* car ils fondent au delà d'une certaine température.
- Les polymères *semi-cristallins* contiennent des zones amorphes et des zones ordonnées.
- Certains polymères sont formés de réseaux tridimensionnels de macromolécules : en plus des enchevêtrements, il existe des liaisons covalentes entre les chaînes (*réticulation*) si les masses moléculaires sont assez élevées. Le polymère est alors nommé *élastomère* si T_g est inférieur à 25 °C ou *thermodurcissable* si T_g est supérieur à 25 °C.

1.2.1.2 Evolution du module d'Young des polymères

L'évolution du module d'Young E avec la température s'explique par la possibilité de mouvements intra ou intermoléculaires des chaînes par rapport à une position d'équilibre statistique.

- E est constant et élevé, de l'ordre du GPa, aux basses températures : c'est le *plateau vitreux*. Aucun mouvement des macromolécules n'est possible et le matériau possède la dureté et la transparence du verre si le polymère ne contient aucune charge.
- E décroît fortement lorsque la température atteint T_g . Les mouvements locaux des chaînes deviennent possibles.
- Pour une température supérieure à T_g , E reste ensuite stable, de l'ordre du MPa : c'est le *plateau caoutchoutique* (ce plateau caoutchoutique n'existe pas pour les polymères de faible masse moléculaire). Les élastomères des bandes de roulement des pneus sont bien sûr utilisés à l'état caoutchoutique, à une température bien supérieure à T_g . La valeur du plateau et la largeur du plateau en température augmentent avec la masse moléculaire du polymère (augmentation des enchevêtrements entre chaînes, des nœuds topologiques, des attractions locales, de la gêne stérique, etc.). Le comportement caoutchouteux est très prononcé pour les polymères réticulés : un élastomère *vulcanisé* (comportant des liaisons soufrées) présente un plateau caoutchoutique très large dont le module E augmente avec la réticulation.
- Pour des températures encore plus élevées, les déplacements des chaînes entières sont possibles et la viscosité du matériau devient prépondérante.
- Enfin, le matériau se transforme à l'état liquide à la température de fusion.

1.2.1.3 Traitement phénoménologique de la viscoélasticité

Le comportement mécanique des polymères est *viscoélastique*, i.e. intermédiaire entre celui d'un liquide visqueux et celui d'un solide élastique (Moore, 1972). La viscoélasticité est linéaire lorsque les macromolécules restent proches de leur position d'équilibre. Les modèles rhéologiques de base couramment utilisés sont ceux de Kelvin-Voigt et Maxwell, avec des éléments élastique (ressort) et visqueux (amortisseur) respectivement en parallèle et en série.

L'étude expérimentale de la viscoélasticité linéaire s'effectue par des sollicitations dynamiques. Les *liquides viscoélastiques* doivent être maintenus dans une géométrie confinée et sont étudiés grâce à des rhéomètres harmoniques en rotation ou en translation. Les *solides viscoélastiques* peuvent être étudiés sous forme d'éprouvette à condition que leur géométrie change peu au cours de l'expérience : des appareils du type DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analyzer) mettent en jeu des oscillations forcées en flexion, cisaillement et élongation.

1.2.1.4 Propriétés viscoélastiques des polymères

Pour l'approche expérimentale de la viscoélasticité linéaire, une déformation sinusoïdale ϵ de faible amplitude ϵ_0 et de pulsation ω est appliquée au matériau, et la contrainte sinusoïdale σ qui en résulte est mesurée (Greenwood et Tabor, 1958).

$$\epsilon = \epsilon_0 \sin(\omega t) \quad , \quad \sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta). \quad (1.5)$$

Le déphasage δ , nommé *angle de perte*, compris entre 0 et $\pi/2$, caractérise le temps de réponse entre la déformation du polymère ϵ et la contrainte appliquée σ . Si le matériau a un comportement purement élastique, σ est en phase avec ϵ et $\delta=0$. Si le matériau est purement visqueux, δ vaut $\pi/2$: σ est en quadrature de phase avec ϵ et en phase avec la vitesse de déformation. On note couramment

$$\sigma = G' \epsilon_0 \sin(\omega t) + G'' \epsilon_0 \cos(\omega t), \quad (1.6)$$

avec

$$G' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos \delta \quad , \quad G'' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin \delta \quad , \quad \tan \delta = \frac{G''}{G'}. \quad (1.7)$$

Le *module de cisaillement* G' du matériau, nommé aussi module de conservation, gouverne la réponse en contrainte en phase avec la déformation. Il caractérise l'énergie emmagasinée par le polymère sous forme élastique. Le rapport $1/G'$ est la *souplesse* de l'élastomère. Un polymère est dit *souple* quand G' est faible et *rigide* quand G' est élevé. Pour les polymères isotropes, le module de cisaillement G' est relié au module d'Young E et au *coefficient de Poisson* ν par

$$G' = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (1.8)$$

Le *module de perte* G'' régit la composante en quadrature de phase avec la déformation : il caractérise l'énergie dissipée dans l'échantillon sous forme visqueuse. Un polymère avec un G'' élevé est dit très *hystérétique*.

Des notations complexes sont souvent utilisées pour décrire les variations sinusoïdales. Le *module dynamique complexe* $G^* = G' + iG'' = (\sigma_0/\epsilon_0)e^{i\delta}$ et la *complaisance dynamique complexe* J^* relie la déformation complexe $\epsilon^* = \epsilon_0 e^{i\omega t}$ et la contrainte complexe $\sigma^* = \sigma_0 e^{i(\omega t + \delta)}$ selon

$$\sigma^* = G^* \epsilon^* \quad \text{et} \quad J^* = \frac{\epsilon^*}{\sigma^*}. \quad (1.9)$$

1.2.1.5 Energie dissipée

Il faut toujours considérer les *conditions de sollicitation* en contrainte-déformation qu'un polymère subit à l'interface durant les essais. Avec une déformation sinusoïdale $\epsilon = \epsilon_0 \sin(\omega t)$ et une contrainte appliquée $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta)$, l'énergie dissipée au cours d'un cycle se calcule par $\Delta W = \int_0^{2\pi/\omega} \sigma d\epsilon = \pi \epsilon_0 \sigma_0 \sin \delta$ (Greenwood et Tabor, 1958; Moore, 1972) :

- Si la sollicitation est à énergie imposée, $(\omega/(2\pi)) \int_0^{2\pi/\omega} \sigma \epsilon dt = (1/2) \epsilon_0 \sigma_0 \cos \delta$, donc ΔW est proportionnelle à $\tan \delta$.
- Si la sollicitation est à déformation imposée ϵ_0 , d'après (1.7), $\Delta W = \pi \epsilon_0^2 G''$.
- Si la sollicitation est à contrainte imposée σ_0 , d'après (1.7), $\Delta W = \pi \sigma_0^2 G'' / G'^2$.

Ces variations de l'énergie dissipée par les polymères selon les conditions de sollicitations sont très souvent utilisées dans la littérature pour expliquer les résultats expérimentaux obtenus avec les élastomères ou les pneus. Cependant, les élastomères suivent en réalité la théorie de l'élasticité caoutchoutique et présentent un comportement non linéaire qui s'explique par les constituants de mélange. Pour être exact, aux températures d'essai très supérieures à T_g et en grandes déformations, il faudrait tenir compte de la forte hystérésis de l'élastomère et appliquer des théories propres aux élastomères (e.g. théories de Mooney (1940) et Rivlin (1948), Treloar (1958), Bueche (1962) ou Lake et Thomas (1967)).

1.2.1.6 Frottement d'un polymère

Veith (1996a,b) a exprimé la force totale de frottement d'un élastomère sur une surface quelconque par $F = F_{ad} + F_{def} + F_{ab}$. F_{ad} comprend l'adhésion entre l'élastomère et le substrat, ainsi que le cisaillement interfacial. F_{def} est due à la déformation de l'élastomère et correspond à une perte d'énergie par dissipation visqueuse (effet de *hystérèse*). F_{ab} est une composante due à l'abrasion et à l'arrachage de particules d'élastomère. L'adhésion se caractérise par un régime de déformation à micro-échelle, i.e. sur des profondeurs inférieures au dixième de millimètre. La composante d'hystérèse est au contraire caractérisée par un régime de déformation à macro-échelle s'étendant sur plusieurs millimètres dans l'élastomère. Le terme F_{def} domine pour des surfaces dures et rugueuses, alors que F_{ad} domine pour des surfaces lisses. On note ici l'importance essentielle de l'aire de contact réelle par rapport à l'aire de contact nominale.

Après les recherches de Greenwood et Tabor (1958), Moore (1972) a exprimé le coefficient de frottement résultant de l'adhésion et de la déformation comme

$$\mu = \left[C_1 \left(\frac{G'}{\sigma_n^m} \right) + C_2 \left(\frac{\sigma_n}{G'} \right)^n \right] \tan \delta, \quad (1.10)$$

avec σ_n la contrainte normale nominale, C_1 et C_2 deux constantes, m un exposant environ égal à 0,2, n un exposant égal ou supérieur à 1.

Si $n=1$, valeur typique selon Moore (1972), la composante d'adhésion est proportionnelle au module de perte G'' . La composante de déformation est proportionnelle à $\tan \delta / G' = G'' / G'^2$ (proche de l'indice G'' / G'^2 dans le cas où G'' est négligeable devant G').

1.2.1.7 Equivalence temps - température

L'évolution de E ou de G' a le même aspect en fonction du temps ou de la température. A température fixée, un polymère est vitreux sous une sollicitation exercée pendant une durée très courte, mais s'écoule sous une sollicitation exercée pendant une durée très longue (à comparer au § 1.2.1.1 à temps fixé et température variable). Cette similitude conduit à postuler une

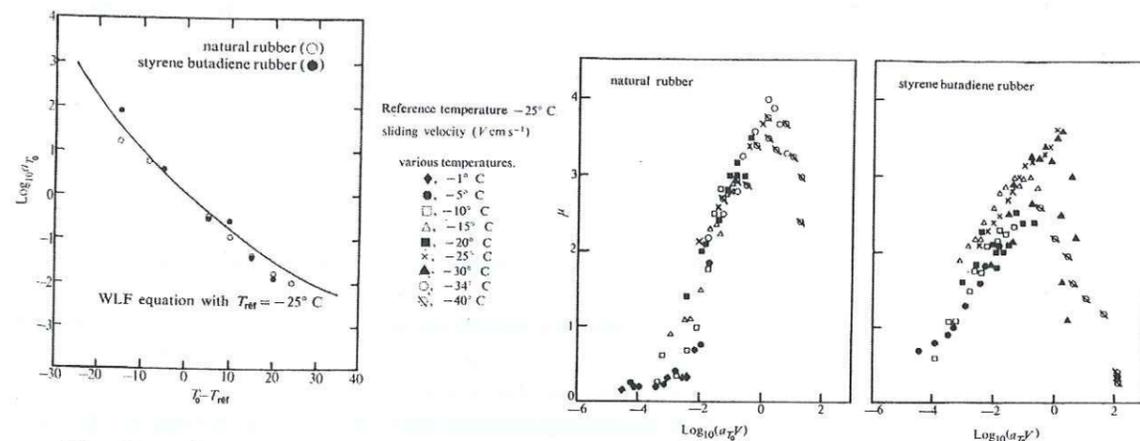


Fig. 1.1 - Facteur de translation de WLF pour deux élastomères (Southern et Walker, 1974).

Fig. 1.2 - Courbe maîtresse pour deux élastomères (Southern et Walker, 1972).

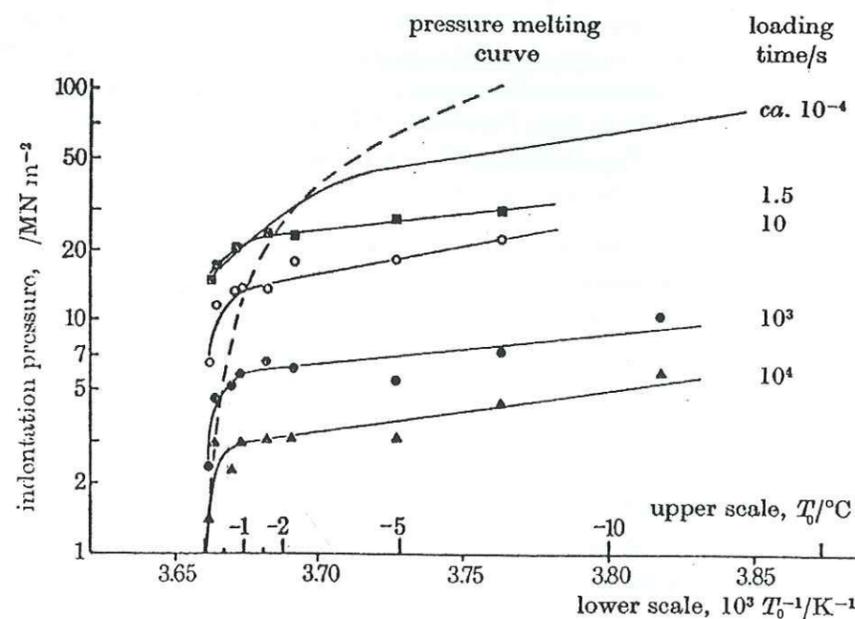


Fig. 1.3 - Mesures de la dureté d'indentation de la glace par Barnes et al. (1971) (Hobbs, 1974).

équivalence du temps et de la température pour le comportement viscoélastique des polymères. Par exemple, un phénomène de relaxation nécessitant une durée donnée se produit en une durée plus courte à température plus élevée, car les mouvements moléculaires sont favorisés par un apport d'énergie supplémentaire sous forme thermique.

Les courbes de E ou de G' en fonction du temps obtenues à différentes températures T_0 peuvent être superposées sur une des courbes choisie à une température de référence T_{ref} , afin d'obtenir une courbe maîtresse.

Le facteur de translation thermique $a_{T_0/T_{ref}}$ donné par l'équation empirique de WLF (du nom des auteurs, Williams, Landel et Ferry) est de la forme :

$$\log a_{T_0/T_{ref}} = -\frac{C_1(T_0 - T_{ref})}{C_2 + (T_0 - T_{ref})}, \quad (1.11)$$

où les valeurs de C_1 et C_2 dépendent de la nature du polymère et de T_{ref} (Fig. 1.1). D'après Williams *et al.* (1955), en choisissant T_{ref} égale à T_g du polymère, ces coefficients sont des constantes indépendantes de la nature du polymère ($C_1 = 17,44$ et $C_2 = 51,6^\circ\text{C}$).

Pour interpréter les mesures de μ obtenues avec un patin d'élastomère sur une piste de glace tournante, Southern et Walker (1972, 1974) ont utilisé le facteur de translation de WLF. Ils ont pu regrouper les courbes de frottement obtenues pour chaque température avec différents polymères pour former une courbe maîtresse à une température de référence T_{ref} (Fig. 1.2). L'existence de courbes maîtresses prouve que les phénomènes physiques qui produisent le frottement dépendent des propriétés viscoélastiques de l'élastomère.

1.2.1.8 Matériaux de la bande de roulement¹

La bande de roulement est la partie du pneu en contact avec la chaussée. L'élastomère qui constitue la base du mélange de la bande de roulement est choisi en fonction des performances désirées. Quelques caoutchoucs naturels et synthétiques souvent utilisés sont : NR (Natural Rubber), NBR (Nitrile Butadiene Rubber), SBR (Styrene Butadiene Rubber), OENR (Oil Extended Natural Rubber), OESBR (Oil Extended Styrene Butadiene Rubber).

La formulation de la bande de roulement d'un pneu est très complexe et comprend de nombreux additifs, dont la proportion est évaluée en *phr* (parts per hundred parts of rubber) :

- La charge renforçante est principalement de deux types : noir de carbone ou silice. Le noir de carbone, utilisé depuis 1915, est obtenu par combustion ou décomposition thermique d'hydrocarbures lourds et permet d'obtenir des mélanges plus résistants à l'abrasion et à la déchirure. La silice est utilisée depuis 1992 par Michelin et les autres manufacturiers de pneus, grâce à un agent de liaison et un procédé de mélange particulier. Les bandes de roulement ainsi obtenues génèrent moins de pertes d'énergies dues à la déformation et présentent une bonne adhérence sur les sols froids.
- Le plastifiant diminue la valeur de T_g du polymère afin de faciliter la mise en oeuvre et de réduire la fragilité du produit fini.
- Les agents de fabrication permettent d'optimiser le procédé de production des pneus : huiles, agents d'adhésion, peptides, adoucisseurs. Les huiles lubrifiantes assurent une lubrification interne et externe. D'une part, elles améliorent les caractéristiques d'écoulement interne du polymère et augmentent ses propriétés de mouillage. D'autre part, elles éliminent le frottement entre le polymère et les surfaces métalliques lors du procédé. Les agents

1. Le matériau de bande de roulement testé est appelé indifféremment *élastomère* ou *gomme*. Nous insistons sur sa composition lorsque nous le nommons *formulation* ou *mélange*. Les *patins* ou *éprouvettes* testés avec le pendule SRT et la machine tournante sont des échantillons produits à partir d'une formulation référencée.

d'adhésion assurent la bonne liaison entre les armatures métalliques et l'élastomère (e.g. sels de cobalt, câbles plaqués en laiton, câbles recouverts de résines).

- Les agents anti-dégradation permettent au pneu de conserver ses propriétés dans le temps en le protégeant contre les agressions extérieures (chaleur, oxydation, rayonnement solaire): stabilisants thermiques, antioxydants, antiUV, etc.
- Le soufre et les agents de vulcanisation facilitent le moulage, dernière étape de la fabrication du pneu. La *vulcanisation* (cuisson et durcissement) repose sur la création d'un nombre limité de liaisons covalentes entre les chaînes de polymère de façon à créer un réseau tridimensionnel plus ou moins rigide.

1.2.2 Propriétés de la glace

1.2.2.1 Structure de la glace

La glace est formée d'un réseau cristallin de molécules d'eau. La *liaison hydrogène*, entre les atomes d'oxygène de deux molécules d'eau proches, confère des propriétés très particulières à la glace. En particulier, durant le gel, elle entraîne la dilatation de l'eau et la diminution de la densité. Sur Terre, à l'état naturel, la variété allotropique est hexagonale de type wurzite et appelée I_h . L'axe de symétrie hexagonale de la glace (également axe optique) est l'axe c , perpendiculaire au plan de base. Le mouvement des dislocations est privilégié dans le plan de base, ce qui rend le *comportement viscoplastique* d'un monocristal très anisotrope (milieu orthotrope de révolution).

Les *jointes de grain* séparent les différents cristaux d'un *polycristal*. Une *glace isotrope* (macroscopiquement) est constituée par des grains quasiment sphériques avec une répartition des axes c aléatoire. Un type particulier de polycristal est souvent utilisé en laboratoire: la *glace colonnaire*, formée par croissance dans un gradient de température unidirectionnel. Cette glace aux cristaux très allongés présente la même structure qu'une glace formée naturellement sur les lacs dans les pays froids (d'où son nom, cf. Lliboutry (1965)). En Finlande, nous avons pu assister aux tests de comportement sur véhicule des pneus hiver que Michelin réalise sur ce type de glace. Lorsque les axes c des grains sont répartis aléatoirement dans le plan perpendiculaire au grand axe des colonnes, le comportement macroscopique de la glace colonnaire est orthotrope de révolution.

La glace colonnaire est fabriquée en laboratoire à partir d'un bac d'eau placé dans une chambre froide à 0 °C. Le bac est posé sur un support métallique à température négative et ses faces latérales sont isolées thermiquement. La glace croît sous forme de colonnes verticales, par gel progressif unidirectionnel dans le gradient de température vertical entre la base froide et le front de gel. Un agitateur élimine les bulles d'air expulsées lors de la croissance de la glace.

1.2.2.2 Comportement mécanique de la glace

La glace est ductile ou fragile selon les conditions de sollicitation. Pour les frottements glace-structure, les vitesses d'interaction sont de l'ordre du m/s; les vitesses de déformation sont en général importantes et il y a accommodation par fissuration. En revanche, pour l'étude des glaciers et calottes polaires, la vitesse de déformation reste faible et le comportement mécanique de la glace est *viscoplastique*.

La *courbe de fluage* (déformation en fonction du temps sous contrainte imposée) met en évidence trois domaines: fluage primaire, secondaire et tertiaire. Lors du fluage primaire, la vitesse de déformation traduit l'écrouissage du matériau (principalement par empilement des dislocations aux joints de grain). Lors du fluage secondaire, la vitesse de déformation est mi-

nimale et presque constante: elle dépend alors principalement de la contrainte appliquée et de la température. Le fluage tertiaire est marqué par une augmentation rapide la vitesse de déformation, due soit à la recristallisation dynamique (cas des faibles vitesses de déformation), soit à l'endommagement du matériau (microfissuration à l'échelle des grains).

En fluage secondaire, la réponse mécanique d'une glace polycristalline isotrope à une contrainte appliquée est calculée d'après la loi d'écoulement de Glen (1958). Cette relation relie la vitesse de déformation \mathbf{D} à la contrainte déviatoire \mathbf{S} selon

$$\mathbf{D}_{ij} = \frac{B(T_0)}{2} \tau^{n-1} \mathbf{S}_{ij}, \quad (1.12)$$

où la fluidité $B(T_0)$ dépend de la température selon la loi d'Arrhénius, τ est la scission efficace (deuxième invariant de \mathbf{S}) et n un exposant compris entre 1 et 3.

1.2.2.3 Dureté de la surface de la glace

Hobbs (1974) a défini la dureté d'indentation pour la glace comme pour tous les autres matériaux: un indenteur rigide, sphérique ou pyramidal, est pressé contre la surface du matériau. La *dureté*, notée H , est calculée comme le rapport de l'effort normal appliqué sur l'aire projetée de la trace d'indentation. Puisque le comportement de la glace est en partie viscoplastique, H dépend de la température T_0 et du temps de chargement, donc ce n'est pas une dureté au sens classique (matériau élastoplastique).

Barnes et Tabor (1966) et Barnes *et al.* (1971) ont remarqué que le comportement de frottement de tout matériau est influencé par la dureté de surface à cause de l'effet de la déformation de la surface durant le glissement. Le caractère viscoplastique de la glace se manifeste par une diminution de la dureté avec l'augmentation du temps de chargement et une augmentation exponentielle de la dureté avec une diminution de la température (Fig. 1.3). Les tests d'indentation de la glace entre -15 et 0 °C révèlent que, pour des températures inférieures à -1,2 °C, le comportement de la dureté s'explique par le fluage pour des temps de chargement supérieurs à 10 s. D'après ces auteurs, la chute de la dureté entre -1,2 et 0 °C indique que la déformation provient du fluage et aussi de la fonte par pression.

1.2.2.4 Enthalpie massique de fusion

L'énergie nécessaire Q pour réchauffer de ΔT et faire fondre une masse M de glace est:

$$Q = M(L + C_{pi}\Delta T), \quad (1.13)$$

où L est l'enthalpie massique de fusion ($L = 334 \text{ kJ kg}^{-1}$) et C_{pi} est la capacité thermique massique de la glace ($C_{pi} = 2 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Lors de la fonte de la glace initialement proche du point de fusion, la majorité de l'énergie dépensée est consommée pour fondre la glace, et non pas pour la réchauffer (pour une température initiale de -20 °C, l'énergie nécessaire pour réchauffer une masse unité de glace jusqu'à 0 °C représente moins d'un huitième de celle nécessaire à la fonte).

1.2.2.5 Fonte par pression

Au tout début du siècle, l'explication du très faible μ sur glace était soutenue par la version de Reynolds (1901): la lubrification par fonte par pression. D'après la thermodynamique, la liaison hydrogène est responsable des effets de fusion par pression à la surface de la glace.

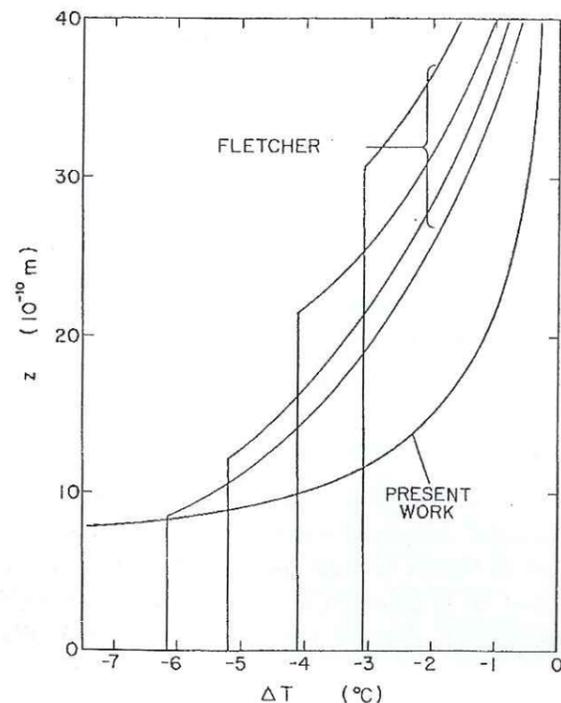
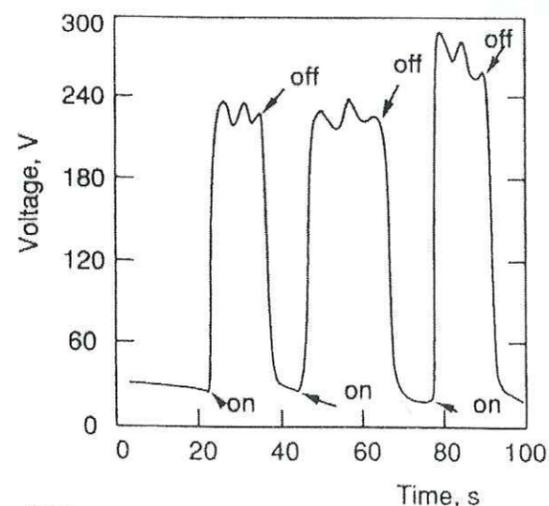


Fig. 1.4 - Epaisseur de la QLL mesurée par Fletcher (1968) et estimée par le modèle de Fukuta (1987).



Sliding velocity was 1 m/s. Temperature = -30 °C. The arrows indicate when the lathe was switched on and off.

Fig. 1.7 - Différence de potentiel entre la glace et un ruban en acier (Petrenko et Colbeck, 1995).

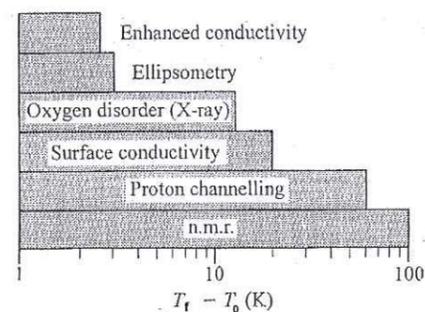


Fig. 1.5 - Gamme de température où la glace révèle des propriétés différentes de la glace en volume (Petrenko et Whitworth, 1999).

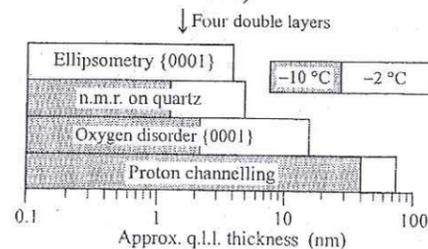
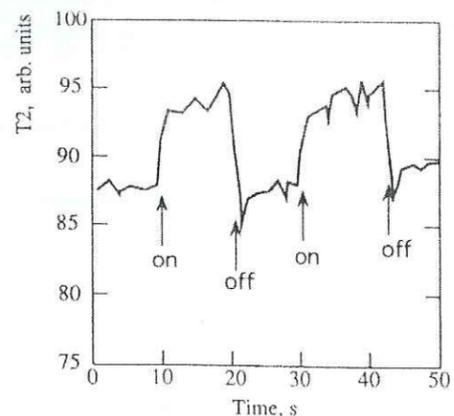


Fig. 1.6 - Epaisseur de la QLL, selon différentes techniques expérimentales (Petrenko et Whitworth, 1999).



Sliding velocity 2 m/s. Temperature -30 °C. Changes in tension of the polyethylene belt (T_2) when a 3 kV bias is switched on and off. The friction coefficient $\mu \approx 0.3$ at $V=0$ and $\mu \approx 0.5$ at $V=3$ kV.

Fig. 1.8 - Effet d'un champ électrique sur le frottement polyéthylène - glace (Petrenko, 1994).

Quand les deux phases glace et eau sont présentes, la diminution de la température de fusion avec la pression est donnée par la loi de Clausius - Clapeyron :

$$\frac{dT_f}{dP} = -0,074 \text{ K MPa}^{-1}. \quad (1.14)$$

Bowden et Hugues (1939) ont montré les premiers que cette théorie n'est en général pas recevable. Par exemple, sous un ski de sport d'hiver, la contrainte normale nominale abaisse le point de fusion de la neige à $-0,00012$ °C. L'aire de contact réelle devrait être environ 10^5 fois plus petite que l'aire nominale pour justifier le faible μ d'un ski sur la neige à -20 °C !

1.2.2.6 Etudes de la couche de surface quasi liquide (QLL)

1.2.2.6.1 Etudes théoriques de la QLL

La surface de la glace, intermédiaire entre le solide à structure cristalline et l'eau, est souvent nommée *couche quasi-liquide* (quasi-liquid layer, QLL). Fletcher (1968) a expliqué théoriquement l'existence d'une structure de surface particulière. Il a montré que, pour des températures supérieures à -5 °C, la surface de la glace est couverte par une QLL dont l'épaisseur croît quand la température approche de T_f . La formation de la QLL provient du phénomène de fusion de surface à l'interface solide-vapeur. Si la somme de l'énergie libre interfaciale entre un solide et son liquide associé et celle entre ce liquide et sa vapeur est plus faible que l'énergie libre entre le solide sec et sa vapeur, alors il devient énergétiquement favorable pour le système de convertir une fine couche de solide de la surface en liquide pour des températures inférieures à la température de fusion volumique. Cette théorie basée sur le principe de minimisation d'énergie est couramment admise, même si Makkonen (1997) a tenté de la mettre en défaut.

Fukuta (1987) a modélisé les liaisons hydrogènes dans la QLL à partir d'un modèle de sphères avec un potentiel d'attraction intermoléculaire de la forme $\Phi = -Cr^{-n}$, avec r la distance entre les centres moléculaires, C et n des constantes. En considérant les potentiels additifs et en intégrant sur tout l'espace, il a obtenu la distribution de pression. La loi de Clausius - Clapeyron a permis d'obtenir une relation entre l'épaisseur de la QLL et la température. L'accord avec les expériences de Fletcher (1968) reste raisonnable (Fig. 1.4).

1.2.2.6.2 Etudes expérimentales de la QLL

Petrenko (1998b) expose les différentes techniques expérimentales utilisées pour mesurer les propriétés physiques de la surface de glace. Selon la propriété physique mesurée et la méthode utilisée, il existe une gamme de température, en dessous du point de fusion, dans laquelle la surface de la glace ne présente pas le même comportement que la glace en volume (Fig. 1.5). Dans l'hypothèse où le changement de la propriété physique peut s'interpréter comme conséquence de l'existence de la QLL, l'épaisseur de la QLL mesurée dépend de la technique expérimentale mise en oeuvre (Fig. 1.6).

Par résonance magnétique nucléaire, Mizuno et Hanafusa (1987) ont montré que les molécules de surface de la glace possèdent des propriétés intermédiaires entre celles de l'eau liquide et celles de la glace cristalline. Le coefficient d'auto-diffusion est environ quatre fois plus faible que pour l'eau, mais deux fois plus grand que celui dans le corps du cristal de glace. Les molécules à la surface se réarrangent à une fréquence environ cinq fois plus grande que dans la glace cristalline, mais seulement 25 fois plus petite que dans l'eau.

Furukawa *et al.* (1987) ont utilisé la technique de l'ellipsométrie pour mesurer l'épaisseur de la couche de transition. La surface de glace couverte de QLL reflète une lumière polarisée linéairement en lumière polarisée elliptiquement. Le rapport des taux de réflexion des composantes perpendiculaires de la lumière polarisée dépend de l'indice de réfraction et de l'épaisseur

de la couche. L'indice de réfraction de la couche de transition (1,330) est plus proche de celui de l'eau volumique (1,333) que de celui de la glace (1,308). Les variations de l'épaisseur de la QLL avec le plan cristallographique s'expliquent par les énergies de surface différentes selon le plan cristallin.

Le microscope à force atomique permet de mesurer le frottement sur glace (Bluhm *et al.*, 2000). Mais Eastman et Zhu (1995) ont montré que la pointe du microscope influence la fonte interfaciale de la glace et peut modifier les mesures à cause de la présence de la QLL (forces de capillarité à l'interface pointe / glace).

1.2.2.7 Propriétés électriques de la glace et frottement sur la glace ²

Les phénomènes électromagnétiques dans la glace se manifestent de nombreuses façons. En particulier, la glace produit des émissions électromagnétiques lors de la croissance de fissures ou d'une variation de contrainte sur une fissure stable. Comme pour tous les matériaux, les fissures génèrent un changement de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique apparente de la glace. De nombreux auteurs ont mesuré les propriétés électriques à la surface de la glace par différentes techniques expérimentales (e.g. Maeno et Nishimura, 1978; Khusnatdinov et Petrenko, 1997; Khusnatdinov *et al.*, 1997). Certains ont aussi proposé quelques modélisations (e.g. Petrenko et Ryzhkin, 1997).

Les travaux de Petrenko sur la relation entre les phénomènes électromécaniques et le frottement sur la glace (Petrenko, 1994; Petrenko et Colbeck, 1995; Petrenko, 1996; Petrenko et Ryzhkin, 1997) ont abouti au dépôt d'un brevet (Petrenko, 1998a). La technique est par exemple développée pour diminuer l'adhésion de la glace sur les ailes d'avion ou augmenter μ entre des pneus ou des semelles de chaussures et des sols verglacés.

D'une part, Petrenko a montré que l'électrification par frottement est importante quel que soit le matériau frottant sur la glace. Il a mesuré en laboratoire l'apparition de champs électriques au niveau d'un ruban frottant sur un cylindre de glace en rotation (Fig. 1.7) et sur le terrain avec un ski instrumenté. D'après Ryzhkin et Petrenko (1997), la glace est chargée électriquement en surface par une forte concentration de défauts de Bjerrum D, d'ions H_3O^+ ou de protons. A l'équilibre thermique, cette charge de surface de la glace est neutralisée par une charge écran de signe opposée et répartie dans la masse de glace sur une profondeur dite *longueur principale d'écran*. L'électrification par frottement résulte du transfert des charges électriques de la surface de glace vers le patin et peut avoir deux causes : soit le patin balaie les charges déjà présentes à la surface de glace ; soit le frottement produit une séparation spatiale de la charge qui est ensuite balayée par le patin.

D'autre part, Petrenko (1994) a étudié l'effet de champs électriques sur le frottement. Il a montré que l'application d'un courant électrique à l'interface glace-patin peut augmenter fortement les frottements dynamique et statique entre la glace et un métal ou un diélectrique (Fig. 1.8). Il a expliqué ce phénomène grâce à la pression électrostatique, l'effet des champs électriques statiques sur la déformation plastique de la glace et une augmentation de l'aire de contact causée par les champs électriques.

Nous avons effectué au LGGE des tests de mesure de frottement gomme - glace avec le pendule SRT, mais ces phénomènes électromécaniques n'ont pas pu être reproduits. μ_{SRT} ne variait pas lorsqu'une tension élevée était imposée entre l'éprouvette de gomme et la glace.

2. Notre étude bibliographique interne est plus détaillée (Lenoël, 1999b).

1.3 Fonctionnement d'un pneu

1.3.1 Différentes performances d'un pneu

Les fonctions d'un pneu sont souvent contradictoires : porter, transmettre, rouler, guider, amortir les chocs, durer. En tenant compte des exigences des clients, les concepteurs cherchent le meilleur compromis entre les différentes *performances* : adhérence, usure, bruit, confort, comportement, endurance et résistance. Ces performances s'évaluent sous trois conditions de contact principales : en traction, en roulement et en freinage.

La capacité de freinage d'un véhicule est déterminée par la conception du véhicule (freins, suspensions, aérodynamique, etc.) et par l'interaction pneu / sol. Outre les caractéristiques du véhicule, les différents facteurs qui affectent la force de frottement sont : la composition de la bande de roulement, l'architecture du pneu, les sculptures de la bande de roulement, la distribution de contrainte normale dans l'empreinte, la charge verticale sur le pneu, la texture de la surface du sol, la contamination de la surface du sol, la température du sol, la température ambiante et la vitesse de glissement.

La consommation de carburant d'un véhicule en mouvement est utilisée à 70 % pour vaincre les efforts aérodynamiques et les frottements internes des ensembles tournants (Fig. 1.9). La *résistance au roulement* liée au travail des pneus représente les 30 % restants. Ainsi, réduire les pertes dues au pneu permet de diminuer la consommation de carburant (et la pollution de l'air par les gaz d'échappement qui en résulte). Lors de l'écrasement du pneu sur le sol, ses constituants absorbent de l'énergie correspondant au travail de déformation dont une partie est dépensée sous forme d'échauffement (perte hystérique). Pour un pneu radial, 61 % de la perte d'énergie dans le pneu intervient au niveau de la bande de roulement (Fig. 1.10).

La *vitesse de glissement* V d'un pneu sur le sol est

$$V = \omega R - V_0, \quad (1.15)$$

avec ω la vitesse de rotation de la roue, R le rayon de la roue et V_0 la vitesse du véhicule.

Le *taux de glissement* g_V d'un pneu sur le sol est défini par

$$g_V = \frac{V}{V_0} = \frac{\omega R - V_0}{V_0}. \quad (1.16)$$

$g_V = -1$ en freinage en roue bloquée, $g_V = 0$ en roulage pur et $g_V = +\infty$ en patinage sur la glace.

1.3.2 Architecture d'un pneu

Chacun des constituants du pneu joue un rôle particulier (Fig. 1.10). Les *nappes* de la *carcasse* et du *sommet* (couches de tissu revêtues de caoutchouc et contenant des câbles textiles ou métalliques) stabilisent le profil du pneu et lui confèrent ses rigidités. La tringle assure le serrage de l'enveloppe sur la jante et maintient l'étanchéité. Le flanc protège la carcasse des agressions extérieures. La *bande de roulement*, nommée aussi *KM*, assure le contact entre le pneu et la chaussée et intervient au premier ordre pour fixer les performances d'adhérence et d'usure. L'*aire de contact* est aussi nommée *empreinte*. En 1946, Michelin a remplacé la carcasse à nappes croisées par une carcasse radiale, qui s'est imposé rapidement à tous les types de véhicules : grâce à la structure en câbles disposés perpendiculairement à la bande de roulement, le sommet travaille indépendamment des flancs, ce qui améliore le confort, la longévité et la tenue de route.

Bohm (1996) a modélisé le processus de frottement dynamique des pneus en tant que structure précontrainte de couches de cordes couvertes de couches d'élastomère. Les câbles de la

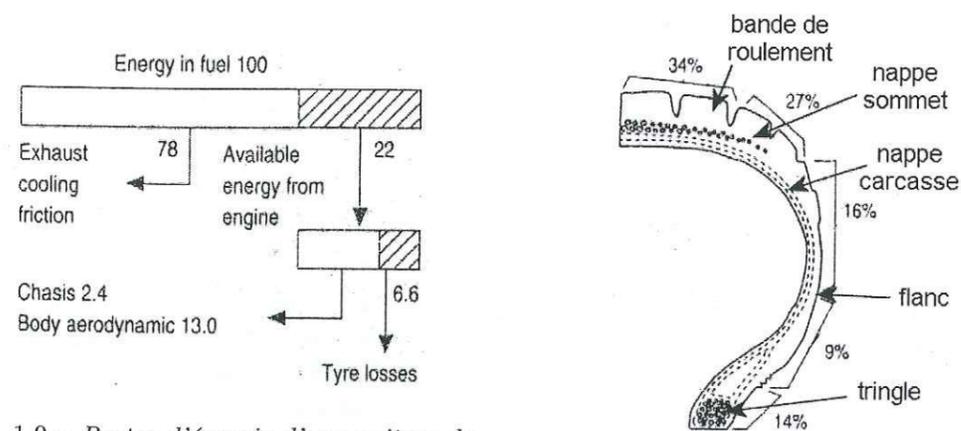


Fig. 1.9 - Pertes d'énergie d'une voiture de taille moyenne à la vitesse constante de 80 km/h (Newell et Wallace, 1995).

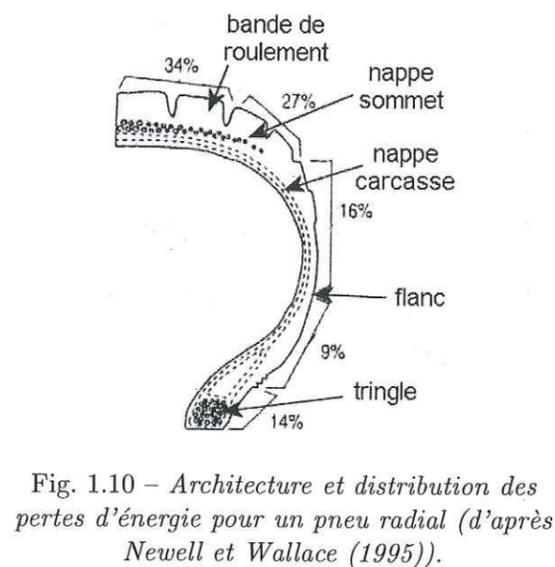


Fig. 1.10 - Architecture et distribution des pertes d'énergie pour un pneu radial (d'après Newell et Wallace (1995)).

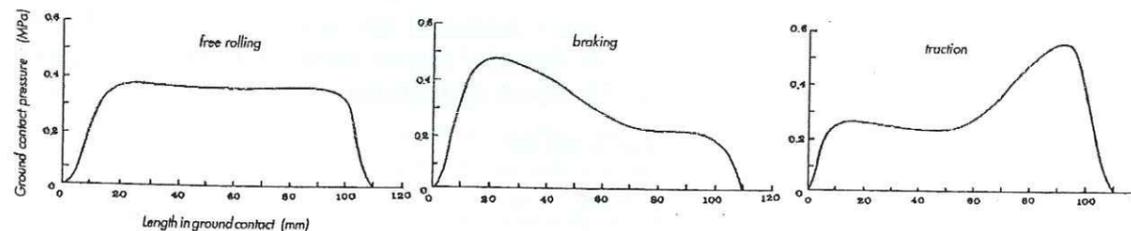


Fig. 1.11 - Distribution de la contrainte normale locale de contact σ_{nl} sur un sol à μ élevé (Yamazaki, 1993).

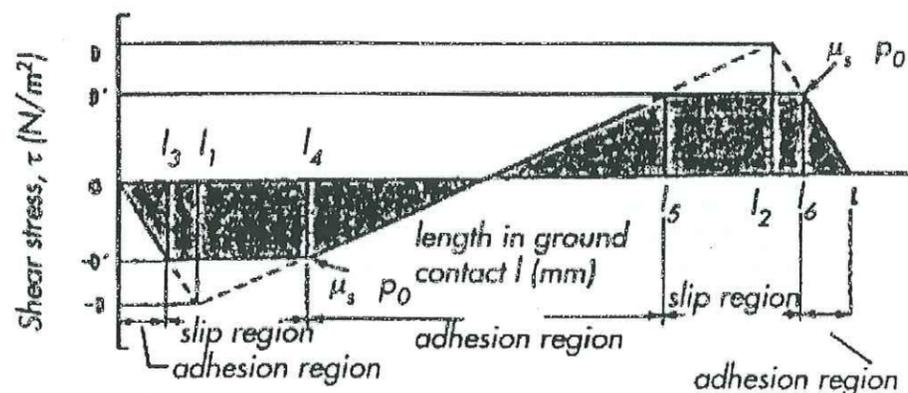


Fig. 1.12 - Contrainte tangentielle en roulement sur une chaussée à faible μ (Yamazaki, 1993).

carcasse résistent uniquement aux efforts de traction ; la pression d'air compense les efforts en compression ; l'élastomère supporte les efforts de cisaillement.

Un code alphanumérique, du type $A/BRCDE$, inscrit sur les flancs du pneu donne les dimensions du pneu, avec A la largeur de la section en millimètre, B les décimales du rapport entre hauteur de flanc et largeur de section, R pour une structure radiale, C le diamètre intérieur de jante en pouces, D un indice de charge et E un indice de vitesse. Le symbole $XM+S$ signifie que la structure du pneu est radiale (X) et qu'il est spécialement conçu pour les chaussées hivernales ($M+S$, i.e. *Mud and Snow*).

Les *clous des pneus cloutés* comprennent trois parties : le corps cylindrique, la tête (base implantée dans la bande de roulement, plus large que le corps) et la *saillie* (extrémité du clou, plus étroite que le corps, dont le sommet sphérique est en contact avec la chaussée). Les clous sont insérés dans une *alvéole* de la bande de roulement. Les *collerettes* (i.e. proéminences circulaires du corps du clou) permettent au clou de bien tenir dans l'alvéole malgré des sollicitations extérieures élevées. D'après Laulusa (1998), les clous portent environ un tiers de l'effort normal total supporté par le pneu (300 à 400 daN). En effet, un clou porte environ 15 daN et l'effort supporté par 8 à 10 clous dans l'aire de contact est 120 à 150 daN.

La bande de roulement est sculptée. Un *rib* est une partie continue de gomme entre deux rainures circonférentielles. Les *pains de gomme* sont séparés par des rainures transversales. Dès 1932, Michelin a inventé les *lamelles* (rainures plus ou moins fines dans les pains de gomme) qui permettent d'améliorer considérablement l'adhérence sur les sols gras et mouillés. Dans les années 70, la technologie des lamelles a commencé à s'appliquer aux produits spécialisés neige.

1.3.3 La performance adhérence d'un pneu

L'adhérence d'un pneu sur la route est la somme de deux composantes :

- **L'adhésion** se manifeste sur un sol lisse propre ou en présence de poussières de très petite taille. Les forces de Van der Waals, de nature électrochimique, s'établissent entre les molécules d'élastomère et celles du sol. Chaque liaison reste très faible mais leur nombre élevé génère une force importante.
- **L'indentation** se manifeste en présence d'aspérités de taille entre 0,001 et 10 mm. L'enfoncement des aspérités du sol dans la gomme dépense de l'énergie de déformation. Chaque élément de la bande de roulement se comporte comme un corps viscoélastique soumis par la charge du pneu à une déformation dynamique. En se comprimant, il stocke de l'énergie mais n'en restitue qu'une partie lorsqu'il sort de l'aire de contact : l'hystérèse est la perte énergétique caractéristique des matériaux viscoélastiques.

L'*aquaplanage* est une perte du contact avec le sol résultant de la vitesse du véhicule et de la formation d'une couche d'eau épaisse. Sous l'effet de la vitesse du pneu, la pression d'eau à l'avant augmente et le soulève progressivement quand la pression hydrodynamique devient supérieure à la pression de contact. En vitesse croissante, le coin d'eau progresse sous le pneu et finit par le décoller totalement du sol. Malgré l'évacuation d'une partie de l'eau par les sculptures sur les côtés du pneu, la distance de freinage augmente et le pouvoir directeur diminue.

1.3.4 Répartition de la contrainte normale sous un pneu

Yamazaki (1993) a expliqué les différences de la répartition des contraintes normale et tangentielle sous un pneu en roulement, traction ou freinage, sur une chaussée à fort ou faible μ . Sur route à fort μ , la distribution de contrainte normale est très hétérogène : élevée à l'avant en freinage, élevée à l'arrière en traction (Fig. 1.11). En revanche, sur chaussée à faible μ , les

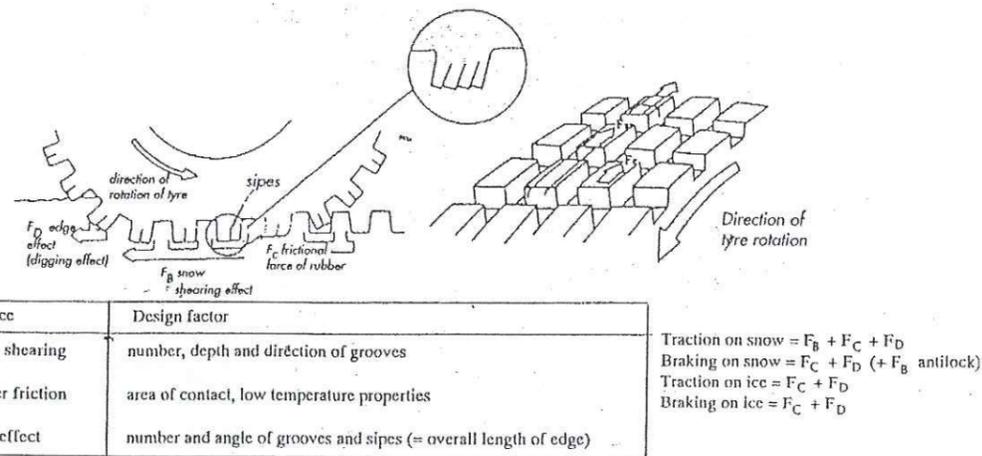


Fig. 1.13 – Différentes composantes de la traction et du freinage des bandes de roulements sculptées sur neige et glace (Sakamoto et Hirata, 1993).

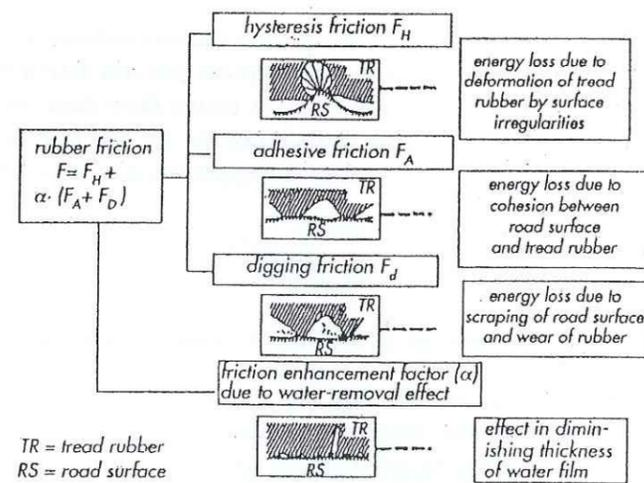


Fig. 1.14 – Décomposition du frottement d'un élastomère sur la glace (Sakamoto et Hirata, 1993).

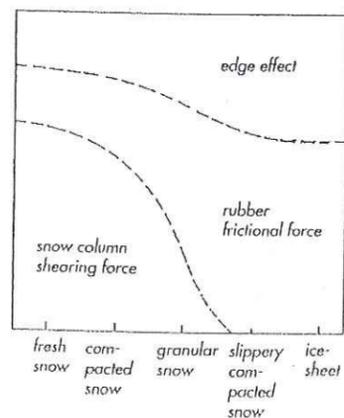


Fig. 1.15 – Contributions relatives des différentes composantes du freinage des pneus sur neige et glace (Sakamoto et Hirata, 1993).

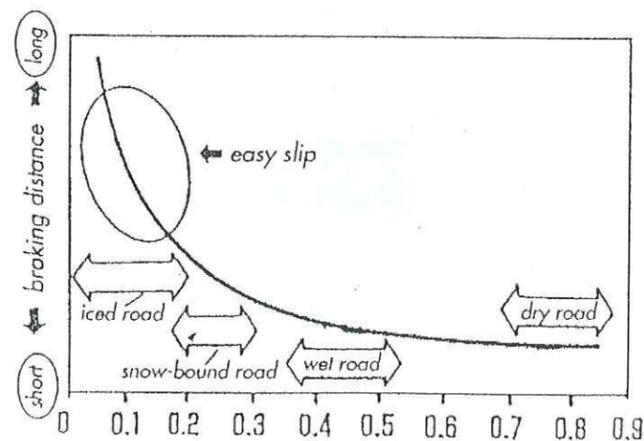


Fig. 1.16 – Ordre de grandeur des μ sous différentes conditions (Sakamoto et Hirata, 1993).

efforts de traction et freinage sont faibles et la contrainte normale locale peut être considérée comme uniforme le long de l'aire de contact. La distribution du cisaillement longitudinal (dans le sens du mouvement) et les zones d'adhésion et de glissement sont décrites sur la figure 1.12 en conditions de roulement.

1.4 Frottement d'un pneu sur neige et glace

1.4.1 Composantes du frottement sur la glace

Différents phénomènes physiques génèrent la force de frottement du pneu sur les routes enneigées ou glacées. La sculpture de la bande de roulement joue un rôle fondamental pour chacune des trois composantes : cisaillement de la couche de neige, frottement de l'élastomère et effet de grattage (Fig. 1.13). Le frottement de l'élastomère peut lui aussi s'exprimer en plusieurs composantes (Fig. 1.14) : hystérèse (perte d'énergie due à la déformation de l'élastomère de la bande de roulement par les irrégularités de la surface de la route), adhésion (perte d'énergie résultant de la cohésion entre la surface de la route et l'élastomère) et effet de grattage (perte d'énergie provenant du creusement de la surface de la route et de l'usure de l'élastomère). Les contributions relatives de chaque composante au frottement d'un pneu dépendent de l'état de la chaussée (Fig. 1.15) : sur la neige, le frottement s'effectue principalement par cisaillement de la couche de neige, alors que sur la glace, l'adhésion de l'élastomère et l'effet de grattage dominant.

1.4.2 Ordres de grandeurs du coefficient de frottement pneu - glace

La valeur de μ pour un pneu sur la glace dépend fortement des conditions de frottement (Roberts, 1992) : vitesse, pression du pneu, structure du pneu, géométrie de la bande de roulement, nature de la glace, températures de la glace, de l'air et du pneu, etc. Quelques ordres de grandeur des μ pneu - sol sous différentes conditions soulignent la nécessité de la recherche sur le frottement pneu - glace pour améliorer la sécurité des usagers (Fig. 1.16). Typiquement, μ est : inférieur à 0,2 sur route glacée, 0,5 sur route mouillée et 0,8 sur route sèche. La nature du sol modifie fortement la distance de freinage d'un véhicule : un doublement de μ se traduit par une diminution de moitié de la distance de freinage.

Afin de faciliter les reconstitutions d'accidents sur chaussées hivernales, Martin et Schaefer (1996) ont proposé une classification des différentes surfaces de glace et neige, en donnant une valeur de μ typique pour chaque cas (Fig. 1.17).

1.4.3 Techniques d'évaluation de performances sur la glace

De nombreux articles comparent des pneus en situation réelle, sur véhicules instrumentés (e.g. Kawano et Ueyama, 1999) ou non (e.g. Blaisdell, 1983). Ils évaluent l'effet de la sculpture, de la pression de gonflage et de la température de la glace. Nishi (1997) a comparé les performances des dispositifs à chaînes en élastomère ou en polymère sur chaussées enneigées.

Sur véhicule, différents tests sont pratiqués pour évaluer chaque performance. Le freinage est par exemple évalué par la distance de freinage d'un véhicule lancé à 30 km/h sur un lac gelé. Le comportement est évalué par des essayeurs expérimentés sur des circuits tortueux et glacés. Ces tests sont indispensables pour les concepteurs de pneus, mais sont onéreux et les conditions dans lesquelles ils sont réalisés ne sont pas toujours optimales (aléas climatiques, délais de fabrication des pneus et de transfert sur site, campagnes de mesures à dates fixes, etc.). Des tests peuvent aussi être pratiqués toute l'année sur patinoire, mais ils restent trop peu significatifs : un fort

| Tire*/Surface Classification | Description | Range of μ Values** |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Ice | A solid sheet of frozen water thick enough that it is not broken through by studs or chains. Looks like glass. When at the melting point will have a layer of water on it. | 0.054 to 0.19 |
| Ice with studded snow tires | Ice as above with studded snow tires on the rear wheels with limited data for all wheels. | 0.092 to 0.16 |
| Ice with steel tire chains | Ice as above with steel reinforced tire chains. | 0.12 to 0.18 |
| Ice w/ low tire pressure | Ice as above with tire pressures of 83 to 221 kPa (12 to 32 psi) | 0.13 to 0.15 |
| Thick black ice | A continuous layer of ice over asphalt or concrete which is difficult for the average driver to see. It is thick enough that it is not broken up by the sliding of locked tires. | 0.12 to 0.26 |
| Thin black ice | Icy layer generally covering the pavement and difficult for the average driver to see. It is thin enough that it is partly broken up when locked tires slide on it. | 0.17 to 0.49 |
| Snow and ice | A continuous layer of snow compacted to form an icy surface. | 0.12 to 0.39 |
| Snow and ice glazed at traffic light | Compact snow and ice at a traffic light where prior vehicles have sat with the warmth of the engines and moisture in the warm exhaust forming glare ice over the surface. | 0.09 to 0.22 |
| Snow and ice with sand | Compact snow and ice with a spread of "sand", almost gravel, particles 3 to 6 mm (1/8 to 1/4 inch) in diameter. | 0.15 to 0.45 |
| Snow and ice with sand in ruts | Compact snow and ice with worn ruts and rivulets with a spread 3 to 6 mm (1/8 to 1/4 inch) diameter sand which has migrated into the ruts. No exposed paving. | 0.20 to 0.29 |
| Snow and ice with an overlay of fresh snow | Compact snow and ice onto which has fallen a fresh layer of snow or frozen fog 3 to 100 mm (1/8 to 4 inch) thick which has not been tracked. | 0.18 to 0.45 |
| Snow and ice with an overlay of old snow | Compact snow and ice onto which has accumulated a layer of rough, old crusty snow 100 to 200 mm (4 to 8 inch) thick which has not been tracked. | 0.43 to 0.45 |
| Snow and ice with 20% exposed ruts | Compact snow and ice which has been worn at the tire tracks to expose 20% of the asphalt paving in the ruts. | 0.20 |
| Tracked snow | Snow which fell onto bare pavement and compacted by vehicles, but not sufficient to be called snow and ice. | 0.24 to 0.37 |
| Untracked snow | Fresh snow fallen onto bare pavement and not compacted by prior vehicles. | 0.15 to 0.42 |
| Deep untracked snow | Snow so deep that the vehicle is not supported on its tires. | 0.92 to 0.95 |
| Heavy frost | Almost ice conditions. Heavy white coating and very visible to the driver. | 0.37 to 0.48 |
| Frost | General white coating covering entire lane. Visible to the driver and completely recognizable as frost. | 0.48 to 0.58 |
| Partial frost | Light or partial coating of frost on the road surface. Visible to the driver as intermittent frosting appearance. | 0.61 to 0.64 |
| Bare | Completely bare dry asphalt road surface. Data taken to observe the effects of low temperature on the friction coefficient of tires on this commonly tested surface. | 0.59 to 0.72 |

*Tires are passenger car tires unless otherwise noted.

**The ranges of values are presented in this table only for the use of the reader in making some quick, general comparisons. Each case must be analyzed using the complete data presented in the text and appendix of this paper.

Fig. 1.17 - Variabilité de μ avec la nature de la chaussée (Martin et Schaefer, 1996).

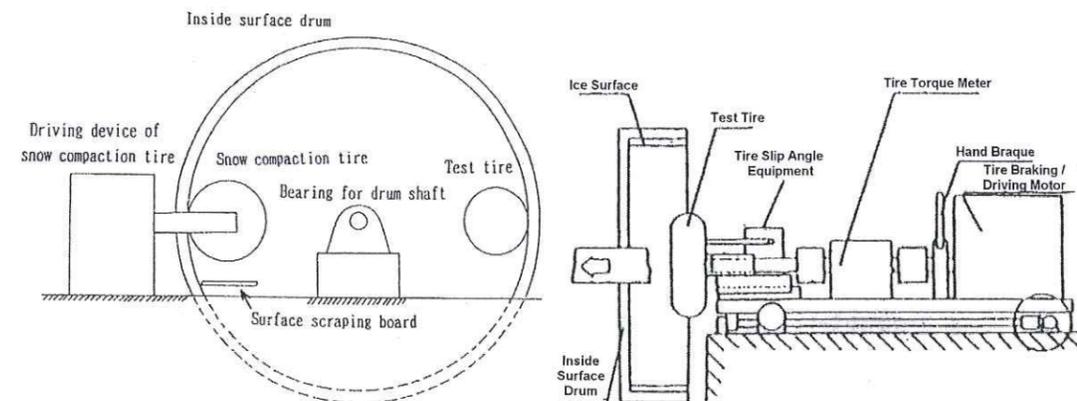


Fig. 1.18 - Schéma d'un volant intérieur de glace (Ochiai et Hiroki, 1994; Hiroki et Horiuchi, 1994).

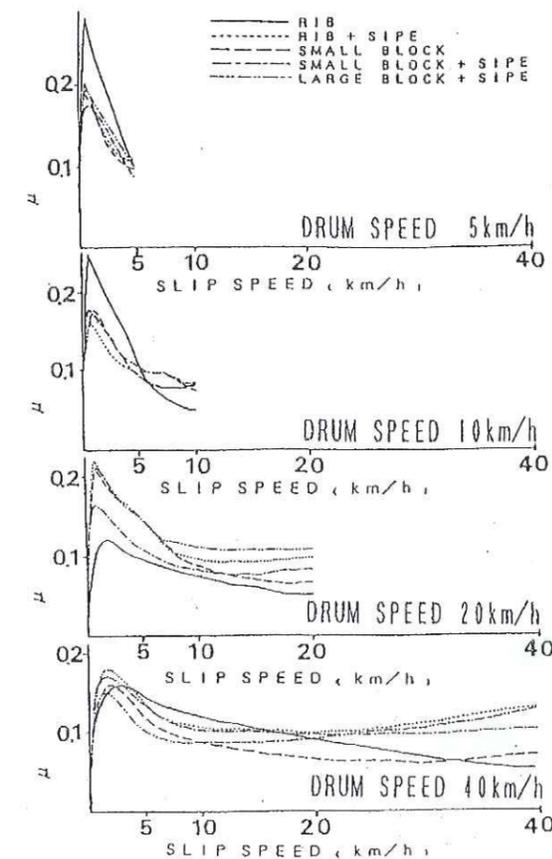


Fig. 1.19 - Evolution de μ avec la vitesse de glissement V à -3°C (Hiroki et Horiuchi, 1994).

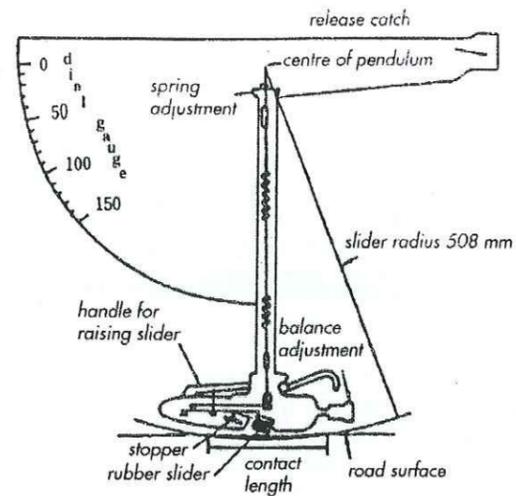


Fig. 1.20 - Schéma du bras du pendule SRT (Wada, 1998).

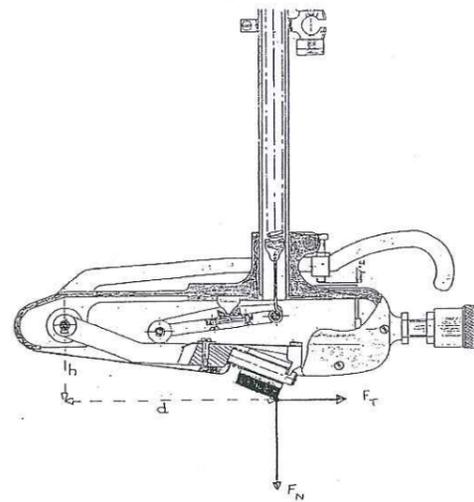


Fig. 1.21 - Schéma du sabot porte éprouvette (Dubus, 1997).

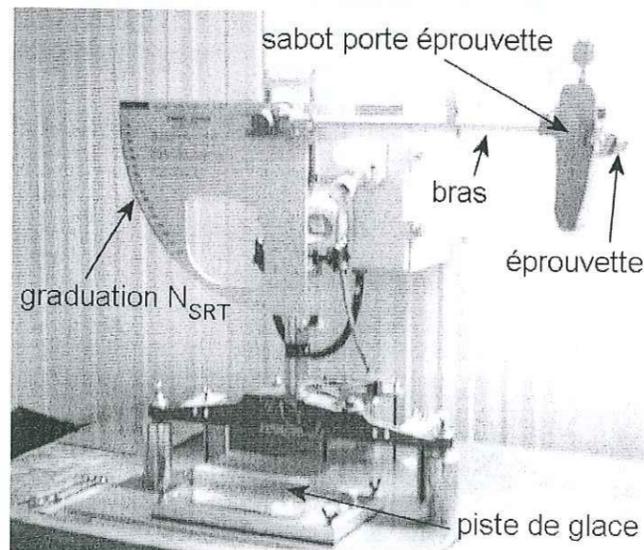


Fig. 1.22 - Pendule SRT utilisé en chambre froide au LGGE.

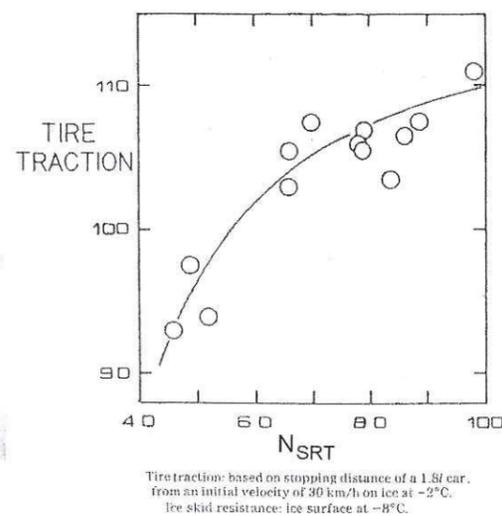


Fig. 1.23 - Corrélation entre l'index de traction du pneu et le N_{SRT} (Ahagon et al., 1988).

gradient de température existe en surface de la glace au contact de l'air ambiant ; le stockage des pneus à température ambiante avant les tests modifie leur comportement. Une expérience sans véhicule permet aussi de mesurer le frottement gomme-glace : le *chariot patinoire* (un support instrumenté traîne sur la glace une éprouvette de gomme sous un effort normal imposé et à vitesse imposée).

Trois principaux types de dispositifs expérimentaux permettent des mesures de laboratoire pour le frottement élastomère-glace appliqué au pneu, en limitant certains problèmes (coût réduit, délai écourté et conditions de test température - vitesse - contrainte normale variables).

- Le **volant intérieur** de laboratoire (Fig. 1.18) permet de comparer diverses performances des pneus avec des taux de glissement variables (e.g. Ochiai et Hiroki, 1994; Hiroki, 93). Un pneu, de dimensions réelles ou plus petit, est mis en rotation par un moteur et placé en contact, sous un effort normal contrôlé, avec la surface intérieure recouverte de glace d'un cylindre de 3 m de diamètre tournant dans le même sens. La vitesse de glissement V provient de la différence entre les vitesses de rotation du cylindre et du pneu. Un déplacement latéral du pneu lui permet de ne jamais passer sur la même trace. Pour chaque essai, le pneu est freiné tout en maintenant le volant à vitesse constante et les forces de frottement sont mesurées jusqu'à l'arrêt du pneu (roue bloquée). L'évolution de μ en fonction de V est montrée sur la figure 1.19 : μ augmente jusqu'à μ_{max} lors de la mise en cisaillement de la bande de roulement puis décroît vers une valeur $\mu_{bloqué}$ en roue bloquée. Le volant intérieur permet par exemple de démontrer l'intérêt de la souplesse de la bande de roulement (Tret'yakov et al., 1993) ou de simuler le freinage d'urgence (Shimizu et Nihei, 1996).
- Les systèmes **pion - disque** (*pin-on-disc*) pour mesurer μ sur glace sont très nombreux, que ce soit avec des élastomères (e.g. Gnorich et Grosch, 1972; Southern et Walker, 1974; Roberts, 1980; Oksanen, 1983; Hayhoe et Shapley, 1989), des polymères (e.g. Keinonen, 1978; Lehtovaara, 1987) ou d'autres matériaux (e.g. Bowden et Hugues, 1939; Evans et al., 1976; Akkok et al., 1987). En général, un patin frotte sur une piste de glace en rotation, mais les rôles peuvent aussi être inversés.
- Le **pendule SRT**, décrit dans le paragraphe suivant, est aussi très utilisé (e.g. Ahagon et al., 1988; Takino et al., 1991; Futamura, 1996).

1.4.4 Pendule SRT

Le *pendule de frottement SRT* (Skid Resistance Tester) comporte un bras portant une éprouvette d'élastomère (ou *patin*) de largeur 75 mm frottant sur 127 mm d'une piste quelconque (Fig. 1.20). Le bras est lâché dans sa position horizontale. L'angle de remontée est mesuré par rapport à la verticale. Le pendule comprend une graduation représentant un nombre N_{SRT} (nombre de résistance au glissement), qui vaut environ 100 fois le coefficient de frottement noté μ_{SRT} . A vide, le bras remonte jusqu'à un certain angle, à cause des frottements internes au niveau de la fixation de l'axe de rotation du bras sur le support. Quand l'éprouvette frotte sur une piste, le bras remonte jusqu'à un angle plus faible. Le coefficient de frottement μ_{SRT} d'un couple élastomère - piste est obtenu d'après la différence ΔN_{SRT} entre N_{SRT} mesuré et celui mesuré à vide par une formule empirique, déterminée pour chaque pendule SRT par un étalonnage. Pour le pendule que nous utilisons, cette formule est

$$\mu_{SRT} = 1,72 * \frac{\Delta N_{SRT} - 5}{197 - \Delta N_{SRT}} \quad (1.17)$$

Le pendule a été conçu et dimensionné pour simuler le frottement de la bande de roulement d'un pneu sur une chaussée humide, mais nous avons montré que son utilisation sur glace ne pose

aucun problème (Lenoël (1998), Fig. 1.22). La vitesse de glissement de l'éprouvette à l'arrivée sur la piste est proche de 3 m/s, soit 11 km/h. Le mode de fonctionnement du pendule est en contrainte normale nominale constante, grâce à un système de ressorts situé dans le sabot porte éprouvette (Fig. 1.21). L'effort normal exercé sur le patin vaut 23 N, ce qui correspond à une contrainte normale nominale d'environ 3 bar, équivalente à celle d'un pneu tourisme.

Kawakami *et al.* (1990) ont mesuré la surface de contact gomme-verre par réflexion totale à travers un prisme en verre placé sous un pendule SRT. Ils ont montré que l'aire de contact nominale A_n exprimée en m^2 vaut

$$A_n \approx \frac{0,1}{\sqrt{G'}}, \quad (1.18)$$

où le module de cisaillement G' mesuré à la fréquence 10 Hz est exprimé en Pa. Dans le cas de notre pendule, pour une formulation de $G'=1,5$ MPa à $-10^\circ C$, la longueur de la surface de contact est seulement 1 mm.

Ahagon *et al.* (1988) ont utilisé le pendule SRT pour comparer les frottements sur glace de différentes formulations. Afin d'examiner les corrélations entre ce test de laboratoire et des tests sur pneu, ils ont mesuré la distance de freinage sur patinoire de pneus ayant les mêmes formulations que les éprouvettes. Les performances du pneu réel se corrélaient raisonnablement avec les N_{SRT} obtenus en laboratoire (Fig. 1.23).

Horiuchi (1991) a effectué de nombreuses mesures avec le SRT. Un dépôt de bleu d'aniline en couche fine sur la surface de glace devenait violet après le passage de l'éprouvette, entre -5 et $0^\circ C$, alors qu'il n'y avait aucun changement de couleur à $-15^\circ C$. La surface de la glace fond donc un peu au dessus de $-5^\circ C$, mais pas en dessous. L'éprouvette ayant montré les meilleures performances à toutes températures est celle dont la souplesse est la plus élevée. De -5 à $0^\circ C$, des éprouvettes dont l'arête est coupée en biseau de 1,5 ou 2,5 mm de longueur ont un frottement environ 20 % plus élevé que celles à bord non modifié. Ceci montre l'influence de l'aire de contact sur la valeur du frottement.

1.4.5 Mesures de laboratoire avec un patin ou un pneu

Mitsuhashi *et al.* (1997) ont comparé des tests de frottement obtenus sur deux cylindres de glace internes, avec un simple patin d'élastomère et des pneus réels. μ augmente toujours quand la souplesse de l'élastomère augmente. Les pneus sculptés donnent un meilleur μ que les pneus lisses. Les auteurs ont obtenu un bon accord entre les valeurs expérimentales et la théorie de l'adhésion. Dans ce cas, la force de frottement est calculée comme le produit de la quantité de chaînes moléculaires d'élastomère adhérant à la surface et de la force d'adhésion entre une molécule d'élastomère et une molécule du sol. Des équations empiriques exprimant μ en fonction de puissances de l'effort normal donnent une décroissance de μ avec une augmentation de l'effort normal. Les résultats du test effectué avec des patins d'élastomère se corrélaient avec ceux obtenus avec des pneus réels sans lamelles (i.e. uniquement avec des ribs). L'utilisation de patins permet ainsi d'analyser l'effet de la souplesse du matériau comme une propriété de frottement adhésif, où seules les propriétés de frottement de l'élastomère interviennent, sans effet d'hystérèse.

Chapitre 2

Etude bibliographique du frottement sur la glace

2.1 Introduction ¹

Donnons les principales notations utilisées pour décrire le frottement d'un patin ou d'un pneu sur la glace (cf. annexe A).

- μ désigne le coefficient de frottement dynamique, μ_s le coefficient de frottement pour une zone sèche.
- F_n et F_t sont les efforts normal et tangentiel.
- A_n et A_r sont les aires de contact nominale et réelle.
- σ_n et σ_t sont les contraintes normale et tangentielle nominales.
- a et b désignent la longueur et la largeur du patin ou du pneu.
- V est la vitesse de glissement du patin ou du pneu sur la glace et V_0 la vitesse du véhicule.
- ϕ désigne une densité de flux de chaleur (i.e. une puissance dissipée par unité d'aire), donné par exemple par $\phi = F_t V / A_n$.
- T_0 est la température ambiante initiale et la température des deux solides initiale. T_f est la température de fusion de la glace. T est une température variable.
- h est l'épaisseur de la couche d'eau et η la viscosité dynamique de l'eau.
- C_{pi} , ρ_i , λ_i , α_i et e_i désignent respectivement la capacité thermique massique de la glace, sa masse volumique, sa conductivité, sa diffusivité et son effusivité thermiques. L est l'enthalpie massique de fusion de la glace.

Les conditions de frottement pour les calculs ou les mesures de μ sont définies au moins par la gamme de température ambiante initiale, vitesse de glissement et contrainte normale nominale, notée $T_0 V \sigma_n$.

Outre le frottement pneu-glace, un nombre important de publications traite du frottement sur glace dans différents domaines et à différentes échelles : écoulement des glaciers (e.g. Schweizer et Iken, 1992; Truffer et Iken, 1998), adhérence des semelles de chaussures (e.g. Gronqvist et Hirvonen, 1995; Kobayashi *et al.*, 1997), conception des brise-glace (e.g. Liukkonen, 1989), frottement de la glace de mer sur les structures offshore (e.g. Sacki *et al.*, 1986; Nakazawa *et al.*, 1993), frottement glace-glace à faible vitesse (e.g. Jones *et al.*, 1991; Kennedy *et al.*, 2000). La recherche pour l'amélioration des performances pour les sports d'hiver s'intéresse aux patins à glace (e.g. Koning *et al.*, 1992; Colbeck, 1995), au bobsleigh (e.g. Huber *et al.*, 1985),

1. Notre bibliographie interne est plus complète (Déloye, 2000a). Pour l'ensemble des articles traitant du frottement sur glace, nous avons repris les hypothèses utilisées pour chacun des modèles, la description des dispositifs expérimentaux, les résultats expérimentaux et les comparaisons entre les mesures et la théorie.

à la mécanique générale d'un ski (e.g. Aho, 1989; Glenne *et al.*, 1997), au mouvement d'une pierre de curling (e.g. Shegelski *et al.*, 1996). L'étude du frottement sur glace fait aussi appel à des compétences dans des domaines connexes: adhésion de la glace (e.g. Jellinek, 1959, 1962), modélisation du troisième corps (e.g. Godet, 1984, 1990; Berthier, 1990), frottement sec (e.g. Ashby *et al.*, 1991), échauffement transitoire par des micro-irrégularités (température flash) (e.g. Galazyuk *et al.*, 1996), transferts de chaleur dus au frottement (e.g. Levystskyi et Onyshkevych, 1996; Pashechko *et al.*, 1997).

Il reste encore une incertitude considérable sur les mécanismes du frottement sur neige et glace (voir par exemple les revues de Kuroiwa (1977), Forland et Tatinclaux (1985), Bourret (1990) ou les références bibliographiques regroupées par Colbeck (1993)). Il est cependant généralement admis que le mécanisme dominant est la fonte de l'interface générée par l'échauffement dû au frottement (d'après (D.8), la densité de flux de chaleur est $\phi = \mu\sigma_n V$). Cette idée, originellement suggérée par Bowden et Hugues (1939), a été corroborée par différentes mises en évidence directes d'eau de fonte formée à l'interface. Il faudrait pouvoir évaluer la rugosité de la glace pour la comparer aux valeurs obtenues pour l'épaisseur de la couche d'eau h (70 μm d'après Bowden et Hugues (1939) ou seulement quelques nanomètres selon Evans *et al.* (1976) et Akkok *et al.* (1987)). Quand F_t est due au cisaillement visqueux d'un fluide en écoulement laminaire (cf. annexe C), $F_t = \eta V A_n / h$ et l'épaisseur du film est auto-régulée: d'une part, si h diminue, F_t augmente, une quantité d'eau plus importante fond et h augmente; d'autre part, si h augmente, F_t diminue, une quantité moins importante d'eau fond et h diminue.

2.2 Fonte de la glace générée par le frottement

2.2.1 Mécanisme général selon Bowden et Hugues (1939)

Bowden et Hugues (1939), puis Bowden (1953) ont développé les premiers l'idée de fonte générée par la chaleur dissipée par le frottement pour expliquer les faibles valeurs de μ sur la glace. Même si une grande part de la chaleur produite par le frottement s'évacue par conduction dans les deux solides par les zones de contact, la densité de flux de chaleur, $\phi = \mu\sigma_n V$, peut être suffisante pour générer une fonte locale aux points de contact.

Un dispositif expérimental avec un patin de glace et une piste de glace en rotation a permis de mesurer μ à 4 m/s (Fig. 2.1). A -3°C , l'augmentation de F_t avec F_n est linéaire pour de faibles valeurs de F_n , puis se ralentit pour F_n élevé. Au contraire, à 0°C , F_t augmente plus rapidement et l'observation des surfaces montre alors la formation d'une couche d'eau. A -12°C , le coefficient de frottement statique μ_{statique} vaut 0,3 alors que μ est égal à 0,03.

La conductivité thermique du matériau du patin influence le frottement.

- Si le lubrifiant est formé par abaissement de T_f sous l'effet de σ_n , quand la température de l'air est supérieure à celle de la glace, l'apport de chaleur est fourni surtout par conduction dans le matériau frottant sur la glace (car la glace est un très mauvais conducteur thermique). Le frottement d'un bon conducteur thermique devrait alors être inférieur à celui d'un mauvais conducteur thermique.
- Au contraire, si le film lubrifiant est formé par échauffement de l'interface et si la chaleur s'évacue rapidement de l'interface, seule une faible quantité de glace peut fondre. Un bon conducteur thermique devrait alors avoir un frottement plus important.

Pour des températures proches de 0°C , les valeurs de μ pour le cuivre et l'ébonite sont les mêmes (Fig. 2.2). Mais pour des températures plus basses, un bon conducteur thermique frotte plus qu'un isolant thermique, l'écart entre les deux augmentant quand la température diminue. Ceci montre l'importance du réchauffement par frottement dans la formation du film lubrifiant.

Des mesures de μ avec des skis creux ont permis de faire varier la conductivité thermique effective sans changement de la surface qui frotte et ont montré que μ est beaucoup plus élevé avec des matériaux de forte conductivité thermique effective.

Bowden (1953) a effectué des mesures de conductivité électrique pour mettre en évidence la formation d'un film d'eau. Deux électrodes sont insérées dans la semelle d'un ski en ébonite frottant sur de la glace formée à partir d'eau contenant du chlorure de potassium. Au début, la conductivité électrique varie peu, car la fonte est localisée aux points de contact isolés. Un saut brutal à une conductivité plus élevée indique le moment où le film d'eau devient continu.

2.2.2 Approfondissement du modèle par Evans *et al.* (1976)

2.2.2.1 Résultats expérimentaux de Evans *et al.* (1976)

Evans *et al.* (1976) ont développé la théorie de Bowden et Hugues (1939) afin d'expliquer les effets de V , de F_n , de T_0 et du matériau du patin sur le frottement. Leur dispositif expérimental comprenait un cylindre de glace horizontal tournant sur lequel frottaient deux patins à glace. Ils ont montré une variation presque linéaire de μ avec $V^{-1/2}$ pour trois matériaux différents (Fig. 2.3), une diminution linéaire de μ avec T_0 (Fig. 2.4) et une variation de μ en $F_n^{-1/3}$. D'après les températures indiquées par deux thermocouples fixés dans les patins en cuivre, 40 à 60 % de la chaleur produite à l'interface était évacuée par conduction dans le cuivre.

Les auteurs ont observé une usure de la piste continue à -2°C , mais aux températures plus basses, l'usure se ralentissait fortement après quelques centaines de rotations. Un changement de couleur d'une couche de suie déposée sur le patin a mis en évidence l'apparition d'eau au contact. La trace d'usure résulte de l'indentation du matériau le plus mou. La dureté estimée par le rapport de F_n (10 N) à l'aire de la trace d'indentation ($\approx 0,7\text{ mm}^2$) est environ 15 MN/m^2 et est compatible avec les ordres de grandeur donnés par Barnes *et al.* (1971) (Fig. 1.3).

Si le frottement était simplement généré par un cisaillement visqueux du film d'eau, l'épaisseur du film d'eau calculée par (C.5) serait égale à 5 nm (avec $V = 1\text{ m/s}$, $\mu = 0,025$, $F_n = 11\text{ N}$ et $A_n = 0,7\text{ mm}^2$). Le film est donc bien plus mince que la rugosité de surface. Il y a lubrification mixte: le lubrifiant supporte une partie de la charge mais aux points élevés des rugosités, les surfaces entrent en contact (ou sont simplement séparées par un film d'une épaisseur de quelques molécules). La valeur de μ dépend alors des proportions relatives d'aire de contact sèche et d'aire de contact lubrifiée. Les forces de frottement s'ajustent pour apporter l'énergie nécessaire pour maintenir l'aire de contact au point de fusion.

2.2.2.2 Description du modèle de Evans *et al.* (1976)

Evans *et al.* (1976) ont écrit F_t comme la somme de trois composantes: $F_t = F_r + F_i + F_m$. F_t est calculé par $F_t = \phi A_n / V$. F_r est calculé d'après la densité de flux de chaleur ϕ_r évacué par conduction à travers le patin, F_i d'après la chaleur ϕ_i qui diffuse dans la glace et F_m d'après la chaleur ϕ_m utilisée pour faire fondre la surface de la glace.

ϕ_r est proportionnel à la conductivité thermique du patin λ et à la différence entre la température de fusion de la glace T_f et la température ambiante négative T_0 : $\phi_r = F_r V / A_n = C_1^* \lambda (T_f - T_0)$, donc

$$F_r = \frac{C_1 \lambda (T_f - T_0)}{V}, \quad (2.1)$$

avec C_1 une constante dépendant des dimensions et de la nature de la surface du patin.

D'après Evans *et al.* (1976), les effets de bords sont négligeables pour le calcul de F_t car

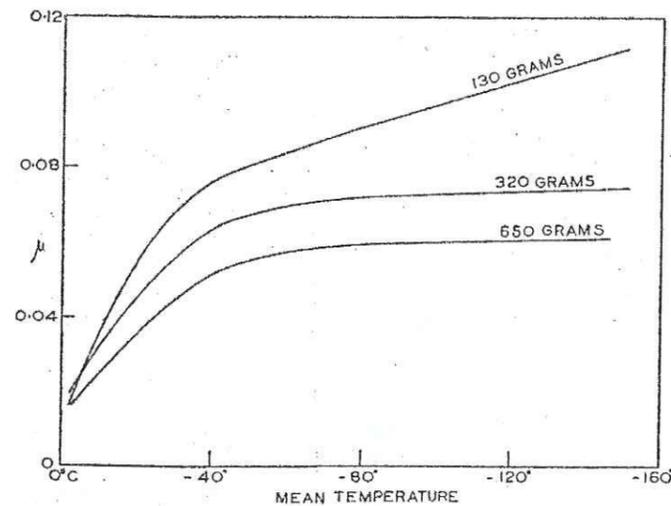


Fig. 2.1 - Influence de la température et de l'effort normal sur μ entre deux surfaces de glace (Bowden et Hugues, 1939).

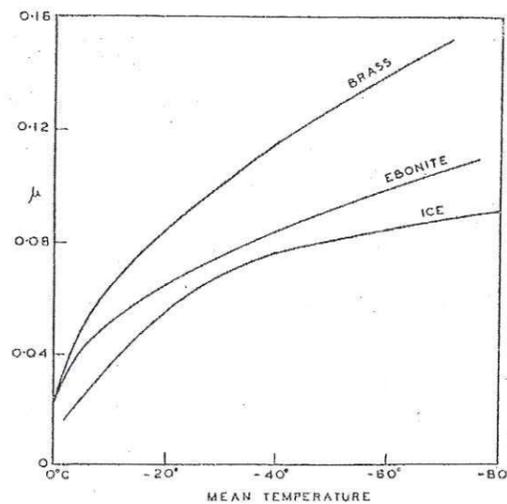


Fig. 2.2 - μ entre différents matériaux et la glace à 4 m/s sous 0,17 bar (Bowden et Hugues, 1939).

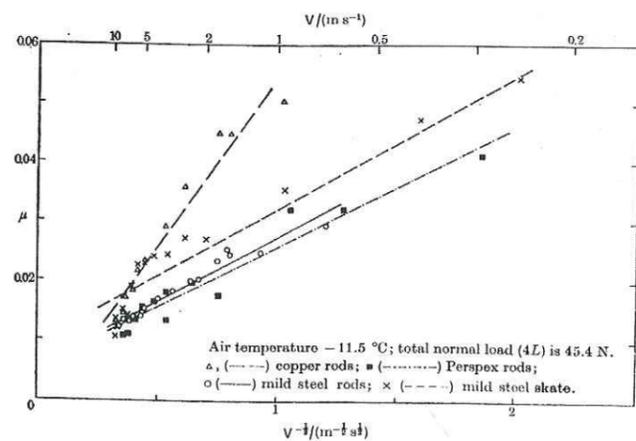


Fig. 2.3 - Variations de μ avec $V^{-1/2}$ pour différents patins en cuivre, Plexiglas et acier (Evans et al., 1976).

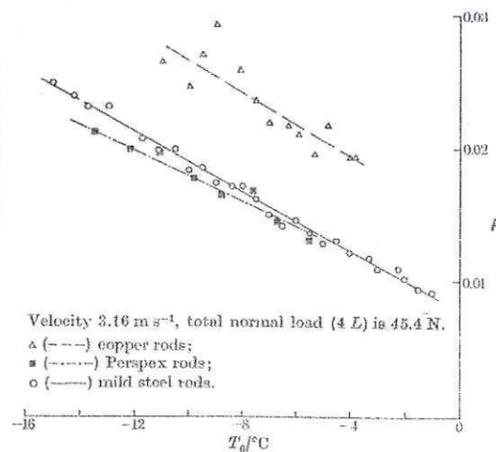


Fig. 2.4 - Variations de μ avec la température pour différents patins en cuivre, Plexiglas et acier (Evans et al., 1976).

la profondeur de pénétration de la perturbation de température dans la glace z_0 pendant la durée de passage du patin a/V est inférieure aux dimensions de l'aire de contact (voir §D.2.1). Avec les conditions expérimentales utilisées, $\alpha_i = 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $a = 1,5 \text{ mm}$ et $V = 3 \text{ m/s}$, $z_0 = 4 \sqrt{\alpha_i a/V}$ vaut 0,1 mm. En un point de la glace à la profondeur z supérieure à z_0 , on a $\Delta T(z,t)/\Delta T(0,t) < 2 \cdot 10^{-3}$ (cf. §D.2.1).

Les effets de bords étant négligeables, le problème se résume au cas d'un solide semi-infini initialement à T_0 dont la température de surface ($z = 0$) passe à T_f entre les instants $t = 0$ et $t = a/V$. D'après Carslaw et Jaeger (1958), la température T au temps t et à la distance z de la surface est donnée par

$$T_f - T = (T_f - T_0) \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha_i t}} \right). \quad (2.2)$$

Le flux de chaleur entrant dans la glace est :

$$\phi_i = -\lambda_i \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = \frac{\lambda_i (T_f - T_0)}{\sqrt{\pi \alpha_i t}}. \quad (2.3)$$

Pendant le passage du patin de longueur a et largeur b , F_i est calculé par

$$F_i = b \int_0^{a/V} \phi_i dt = 2b\lambda_i (T_f - T_0) \sqrt{\frac{a}{\pi \alpha_i V}}. \quad (2.4)$$

L'expression du flux dû à la conduction (2.3) diffère de celle que nous obtenons (D.5) car Evans et al. (1976) ont considéré une condition à la limite de type Dirichlet ($T(0,t) = T_f = 0^\circ \text{C}$) donnant la distribution de température (2.2), alors que nous considérons une condition à la limite de type Neumann ($-\lambda(\partial T/\partial z)_{z=0} = \phi$) donnant la distribution de température (D.4).

La conduction conduit à une décroissance du frottement en $V^{-1/2}$ qui s'explique qualitativement. Quand V augmente, la quantité de chaleur dissipable par conduction diminue, donc en régime stationnaire la chaleur dissipée par frottement décroît aussi, d'où une diminution de μ .

Par hypothèse, la température du film d'eau est proche de T_f , le terme supplémentaire tenant compte de la capacité thermique massique de l'eau est faible et les auteurs l'ont considéré comme faisant partie de F_m .

D'après (2.1) et (2.4), Evans et al. (1976) ont finalement évalué μ par

$$\mu = \mu_r + \mu_i + \mu_m = \frac{C_1 \lambda (T_f - T_0)}{F_n V} + \frac{C_2 (T_f - T_0)}{F_n \sqrt{V}} + \mu_m, \quad (2.5)$$

avec C_2 un facteur qui dépend des propriétés thermiques de la glace et de la géométrie de l'aire de contact.

D'après (2.5), la contribution relative maximale de μ_m correspond à la valeur de μ obtenue à la limite T_f ou lorsque V tend vers l'infini. Supposons en effet qu'il existe une lubrification mixte et que le frottement local est plus faible dans les zones où l'eau est présente que dans les zones où le contact est sec. Quand T_0 tend vers T_f ou V tend vers l'infini, les quantités de chaleur ϕ_r et ϕ_i évacuées par conduction dans le patin et la glace sont faibles et beaucoup d'eau est produite sous le patin : le film d'eau occupe une grande part de l'aire de contact, μ_m est prépondérant et μ est faible. La figure 2.5 représente les variations de μ et de ses trois contributions avec T_0 , V et λ . Par extrapolation des résultats expérimentaux à V infini, μ_m est inférieur à 0,005 et représente donc toujours une contribution très faible au frottement global.

2.2.2.3 Exploitation des résultats de Evans *et al.* (1976)

La figure 2.4 confirme expérimentalement la variation linéaire de μ avec T_0 indiquée par (2.5) puisque μ_m est négligeable. Les figures 2.3 et 2.4 montrent la dépendance de μ par rapport à la conductivité thermique du patin λ . L'importance relative de μ_r et μ_i dans (2.5) dépend de λ et V . Pour le cuivre, la moitié de la chaleur produite est évacuée par le patin et les contributions de μ_r et μ_i sont du même ordre de grandeur. μ_r est proportionnel à λ et λ est environ 2000 fois plus élevé pour le cuivre que pour le Plexiglas. Puisque μ_i est indépendant du matériau, Evans *et al.* (1976) ont conclu que $\mu_{\text{Plexiglas}}$ est égal à la valeur de μ_i de tous les matériaux. La différence $\mu_{\text{cuivre}} - \mu_{\text{Plexiglas}}$ (égal à $\mu_{r,\text{cuivre}}$) est environ 10 fois plus élevée que $\mu_{\text{acier}} - \mu_{\text{Plexiglas}}$ (égal à $\mu_{r,\text{acier}}$), en accord avec (2.5) compte tenu du rapport des conductivités thermiques du cuivre et de l'acier égal à 9.

Evans *et al.* (1976) ont remarqué qu'il était prévisible que μ_r soit négligeable devant μ_i pour les matériaux de faible λ . En effet, la température loin du contact est à T_0 pour les deux matériaux, mais alors que de la glace continuellement fraîche arrive au contact, la même surface du patin frotte très longtemps. Le gradient de température transitoire dans la glace en dessous du contact est donc supérieur au gradient de température stationnaire dans le patin au dessus du contact. Même si les matériaux du patin sont de meilleurs conducteurs thermiques que la glace, la majorité de la chaleur perdue par conduction passe dans la glace avec ce système pion - disque.

La dépendance expérimentale de μ avec $V^{-1/2}$ (Fig. 2.3) est en accord avec (2.5) quand μ_r est négligeable devant μ_i (cas de l'acier et du Plexiglas). Dans le cas du cuivre, μ est proportionnel à V^{-1} à faible vitesse et proportionnel à $V^{-1/2}$ à vitesse élevée.

La dépendance de μ avec F_n n'est pas complètement explicitée par (2.5) car l'aire réelle A_r varie avec F_n (donc C_1 et C_2 augmentent avec F_n) et F_n affecte aussi μ_m et T_f . D'après les auteurs, en supposant que a et b augmentent proportionnellement avec $F_n^{1/2}$ (A_r augmente linéairement avec F_n si la déformation de la glace est plastique, cf. § 1.1.3), μ_i devient proportionnel à $F_n^{-1/4}$ et la variation expérimentale en $F_n^{-1/3}$ s'explique par les incertitudes de mesures.

2.2.2.4 Film d'eau sous le patin selon Evans *et al.* (1976)

La quantité de chaleur utilisée pour faire fondre la glace pendant le passage du patin de longueur a est égale d'une part à $\mu_m F_n a$ et d'autre part à $L \rho_i a b h$, ce qui conduit à l'expression (D.15) pour h : $h = (\mu_m F_n) / (\rho_i L b)$. Dans les conditions d'essai de Evans *et al.* (1976) ($\mu_m = 0,005$, $F_n = 11$ N, $a = 1,5$ mm et $b = 0,5$ mm), h est de l'ordre de $0,3 \mu\text{m}$ et ne représente que 10 % de la profondeur indentée (estimée d'après les observations de l'aire de contact). L'usure de la piste est donc causée plutôt par une déformation plastique que par la fonte.

La densité de flux de chaleur diffusant à travers la surface de contact vers la glace est $(\mu_m + \mu_i) F_n V / A_n$. Elle passe par conduction à travers le film d'eau, donc le gradient de température dans le film est $-(\mu_m + \mu_i) F_n V / (A_n \lambda_e)$, avec λ_e la conductivité thermique de l'eau. Ce gradient est de l'ordre de $1^\circ \text{C} / \mu\text{m}$ et l'épaisseur du film d'eau étant inférieure au micron, sa température moyenne est légèrement supérieure au point de fusion.

D'après (2.3), la densité de flux de chaleur fournie à la glace varie en $t^{-1/2}$. La contribution locale du frottement est $\phi = \mu_i \sigma_n V$. μ_i est proportionnel à $t^{-1/2}$ donc à $x^{-1/2}$, avec x la distance par rapport à l'arête d'attaque de l'aire de contact. Ceci n'est bien sûr pas vérifié au bord d'attaque, μ_i ne pouvant pas être infini. La situation réelle peut correspondre à une aire sèche à l'avant, où la température de la glace est progressivement élevée jusqu'à T_f .

La densité de flux de chaleur dans la zone sèche est $\phi = \mu_s \sigma_n V$. Le contact reste sec sur une

longueur x_s calculée par (D.18) :

$$x_s = \frac{\pi}{\alpha_i V} \left(\frac{(T_f - T_0) \lambda_i}{2 \mu_s \sigma_n} \right)^2 \quad (2.6)$$

Dans les conditions d'essai de Evans *et al.* (1976), en prenant $\mu_s = 0,2$, x_s est égale à $35 \mu\text{m}$ (soit 2 % de la longueur totale du contact) et la contribution de la zone sèche au frottement est de 8 %. D'après Evans *et al.* (1976), l'écart entre les μ mesurés et calculés s'explique principalement par la différence entre A_r et A_n et de manière secondaire par l'existence d'une région sèche à l'avant du patin.

2.3 Frottement contrôlé thermiquement

2.3.1 Modèle initial de Ettles (1985)

Dans les canons des armes à feu (Ettles, 1985) ou lors du frottement d'élastomères en conditions très sévères (Ettles, 1986b,a), la limitation de la température de surface à la température de fusion de l'un des matériaux permet de calculer μ . Quand deux matériaux glissent l'un contre l'autre, la température du contact augmente jusqu'à atteindre une température critique T_c , au dessus de laquelle l'un des deux matériaux en contact est détruit (soit il devient trop facilement abrasé et éliminé par cisaillement, soit il approche sa température de fusion). Un troisième corps constitué des débris du matériau altéré se forme alors à l'interface. Quand T_c est atteint, le flux thermique généré par le frottement s'ajuste pour maintenir l'interface à cette température.

Un patin de longueur a en mouvement à la vitesse V sous la contrainte normale nominale σ_n sur un demi-espace provoque un échauffement en surface du substrat. L'échauffement maximum en régime stationnaire, obtenu au bord arrière du contact en supposant que toute la chaleur part dans le demi-espace pendant le temps $t = a/V$, est donné par (D.9) :

$$\Delta T_{max} = 2 \mu \sigma_n \sqrt{\frac{aV}{\pi \lambda \rho C_p}} \quad (2.7)$$

avec λ , ρ et C_p respectivement la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité thermique massique du demi-espace.

D'après Archard (1959), la température moyenne ΔT_{moy} sur la longueur du patin est

$$\Delta T_{moy} = 1,22 \mu \sigma_n \sqrt{\frac{aV}{\pi \lambda \rho C_p}} \quad (2.8)$$

Le coefficient de frottement dû à la conduction dans le demi-espace est donc de la forme :

$$\mu = C \frac{T_c - T_0}{\sigma_n} \sqrt{\frac{\lambda \rho C_p}{aV}} \quad (2.9)$$

où C est une constante, T_c est la température critique dans le contact en dessous de laquelle le modèle n'est plus applicable et T_0 la température de la surface de la piste juste devant le patin.

D'après Ettles (1986b), il existe une enveloppe de $F_n V^{1/2}$ sous laquelle la température T_c n'est pas atteinte (Fig. 2.6). Quand les conditions de frottement atteignent les limites de l'enveloppe $F_n V^{1/2}$ et la température dans le contact atteint T_c , le contrôle thermique est initié et μ décroît avec une augmentation de V ou de T_0 selon (2.9).

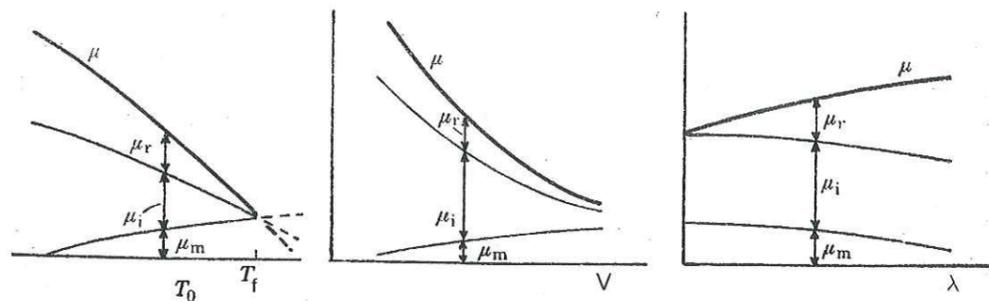


Fig. 2.5 - Variations schématiques de μ et des trois contributions (μ_r , μ_i et μ_m) en fonction de la température ambiante T_0 , de la vitesse de glissement V et de la conductivité thermique du matériau λ (Evans et al., 1976).

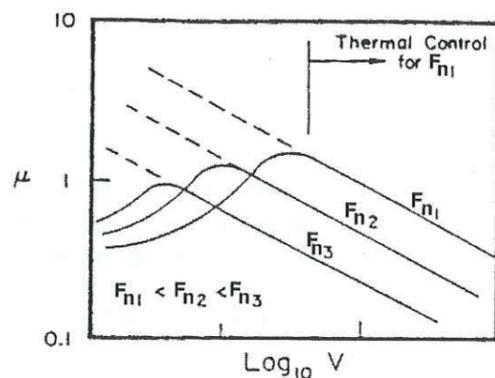


Fig. 2.6 - Variation de μ avec la vitesse V , en échelles logarithmiques, sous plusieurs efforts normaux F_n (Ettles, 1986b).

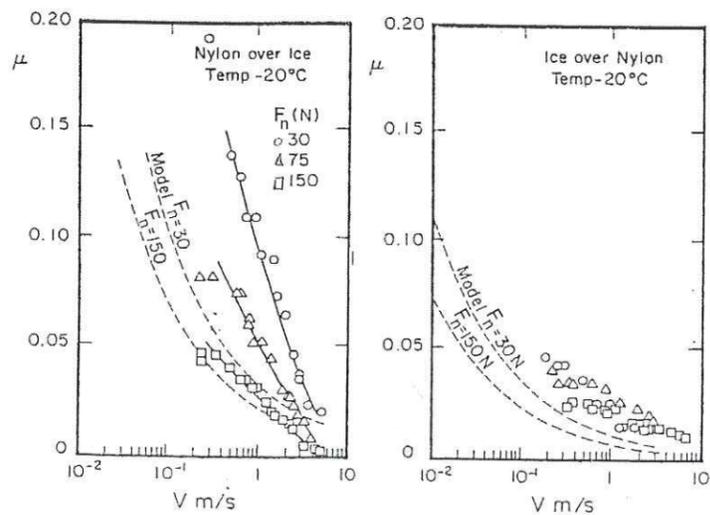


Fig. 2.7 - Comparaison entre le modèle et les valeurs expérimentales de Akkok et al. (1987) (trois patins en rotation frottent sur une piste circulaire).

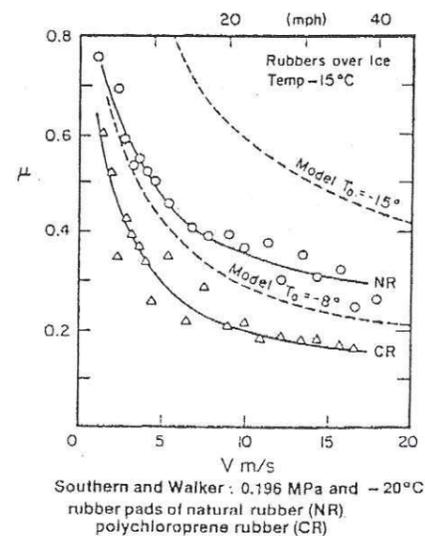


Fig. 2.8 - Comparaison entre le modèle de Akkok et al. (1987) et les valeurs expérimentales de Southern et Walker (1972, 1974).

2.3.2 Application à la glace par Ettles (1986b) et Akkok et al. (1987)

A partir de cette théorie, Ettles (1986b) et Akkok et al. (1987) ont construit un modèle de frottement d'un patin de glace sur un demi-espace et calculé μ par (2.9). Alors que les modèles de Bowden (1953) et de Evans et al. (1976) prévoient une augmentation de la température le long du contact, le contrôle thermique suppose que toute l'aire de contact est à la température T_c . La définition de T_c est donc importante. Elle représente soit la "température d'assouplissement mécanique" de la glace ($-1,2^\circ\text{C}$ d'après Barnes et Tabor (1966), cf. § 1.2.2.3), soit sa température de fusion. La différence numérique est faible, mais deux raisons rendent cette distinction nécessaire. Si T_c est la température de fusion, l'hypothèse que toute la chaleur générée par le frottement part par conduction n'est plus valable puisque la chaleur est aussi utilisée pour le changement de phase. En outre, de l'eau est générée et il y a lubrification par fonte.

Sous un patin de glace (de longueur a et de largeur b) glissant en régime stationnaire sur un demi-espace, l'épaisseur h du film d'eau est donnée par (C.5) :

$$h = \frac{\eta V}{\mu \sigma_n}, \quad (2.10)$$

avec μ le coefficient de frottement dû au cisaillement du film pour un écoulement laminaire.

Le débit volumique est d'après (C.6)

$$q = \frac{1}{2} b V h. \quad (2.11)$$

L'énergie fournie à l'eau par unité de temps est

$$Q = \mu V \sigma_n a b. \quad (2.12)$$

Elle sert en régime stationnaire à réchauffer et fondre une quantité de glace égale au débit q , donc

$$Q = q \rho_i [C_{pi}(T_c - T_0) + L], \quad (2.13)$$

avec T_0 la température initiale de la glace.

En tenant compte de (2.10), (2.11), (2.12) et (2.13), le coefficient de frottement dû au cisaillement du film d'eau est :

$$\mu = \frac{1}{\sigma_n} \sqrt{\frac{\eta V \rho_i [C_{pi}(T_c - T_0) + L]}{2a}}. \quad (2.14)$$

D'après (2.9) et (2.14), le rapport entre le coefficient de frottement dû au cisaillement du film d'eau et celui dû à la conduction dans le demi-espace est

$$r = \frac{V}{\sqrt{2C}(T_c - T_0)} \sqrt{\frac{\eta \rho_i [C_{pi}(T_c - T_0) + L]}{\lambda \rho C_p}}. \quad (2.15)$$

Ce rapport r est indépendant de σ_n et des dimensions du contact (a et b). Il varie avec les propriétés thermiques du matériau formant le demi-espace. En adoptant la valeur $C = 2$ (Ettles, 1985), pour le frottement glace/glace, r est inférieur à 0,07 pour V inférieur à 5 m/s et T_0 inférieur à -10°C . Pour le frottement glace/nylon, r vaut 0,2 à 5 m/s et -10°C .

Ettles (1986b) et Akkok et al. (1987) sont donc arrivés à la même conclusion que Evans et al. (1976) et Oksanen (1980) : le frottement est généré par la conduction dans le demi-espace à basse température et par le cisaillement du film d'eau à température proche du point de fusion.

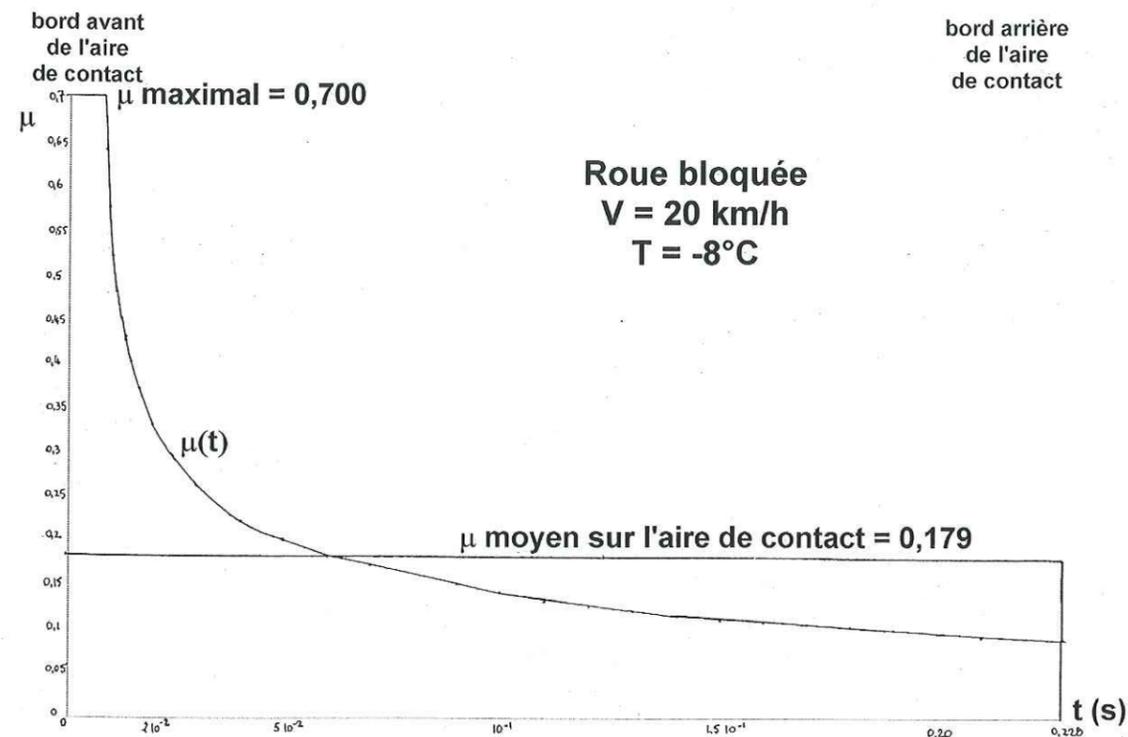


Fig. 2.9 – Evolution de μ avec le temps $t = x/V$ (x est la distance du point par rapport à l'arête d'attaque de l'aire de contact) pour un point de l'aire de contact (Dorémieux, 1990).

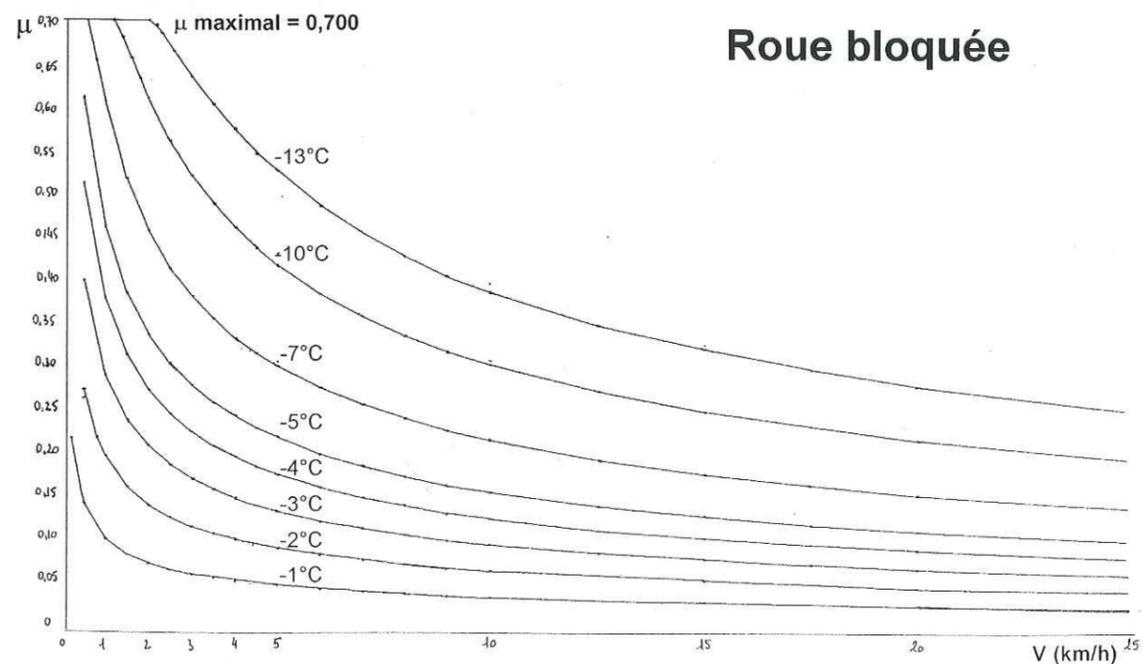


Fig. 2.10 – μ pour plusieurs vitesses de glissement V et températures ambiantes T_0 (Dorémieux, 1990).

La confrontation du modèle aux valeurs expérimentales montre que, sous certaines conditions, le frottement sur glace peut être modélisé par le mécanisme de contrôle thermique. Ettles (1986b) et Akkok *et al.* (1987) ont exprimé μ en fonction de puissances de chaque paramètre et calculé les exposants par régression linéaire. Ils ont souligné les difficultés d'accéder aux valeurs expérimentales de l'aire frottée et de la contrainte normale nominale à l'interface pour appliquer la théorie. Le modèle et les mesures s'accordent pour un exposant $-1/2$ de V (Fig. 2.7). L'idée de contact partiel est introduite par l'intermédiaire d'aspérités de dimensions fines. La théorie prévoit un exposant $-1/4$ de F_n pour un contact partiel et -1 pour un contact complet; les résultats expérimentaux présentent des cas intermédiaires. Les corrélations entre ce modèle et d'autres résultats expérimentaux sont assez bonnes (Fig. 2.8).

2.3.3 Extensions du modèle par Dorémieux (1990)

Dorémieux (1990) a gardé le même principe de base en utilisant les hypothèses suivantes : tout le transfert thermique s'effectue par conduction dans une direction perpendiculaire à la surface de contact ; la part d'énergie dépensée en fusion est négligeable devant la conduction. Ce modèle reste valable uniquement sous des conditions pour lesquelles il n'existe pas de film fluide continu, car le phénomène dominant devient alors le cisaillement du film visqueux.

Le flux thermique s'évacue dans les deux corps en fonction du rapport des effusivités thermiques des deux matériaux (cf. (D.10)). Le problème de partage de flux est réduit à l'étude d'une conduction unidirectionnelle dans un corps semi-infini. Le patin est considéré comme une source de chaleur produisant le flux $\phi = K\mu\sigma_n V$ qui dépend des propriétés thermiques des deux corps via le coefficient de partage K et passe entièrement dans le demi-espace.

Le calcul de μ s'effectue en considérant deux cas.

Avant initiation du contrôle thermique. Les conditions aux limites sont de type Neumann : le flux entrant est constant. L'expression du champ de température en fonction de la profondeur et du temps est donnée par (D.4).

Après initiation du contrôle thermique. Les conditions aux limites sont du type Dirichlet : la température est constante à l'interface. Les conditions initiales ne sont pas uniformes car elles résultent de la solution du cas précédent. La solution du problème est la somme d'une solution générale correspondant à des conditions initiales nulles et d'une solution particulière d'un problème aux conditions initiales non homogènes.

Dorémieux (1990) a appliqué son modèle au freinage d'un pneu sur la glace. Il a supposé que la surface de la glace est formée d'aspérités dont la surface totale est obtenue par le rapport de l'effort normal sur la dureté d'indentation de la glace (cf. § 1.2.2.3). Il s'est basé sur les résultats de Oksanen (1980) pour évaluer le nombre d'aspérités et le volume fondu.

Pour un état stationnaire en roue bloquée, les figures 2.9 et 2.10 présentent l'évolution de μ avec le temps $t = x/V$ pour un point de l'aire de contact et l'évolution de μ avec la vitesse et la température. D'après Dorémieux (1990), le contrôle thermique apparaît après 7 m de freinage et la proportion de l'aire de contact dominée par le contrôle thermique augmente très vite : 75 % après 14 m et 95 % après 28 m de freinage.

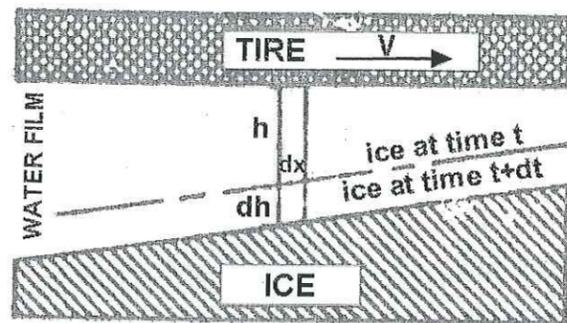


Fig. 2.11 - Profil du film d'eau en zone lubrifiée (Hayhoe et Shapley, 1989).

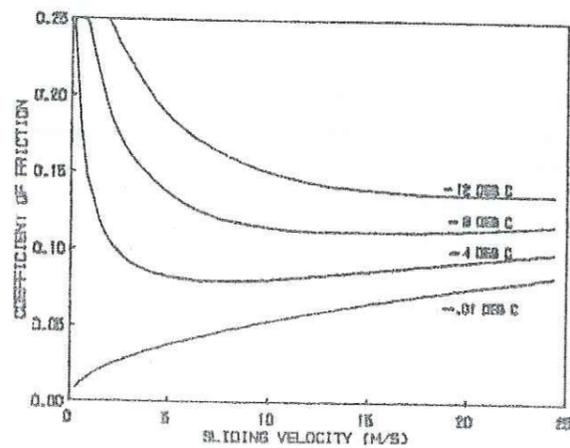


Fig. 2.13 - Evolution théorique de μ avec la vitesse en roue bloquée, pour différentes températures initiales de la glace T_0 (Hayhoe et Shapley, 1989).

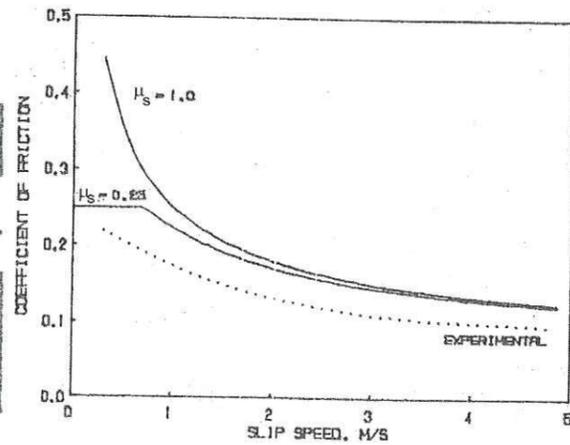


Fig. 2.12 - Evolution de μ avec la vitesse en roue bloquée selon le modèle numérique et des résultats expérimentaux, pour deux valeurs de μ_s (Hayhoe et Shapley, 1989).

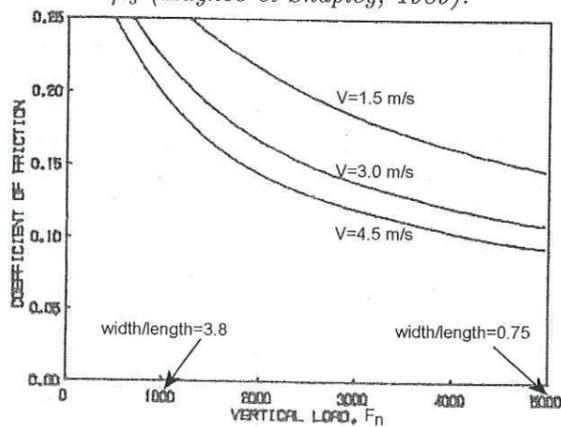


Fig. 2.14 - Evolution théorique de μ avec l'effort normal en roue bloquée pour différentes vitesses avec des longueurs variables (largeur de contact et contrainte normale nominale constantes) (Hayhoe et Shapley, 1989).

2.4 Zone sèche dans l'aire de contact

2.4.1 Zones sèche et humide dans l'aire de contact (Hayhoe et Shapley, 1989)

2.4.1.1 Description du modèle de Hayhoe et Shapley (1989)

Hayhoe et Shapley (1989) ont construit un modèle de calcul de μ d'un pneu sur la glace en utilisant les hypothèses suivantes. La vitesse du véhicule V_0 est constante et la vitesse de glissement V à l'interface pneu-glace dépend du taux de glissement (cf. § D.5.1 pour la distinction entre les deux vitesses). La surface de l'empreinte du pneu est lisse, de longueur a et de largeur b . La contrainte normale σ_n est uniforme. Sur une longueur x_s à l'avant de la surface de contact, le coefficient de frottement sec μ_s est constant jusqu'à ce que la température à l'interface atteigne T_f . A l'arrière, le pneu et la glace sont séparés par un film d'eau : une fois que la fusion a commencé, un film d'eau stable peut être maintenu par échauffement par cisaillement visqueux et son épaisseur h augmente le long de l'empreinte. Pour le calcul du frottement dans la zone lubrifiée, on suppose qu'il n'y a pas de glissement à l'interface solide/liquide, que l'écoulement est laminaire avec une vitesse dans le fluide fonction linéaire de l'altitude, et que la température est constante. Le flux de chaleur dans la glace est orthogonal à l'interface et celui dans le pneu est négligé. En réalité, des pertes par hystérèse provoquent un échauffement dans le pneu et celui-ci peut alors apporter de la chaleur à l'interface plutôt que d'en recevoir, mais les auteurs ont éludé ces conditions aux limites complexes en négligeant l'effet du coefficient de partage.

Distribution de température et longueur sèche

La densité de flux de chaleur généré dans l'aire de contact sèche dépend de V :

$$\phi_s = \mu_s \sigma_n V. \quad (2.16)$$

Selon (D.22), la glace initialement à T_0 atteint T_f après une distance x_s dépendant de V_0 :

$$x_s = \frac{\pi V_0}{\alpha_i} \left(\frac{(T_f - T_0) \lambda_i}{2 \phi_s} \right)^2. \quad (2.17)$$

Chaleur générée par le frottement visqueux du film d'eau

D'après (C.7), le flux de chaleur provenant du cisaillement du film dépend de V par

$$\phi_h = \frac{\eta V^2}{h}. \quad (2.18)$$

Flux de chaleur par conduction dans la glace

Pour un solide semi-infini avec une température initiale T_0 et une température de surface imposée nulle à $t=0$, le flux de chaleur évacué par conduction est, en remplaçant t par x/V_0 dans (D.5) :

$$\phi_c = \frac{\lambda_i (T_f - T_0)}{2} \sqrt{\frac{\pi V_0}{\alpha_i x}}. \quad (2.19)$$

Chaleur dépensée pour fondre la glace

L'épaisseur de l'eau varie longitudinalement sous le pneu (Fig. 2.11). Le flux de chaleur nécessaire à la fonte de la glace dépend de V_0 :

$$\phi_m = \rho_i L V_0 \frac{dh}{dx}. \quad (2.20)$$

Bilan d'énergie et épaisseur du film

En écrivant que la chaleur dissipée par frottement visqueux dans le film sert à réchauffer et

fondre la glace, i.e. $\phi_h = \phi_c + \phi_m$, Hayhoe et Shapley (1989) ont obtenu

$$\frac{dh}{dx} = \frac{C_1}{h} - \frac{C_2}{\sqrt{x}}, \quad (2.21)$$

en notant

$$C_1 = \frac{\eta V^2}{\rho_i L V_0} \text{ et } C_2 = \frac{\lambda_i (T_f - T_0)}{2 \rho_i L} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_i V_0}}. \quad (2.22)$$

Si $h = 0$ quand $x = 0$, la solution de (2.21) est

$$h = C_3 \sqrt{x}, \text{ avec } C_3 = C_2 \left(\sqrt{\frac{2C_1}{C_2^2} + 1} - 1 \right). \quad (2.23)$$

Calcul et cumul des forces de frottement dans les régions sèche et mouillée

Dans la zone sèche, la force de frottement est $F_s = \mu_s \sigma_n b x_s$, soit d'après (2.16) et (2.17) :

$$F_s = \frac{b \pi V_0}{\alpha_i \mu_s \sigma_n} \left(\frac{(T_f - T_0) \lambda_i}{2V} \right)^2. \quad (2.24)$$

La force sur l'aire de contact humide F_h est indépendante de σ_n et augmente avec le ratio largeur / longueur (b/a), car d'après (C.2) et avec l'expression de h donnée par (2.23),

$$F_h = \int_0^{a-x_s} \frac{\eta V}{h} b dx = \frac{2 \eta V b}{C_3} \sqrt{a - x_s}. \quad (2.25)$$

2.4.1.2 Résultats du modèle de Hayhoe et Shapley (1989)

L'équation différentielle pour l'épaisseur du film d'eau (2.21) n'est valable que pour des vitesses élevées car le modèle de conduction de chaleur dans la glace dans la zone lubrifiée suppose que la surface de la glace passe brusquement de T_0 à T_f . Un modèle plus précis pour la conduction, tenant compte des variations de la distribution de température dans la zone lubrifiée (voir Hayhoe, 1981), a montré que (2.21) devient

$$\frac{dh}{dx} = \frac{C_1}{h} - \frac{\phi_c(r)}{\rho_i L V_0} \text{ avec } r = \frac{x}{x_s} \geq 1. \quad (2.26)$$

Les deux modèles (2.21) et (2.26) convergent quand la vitesse V_0 est élevée ou que la température de la glace T_0 est proche de T_f . L'intégration numérique de (2.26) a montré qu'au début de la zone lubrifiée (r légèrement supérieur à 1), l'épaisseur du film est si petite que le coefficient de frottement local dû au cisaillement visqueux est plus élevé que le coefficient de frottement local dans la zone sèche.

Pour le glissement en roue bloquée, avec deux valeurs de μ_s (0,25 ou 1), la vitesse de glissement n'a une influence importante que pour les faibles vitesses (Fig. 2.12) (la tendance générale est la même pour les mesures sur pneu). La figure 2.13 rend bien compte de la décroissance typique de μ avec une augmentation de T_0 . La figure 2.14 montre l'effet d'une variation du rapport d'aspect (b/a , largeur / longueur de la surface de contact) : b et σ_n étant constantes, une évolution du rapport d'aspect se traduit par un changement de F_n . μ décroît quand la longueur de l'aire lubrifiée a augmente tout en conservant x_s constante.

2.4.2 Origine du frottement sec sur la glace selon Makkonen (1994)

Makkonen (1994) a proposé une théorie originale, en interprétant la force de frottement sur la glace comme le flux d'énergie nécessaire pour créer l'interface des aspérités en contact

(cf. § E.1). Le modèle considère un patin de glace rugueux mobile sur une surface plane rigide indéformable, en frottement sec. μ augmente alors avec une augmentation de la différence entre l'énergie de surface du substrat et l'énergie d'interface substrat-glace, une diminution de la dureté du matériau le plus mou ou une diminution de la longueur des aspérités de la glace.

2.4.3 Modélisation de la zone sèche par un flux rétroactif par Douce (1993)

Douce (1993) a séparé l'aire de contact en deux zones : une zone sèche (pour laquelle elle a proposé un modèle à flux rétroactif), suivie d'une zone lubrifiée (pour laquelle elle a appliqué le modèle de Oksanen et Keinonen (1982)). Par rapport à un modèle à flux constant (e.g. Hayhoe et Shapley, 1989) qui aboutit à une augmentation de μ le long de la zone sèche, le modèle à flux rétroactif améliore la description de la zone sèche : puisque l'épaisseur de la QLL dépend de la température (cf. § 1.2.2.6), une augmentation de la température locale T peut entraîner une diminution du μ local, donc du flux d'énergie correspondant $\phi(T)$.

Le frottement sur l'aire de contact sèche est obtenu par intégration spatiale. Le flux d'énergie local pour une température donnée est obtenu par itération temporelle : à l'instant t , en utilisant la valeur de la température T et du flux d'énergie local $\phi(T)$, la résolution du problème complet (conduction de la chaleur - condition à la limite - condition initiale) par transformation de Fourier fournit la température $T + dT$ et la valeur du flux d'énergie $\phi(T + dT)$ à $t + dt$. Une augmentation de T est supposée avoir le même effet sur μ , quelle que soit sa cause : augmentation de la température ambiante T_0 ou échauffement par frottement.

A partir d'essais effectués avec un volant intérieur (cf. § 1.4.3), Douce (1993) a établi une régression expérimentale (i.e. une relation statistique) entre l'effort tangentiel F_t et les trois paramètres : pression interne du pneu P , vitesse de glissement V et temps de transit d'un élément ponctuel de la piste de glace sous l'empreinte. D'après cette régression, F_t augmente quand P augmente, sans doute car l'aire de contact réelle augmente. Pour V et T_0 élevés, la diminution du rôle bénéfique de P est due à l'apparition du régime lubrifié.

Le mécanisme de frottement sur glace est principalement gouverné par la température de surface de la glace T et est indépendant de la température en masse du matériau T_0 : en effet, pour deux valeurs différentes de T_0 , le frottement mesuré est le même après une simple translation de V de façon à ce que T devienne égal à T_0 . Ainsi, V agit sur la valeur de μ uniquement à cause de son influence sur la température de surface.

Par rapport à un modèle à flux constant, le modèle à flux rétroactif est bien plus proche de la régression expérimentale dans le cas où la zone sèche représente une part non négligeable de l'aire de contact, i.e. pour des températures T_0 basses et un taux de glissement assez faible (Fig. 2.15 et 2.16). Pour des glissements intermédiaires ou des températures T_0 moyennes, les modèles à flux constant ou à flux rétroactif sont tous deux cohérents avec la régression expérimentale. Pour de forts taux de glissement, ces deux modèles prévoient la chute de μ pour V plus faible que celle donnée par la régression expérimentale.

2.5 Frottement dû uniquement au cisaillement visqueux (Oksanen, 1983)

2.5.1 Modèle de frottement de Oksanen (1983)

Oksanen (1980), Oksanen et Keinonen (1982), Oksanen (1983) ont posé les hypothèses suivantes pour établir un modèle de frottement pour un patin lisse (référéncé 2) glissant sur de la

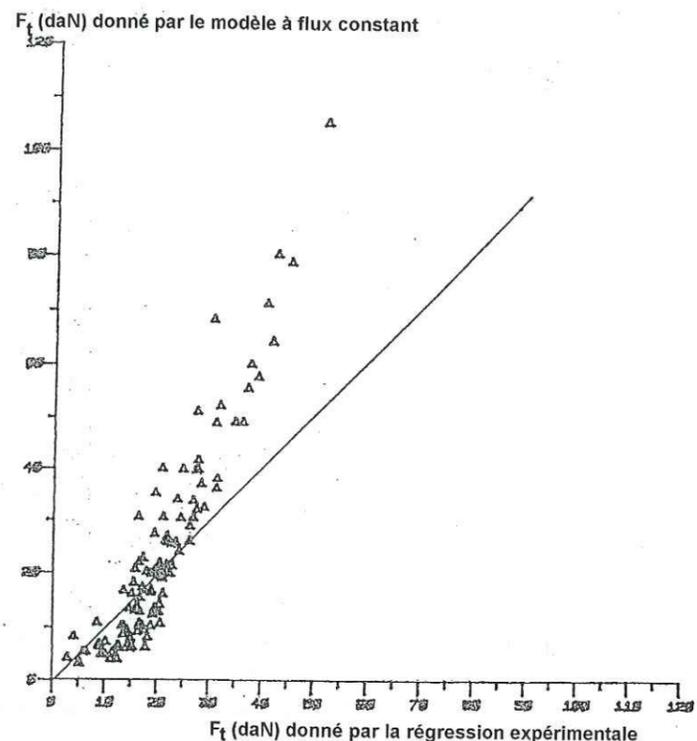


Fig. 2.15 – Comparaison des efforts tangentiels F_t donnés par le modèle à flux constant et par la régression expérimentale (Douce, 1993).

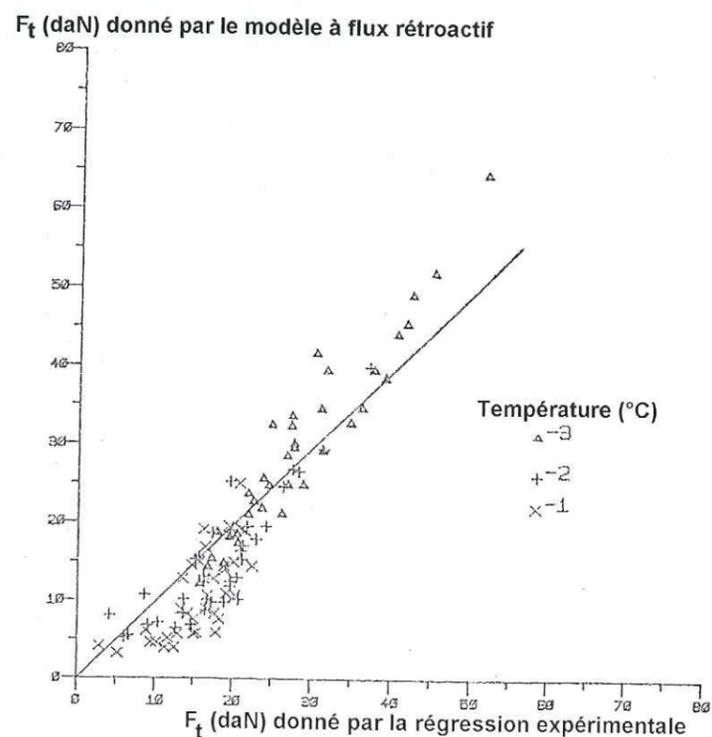


Fig. 2.16 – Comparaison des efforts tangentiels F_t donnés par le modèle à flux rétroactif et par la régression expérimentale (Douce, 1993).

glace lisse (référéncée 1) :

1. F_t est généré uniquement par le cisaillement visqueux du film d'eau de viscosité η .
2. La distribution de vitesse est linéaire en fonction de l'altitude dans la couche d'eau d'épaisseur h et est indépendante de la position longitudinale du point considéré.
3. L'énergie produite par le frottement est consommée pour fondre la glace et évacuée par conduction de chaleur dans le patin et la glace.
4. La température de l'interface est égale à celle du point de fusion de la glace.
5. Le transfert de chaleur de l'interface vers les deux milieux est transitoire, avec une distribution de température linéaire en fonction de l'altitude perpendiculairement au contact.
6. Le patin est rectangulaire de longueur a et de largeur b . L'aire de contact nominale est $A_n = ab$

Energie produite par le frottement Q_h

Par définition, $F_t = \mu F_n$. Durant le passage du patin, l'énergie produite est

$$Q_h = \mu F_n a. \quad (2.27)$$

Chaleur conduite dans la glace Q_c

Le caractère transitoire du transfert de chaleur dans les deux solides est évident pour le substrat, mais pas pour le patin qui semble recevoir un flux de chaleur stationnaire. Oksanen (1980) a justifié l'hypothèse 5 (Fig. 2.17) de deux façons. D'une part, le flux de chaleur est transitoire dans le patin si les dimensions du patin sont grandes et le temps de mesure très court comparé au temps nécessaire pour atteindre l'équilibre thermique. D'autre part, comme aucun des deux solides n'est parfaitement plat, quand un micro-contact se forme, le flux de chaleur dans le patin est transitoire.

Une partie de la chaleur due au frottement est stockée dans le patin. La différence de température entre la surface et le coeur du patin est inférieure à celle entre la surface et le coeur de la glace. La quantité de chaleur conduite dans le substrat durant le passage du patin Q_{c1} s'exprime de deux façons en fonction de l'épaisseur de la couche de glace dans laquelle la chaleur est conduite δ_1 . D'une part, $Q_{c1} = (\lambda_i ab \Delta T_1 a) / (\delta_1 V)$, avec ΔT_1 la différence de température entre la surface et le coeur de la glace. D'autre part, Q_{c1} est égale à la quantité d'énergie stockée dans la couche de glace réchauffée $Q_{c1} = \rho_i ab \delta_1 C_{pi} \Delta T_1 / 2$. L'élimination de δ_1 donne

$$Q_{c1} = ab \Delta T_1 \sqrt{\frac{a}{2V}} \sqrt{\lambda_i \rho_i C_{pi}}. \quad (2.28)$$

Cette équation est en accord avec (2.4) obtenue par Evans *et al.* (1976), au facteur multiplicatif près. Puisque la même équation peut être obtenue pour le patin, la chaleur totale évacuée par conduction est

$$Q_c = Q_{c1} + Q_{c2} = ab \sqrt{\frac{a}{2V}} \left(\Delta T_1 \sqrt{\lambda_i \rho_i C_{pi}} + \Delta T_2 \sqrt{\lambda_2 \rho_2 C_{p2}} \right). \quad (2.29)$$

Chaleur utilisée pour fondre la glace Q_m

En notant L l'enthalpie massique de fusion de la glace et ρ_e la masse volumique de l'eau, la chaleur nécessaire à la fonte de glace correspondant au film d'eau d'épaisseur h est

$$Q_m = ab h \rho_e L. \quad (2.30)$$

Epaisseur de la couche d'eau h

Puisque $Q_h = Q_c + Q_m$, h est calculée d'après (2.27), (2.29) et (2.30) par :

$$h = \frac{1}{L \rho_e} \left[\frac{\mu F_n}{b} - \sqrt{\frac{a}{2V}} \left(\Delta T_1 \sqrt{\lambda_i \rho_i C_{pi}} + \Delta T_2 \sqrt{\lambda_2 \rho_2 C_{p2}} \right) \right]. \quad (2.31)$$

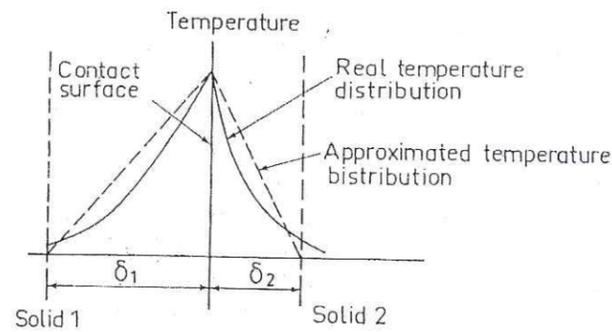


Fig. 2.17 - Distributions de température dans les solides en contact (Oksanen, 1980).

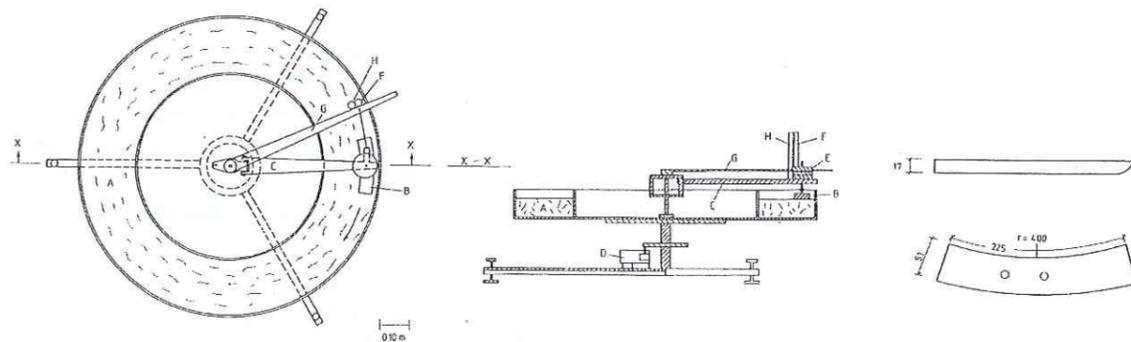


Fig. 2.18 - Dispositif expérimental et forme des patins (Keinonen, 1978; Oksanen, 1980).

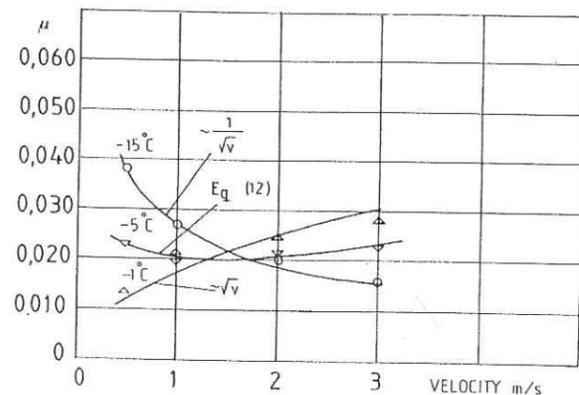


Fig. 2.19 - Variations expérimentales et théoriques de μ glace/glace avec la température T_0 et la vitesse V pour une contrainte normale nominale σ_n de 0,8 kPa (Oksanen, 1980).

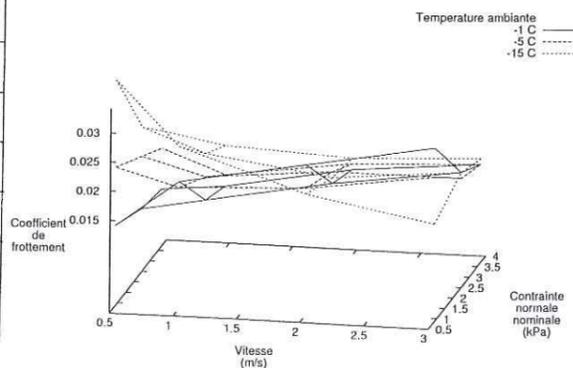


Fig. 2.20 - Variations expérimentales de μ glace/glace avec la vitesse V et la contrainte normale nominale σ_n pour trois températures T_0 (d'après Oksanen (1980)).

Coefficient de frottement μ

Selon les hypothèses 1 et 2, en écoulement laminaire, μ est calculé comme (C.4) :

$$\mu = \frac{\eta V A_n}{h F_n} \tag{2.32}$$

En remplaçant l'expression (2.31) de h dans (2.32), on montre que μ doit satisfaire une équation du second degré où le terme constant dépend du cisaillement visqueux et le coefficient du terme en μ dépend de la chaleur passant dans les deux milieux :

$$\mu^2 - \frac{b}{F_n} \sqrt{\frac{a}{2V}} (\Delta T_1 \sqrt{\lambda_1 \rho_1 C_{p1}} + \Delta T_2 \sqrt{\lambda_2 \rho_2 C_{p2}}) \mu - \frac{\eta V A_n L \rho_e b}{F_n^2} = 0 \tag{2.33}$$

2.5.2 Résultats du modèle de Oksanen (1983)

De même que le modèle de Ettles (1986b) et Akkok *et al.* (1987), cette théorie montre que la température ambiante T_0 modifie la compétition entre le cisaillement visqueux et la conduction (cf. § 2.3.2).

Glace froide, ΔT_1 supérieur à 10 °C

La conduction est prédominante par rapport au cisaillement visqueux dans (2.33) :

$$\mu = \frac{b}{F_n} \sqrt{\frac{a}{2V}} (\Delta T_1 \sqrt{\lambda_1 \rho_1 C_{p1}} + \Delta T_2 \sqrt{\lambda_2 \rho_2 C_{p2}}) \tag{2.34}$$

Un résultat similaire est obtenu en posant $h = 0$ dans (2.31).

Glace chaude, température ambiante T_0 proche du point de fusion

Le terme constant de (2.33) domine, μ dépend de la fonte de la glace et du cisaillement visqueux :

$$\mu = \frac{\sqrt{\eta V A_n L \rho_e b}}{F_n} \tag{2.35}$$

Température ambiante T_0 intermédiaire

μ dépend alors du bilan entre le transfert de chaleur dans les deux milieux et le cisaillement visqueux. Si V est faible, la conduction domine et μ décroît en $V^{-1/2}$. Si V est élevée, le cisaillement visqueux domine et μ augmente en $V^{1/2}$.

2.5.3 Résultats expérimentaux de Oksanen (1983)

Keinonen (1978), Oksanen (1980, 1983), Oksanen et Keinonen (1982) ont développé une machine tournante pour mesurer le frottement entre un patin porté par un bras articulé et une piste de glace tournante (Fig. 2.18). Un ressort intercalé entre le bras et le bâti de la machine permettait de mesurer la force de frottement. Les conditions expérimentales étaient : T_0 de -15 à +5 °C, V de 0,5 à 3 m/s, σ_n entre 0,82 et 3,69 kPa. La figure 2.19 présente l'évolution de μ glace/glace en fonction de V à différentes valeurs de T_0 sous σ_n faible. La figure 2.20 montre les résultats pour différentes valeurs de σ_n .

2.5.4 Comparaison entre des expériences et la théorie de Oksanen (1983)

Pour comparer le modèle à l'expérience, Oksanen (1983) a supposé que A_n est formée de N aspérités carrées de côté c (soit $a = Nc$ et $b = c$). La dimension des aspérités est éliminée de (2.33) en faisant intervenir la dureté d'indentation de la glace $H = F_n/A_n$, ce qui donne

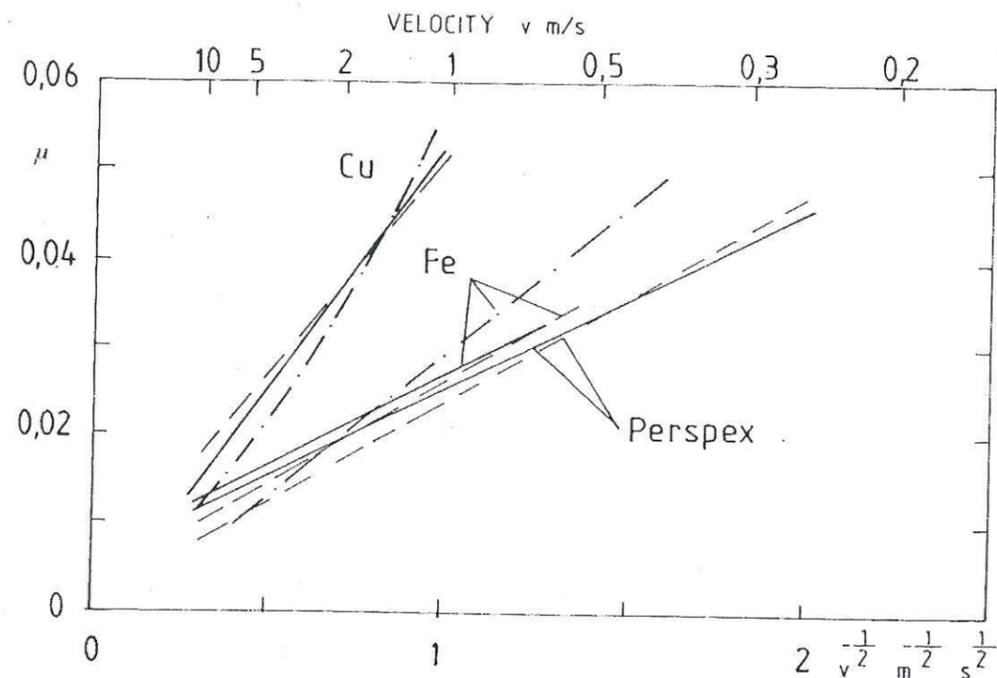


Fig. 2.21 - Variations expérimentales de μ avec la vitesse V obtenues à $-11,5^\circ\text{C}$ par Evans et al. (1976) (trait plein); comparaison avec la théorie de Oksanen (1980) (tirets) et le résultat en flux stationnaire (trait mixte).

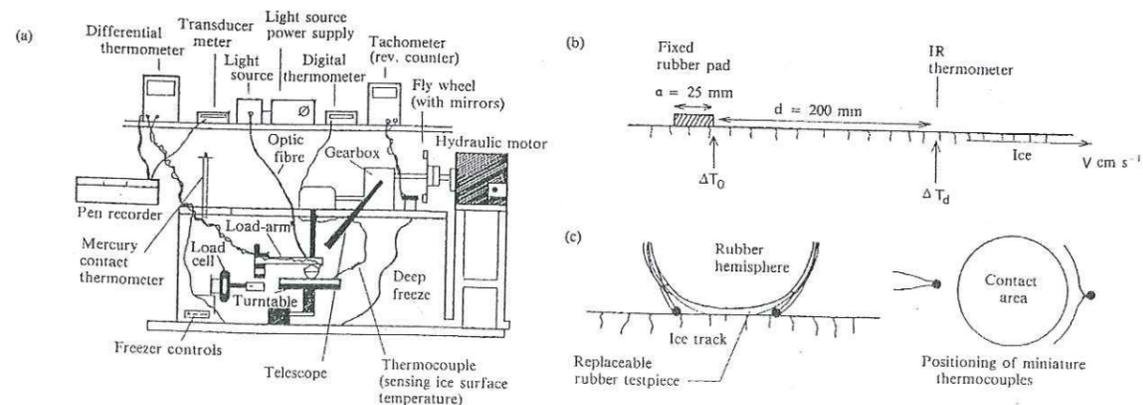


Fig. 2.22 - Dispositif expérimental placé dans un congélateur pour mesurer simultanément μ et la variation de température de la surface de la glace (Roberts, 1987).

$c = \sqrt{F_n/(NH)}$. Oksanen a utilisé les courbes de Barnes et Tabor (1966) (Fig. 1.3) pour obtenir H en fonction du temps de chargement de la glace lors de ses expériences.

Sous ces hypothèses, la solution de (2.33) devient :

$$\mu = N^{-1/4} H^{-3/4} F_n^{-1/4} \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2V}} \right] \left[(\Delta T_1 \sqrt{\lambda_i \rho_i C_{pi}} + \Delta T_2 \sqrt{\lambda_2 \rho_2 C_{p2}}) + \sqrt{(\Delta T_1 \sqrt{\lambda_i \rho_i C_{pi}} + \Delta T_2 \sqrt{\lambda_2 \rho_2 C_{p2}})^2 + 8\eta V^2 L \rho_0} \right] \quad (2.36)$$

Oksanen (1983) a comparé ses propres mesures avec μ calculé par (2.36) : μ décroît en $V^{-1/2}$ sur glace froide et μ augmente en $V^{1/2}$ sur glace chaude (Fig. 2.19). La bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et le modèle reflète sans doute le bon calage du nombre d'aspérités en contact N , des différences de température (ΔT_1 et ΔT_2) et de la dureté d'indentation H . N n'intervenant qu'à la puissance $-1/4$ dans le calcul de μ , sa valeur n'est pas critique et Oksanen l'a fixée arbitrairement à 20. En revanche, Oksanen a choisi arbitrairement ΔT_1 , qui vaut respectivement 10, 1 ou 0°C pour T_0 égal à -15 , -5 et -1°C , et ΔT_2 qui reste fixé à 0°C quel que soit T_0 .

Ce modèle basé simplement sur le cisaillement du film d'eau fournit le bon ordre de grandeur de μ pour un frottement glace / glace pour σ_n égal à $0,82\text{ kPa}$, sans intervention d'autres phénomènes comme le grattage ou la formation de débris. Il donne aussi la bonne évolution de μ avec V et F_n . Pour σ_n légèrement plus élevé, le modèle convient encore (Fig. 2.20), mais il n'y a pas de résultats expérimentaux pour σ_n de l'ordre du bar.

Oksanen (1983) a aussi appliqué sa théorie aux résultats de Evans et al. (1976) en calant les paramètres de (2.36). Alors que la température de test T_0 était $-11,5^\circ\text{C}$, Oksanen a choisi $\Delta T_1 = 8^\circ\text{C}$. Evans avait évalué le flux de chaleur dans les patins de cuivre entre 40 et 60 % de la chaleur totale produite : l'égalité de $\Delta T_1 \sqrt{\lambda_1 \rho_1 C_{p1}}$ et $\Delta T_2 \sqrt{\lambda_2 \rho_2 C_{p2}}$ impose donc $\Delta T_2 = 0,5^\circ\text{C}$ pour le cuivre (les différences de température des autres matériaux sont estimées en comparant les diffusivités avec celle du cuivre : ΔT_2 est égal à $0,06^\circ\text{C}$ pour l'acier et 0°C pour le Perspex). H est obtenu d'après la figure 1.3 en estimant le temps de chargement lors des expériences de Evans entre 10^{-3} et 10^{-4} s . Le nombre N de microcontacts est estimé à 20. La figure 2.21 compare les variations de μ avec la vitesse V obtenues par Evans et al. (1976) et Oksanen (1980). Quand la conductivité thermique du matériau λ_2 est très faible (e.g. Perspex), les résultats en flux transitoire ou stationnaire (cas représenté par des traits mixtes) dans le patin sont similaires.

2.6 Echauffement de la glace dû au frottement

2.6.1 Echauffement de la glace sous un patin sans partage du flux thermique

2.6.1.1 Modèle d'échauffement de Roberts (1987, 1993)

Roberts (1987; 1993) a développé un modèle thermique pour obtenir l'augmentation de température de la glace (considérée comme un solide semi-infini à surface lisse) frottée par un patin d'élastomère. La chaleur est générée par le frottement qui impose une condition à la limite à flux constant ϕ . Le flux de chaleur dans le patin d'élastomère est négligeable. Dans la glace, le flux de chaleur est orthogonal à l'interface et les surfaces isothermes sont des plans parallèles à l'interface. Les propriétés thermiques de la surface de glace sont indépendantes de la position et de la température.

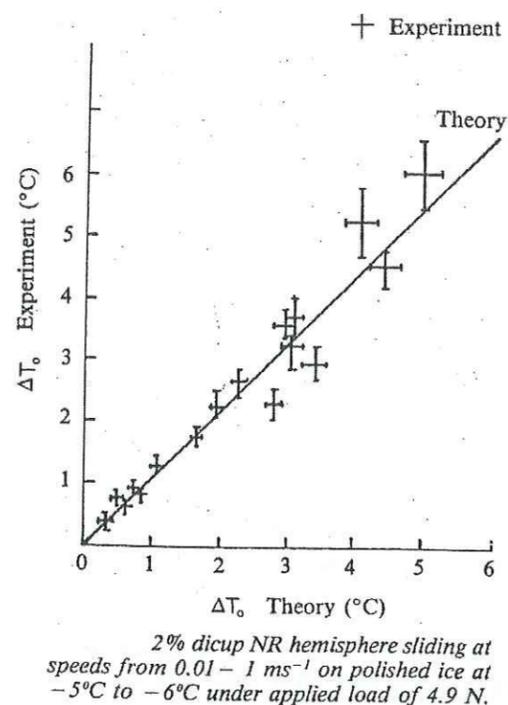


Fig. 2.23 – *Echauffement théorique de la piste de glace et valeurs expérimentales à -5 °C sous 1,96 bar (Roberts, 1987).*

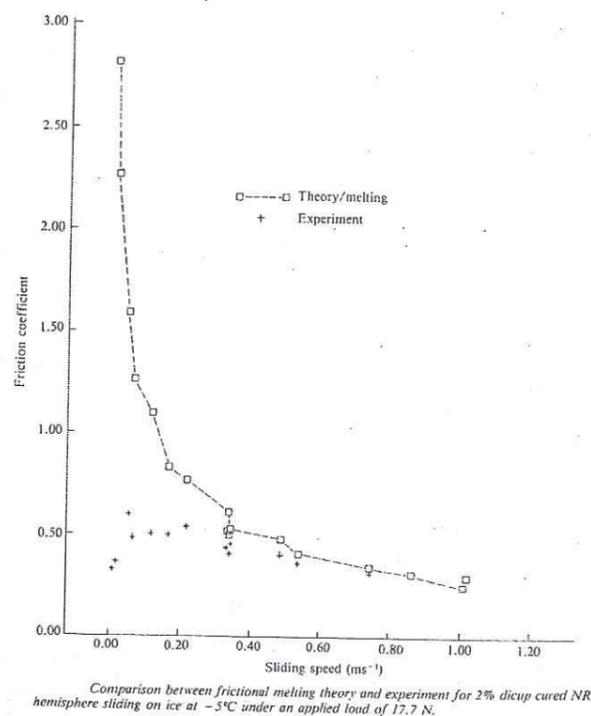


Fig. 2.24 – *μ théorique et valeurs expérimentales à -5 °C sous 7 bar (Roberts, 1987).*

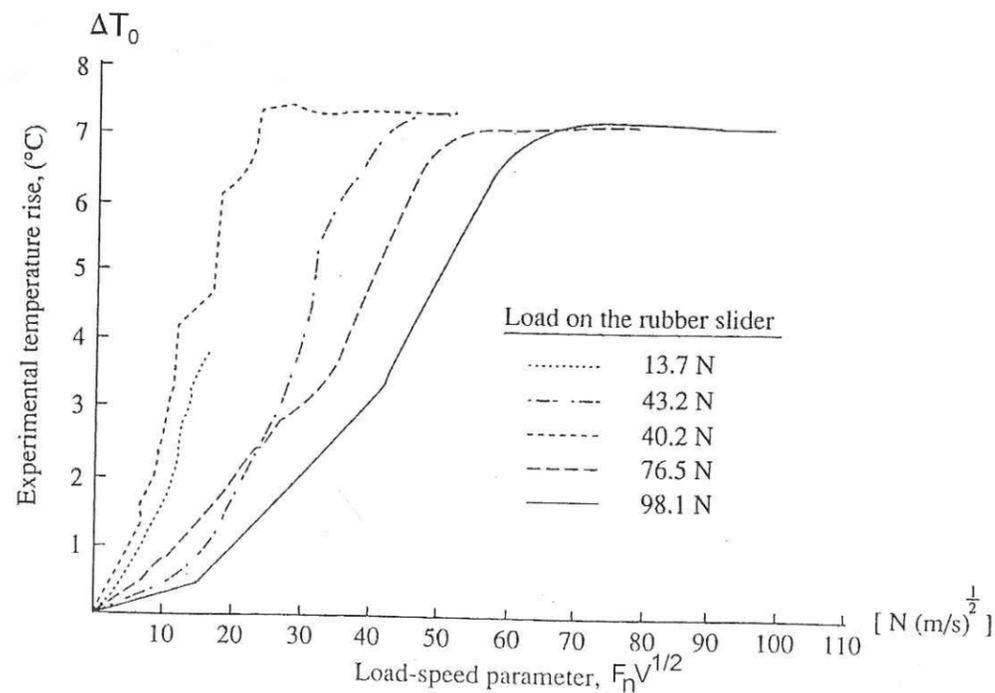


Fig. 2.25 – *Augmentation de température expérimentale ΔT₀ pour un patin en NBR à -22 °C (Roberts, 1993).*

L'augmentation de température ΔT d'un point de la surface de glace après l'action du flux de chaleur constant ϕ pendant une durée t s'exprime par (D.5). La puissance dissipée par unité d'aire de contact est $\phi = (F_t V)/(ab)$, avec a la longueur et b la largeur du patin. Si toute la conduction s'effectue dans la glace, l'élévation de température ΔT_0 de la surface de la glace entre le bord d'entrée du patin et le bord de sortie est d'après (D.9)

$$\Delta T_0 = \frac{2F_t}{b} \sqrt{\frac{V}{\pi \lambda_i \rho_i C_{pi} a}} \quad (2.37)$$

En tenant compte du refroidissement après le passage du patin, l'élévation de température correspondante mesurée à une distance d du bord arrière (cf. Fig. 2.22-b) est

$$\Delta T_d = \Delta T_0 \sqrt{\frac{a+d}{a}} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{a}{a+d}} \right] \quad (2.38)$$

2.6.1.2 Mesures de frottement élastomère-glace par Roberts (1987, 1993)

Roberts (1987, 1993) a mesuré simultanément μ (un patin hémisphérique en élastomère frotte sur un disque de glace en rotation, cf. Fig. 2.22-a) et l'élévation de la température de la surface de la glace ΔT_d (un thermomètre infra-rouge dont le point de visée est situé à la distance d du bord arrière du patin évalue la température de la glace, cf. Fig. 2.22-b). Des thermocouples miniatures peuvent aussi être placés juste devant et derrière le patin de gomme (Fig. 2.22-c). Avec une variation de la vitesse de 0,01 à 1 m/s, pour des températures inférieures à -5 °C, l'accord est très bon entre les augmentations de température ΔT_0 expérimentale et théorique donnée par (2.37) (Fig. 2.23). Les expériences confirment que l'augmentation de la force de frottement a un effet très important sur l'augmentation de la température. Quand le frottement était élevé, aux basses températures, Roberts (1987, 1993) a observé une tendance vers un mouvement de stick-slip et l'augmentation de température mesurée variait alors beaucoup.

D'après (2.37), le coefficient de frottement $\mu = F_t/F_n$ s'exprime comme :

$$\mu = \frac{b \sqrt{\pi \lambda_i \rho_i C_{pi} a}}{2} \frac{\Delta T_0}{F_n \sqrt{V}} \quad (2.39)$$

Pour l'évolution de μ avec V (Fig. 2.24), chaque point des courbes tracées tient compte des valeurs exactes de a et b mesurées in situ à travers l'élastomère transparent. D'après le principe du contrôle thermique, la température à l'interface ne peut pas dépasser la température de fonte donc la valeur limite de ΔT_0 est l'opposé de la température ambiante. La théorie et l'expérience divergent pour V inférieur à 0,3 m/s car les propriétés de la surface de glace interviennent alors beaucoup. Quand l'effort normal ou la température diminuent, la théorie s'écarte des valeurs expérimentales pour V supérieur à 0,3 m/s, car il est plus difficile de mesurer a et b quand A_r est bien plus faible que A_n .

2.6.1.3 Palier de température à la surface de la glace selon Roberts (1987, 1993)

Pour σ_n modéré, l'augmentation de température montre un bon accord entre l'expérience et la théorie (Fig. 2.23). Pour σ_n élevé, l'augmentation de température présente un palier, différent selon le type d'élastomère. En supposant que l'aire de contact est constante, d'après (2.39), la pente théorique de l'augmentation de température en fonction de $F_n \sqrt{V}$ est proportionnelle à μ : $\Delta T_0 = C \mu F_n \sqrt{V}$, avec C une constante. Les variations expérimentales de ΔT_0 en fonction de $F_n \sqrt{V}$ montrent un palier indépendant de F_n (Fig. 2.25). Le palier et les valeurs de μ varient avec les propriétés viscoélastiques de l'élastomère. Avec un élastomère NBR de module

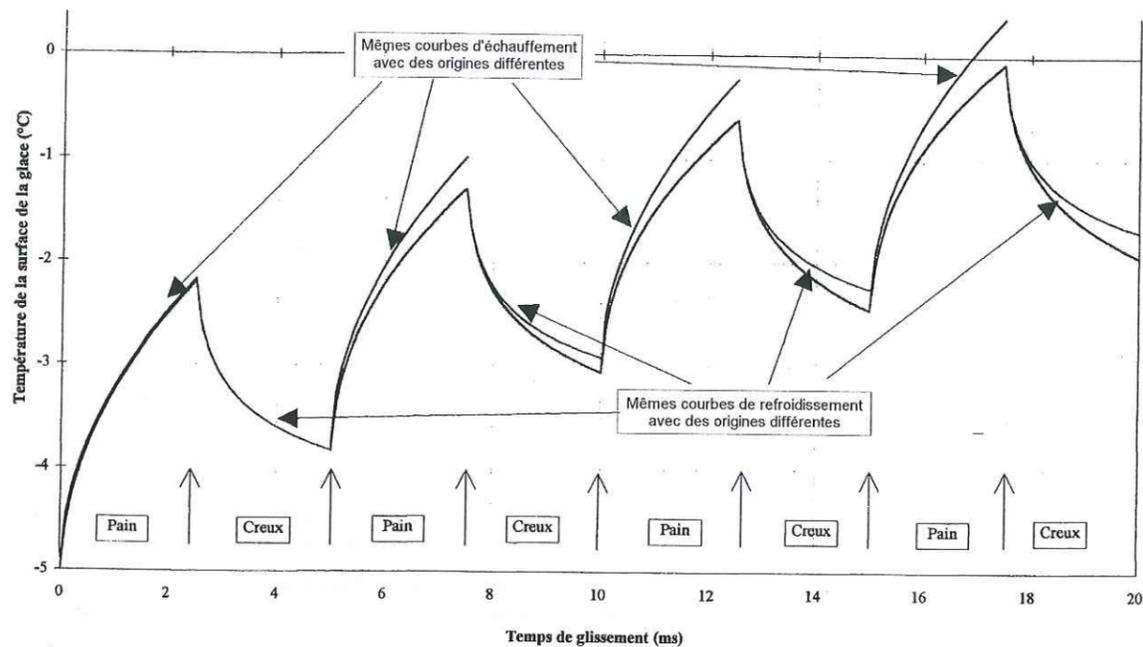


Fig. 2.26 – Echauffement de la glace pendant le freinage d'un pneu (Vidal, 1997).

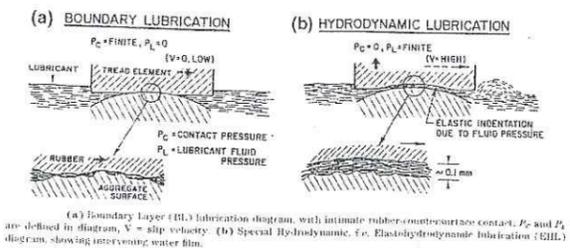


Fig. 2.27 – Différents modes de lubrification (Veith, 1996a,b, 1998).

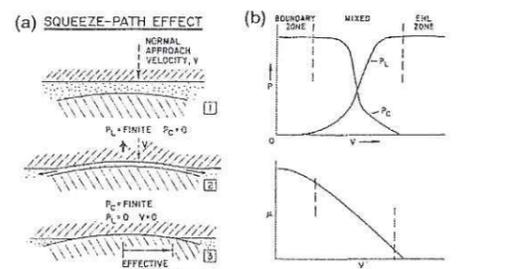


Fig. 2.28 – Effet d'éponge (Veith, 1996a,b, 1998).

d'Young 6,2 MPa, $\mu=0,1$ et $\Delta T_0=7,5^\circ\text{C}$. Avec un élastomère NR de module 0,56 MPa, $\mu=2,2$ et $\Delta T_0=14,5^\circ\text{C}$. Les paliers de température augmentent donc quand la souplesse de l'élastomère augmente.

Plusieurs questions se posent. Pourquoi l'augmentation de température présente-t-elle une limite? Pourquoi cette limite est différente pour chaque gomme et indépendante de F_n ? Comment peut-on former de l'eau sur une glace à -22°C avec une hausse de température mesurée maximale de $7,5^\circ\text{C}$? Pour les manipulations avec les efforts normaux les plus élevés, Roberts a en effet apporté deux preuves indirectes de formation d'eau à l'interface. D'une part, lors d'une réduction instantanée de V de 1,2 à 0 m/s, le traceur de la force de frottement sortait de l'échelle, à cause d'un collage dû au regel de l'eau. D'autre part, après la relevée du patin, un bourrelet d'environ 1 mm de haut apparaissait sous le bord de contact arrière du patin.

Roberts (1987, 1993) a supposé que la surface du patin est lisse par rapport à la piste de glace car le givre est une source de rugosité et l'usinage laisse des stries. Le frottement étant localisé au sommet des aspérités de la glace, l'augmentation de température au sommet des aspérités ΔT_{max} calculée par (2.7) est supérieure à l'augmentation de température théorique moyenne ΔT_{moy} calculée par (2.8). Si ΔT_{moy} est suffisant, les sommets fondent car ΔT_{max} est élevée et le frottement est lubrifié. L'eau fondue se réfugie dans les creux voisins et on obtient un étalement de température. Le modèle ne prend pas en compte l'enthalpie massique de fusion. Les équations simplifiées ne sont pas valables si beaucoup d'eau fond : la libération de l'enthalpie massique de fusion lors du regel provoque une diminution de l'augmentation de température.

Pour les gommes souples, A_r approche A_n (cf. § 1.1.2) ; la chaleur générée localement est peu importante mais s'étend sur une grande surface, donc l'augmentation de température moyenne mesurée par les thermocouples est élevée. En revanche, l'augmentation de température moyenne mesurée par les thermocouples est faible pour les gommes dures car la chaleur fond les sommets : il existe en réalité un petit nombre de contacts très chauds et μ est faible. Ainsi, les composés souples sont indispensables pour un bon freinage sur glace : selon le modèle, μ est proportionnel à l'augmentation de température ΔT_0 qui varie en sens inverse du module d'Young.

2.6.2 Echauffement sous un pneu avec partage du flux thermique

2.6.2.1 Modèle de Hayhoe et Shapley (1982) et Vidal (1997)

Pour étudier l'échauffement de la glace sous un pneu lors du freinage, Hayhoe et Shapley (1982) et Vidal (1997) ont tenu compte du partage du flux de chaleur entre le pneu et la glace, alors que Roberts (1987, 1993) a négligé ce phénomène dans (2.37). Le modèle d'échauffement suppose que toute l'énergie du frottement est dissipée à l'interface et que le flux de chaleur est constant à travers l'empreinte.

Le sol est considéré comme semi-infini. Cette hypothèse est justifiée par le critère de Fourier : $F_0 = \alpha_i t / z^2 \leq 1$, avec t le temps et z une dimension dans le sens de la propagation du flux. Par exemple, pour un temps de passage du pneu de 20 ms, le critère requiert une épaisseur de glace supérieure à 0,2 mm pour pouvoir considérer la glace comme un demi-espace. Le flux généré par le frottement est donc unidirectionnel et perpendiculaire à l'interface. L'enthalpie massique de fusion de la glace n'est pas prise en compte. L'échauffement dû au roulage est négligé devant l'énergie dissipée par le frottement.

D'après (D.13), l'augmentation de température de la glace (isotherme en condition initiale) à la distance x de l'avant d'un pain de gomme d'un pneu est

$$\Delta T = \frac{2\mu\sigma_n}{e_1 + e_2} \sqrt{\frac{xV}{\pi}} \tag{2.40}$$

avec e_n les effusivités des matériaux.

Hayhoe et Shapley (1982) ont utilisé cette expression pour expliquer les différences entre les performances de freinage des voitures de tourisme et des camions sur la glace (cf. § E.2).

2.6.2.2 Optimisation de la sculpture selon Vidal (1997)

Vidal (1997) a étudié l'échauffement de la glace pendant le freinage, dans l'objectif de mieux répartir les efforts dans l'aire de contact afin d'augmenter μ . Le code comprend plusieurs paramètres modifiables: σ_n , V , e_g l'effusivité de la gomme, la durée du frottement, la succession des pains et creux du pneu. L'augmentation de température d'un point de la surface de glace est calculée à partir de (2.40) après différents scénarios de successions de pains et creux (Fig. 2.26). Le paramètre le plus important d'un point de vue thermique est σ_n : quand σ_n diminue, l'échauffement de la glace diminue aussi proportionnellement (une augmentation forte de l'effusivité e_g ne peut provoquer qu'une diminution faible de l'échauffement de la glace). L'échauffement de la glace est proportionnel à \sqrt{a} , la racine carrée de la longueur de l'aire de contact (cf. (2.7)). Puisqu'il ne faut pas que σ_n augmente, il faut élargir l'empreinte pour améliorer le frottement: diminuer la longueur de l'aire de contact, tout en conservant la même contrainte normale sur les pains réduit l'échauffement de la glace.

2.7 Frottement lubrifié

2.7.1 Différents modes de lubrification

D'après Veith (1996a,b, 1998), le frottement lubrifié résulte principalement de deux modes: la *lubrification par couche limite* (Fig. 2.27-a) et la *lubrification élastohydrodynamique* (Fig. 2.27-b) (cf. § E.3). L'*effet d'éponge* (Fig. 2.28-a) est un retard au contact intime entre deux surfaces lubrifiées qui résulte de la pression dans le fluide (cf. § E.3).

2.7.2 Interprétation de performances par l'index de criticité (Veith, 1996a,b)

Veith (1996a) a souligné que la performance relative des pneus dépend autant des conditions de test que des facteurs de conception du pneu. Cette remarque doit être prise en compte lors du choix et de la conception d'un type de dispositif expérimental. Veith a remarqué que le coefficient de traction mesuré sur sol humide μ_{humide} peut s'écrire en fonction de la fraction Φ_{EHL} de l'empreinte en mode de lubrification élastohydrodynamique. $\mu_{humide} = (1 - \Phi_{EHL})\mu_{limite}$, avec μ_{limite} une constante qui désigne le coefficient de traction en lubrification par couche limite à basse vitesse. Une augmentation de vitesse à partir d'une condition de lubrification par couche limite accroît Φ_{EHL} et μ_{humide} diminue jusqu'à l'hydroplanage. Φ_{EHL} est un indice de criticité qui peut caractériser les conditions de frottement en glissement relatif lubrifié.

Afin de comparer les résultats de quatre techniques d'évaluation couramment utilisées en conditions lubrifiées sur sol dur (volant intérieur avec pneu réel, tests de freinage et de virage avec une remorque, distance de freinage avec un patin et test de comportement), Veith (1996b) a introduit un autre indice de criticité $I_c = (\text{vitesse du test}) \times (\text{épaisseur d'eau})$. La performance de traction est bien corrélée avec I_c pour le volant intérieur, mais aucune corrélation n'apparaît pour les tests sur sol réel. Il est donc indispensable de connaître les conditions de criticité de chaque test avant de chercher une quelconque corrélation avec un paramètre.

2.7.3 Influence des propriétés viscoélastiques de l'élastomère

Futamura (1990) a développé le concept de l'indice de déformation m , qui est basé sur la distinction entre les états de contrainte constante, déformation constante et énergie de déformation constante. Il exprime la perte totale d'énergie dans les composés élastomères de la bande de roulement par $CG^m/G^{*m} + \Delta W$, avec C une constante, m l'indice de déformation et ΔW une perte d'énergie supplémentaire. m est égal à 0 ou 2 si μ provient respectivement d'une dissipation à déformation constante ou à contrainte constante (cf. § 1.2.1.5). Futamura a trouvé $m=0$ pour la traction humide, $m=0,8$ pour la résistance au roulement et $m=1,8$ pour la traction sèche. Nahmias et Serra (1997) ont aussi montré que la valeur de G^m domine la traction humide.

Veith (1996a) a caractérisé la texture du sol par la densité de rugosités par centimètre D_r et la taille moyenne des rugosités T_r . L'index de criticité est exprimé en fonction de ces deux paramètres et de la vitesse de glissement V : $I_c = V/(D_r T_r)$. μ est calculé comme (1.10) avec $n=1$. Pour des surfaces lisses ou rugueuses, l'amélioration (en valeur absolue) de la traction obtenue pour une augmentation de 20% de $\tan \delta/G'$ décroît linéairement avec le logarithme de I_c sur sol humide. Le gain dû à la composante d'adhésion G^m décroît de la même façon, mais seulement pour une surface lisse. Des valeurs élevées de D_r et T_r favorisent la composante de déformation de la perte d'énergie de l'élastomère et la lubrification par couche limite domine. Au contraire, de faibles valeurs des deux paramètres D_r et T_r (surface plus lisse) permettent un contact croissant entre les deux surfaces: les contacts de haute déformation diminuent et la lubrification élastohydrodynamique est favorisée.

2.7.4 Mécanique des fluides dans l'interface

2.7.4.1 Modélisation générale

Les modèles de frottement sur glace traitent principalement du transfert de la chaleur vers l'extérieur de la zone de contact. Ces modèles analytiques sont monodimensionnels car ils négligent les variations spatiales des flux de chaleur et de fluide dans l'aire de contact. Certains auteurs ont cependant posé le problème complet de mécanique des fluides et de transfert de chaleur dans la couche lubrifiante (e.g. Bicego *et al.*, 1981).

Pour modéliser le contact d'un matériau pouvant changer de phase placé sur un support lisse rigide se déplaçant horizontalement à une vitesse donnée, Bejan s'est intéressé aux variations tridimensionnelles des champs de température et de vitesse dans le volume mouillé par le matériau fondu (Bejan, 1989; Bejan et Tyvand, 1992; Bejan, 1994). L'effet de convection est supposé négligeable dans la couche fondue. Chacune des variables thermiques et cinétiques est exprimée par rapport aux trois coordonnées de la position du point. Le modèle fournit les expressions de la température locale, de la pression et des vitesses dans le fluide, des flux d'écoulement du fluide et du flux de chaleur.

Bejan (1994) a obtenu les expressions de la vitesse de fonte, de μ et de la température de la surface du solide en fonction de trois paramètres adimensionnés (mouvement relatif vertical, position longitudinale et taux d'écoulement à l'amont); dans deux cas distincts:

- La fonte est due à un réchauffement direct par le solide mobile dont la température T est plus élevée que le point de fusion T_f du matériau à changement de phase. L'épaisseur fondue est uniforme et le frottement décroît quand F_n ou $T - T_f$ augmente.
- La fonte est causée par un réchauffement par frottement du liquide formé à l'interface. L'espace entre les deux matériaux a alors une forme convergente-divergente qui varie avec les paramètres du problème. Plus F_n est élevé, plus la fraction de matériau fondu par le bord amont est importante.

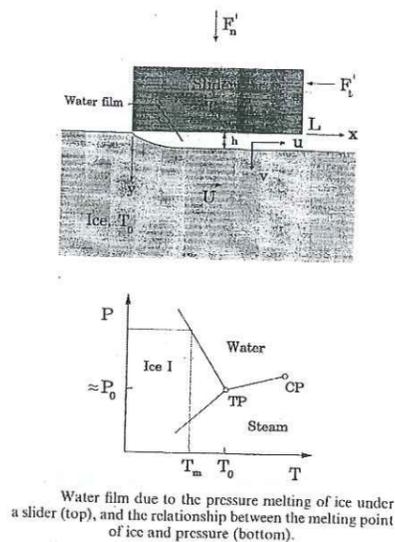


Fig. 2.29 - Lubrification due à la fonte par pression (Fowler et Bejan, 1993).

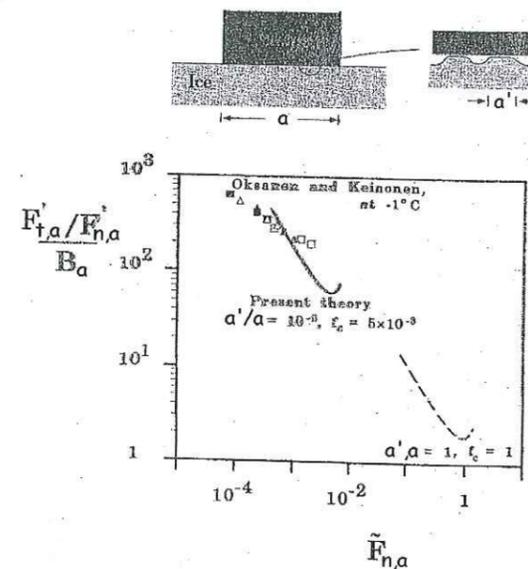


Fig. 2.30 - Effet des aspérités de la glace sur l'accord entre le modèle de Fowler et Bejan (1993) avec les résultats expérimentaux de Oksanen (1980).

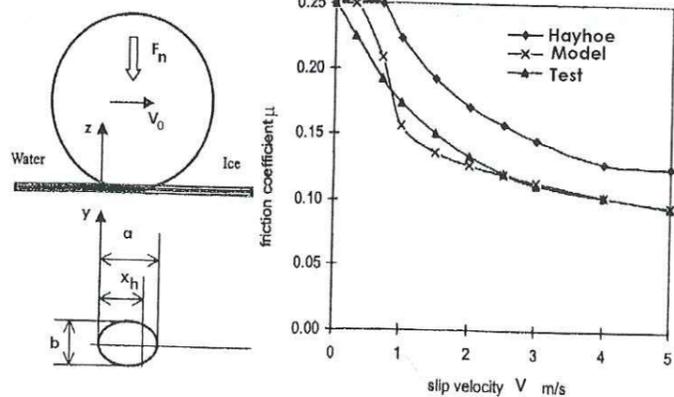


Fig. 2.31 - Aire de contact d'un pneu sur la glace (Peng et al., 1999).

Fig. 2.32 - μ théorique et expérimental en roue bloquée en fonction de V (Peng et al., 1999) et modèle de Hayhoe et Shapley (1989).

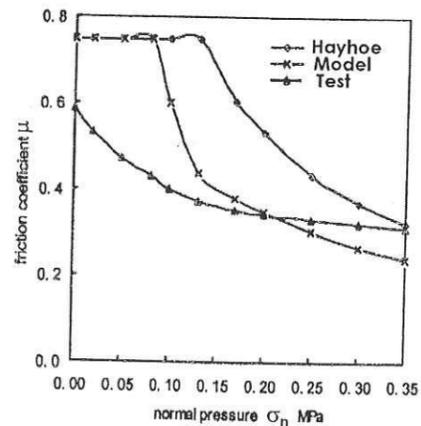


Fig. 2.33 - μ théorique et expérimental d'un patin d'élastomère sur la glace en fonction de σ_n (Peng et al., 1999) et modèle de Hayhoe et Shapley (1989).

2.7.4.2 Application au frottement sur glace par Fowler et Bejan (1993)

Fowler et Bejan (1993) ont expliqué la compétition entre la fonte due à l'abaissement du point de fusion avec la pression et la fonte due à l'échauffement par cisaillement visqueux pour maintenir le film d'eau à l'interface sous un patin qui frotte sur la glace. Ils ont résolu le problème couplé de trois phénomènes physiques : le transfert de chaleur à travers le film d'eau, la fonte à la surface de la glace et la mécanique des fluides dans le film.

Les auteurs ont développé deux cas particuliers : soit le film d'eau est uniquement dû à la fonte par pression, soit le film d'eau est dû à la fonte par pression et à la dissipation visqueuse. Le modèle est bidimensionnel (Fig. 2.29). La glace est supposée plate sans aspérités. Le mouvement du patin sur la glace est stationnaire et le patin est poussé par une force par unité de longueur constante. Le patin et le volume de glace ont une température $T_0=0^\circ\text{C}$. La température locale du film liquide est entre T_0 et T_f , légèrement plus basse à cause de l'abaissement du point de fusion avec la pression. La vitesse relative est assez élevée pour que le cisaillement visqueux du fluide génère beaucoup de chaleur, ce qui n'est vérifié que si le film est extrêmement mince.

Les auteurs sont partis de l'équation de Reynolds pour les fluides en film mince, en supposant que le transfert de chaleur dans le film est de la conduction pure dans une direction verticale. La température T du film d'eau décroît alors linéairement entre 0°C et T_f . Il faut considérer deux cas distincts pour le bilan d'énergie : le patin est isotherme (i.e. très conducteur) ou le patin est adiabatique (i.e. faible conductivité thermique). Les auteurs ont exprimé l'épaisseur, la forme et la taille du film d'eau en fonction des variables adimensionnées représentant l'effort normal $F_{n,a}$ et l'effort tangentiel $F_{t,a}$ exercés sur le patin de longueur a .

Les auteurs ont comparé les résultats de leur modèle dans le cas où la fonte est due à l'abaissement du point de fusion avec la pression avec les mesures obtenues par Oksanen (1980). Ils ont alors pris en compte la rugosité de la glace : le modèle est appliqué à chaque aspérité, représentée par deux paramètres géométriques, rapport de longueur (longueur d'une aspérité sur la longueur du patin) et fraction de la longueur du patin associée à la fonte par contact. Le modèle correspond assez bien avec les résultats expérimentaux pour deux valeurs assez réalistes de ces deux paramètres (Fig. 2.30) : le rapport du frottement $F_{t,a}/F_{n,a}$ sur la finesse du film B_a (paramètre dépendant du rapport de l'épaisseur du film à la longueur du patin) se corrèle bien avec $F_{n,a}$. Il est surprenant que les résultats se corrèlent si bien dans le cas où la fonte est générée par l'abaissement du point de fusion par la pression alors que que la fonte par dissipation d'énergie par cisaillement visqueux est en général considérée comme le mécanisme dominant (e.g. Bowden et Hugues, 1939; Bowden, 1953; Evans et al., 1976).

2.7.4.3 Frottement d'un pneu sur la glace selon Peng et al. (1999)

Selon Peng et al. (1999), la surface de contact elliptique entre un pneu et la glace est divisée en deux régions (Fig. 2.31) : une zone sèche à l'avant (où μ est constant égal à μ_s) et une partie mouillée par un film d'eau de longueur x_h et d'épaisseur h (liquide newtonien et incompressible de viscosité η constante). Le taux de glissement $g = V/V_0$ est différent de 1. Le coefficient de frottement dans la zone humide est obtenu à partir de la résolution des équations de conservation de la masse, de Navier-Stokes et de conservation de l'énergie dans le film fluide. La gomme est supposée rigide, de surface lisse et parallèle à la glace. h et la profondeur de pénétration de la chaleur (cf. § D.2.1) sont supposés négligeables devant les dimensions de l'aire de contact. Le mouvement du fluide est laminaire d'après la valeur du nombre de Reynolds $Re = hV/\eta$ (cf. § C.2). La chaleur produite par le frottement est évacuée par fonte et par conduction monodimensionnelle dans le pneu et la glace. L'état quasi-stationnaire est atteint dans le film. Les températures dans la masse du pneu et de la glace sont supposées égales à T_0 .

A cause de l'ellipticité de l'aire de contact (de longueur a), l'expression de la longueur humide x_h tenant compte du taux de glissement et du partage du flux de chaleur est légèrement modifiée par rapport à l'expression de la longueur sèche x_s donnée par (D.24) pour un contact rectangulaire :

$$x_h = a - \pi V_0 \left[\frac{(T_f - T_0)e_i e_2}{2\mu_s \sigma_n V (e_i + \sqrt{\pi} e_2)} \right]^2, \quad (2.41)$$

avec e_i et e_2 les effusivités de la glace et du pneu respectivement.

D'après le bilan d'énergie pour la zone lubrifiée, h est solution d'une équation du quatrième degré de la forme $C_1 - C_2 h - C_3 h^4 = 0$, où C_1 , C_2 et C_3 dépendent des propriétés des matériaux et de la géométrie du contact.

Pour une aire de contact rectangulaire, le coefficient de frottement moyen sur l'aire de contact est obtenu d'après les expressions de x_h et h par

$$\mu = \frac{\eta V}{h \sigma_n} \left(\frac{x_h}{a} \right)^2 + \mu_s \left(1 - \frac{x_h}{a} \right). \quad (2.42)$$

Peng *et al.* (1999) ont montré que h augmente avec une diminution de V ou une augmentation de $g = V/V_0$ (par exemple, h vaut $0,12 \mu\text{m}$ pour $g = 1$ et $0,51 \mu\text{m}$ pour $g = 14$). Pour un freinage en roue bloquée, les frottements théoriques et expérimentaux sont proches, sauf pour les faibles vitesses de glissement (Fig. 2.32) car ce sont alors les propriétés de la glace qui s'expriment (cf. Roberts et Richardson (1981)); l'accord est toujours meilleur qu'avec le modèle de Hayhoe et Shapley (1989). La mauvaise corrélation de μ en fonction de σ_n s'explique car les résultats expérimentaux ont été obtenus à $0,3 \text{ m/s}$ et -5°C (Fig. 2.33) : dans ces conditions, la complexité de la surface de glace près du point de fusion intervient et il est très difficile d'identifier la zone de transition car les sommets des aspérités peuvent fondre même dans la zone sèche. μ décroît fortement quand le rapport d'aspect $r = a/b$ (a est la longueur et b est la largeur du patin) augmente pour un contact rectangulaire : μ diminue de 0,25 à 0,045 quand r augmente de 0,5 à 4 (cf. Hayhoe et Shapley (1989); Vidal (1997)). μ augmente avec la conductivité de l'élastomère, mais comme l'avait souligné Vidal (1997), il est très difficile d'augmenter fortement la conductivité des formulations. D'après Peng *et al.* (1999), la convection entre le pneu et l'air n'est pas négligeable pour V élevé ou lors d'un roulage avec glissement.

2.7.5 Modèles macroscopiques d'une couche liquide établie

Shugai (1994) a étudié le frottement d'un patin formé d'un matériau pouvant changer de phase (initialement au point de fusion T_f) sur un demi-espace (température locale de surface $T > T_f$) avec V très élevé. L'épaisseur h de la couche fondue formée est supposée bien supérieure aux rugosités des deux matériaux, donc les déformations plastiques des deux surfaces et les effets de bords relatifs aux films minces sont négligeables : h est supposée supérieur à 10^{-4} cm , ce qui correspond, pour le cas du frottement sur la glace, à $V \approx 220 \text{ m/s}$ d'après Kozlov et Shugai (1991). Les calculs de Shugai (1994) prennent en compte l'élimination du matériau fondu de la zone de contact : le liquide laisse une trace à l'arrière et forme aussi un jet à l'avant du patin sous l'effet de σ_n . L'étude présente des ordres de grandeurs intéressants, en partant du bilan de chaleur global du fluide (énergie utilisée pour fondre le matériau du patin + énergie conduite vers le patin = énergie générée par dissipation visqueuse + énergie en provenance du demi-espace).

D'après Shugai (1994), l'apport d'énergie vers le fluide s'effectue principalement par dissipation visqueuse si $E_c \gg S_{te}/P_r$ et principalement par l'apport de chaleur depuis la surface du substrat si $E_c \ll S_{te}/P_r$, avec $E_c = V^2/L$ le nombre de Eckert, $S_{te} = C_p(T - T_f)/L$ le nombre de Stephan et $P_r = C_p \eta / \lambda$ le nombre de Prandtl, L l'enthalpie massique de fusion, C_p , η et λ respectivement la capacité thermique massique, la viscosité et la conductivité du fluide. La force

de frottement F_t s'évalue en fonction de V , η , S_{te} , P_r , E_c et P_e ($P_e = aV/\alpha$: nombre de Peclet, avec a la longueur du patin et α la diffusivité thermique du substrat). F_t est proportionnelle à $V^{1/2}$ si la formation de la couche fondue est principalement due à la dissipation visqueuse et F_t est proportionnelle à $V^{3/2}$ si la formation de la couche fondue est principalement due à l'apport de chaleur depuis la surface du substrat. L'auteur a souligné qu'une faible dépendance du taux de fonte et de la force de frottement par rapport à F_n caractérise un frottement avec une couche fondue continue.

Pour modéliser le frottement sous un patin à glace, Stiffler (1984) a étudié la lubrification par fonte. Il a obtenu les expressions de l'épaisseur du film de fluide, la force de frottement et l'usure du matériau fondant, ainsi que l'augmentation de température de la surface non-fondante et l'épaisseur du film fondu. La majorité de la chaleur générée s'évacue dans le matériau ayant la conductivité thermique la plus élevée.

2.8 Mesures du frottement sur la glace

2.8.1 Frottement gomme-glace à faible vitesse

Southern et Walker (1972, 1974) ont mesuré le frottement entre un patin de gomme et une piste de glace, avec une vitesse très faible ($V < 1 \text{ cm/s}$) afin de minimiser les effets d'échauffement par frottement. Pour $\sigma_n = 0,4 \text{ bar}$, μ variait entre 1 et 5. Selon la température et l'élastomère utilisé, une augmentation de V conduisait à une augmentation ou une diminution de μ , mais en utilisant le facteur de translation de WLF (Fig. 1.1), les auteurs ont obtenu pour chaque polymère des courbes maîtresses du frottement en fonction de la vitesse (Fig. 1.2).

L'existence de courbes maîtresses est une bonne preuve que les phénomènes qui produisent le frottement dépendent des propriétés viscoélastiques de l'élastomère. Si la température de référence est choisie pour chaque élastomère à 50°C au dessus de T_g , le pic des courbes maîtresses intervient pour la même abscisse $\log(aT_0 V)$ pour tous les élastomères. Quand μ est proche du pic, le phénomène de stick-slip intervient.

En échelles logarithmiques, μ décroît linéairement avec σ_n avec une pente de 1/3, en accord avec la théorie de Schallamach (1963, 1971) (Fig. 2.34). Sous $\sigma_n \approx 2 \text{ bar}$, μ est très faible et décroît avec une augmentation de V ; le meilleur frottement est observé avec le caoutchouc naturel (Fig. 2.35).

Gnorich et Grosch (1972) ont conçu une machine tournante assurant une vitesse de glissement inférieure à 5 cm/s . Ils ont étudié les effets du mélange sur le frottement et utilisé la transformation de WLF pour relier leurs résultats de frottement sur glace au frottement sur verre sous d'autres conditions.

2.8.2 Observations de la surface de glace sous un élastomère (Roberts, 1981)

2.8.2.1 Frottement d'un élastomère sur la glace et du verre sec ou humide

Avec un dispositif pion-disque (Fig. 2.22), Roberts a effectué des mesures de μ et des observations optiques simultanées de l'interface élastomère-glace pour V entre $0,001$ et 10 mm/s (Roberts, 1980, 1981; Roberts et Richardson, 1981). La figure 2.36 schématise la variation de μ avec la température ambiante T_0 sur un substrat glace ou verre. μ est élevé (≈ 2) et peu dépendant de V sur de la glace froide; mais une forte chute intervient pour T_0 supérieur à -10°C , quel que soit V , jusqu'à une valeur de $0,02$.

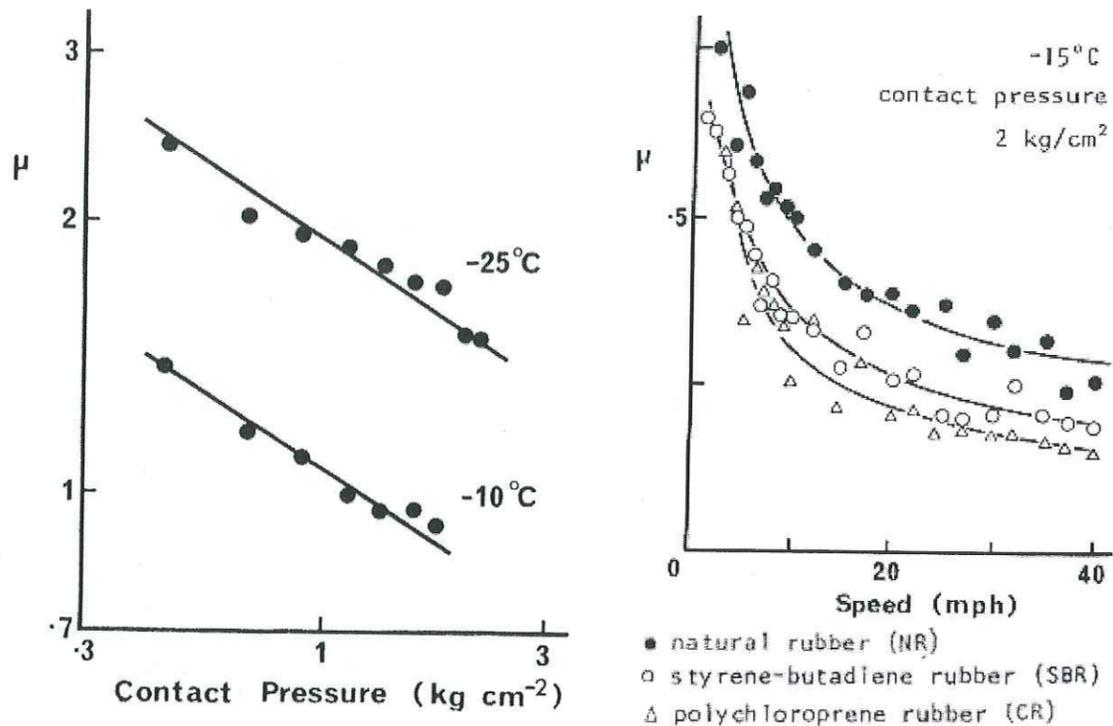


Fig. 2.34 - Evolution de μ avec la contrainte normale σ_n pour du caoutchouc naturel (Southern et Walker, 1974). Fig. 2.35 - Evolution de μ avec la vitesse V (Southern et Walker, 1974).

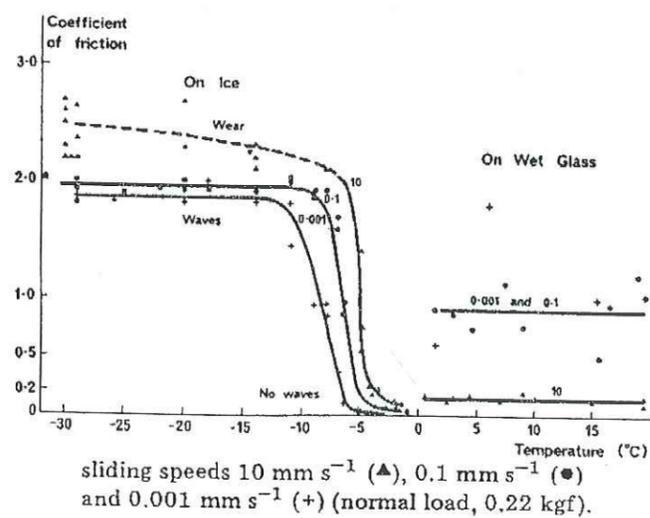


Fig. 2.36 - μ d'un élastomère sur la glace en fonction de la température et de la vitesse (Roberts, 1980).

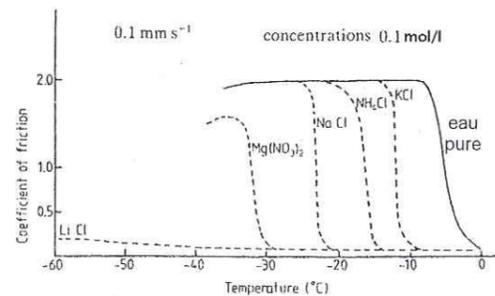


Fig. 2.37 - Effet de différents sels sur μ entre un élastomère et la glace (Roberts et Lanes, 1983).

Pour du frottement sur du verre sec, μ est presque constant (≈ 2) entre -30 et $+20$ °C et entre $0,001$ et 1 mm/s. Sur la glace, μ augmente étonnamment avec V entre $0,001$ et 10 mm/s et entre -30 et 0 °C, selon une combinaison des propriétés de la surface de la glace et de la composition de l'élastomère; mais le contraire se passe pour du verre humide à cause de la lubrification hydrodynamique. Un même échantillon d'élastomère frotte plus sur du verre lisse lubrifié avec de l'eau que sur de la glace proche de son point de fusion T_f ; donc même en présence d'eau, d'autres phénomènes sont mis en jeu en surface de la glace. Roberts a remarqué qu'un fin film d'eau peut couvrir de la glace proche de T_f car les impuretés ioniques de la glace se concentrent à la surface et aux joints de grains et abaissent T_f . Il a souligné que l'eau ne mouille pas le caoutchouc et qu'elle doit donc être éliminée par la pression (ce qui augmente le frottement).

2.8.2.2 Comportement de la glace froide

Pour de faibles vitesses ($V \leq 1$ mm/s) sur une glace froide ($T_0 \leq -15$ °C), la région de contact présente des ondes de Schallamach de façon très régulière. Les surfaces se détachent entre des zones de forte adhésion par propagation d'ondes de pression dans l'élastomère (Schallamach, 1963, 1971). μ est alors élevé et indépendant de V . Les rugosités de la glace cassent les ondes en ondelettes. A -30 °C, seules des rides épaisses persistent et s'accompagnent d'abrasion et d'une augmentation du frottement: des fragments de caoutchouc apparaissent entre les surfaces et roulent ensemble, avant d'être déposés sur la piste de glace.

2.8.2.3 Comportement de la glace chaude

A faibles vitesses ($V \leq 1$ mm/s) au dessus de -10 °C, Roberts n'a observé aucune onde de Schallamach et μ augmente avec V . Une augmentation de T_0 diminue fortement le frottement et au dessus de -3 °C le frottement est extrêmement faible. Roberts n'a observé aucune modification de la surface de la glace, donc la fusion par frottement n'est pas une explication recevable: il a expliqué la chute de μ par une rupture plus aisée de la surface de la glace proche de son point de fusion. Pour de très faibles vitesses, le cisaillement par fluage de la surface de la glace serait suffisant pour suivre le mouvement du caoutchouc (voir Barnes *et al.*, 1971); en revanche, pour de plus grandes vitesses, l'élastomère devrait accommoder le mouvement relatif par des ondes. Un calcul des efforts tangentiels nécessaires au fluage de la glace donnant un frottement bien plus élevé que celui mesuré, l'auteur a conclu que la surface de la glace est mécaniquement faible et peut être décrite comme quasi-liquide.

Sur de la glace chaude, le frottement dépend surtout des propriétés de la glace pour de faibles vitesses ($0,001$ à $0,1$ mm/s) mais les propriétés de l'élastomère interviennent pour des vitesses intermédiaires (de 1 à 100 mm/s). Pour de plus grandes vitesses, la fusion de la glace gouverne le frottement: plus V augmente, plus le réchauffement dû au frottement est important et plus le frottement est faible. A 500 mm/s, Roberts a observé de fins ruisseaux d'eau qui regelaient hors du contact, au bord de la piste suivie par le caoutchouc.

2.8.3 Influence d'impuretés dans la glace sur le frottement gomme-glace

L'influence d'impuretés dans la glace a souvent été étudiée (cf. § E.4). Roberts et Lanes (1983) ont évalué l'effet de différents sels sur μ élastomère / glace à $0,1$ mm/s avec des concentrations importantes (Fig. 2.37). Quand la concentration en impuretés est faible, Shimizu *et al.* (1994) ont montré que μ diminue avec une augmentation de la conductivité de la glace. Shimizu *et al.* (1992) ont étudié l'influence sur le frottement de la microrugosité de la glace et de sa macrorugosité. Blaisdell et Borland (1992) ont effectué des mesures de μ sur une glace recouverte de sable dans l'objectif d'optimiser le sablage des chaussées.

2.8.4 Effet de la sculpture du pneu sur le frottement

De nombreux auteurs ont évalué l'effet de la sculpture et de la lamellisation des pneus (cf. §E.5). Hiroki et Horiuchi (1994) ont comparé les performances de pneus à ribs, sculptés ou lamellisés avec un volant intérieur. Sakamoto et Hirata (1993) ont souligné les compromis à effectuer pour choisir la souplesse de l'élastomère, le nombre de lamelles et l'ajout de fibres lors de la conception d'un pneu.

2.8.5 Influence des propriétés de l'élastomère sur le frottement sur la glace

De nombreuses mesures de frottement effectuées avec le SRT ont montré l'effet des propriétés viscoélastiques sur μ et sont développées en annexe E.6. Alors que μ dépend très peu de la nature du mélange près du point de fusion, l'écart entre les valeurs de μ obtenues pour des mélanges différents est élevé à basse température. Les trois caractéristiques d'un élastomère permettant d'augmenter μ sur glace sont par ordre d'importance décroissante: impérativement T_g faible, nécessairement G' faible et si possible G'' élevé. Le caoutchouc naturel est donc très intéressant et est utilisé pour les bandes de roulement des pneus hiver. La formulation du mélange permet d'améliorer le frottement, par l'usage d'huiles ramollissantes, de plastifiants, de matériaux azotés, de collagène et de charges adéquates. Le choix d'un matériau de bande de roulement hiver doit tenir compte de l'interaction de plusieurs facteurs et chercher le meilleur compromis pour améliorer la performance désirée.

2.8.6 Observations du frottement de différents matériaux sur glace ou neige

Divers articles sur le frottement sur glace ou neige nous ont semblé utiles à développer en annexe E.7. Ils traitent du frottement glace-structure (e.g. Barnes *et al.*, 1971; Fiorio, 2000), du frottement sur glace à vitesse très élevée (e.g. Kozlov et Shugai, 1991; Casassa *et al.*, 1991), de l'influence des vibrations sur μ entre un plastique et la glace (e.g. Lehtovaara, 1987), de l'effet des rugosités de la glace (e.g. Forland et Tatinclaux, 1984; Itagaki *et al.*, 1987). Certains auteurs ont effectué des mesures de température de patins à glace (e.g. Colbeck *et al.*, 1997) et d'épaisseur du film d'eau (e.g. Ambach et Mayr, 1981; Jones *et al.*, 1994; Strausky *et al.*, 1998).

2.9 Conclusion sur l'étude bibliographique ²

Les modèles qui considèrent une partie sèche à l'avant de l'aire de contact et une zone mouillée dès que la température atteint la température de fusion de la glace sont intéressants. Pour la fraction sèche, les calculs sont souvent effectués à flux entrant constant, ce qui génère une augmentation de température le long de l'interface (Dorémieux, 1990). Il semble toutefois préférable de s'inspirer du modèle à flux rétroactif (Douce, 1993). Des modèles semblent bien modéliser la fraction lubrifiée (Hayhoe et Shapley, 1989; Oksanen, 1983). La plupart des articles parus reprennent un modèle monodimensionnel de conduction de chaleur dans une direction orthogonale au plan de contact, à l'extérieur de la zone de contact. En fait, il faudrait tenir compte des variations locales des paramètres physiques dans la couche fondue (Fowler et Bejan, 1993; Peng *et al.*, 1999).

La plupart des modèles thermiques menés jusqu'au terme des calculs ne peuvent reproduire les résultats expérimentaux. Selon leurs auteurs, la difficulté vient de la rugosité des surfaces qui est mal prise en compte: d'une part, les aspérités brisent le film d'eau et génèrent un frottement

2. Un récapitulatif des articles les plus intéressants pour cette étude est présenté sous forme de tableau en annexe E.8.

sec; d'autre part, elles sont responsables de la différence entre l'aire nominale et l'aire réelle. On revient ainsi toujours au même problème: pour évaluer μ , il faut connaître la densité et la taille des aspérités. Ces deux valeurs sont difficilement accessibles par l'observation de la piste de glace, qui ne permet que d'avancer des ordres de grandeur.

La difficulté avec la fonte par frottement est que le film d'eau est mis difficilement en évidence. D'autre part, il semble très délicat d'accéder à son épaisseur par l'expérience, malgré les nombreuses tentatives. Les calculs de μ menés par Evans *et al.* (1976) et Oksanen et Keinonen (1982) sont cependant en bon accord avec de nombreux résultats expérimentaux.

GRATTAGE DE LA GLACE

Chapitre 3

Etude du grattage de la glace avec le pendule SRT

3.1 Introduction

On nomme *grattage de la glace* l'effet produit par des éléments indéformables ou plus durs que la glace (nommés *indenteurs*) qui creusent la surface de la glace lors d'un déplacement sous un effort normal non nul. L'objectif de cette étude expérimentale est de déterminer les mécanismes physiques mis en jeu lors du grattage de la glace. Une bonne compréhension de ces mécanismes permettrait de réduire les distances de freinage en améliorant la conception des pneus cloutés ou en utilisant d'autres concepts pour mettre en jeu la décohérence de la glace. Afin de dégager les mécanismes importants à chaque échelle, des indenteurs de tailles très variées ont été utilisés : inclusions solides de $50\ \mu\text{m}$, papiers abrasifs de taille moyenne de grains de 50 à $350\ \mu\text{m}$, clous.

Les premières mesures de μ ont été faites en utilisant le pendule SRT¹ (Fig. 1.22). Un autre dispositif plus modulable a été conçu au LGGE : un marteau-pendule frappe un patin supporté par quatre éléments frottants et la distance parcourue par le patin sur une piste de glace est mesurée. Les éléments frottants sont constitués de papier abrasif ou de clous.

3.2 Etat de l'art²

3.2.1 Performances d'un pneu clouté

De nombreux auteurs ont souligné les effets néfastes des pneus cloutés : usure de la chaussée, poussière toxique générée par les clous, bruit engendré (e.g. Hasebe, 1984). Ceci a abouti à l'interdiction de la commercialisation des pneus cloutés au Japon depuis 1991. En Europe, l'évolution actuelle des législations tend vers leur interdiction (e.g. Allemagne, Pologne, Portugal), mais certains pays continuent à les autoriser (e.g. France, pays scandinaves).

Les paramètres influençant le frottement d'un pneu clouté sont multiples (Fig. 3.1). Ils caractérisent la structure et les propriétés du pneu, ainsi que les propriétés des clous. Lors de l'étude expérimentale du grattage de la glace, nous n'avons étudié que l'effet d'un indenteur

1. Les détails des protocoles expérimentaux, des observations qualitatives et résultats quantitatifs obtenus avec le pendule SRT sont consignés dans un rapport interne (Déloye, 2000b).

2. Le sujet des pneus cloutés a été détaillé dans une étude bibliographique interne (Lenoël, 1999a). Une synthèse interne décrit de manière assez complète l'influence des différents paramètres sur les performances des pneus cloutés (Laulusa, 1998).

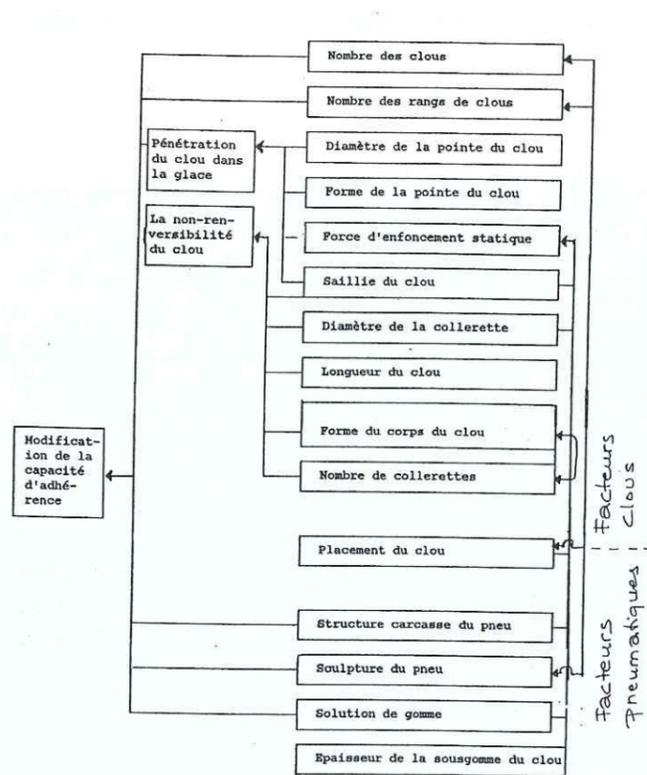


Fig. 3.1 - Paramètres influençant le frottement pneu clouté-glace (Anttila, 1980).

| modification | tenue | contraintes max |
|------------------------------------|--------|-----------------|
| diminution diamètre alvéole | + | + |
| forme alvéole = forme clou-serrage | + | - |
| augmentation diamètre fond alvéole | = | - |
| augmentation sous-creux | = | - |
| augmentation hauteur clou.alvéole | + | + |
| augmentation diamètre collerette | + ou - | + |
| diminution diamètre collerette | + ou - | - |
| collerette supplémentaire | + | = |

Fig. 3.2 - Récapitulatif des résultats de Canizares (1988).

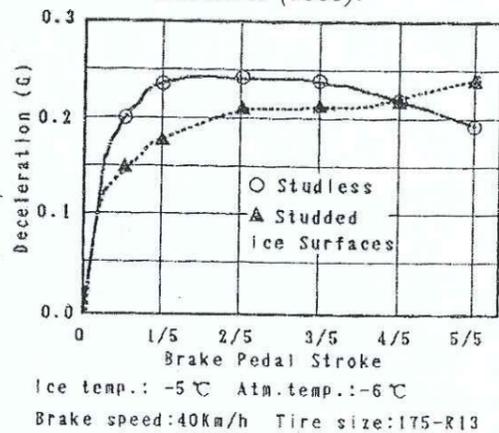


Fig. 3.3 - Performances en freinage sur glace des pneus cloutés ou non (Horiuchi, 1991).

| Désignation éprouvette | mélange de base | % en volume | liées | G' (MPa) | tanδ | G''/G'^2 (MPa^-1) | mm abrasés | Aspect du bord abrasé |
|------------------------|-----------------|-------------|-------|----------|-------|-------------------|------------|-----------------------|
| E1 | silice | 10 | oui | 4,016 | 0,262 | 0,0612 | 0,67 | lisse |
| E2 | silice | 0 | | 6,094 | 0,280 | 0,0426 | 0,52 | lisse |
| E3 | noir | 10 | non | 4,303 | 0,254 | 0,0555 | 0,64 | lisse |
| E4 | noir | 10 | non | 4,665 | 0,250 | 0,0504 | 0,67 | lisse |
| E5 | noir | 10 | oui | 4,787 | 0,238 | 0,0471 | 0,70 | échancré |
| E6 | noir | 5 | oui | 5,155 | 0,263 | 0,0477 | 0,61 | échancré et lisse |
| E7 | noir | 0 | | 6,420 | 0,281 | 0,0406 | 0,58 | échancré |

Tab. 3.1 - Propriétés viscoélastiques et rodage des mélanges à -15 °C.

rigide sur la glace sans tenir compte de tous les paramètres possibles: pour les essais avec la piste rectiligne, les clous étaient fixés de manière rigide sur leur support.

La plupart des études expérimentales s'effectuent par des tests sur véhicule, qui seuls peuvent rendre vraiment compte du paramètre pneu. Rougier (1969) a ainsi montré que la force de traction est étroitement liée au nombre de clous implantés dans la bande de roulement, à la hauteur des clous et à la force de pénétration du clou dans la glace. Le bon positionnement de la zone de cloutage le long de la bande de roulement s'est révélé essentiel. Par des essais de freinage en roue bloquée, Greiner (1990, 1991) a estimé les effets de la hauteur du clou et de la hauteur de sa saillie: il a montré qu'ils dépendent fortement du type de pneu et de ses dimensions.

Des dispositifs expérimentaux peuvent permettre d'étudier l'effet de la vitesse et de la température sur les efforts tridimensionnels générés par un clou. Dans cet objectif, Lefebvre (1991) a utilisé une rouleuse munie d'un capteur piézo-électrique. Anttila (1980) a étudié en laboratoire l'influence de la structure du pneu et a mesuré les efforts normal, longitudinal et latéral exercés sous un clou.

Certains auteurs ont tenté une approche théorique. Canizares (1988) a évalué les contraintes dans un pain de gomme muni d'un clou monocollerette en utilisant un code aux éléments finis. Il a pu optimiser la forme de l'alvéole en T dans la gomme par rapport aux dimensions du clou. La figure 3.2 indique l'effet d'un changement de géométrie sur la tenue du clou et sur les contraintes maximales. La tenue du clou est le moment de rappel qui tend à maintenir le clou en position malgré l'application d'un effort radial sur sa saillie. Les contraintes maximales sont celles qui sont évaluées dans la gomme à proximité du clou.

3.2.2 Pneus cloutés ou lamellisés

Horiuchi (1991) a montré qu'un pneu non clouté peut atteindre les mêmes performances qu'un pneu clouté et le remplace même avantageusement sous certaines conditions. Des tests de force de traction ont été menés en tirant un véhicule à l'arrêt par un autre véhicule. Les pneus non cloutés permettaient d'obtenir une très bonne traction en accélérant très progressivement au démarrage.

Horiuchi (1991) a effectué des tests de freinage sur route avec un véhicule équipé d'un accéléromètre et d'un indicateur de position de pédale de frein. Au freinage, les pneus non cloutés étaient meilleurs que les pneus cloutés pour des taux de glissement entre 20 et 40 % (Fig. 3.3). En fait, pour un freinage en roue bloquée, les pneus à clous avaient une décélération un peu plus importante que les pneus non cloutés. Mais, pour un freinage normal, les pneus non cloutés produisaient une décélération meilleure que celle des pneus cloutés.

Avec un volant intérieur, le freinage maximum était obtenu pour des taux de glissement de 20 à 40 % pour des pneus non cloutés mais n'était toujours pas atteint pour des pneus cloutés avant 40 % de taux de glissement. Lors du freinage sur route, le taux de glissement reste inférieur à 50 % pour une pression de la pédale de frein inférieure à mi-course: la performance en freinage du pneu non clouté est donc supérieure à celle du pneu clouté. Avec le volant intérieur, le frottement était le même pour les pneus cloutés ou non à 0 °C. Au contraire, entre -15 et -10 °C, les pneus non cloutés donnaient de meilleures performances que les pneus cloutés en freinage.

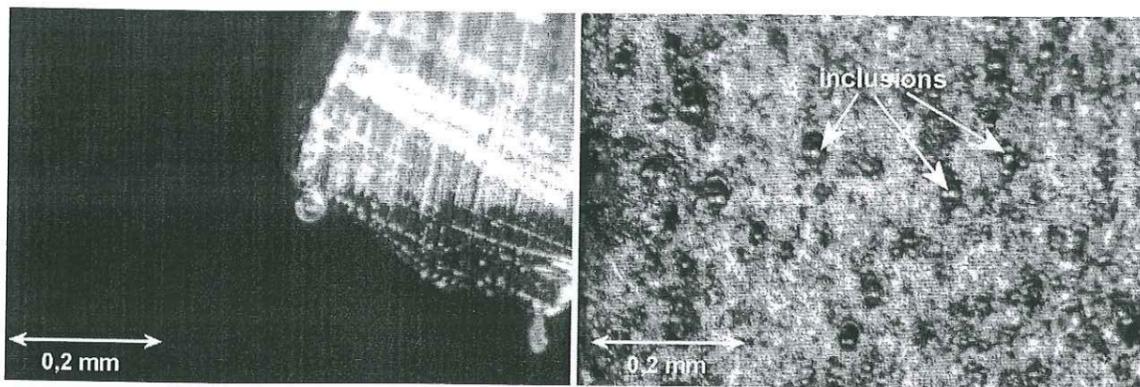
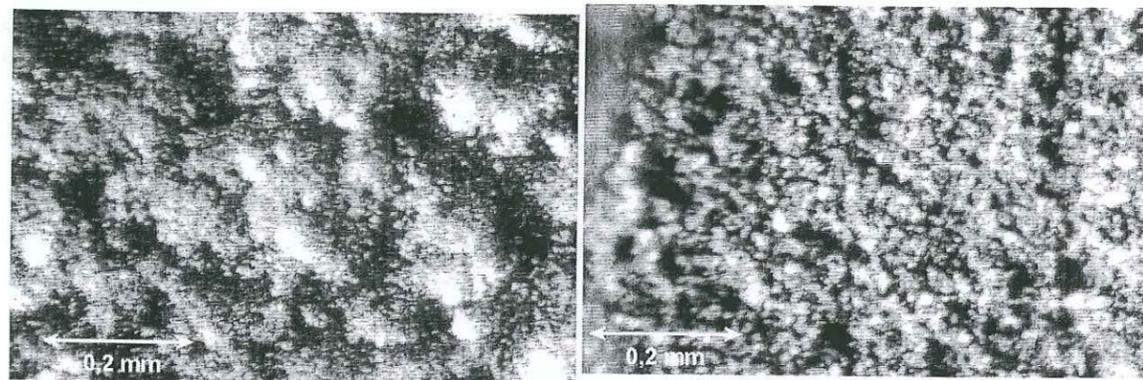


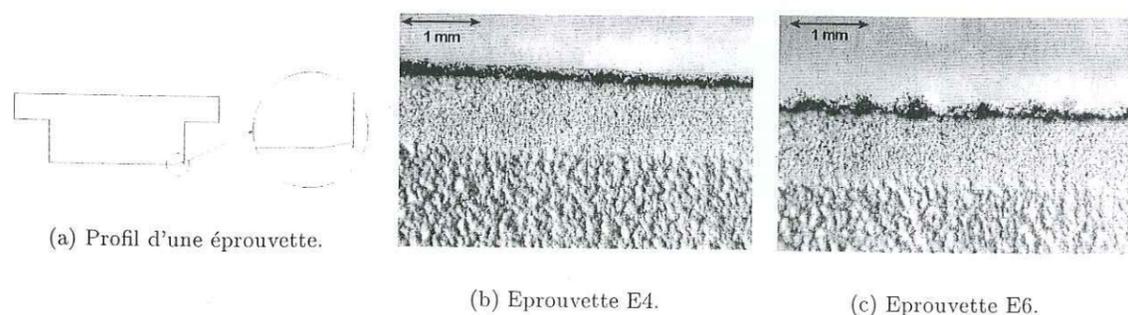
Fig. 3.4 - Microsphère de verre sur l'extrémité d'une lame de cutter. Fig. 3.5 - Surface d'une éprouvette E3 coupée manuellement au cutter.



(a) Avant rodage.

(b) Après rodage par cinq passages SRT sur papier abrasif.

Fig. 3.6 - Surface de l'éprouvette E4.



(a) Profil d'une éprouvette.

(b) Eprouvette E4.

(c) Eprouvette E6.

Fig. 3.7 - Bord rodé par cinq passages SRT sur papier abrasif.

3.3 Frottement de patins SRT avec des inclusions solides dans la gomme

L'objectif de ces manipulations était de déterminer si l'utilisation d'inclusions solides dans la gomme pourrait améliorer le coefficient de frottement gomme-glace. Les éprouvettes contenaient des microsphères de verre de diamètre moyen $50 \mu\text{m}$ (Fig. 3.4).

3.3.1 Eprouvettes SRT avec des inclusions solides

Les sept mélanges utilisés, notés E1 à E7, sont des variantes autour de deux témoins (E2 et E7) différenciés par la nature de la charge, silice ou noir de carbone. La teneur volumique en inclusions solides varie de 5 à 10%. Les inclusions sont liées ou non à la gomme par une interface adhésive. Le tableau 3.1 donne les caractéristiques et les propriétés viscoélastiques des mélanges à -15°C , mesurées à la fréquence 10 Hz sous contrainte constante de 0,2 MPa.

T_g est voisin de -50°C pour tous les mélanges et les variations de T_g sont assez faibles pour n'avoir aucune incidence sur le frottement sur glace. Les mélanges contenant des microsphères de verre sont plus souples: G' diminue quand la proportion d'inclusions solides augmente. La diminution de G' est plus marquée si les inclusions ne sont pas liées. L'ajout d'inclusions solides peut se révéler intéressante: le coefficient de frottement sur glace augmente généralement avec le rapport G''/G'^2 (i.e. pour une gomme plus souple et plus hystérétique). De ce point de vue, les inclusions non liées semblent plus intéressantes pour améliorer le frottement sur glace.

3.3.2 Rodage des éprouvettes SRT

Les microsphères de verre n'étant pas visibles en surface des éprouvettes, il fallait roder les éprouvettes pour que les inclusions solides grattent la glace. Après section d'une éprouvette avec un cutter, les inclusions solides étaient visibles en surface de l'éprouvette (Fig. 3.5). Cependant, l'usage du cutter s'est avéré inadéquat car la section créée présentait des ondulations.

Les éprouvettes ont donc été rodées à -15°C en effectuant des passages SRT sans lubrification sur du papier abrasif très fin Norton Emery A621. Les conditions de rodage en vitesse et contrainte normale étaient ainsi fixées. Par cinq ou vingt passages SRT sur du papier abrasif, le bord frottant de l'éprouvette était abrasé sur une longueur inférieure à 1 mm et moins de 0,1 mm d'épaisseur était éliminé. Nous avons toujours utilisé cette méthode de rodage, même si elle n'est pas satisfaisante pour quatre raisons:

- Les éprouvettes ne sont pas rodées de la même façon. Certaines gommes sont plus abrasées que d'autres, sans que ce soit lié à la teneur en inclusions solides ou à G' (Tab. 3.1).
- La surface usée présente une rugosité très différente de la rugosité initiale de l'éprouvette brute (Fig. 3.6). Le patin a lissé les rugosités de grande taille et a formé une surface à rugosité assez uniforme et à échelle beaucoup plus faible.
- Le rodage ne fournit pas une surface de contact plane car il génère une barbe au bord arrière de l'éprouvette (Fig. 3.7(a)). La lèvre extérieure peut être lisse ou très échancrée. Les deux photos (Fig. 3.7) montrent la barbe et la grande différence de rugosité entre la surface rodée et la surface initiale. L'état du bord abrasé ne semble pas être lié à la présence ou à l'absence d'inclusions solides (Tab. 3.1).
- Quelle que soit l'éprouvette, les inclusions solides ne sont pas visibles en surface: des inclusions solides devraient apparaître sur la surface rodée de l'éprouvette E4 (Fig. 3.6(b)).

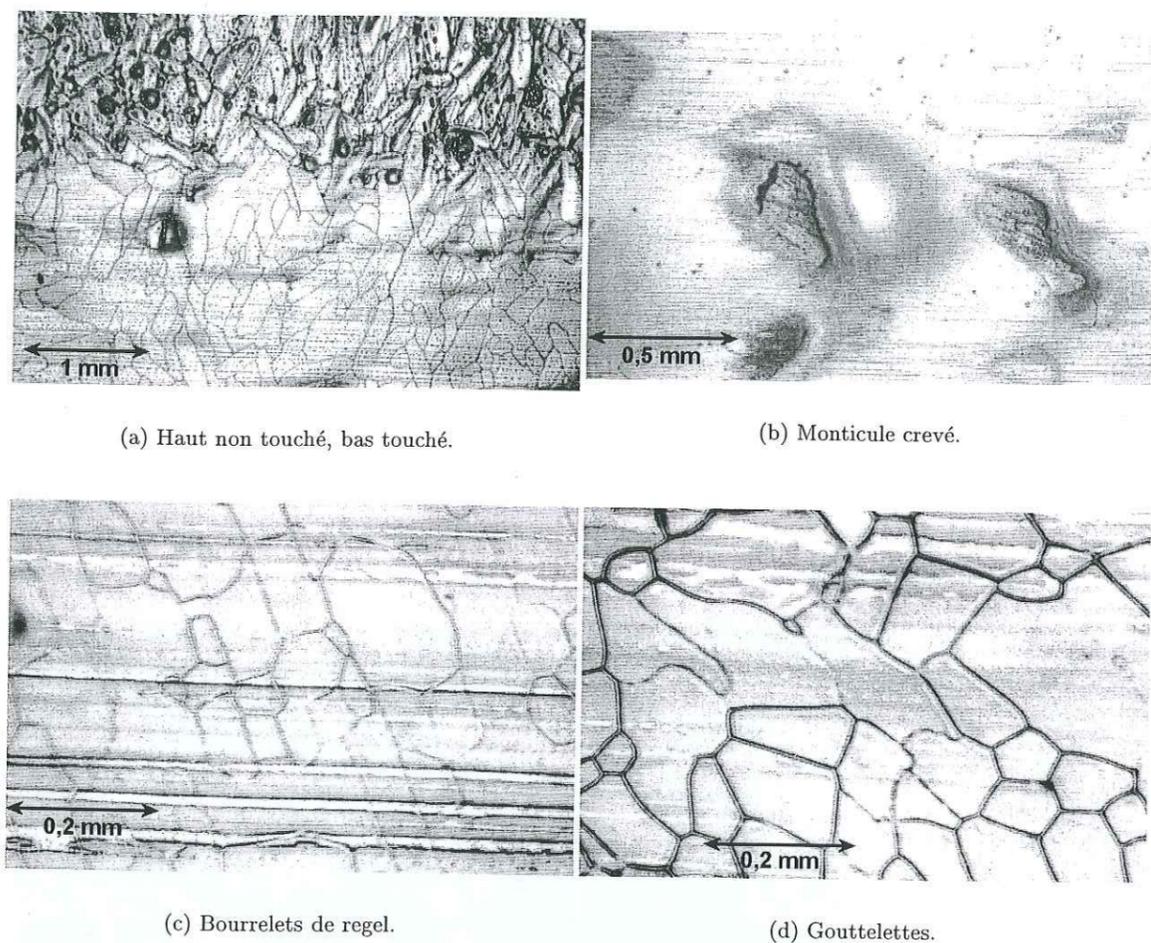


Fig. 3.8 - Aspect typique de la glace Finlande après 50 passages SRT entre -25 et -5 °C.

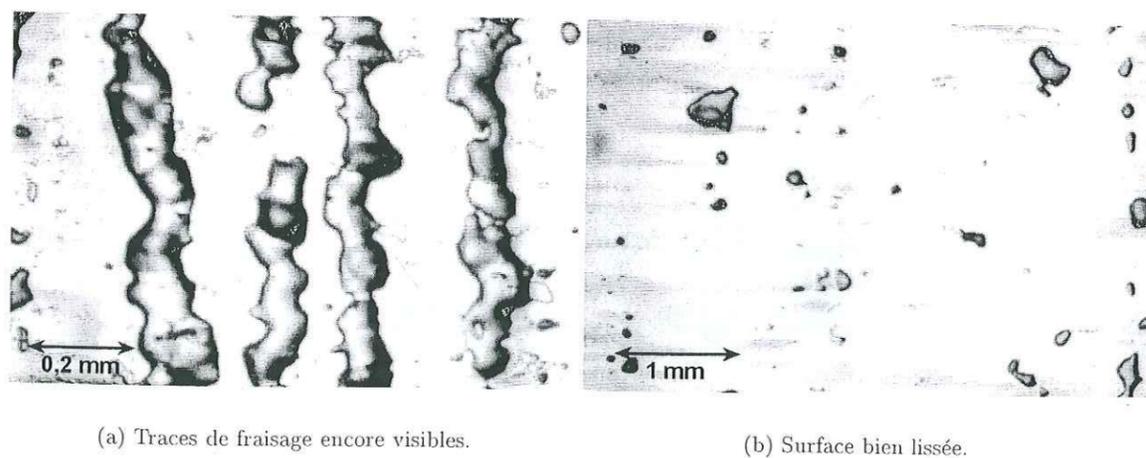


Fig. 3.9 - Aspect typique de la glace lisse après 12 passages SRT entre -25 et -5 °C.

3.3.3 Protocole expérimental avec les inclusions solides et le SRT

La surface de glace sur laquelle frotte une éprouvette SRT est préparée sur un bloc de glace obtenu à partir d'eau distillée. Ce bloc est formé de glace colonnaire dont les cristaux sont allongés dans la direction verticale (leurs axes c sont horizontaux) et de dimensions horizontales inférieures au centimètre. Deux types de surfaces de glace sont testés.

- Glace dite *Finlande* obtenue par gel, sur une surface de glace préalablement fraisée, de 0,5 mm d'eau du robinet à 5 °C dans une chambre à -10 °C. Son aspect observé à la loupe binoculaire est similaire à celui de la surface de glace du lac de Finlande où sont réalisés les essais sur véhicule. La surface est macroscopiquement lisse mais comporte des monticules microscopiques.
- Glace *lisse* obtenue en laissant sublimer à -15 °C une surface de glace fraisée au moins 48 heures avant. La surface est macroscopiquement lisse. L'observation à la loupe binoculaire révèle des traces d'usure peu profondes.

Pour les essais sur glace *Finlande*, 50 passages de l'éprouvette SRT sont effectués afin de calculer μ_{SRT} correspondant à N_{SRT} moyen entre le 30^e et le 50^e passage par (1.17). Nous avons montré que les résultats sur glace *Finlande* sont significatifs à 10 % près (Lenoël, 1998).

Pour les essais sur glace *lisse*, la surface de glace est conditionnée par 50 passages d'une éprouvette particulière (formulation F1 très souple, référence glace pour les bandes de roulement). Douze passages sont effectués avec chaque mélange, en passant successivement les éprouvettes E7, E2, E6, E1, E5, E4 et E3. μ_{SRT} est calculé à partir de N_{SRT} moyen entre le 3^e et le 12^e passage pour chaque mélange par (1.17). Les résultats sont exprimés en relatif par rapport au mélange témoin, silice ou noir de carbone (E2 ou E7).

3.3.4 Observations avec les inclusions solides et le SRT

Après chaque essai, la surface de glace est observée en réflexion à la loupe binoculaire (Fig. 5.2). Pour toutes les photos présentées dans la suite, sauf mention contraire, l'éprouvette SRT est passée de la droite vers la gauche.

Après les mesures de μ_{SRT} sur glace *Finlande* et sur glace *lisse*, l'observation de la surface de glace avec la loupe binoculaire a révélé les mêmes modifications qu'avec des éprouvettes sans inclusions solides. Aucune trace de grattage de $50 \mu\text{m}$ de largeur qui serait due aux inclusions solides n'a été observée: les mécanismes physiques mis en jeu sont donc les mêmes pour des éprouvettes avec ou sans inclusions solides.

- Sur glace *Finlande*, presque toute la surface est touchée; les monticules sont arasés; des bourrelets de regel et des gouttelettes apparaissent par endroit (Fig. 3.8). Il reste un peu de neige sous le patin après les passages.
- Sur glace *lisse*, la surface n'est pas spécialement usée par les inclusions solides. Des bourrelets de regel et de fines stries uniformément réparties sont visibles sur la glace (Fig. 3.8). Il n'y a pas de neige sous le patin.

3.3.5 Résultats expérimentaux avec les inclusions solides et le SRT

3.3.5.1 Mesures SRT sans rodage préalable des patins

La figure 3.10 permet de comparer les résultats obtenus en chambre froide et sur patinoire, sans rodage de l'éprouvette. Les variations obtenues sur glace *Finlande* ou sur glace *lisse* ne sont

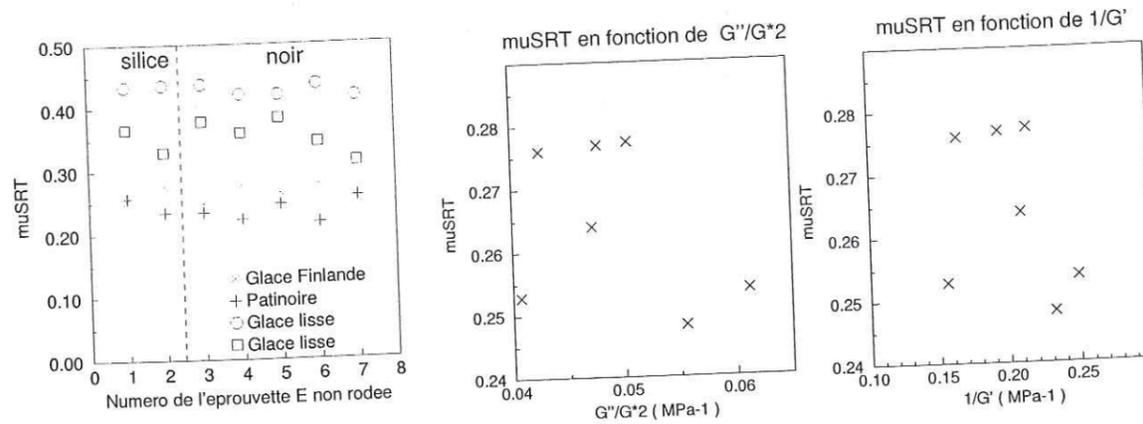


Fig. 3.10 – Mesures sur éprouvettes non rodées en chambre froide à -15°C et en patinoire à -4°C .

Fig. 3.11 – μ_{SRT} sur glace Finlande en fonction des propriétés viscoélastiques à -15°C .

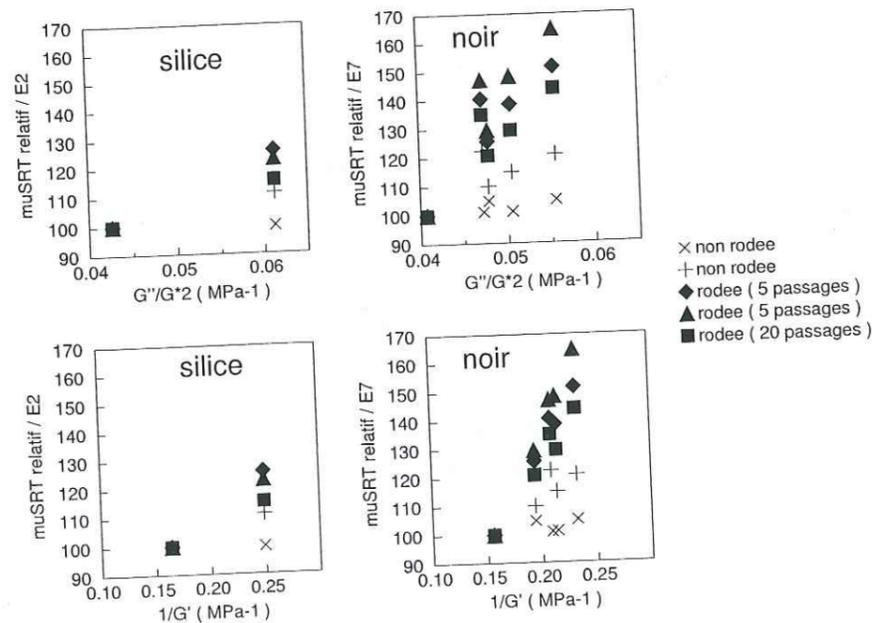


Fig. 3.12 – μ_{SRT} relatif sur glace lisse en fonction des propriétés viscoélastiques à -15°C .

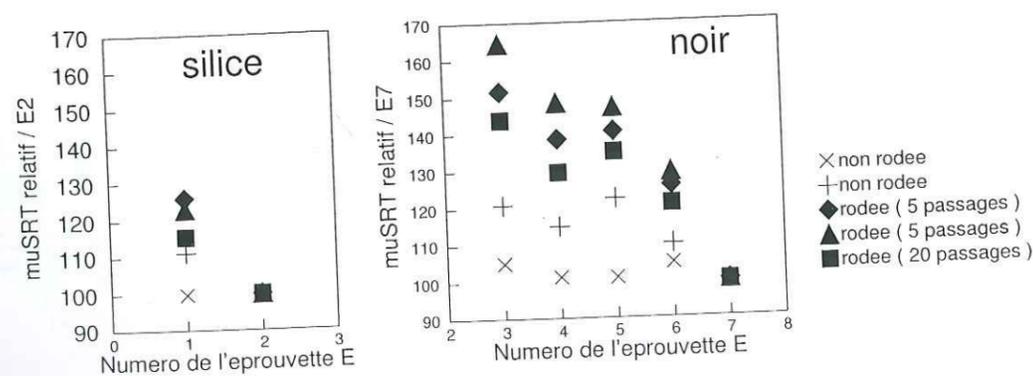


Fig. 3.13 – Mesures de μ_{SRT} sur glace lisse à -15°C .

pas significatives car l'écart relatif entre les valeurs de μ_{SRT} est inférieur à la limite de résolution de la mesure.

Les propriétés viscoélastiques des différentes éprouvettes sont assez semblables et les μ_{SRT} sont trop proches en regard de la limite de résolution de la mesure pour aboutir à une conclusion. Il semble qu'il n'y ait aucune corrélation entre les propriétés viscoélastiques et μ_{SRT} à -15°C sur glace Finlande (Fig. 3.11). Pour les résultats sur glace lisse, le μ_{SRT} relatif augmente très légèrement avec les deux indices viscoélastiques: $1/G'$ et G''/G^{*2} (Fig. 3.12).

3.3.5.2 Mesures SRT après rodage préalable des patins

Un rodage des éprouvettes de gomme par cinq ou vingt passages SRT sur du papier abrasif améliore très fortement le frottement sur glace lisse pour les éprouvettes comportant une forte teneur en inclusions non liées (Fig. 3.13). L'ajout de 10% d'inclusions solides liées augmente le frottement de 25% par rapport au témoin silice E2 (éprouvette E1) et de 45% par rapport au témoin noir E7 (éprouvette E5). Le μ_{SRT} relatif semble augmenter linéairement avec la teneur en inclusions solides liées pour les mélanges au noir de carbone.

Pour les éprouvettes rodées par cinq passages sur du papier abrasif, le μ_{SRT} relatif augmente toujours nettement par rapport au témoin avec une augmentation des deux indices viscoélastiques: $1/G'$ et G''/G^{*2} (Fig. 3.12). Après un rodage par vingt passages sur du papier abrasif, l'augmentation de μ_{SRT} avec $1/G'$ et G''/G^{*2} est étonnamment légèrement moins marquée. Les évolutions de μ_{SRT} après rodage ne dépendent pas simplement de l'aire nominale abrasée: le frottement dépend aussi des propriétés viscoélastiques du matériau qui modifient la surface réelle frottée. Pour chercher une corrélation entre le frottement et la surface frottée, il faudrait pouvoir comparer l'évolution de μ_{SRT} avec la surface réelle frottée et non la surface nominale, afin de bien prendre en compte deux paramètres importants: la variation d'aire réelle frottée due au rodage sur papier abrasif et les propriétés viscoélastiques du matériau. Par ailleurs, μ_{SRT} dépend de la contrainte normale locale, qui dépend elle-même de l'aire de contact réelle: le sabot applique un effort normal de 23 N mais la contrainte normale locale est inconnue.

3.3.6 Conclusion sur les mesures avec les inclusions solides et le SRT

D'après les essais internes Michelin effectués avec des bandes de roulement, l'effet de l'ajout d'inclusions solides révèle trois phénomènes particuliers.

- D'après les essais avec pneus, les inclusions solides n'apparaissent pas en surface et s'éliminent au cours de l'usure de la bande de roulement.
- L'ajout d'inclusions solides augmente fortement l'usure de la bande de roulement.
- L'ajout d'une faible quantité d'inclusions solides de $50\ \mu\text{m}$ diminue G' et augmente G'' des mélanges. Les effets sur le témoin noir sont d'autant plus marqués que les inclusions ne sont pas liées.

Nous avons aussi observé avec les éprouvettes SRT que les inclusions solides ne restent pas en surface, mais nous n'avons pas mis en évidence une usure plus importante pour les mélanges contenant des inclusions solides.

Les conclusions de ces mesures SRT sont à considérer avec circonspection car le rodage ne fournit pas les mêmes surfaces (en termes d'aire nominale de contact et de rugosité) et le nombre d'éprouvettes testées est très restreint. Les trois idées générales observées avec des mélanges

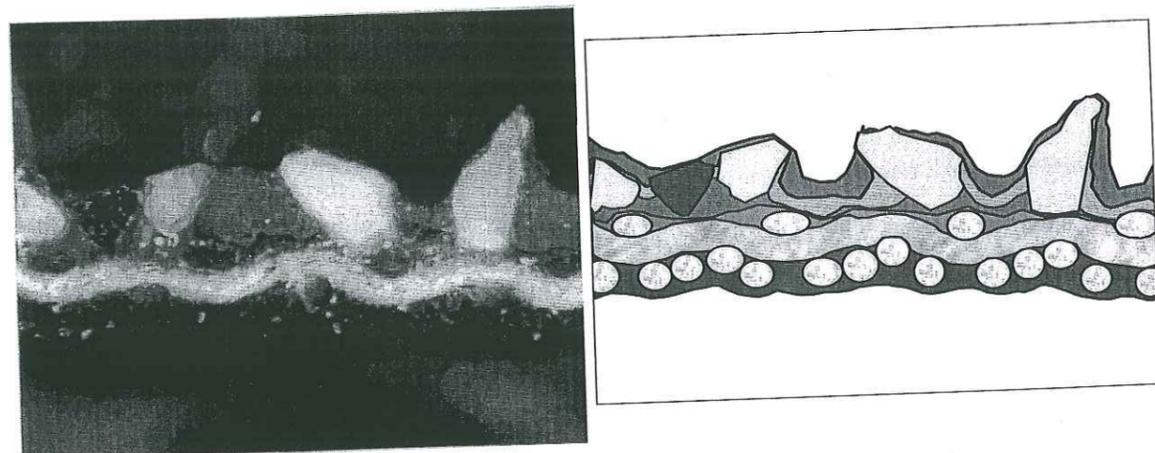


Fig. 3.14 – Section d'abrasif sur toile : vue réelle et vue schématique.

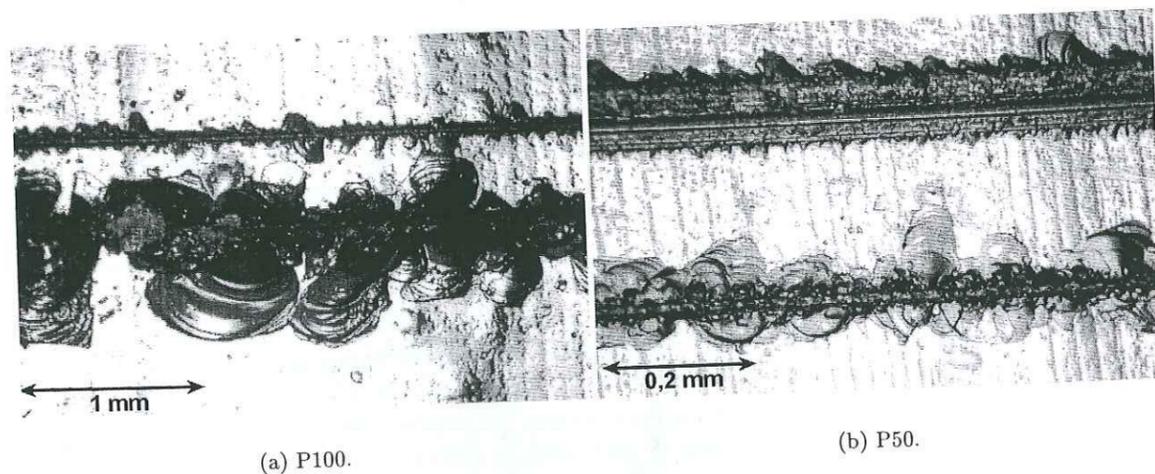


Fig. 3.15 – Traces de grattage voisines et très différentes ; papier abrasif sur la glace avec le pendule SRT à -5°C .

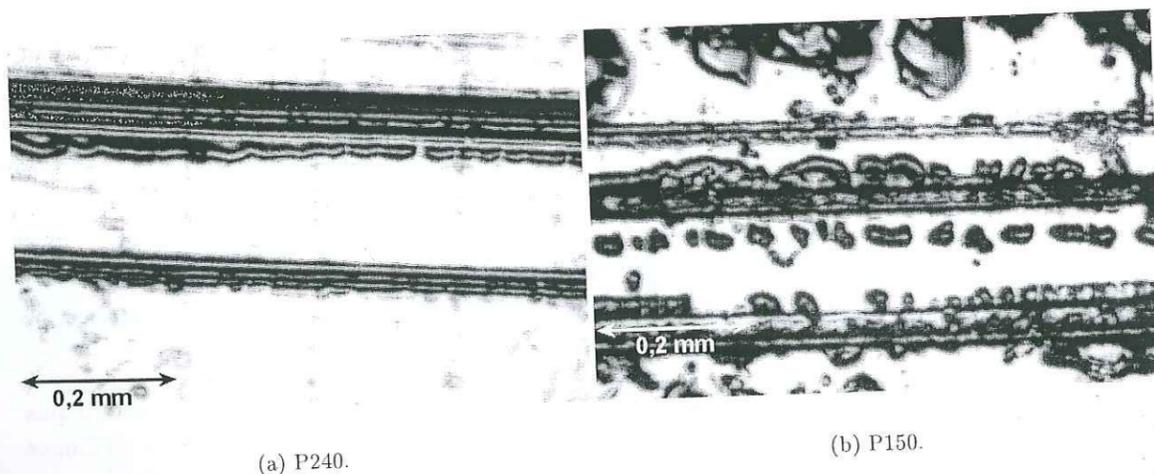


Fig. 3.16 – Traces de grattage avec bourrelet de regel ; papier abrasif sur la glace avec le pendule SRT à -5°C .

contenant des inclusions solides de $50\ \mu\text{m}$ sont les suivantes :

- Aucune trace de grattage n'était visible sur la glace après le frottement des éprouvettes contenant des inclusions solides, rodées ou non.
- Avant rodage, le pendule SRT ne permet pas de détecter d'effet tangible de l'ajout d'inclusions solides sur le frottement sur glace *Finlande* ou *lisse*.
- Après rodage, il semble que l'ajout d'une faible teneur d'inclusions non liées augmente fortement le frottement sur glace. L'ajout d'inclusions liées augmente aussi le frottement sur glace ; l'augmentation étant d'autant plus marquée que la teneur en inclusions est forte.

Le pendule SRT n'est pas le meilleur dispositif pour étudier l'effet d'inclusions solides : l'aire frottée est très faible et les inclusions solides restent invisibles en surface. D'autre part, les résultats obtenus par le pendule SRT mettent plus en évidence l'évolution de μ_{SRT} avec la souplesse du matériau $1/G'$ qu'avec l'hystérèse G'' ou l'état de surface de la gomme (d'après Lenoël (1998)). Ces deux derniers paramètres sont cependant importants pour le frottement sous un pneu.

3.4 Frottement de papiers abrasifs sur la glace avec le SRT

Pour caractériser le grattage de la glace par des aspérités solides de taille plus importante que les inclusions solides utilisées en nous affranchissant des effets viscoélastiques (i.e. afin de n'observer que l'effet de grattage sur la glace), nous avons fait frotter du papier abrasif sur de la glace en utilisant le pendule SRT.

3.4.1 papiers abrasifs utilisés

Les papiers abrasifs utilisés, fabriqués par NORTON ou 3M, vont du grade P50, P100, P150 au P240, du grain le plus épais au plus fin. Les dimensions nominales des grains, autour desquelles il existe en réalité une dispersion contrôlée sont respectivement 348 , 157 , 96 et $52\ \mu\text{m}$. Les dépôts de grains sont variables : la distribution est théoriquement monocouche, mais s'étale en fait de très espacée à très serrée. Il n'existe aucun moyen simple de caractériser la distribution des grains sur la surface des papiers utilisés.

La figure 3.14, fournie par les fabricants, montre la grande irrégularité de distribution et de positionnement des grains à la surface du papier abrasif. Les grains sont obtenus par broyage et leur forme est irrégulière et allongée. Le dépôt des grains sur le support par procédé électrostatique tend à les orienter lors du collage. Les sommets des indenteurs ont des altitudes très différentes donc les grains ne sont pas tous en contact simultané avec la glace. Leur pouvoir de coupe dépend aussi beaucoup des arêtes de fractures initiales.

Les papiers abrasifs P150 et P240 ont des particules en oxyde d'aluminium, dont les arêtes sont arrondies. Ce sont des abrasifs appliqués ouverts : le taux de couverture de la surface va de 40 à 70 %. Pour le P50, les particules sont en carbure de silicium, d'arêtes plus aiguës, plus longues et plus fines. C'est un abrasif appliqué fermé : toute la surface est recouverte de grains.

3.4.2 Protocole expérimental avec les papiers abrasifs et le SRT

Les différents papiers abrasifs sont collés sur l'arête d'une éprouvette de gomme dure, afin que le support n'influence pas les valeurs de μ_{SRT} obtenues. La surface de glace est fraisée au moins 24 heures avant l'essai et sublimée dans la chambre froide à -10°C à l'abri du vent. Pour

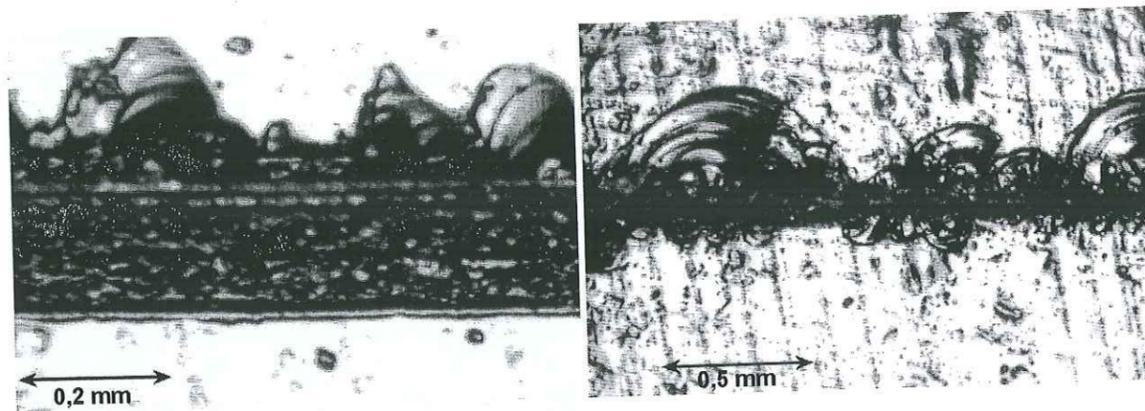
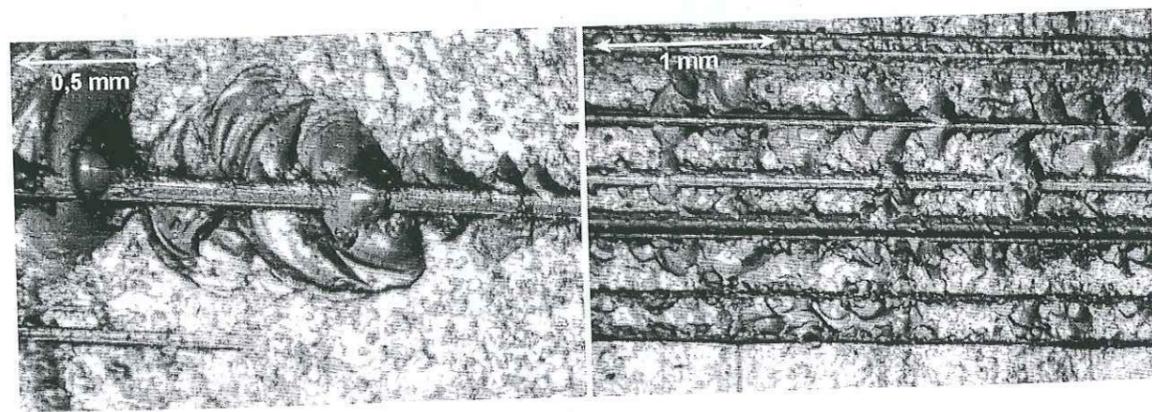


Fig. 3.17 - Traces de grattage à bords mixtes; papier abrasif P100 sur la glace avec le pendule SRT à -5°C .



(a) P50, -20°C .

(b) P100, -25°C .

Fig. 3.18 - Traces de grattage écaillées; papier abrasif sur la glace avec le pendule SRT.

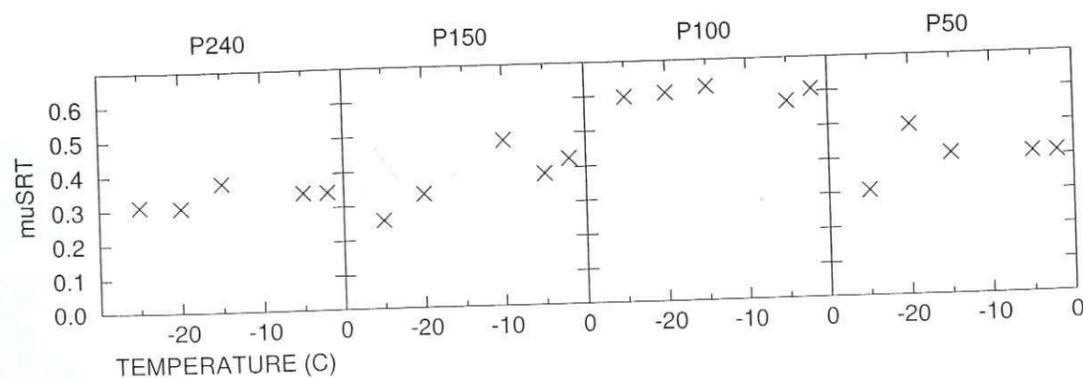


Fig. 3.19 - Evolution de μ_{SRT} en fonction de la température pour les différents papiers abrasifs.

chaque papier abrasif, un unique passage du pendule est effectué, puis la surface de la glace est observée.

Les conditions de frottement dépendent de nombreux paramètres, identifiés mais non quantifiables: nombre de grains; taille, forme, arêtes et matière des grains; surface réelle frottée; contrainte normale nominale à l'interface; profondeur de glace atteinte; sauts du patin; etc.

3.4.3 Observations avec les papiers abrasifs et le SRT

3.4.3.1 Irrégularités du grattage

Deux grains voisins du papier abrasif peuvent avoir des effets très différents sur la surface de glace (Fig. 3.15). Sur la figure 3.15(a), la trace du haut est peu profonde et légèrement écaillée alors que celle du bas est très large, très écaillée et semble profonde. La taille moyenne des grains du papier abrasif P100 est 0,16 mm, alors que la strie du haut est large de 0,1 mm et celle du bas large de 0,4 mm. Sur la figure 3.15(b), la strie supérieure, très large et peu profonde, a pu être causée par un gros grain à bords assez lisses et assez plat; alors que la strie inférieure, plus profonde, beaucoup moins large et beaucoup plus écaillée, provient sans doute d'un grain aux bords plus anguleux. Ceci prouve bien que la taille moyenne des grains n'est qu'un indicateur et qu'il faudrait considérer la taille réelle de chaque indenteur, son altitude d'implantation et la nature de ses arêtes pour évaluer son pouvoir de coupe. Seule une aire de contact assez importante permettrait d'avoir des résultats statistiquement représentatifs.

3.4.3.2 Bourrelets de regel

Des bourrelets de regel apparaissent le long des rainures sous n'importe quelle condition opératoire: basse température (-25°C) et gros grains (P50) ou haute température (-5°C) et grains fins (P240). Ils se généralisent pour de petits indenteurs à température proche de celle du point de fusion (Fig. 3.16(a)).

Les bourrelets de regel peuvent avoir deux origines. Soit des copeaux de glace sont repoussés sur les côtés lors du grattage puis regèlent en formant un fin bourrelet. Soit de l'eau est formée sous les indenteurs et est ensuite expulsée sur les bords où elle regèle.

La figure 3.16(b) illustre un autre cas de dépôt de matière, qui correspond souvent à une température élevée. Des cristaux de neige sont déposés à intervalles réguliers sur les bords des rainures. Ce pourrait être de la glace fondue qui regèle sous forme de gouttelettes espacées afin de minimiser au mieux l'énergie de surface dans la durée disponible avant le regel total: la quantité d'eau étant très faible, elle regèle quasiment sur place et n'a pas le temps de migrer pour former une unique goutte de grand rayon. Mais l'observation à la loupe binoculaire conduit plutôt à supposer que ce sont des copeaux de glace arrachés par l'indenteur: ils fondent un peu et regèlent sous une forme plus sphérique que lors de l'arrachement.

3.4.3.3 Bords de rayure mixtes

Les deux bords d'une même rainure peuvent être très différents sur la longueur totale des 127 mm du contact (Fig. 3.17). Ceci ne s'explique pas par des contraintes résiduelles dans la glace qui lui confèreraient un comportement fragile ou ductile selon la localisation à la surface du bloc. En effet, le comportement mécanique de la glace est éventuellement différent selon l'orientation du grain (faible anisotropie élastique), mais pas sur une longueur inférieure à la taille du grain. L'explication la plus probable provient des géométries variées des grains du papier

abrasif. Certains grains sont sphériques mais la plupart sont très anguleux. L'impact d'un grain anguleux sur la surface de glace dépend de l'orientation des facettes par rapport à la direction du mouvement. Un grain à géométrie ronde d'un côté et anguleuse de l'autre peut produire simultanément des bourrelets de regel et d'importants écaillages.

3.4.3.4 Bords de rayures écaillés

Les écaillages des bords de rainures sont courants pour des sollicitations très contraignantes, i.e. des températures basses et de gros indenteurs (Fig. 3.18). Ils apparaissent cependant parfois pour des sollicitations beaucoup moins agressives, comme du papier abrasif fin à température élevée. Une fine strie peut s'accompagner d'écaillages sur une grande surface au bord de la trace : par exemple, la strie de 0,1 mm de large sur la photo 3.18(a) présente des écailles de glace de 0,5 mm de diamètre.

Le papier abrasif P100 provoque des rainures écaillées à -15°C mais pas à température plus élevée. Les papiers abrasifs P240 et P150 écaillent très peu la glace. Le papier abrasif P50 écaille la surface à toutes les températures : on pourrait penser que les gros grains sont plus espacés donc l'aire de contact réelle est plus petite et la contrainte normale locale est plus élevée, mais les différences observées ne semblent pas être liées simplement à la taille moyenne des indenteurs. Elles proviennent sûrement du fait que certains grains sont plus agressifs que d'autres. En effet, les papiers abrasifs P150 et P240 sont formés de particules assez rondes alors que le P50 a des grains à arêtes plus aiguës.

3.4.4 Résultats expérimentaux avec les papiers abrasifs et le SRT

Les évolutions de μ_{SRT} en fonction de la température pour les différents papiers abrasifs (Fig. 3.19) et les observations qualitatives amènent les remarques suivantes :

- Le papier abrasif P50 ne touche jamais uniformément la surface de glace. Souvent, un seul côté du patin frotte. Ses résultats de μ_{SRT} ne sont donc pas fiables. La très faible valeur de μ_{SRT} est due au petit nombre d'indenteurs.
- Le papier abrasif P100 semble beaucoup sauter sur la surface à toutes températures. Sans doute est-ce un type de grain très agressif ? La question est de savoir si ces rebonds sont dus à la forme ou à la taille des grains.
- μ_{SRT} augmente avec la taille de grain : le papier abrasif P100 frotte plus que le P150, lui-même plus que le P240. Cependant, l'aire de contact réelle est certainement plus faible avec des papiers abrasifs épais : en effet, bien que le P100 ait des grains plus gros que le P240, le nombre de grains en contact est tellement plus faible que la surface réelle frottée peut être plus petite et la contrainte normale locale plus élevée. Ainsi, pour avoir μ élevé, il semble plus intéressant d'attaquer la glace avec de gros indenteurs qu'avec de nombreux petits indenteurs.
- Le niveau de μ_{SRT} semble très peu influencé par la température de manipulation. La vitesse étant élevée, la sollicitation resterait dans le domaine fragile de la glace. En revanche, l'observation de la glace à la loupe binoculaire a mis en évidence des différences d'attaque selon la température.

3.4.5 Conclusion sur les mesures avec les papiers abrasifs et le SRT

Les remarques qualitatives sur l'observation de la surface de glace après passage du papier abrasif sont les suivantes :

- Des débris de glace restent dans les rainures creusées par les abrasifs du papier abrasif.
- Les bords des rainures ont un aspect différent selon les conditions de sollicitation.
 - Sur glace chaude, les bords sont lisses et souvent encadrés de fins bourrelets de regel, comme si la glace était ductile. L'indenteur a arraché des particules de glace qui fondent à cause de la chaleur dissipée par le frottement. L'eau est repoussée sur les bords et regèle.
 - Au contraire, sur glace froide, les bords des rainures sont souvent très écaillés car la glace est plus fragile.
 - Le papier abrasif épais P50 semble générer plus d'écaillage que les plus fins. Cependant, il est très difficile de conclure précisément car le pouvoir de coupe dépend beaucoup du type de grain et de la forme de ses arêtes d'attaque.
- Il semble que l'atterrissage du patin se fasse plus en douceur à température proche de 0°C . Le patin a tendance à effectuer des sauts plus longs et plus nombreux à basse température.
- Il est très difficile de considérer l'effet global de l'attaque d'un type de papier abrasif. L'effet sur la glace est très variable selon l'enfoncement du grain dans le support et le grattage d'un grain est toujours complètement différent de celui des voisins. Les grains qui effleurent juste la surface donnent des bourrelets de regel quasiment à toutes les températures. Au contraire, les grains qui s'enfoncent beaucoup, quelle que soit leur taille, écaillent en général la surface.

Nous pouvons essayer de dégager certaines tendances concernant le grattage de grains du papier abrasif de dimensions entre 50 et $350\ \mu\text{m}$.

- A surface frottée nominale égale, un petit nombre de gros grains frotte plus qu'un grand nombre de petits grains.
- Les gros indenteurs ont tendance à écailler la surface, alors que les petits ont tendance à former des bourrelets de regel.
- Un frottement élevé est plutôt accompagné d'écaillage de la glace que de fonte de la glace sur les bords des rainures.
- Sous l'effet des indenteurs, la surface fond plus facilement à haute température (-5°C) qu'à basse température (-25°C). La quantité de chaleur nécessaire pour atteindre le point de fusion est moindre.
- Dans les conditions de manipulation, μ_{SRT} est indépendant de la température.

Notons que l'ordre de grandeur de μ_{SRT} est le même pour les éprouvettes d'élastomère ou le papier abrasif. Ceci met en évidence la qualité des formulations, qui permettent d'obtenir un frottement aussi important qu'avec des indenteurs.

Chapitre 4

Etude du grattage de la glace avec la piste rectiligne

4.1 Présentation du dispositif expérimental ¹

4.1.1 Principe de la mesure avec la piste rectiligne

Afin d'obtenir des renseignements plus précis sur le grattage de la glace, un nouveau dispositif expérimental a été conçu, qui consiste en un pendule permettant de lancer un patin supporté par quatre frotteurs sur une piste de glace (Fig. 4.1). La piste est formée de deux rails de 90 mm de large et 45 mm de haut, écartés de 50 mm, et la limitation de sa longueur totale à 2,4 m est imposée par les dimensions de la chambre froide. Le pendule utilisé pour lancer le patin est composé d'une tige filetée portant des cylindres d'acier pour augmenter l'inertie et d'un marteau. Un système simple, visible à droite de la photo 4.1, permet de connaître l'angle de remontée du marteau après le choc sur le patin.

Pour le démarrage, le patin est placé sur deux barres en Téflon d'un support élévateur afin que le frottement soit faible au décollage (Fig. 4.2). Le réglage en hauteur et en horizontalité permet d'éviter toute adhésion ou même grattage des frotteurs avant la manipulation.

Les quatre frotteurs portés par le patin peuvent être constitués de clous ou de papiers abrasifs. Les deux frotteurs avant sont plus rapprochés que les deux autres placés à l'arrière afin d'obtenir quatre traces distinctes : les clous passent ainsi toujours sur la glace neuve (Fig. 4.2). Le nombre variable de masses en acier sur le patin permet de faire évoluer la contrainte normale sous les indenteurs. Deux baguettes en Téflon placées des deux côtés de l'élément médian du patin assurent son guidage. Un organe élastique repousse ces deux baguettes vers les deux faces internes des deux rails de glace, sur lesquelles un spray Téflon est vaporisé afin de limiter les frottements. Le patin porte un circuit électronique qui allume deux diodes à forte luminosité et à faible angle de diffusion. Ces deux diodes (Fig. 4.2), sont situées dans le plan vertical décrit par l'indenteur arrière gauche. Le circuit assure une fréquence d'allumage constante et différente pour chacune des diodes (environ 30 Hz pour la diode du haut et 60 Hz pour celle du bas). Une troisième diode, située juste au-dessus de l'indenteur arrière gauche, reste allumée en permanence et permet d'évaluer les mouvements verticaux du patin. Un accéléromètre est fixé parallèlement à l'axe du patin (Fig. 4.2). Son câble d'alimentation et d'acquisition est accroché au plafond afin de ne pas entraver les mouvements du patin.

Un profil en U en aluminium, équipé de fibres optiques en PMMA implantées à des distances

1. Le détail des protocoles expérimentaux, des observations qualitatives et des résultats quantitatifs obtenus avec ce banc de test est décrit dans un rapport interne (Déloye, 2000b).

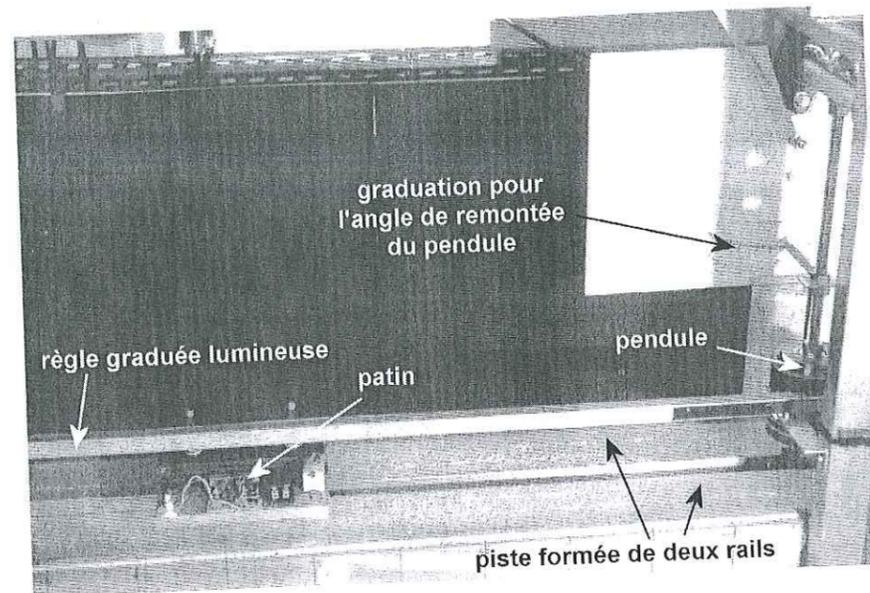


Fig. 4.1 - Vue générale de la piste de glace et du patin après un lancer.

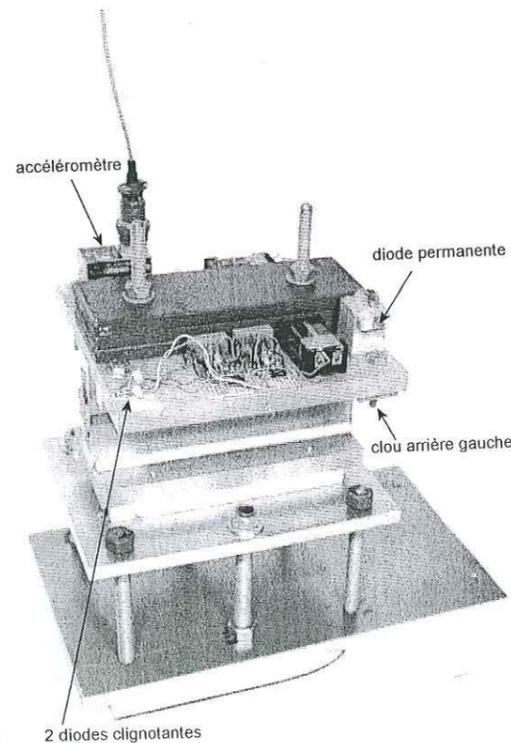


Fig. 4.2 - Patin placé sur l'élevateur utilisé pour le démarrage.

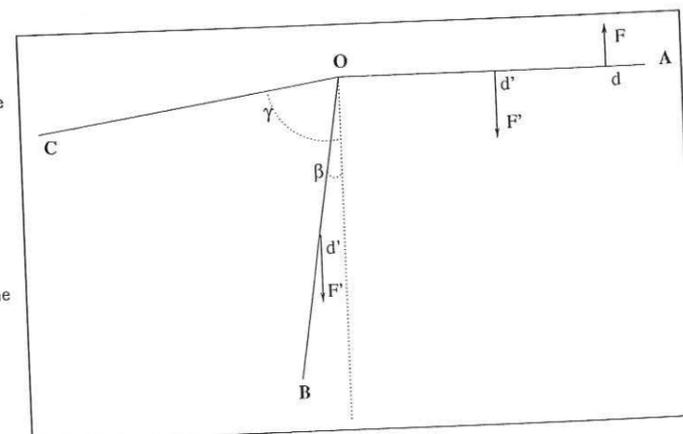


Fig. 4.3 - Schéma du pendule et notations utilisées.

connues, sert de règle graduée lumineuse sur toute la longueur de la piste (Fig. 4.1). Nous disposons ainsi d'une règle lumineuse de 30 points espacés de 1 cm pour le début du parcours, puis espacés de 5 cm pour la fin de la piste. La règle est placée à l'horizontale dans le plan vertical parcouru par l'indenteur arrière gauche. La position et la vitesse du patin peuvent être évaluées lors de chaque allumage des diodes lumineuses d'après des photos du parcours prises en longue pose, la chambre froide étant plongée dans l'obscurité.

4.1.2 Caractéristiques de l'appareillage

La piste fait 2,3 m de longueur utile. Le patin support des quatre frotteurs est en aluminium et pèse entre 4 et 12 kg.

A l'équilibre dans la position OA , un dynamomètre placé à une distance d connue sur l'axe de rotation du pendule mesure une force F (Fig. 4.3). Ceci permet d'accéder au produit du poids F' du pendule par la distance d' de l'axe de rotation au centre de gravité du pendule. D'après la nullité de la somme des moments au point O : $Fd - F'd' = 0$. En position OA , le pendule a une énergie potentielle disponible de 25,7 J.

L'estimation du frottement à vide est obtenue en relevant l'angle γ de remontée du pendule sans choc sur le patin: quelle que soit la température de la chambre froide, $\gamma = 88^\circ$. Ceci représente une dissipation d'énergie par frottement des organes de la machine $\Delta W_1 = F'd' \cos \gamma = Fd \cos \gamma$. Le couple de frottement à vide C_f est estimé par $C_f = Fd \cos \gamma / (\gamma + \pi/2) \approx 9.10^{-2} \text{ mJ.rad}^{-1}$.

Quand le marteau a frappé sur le patin, l'angle de remontée β maximum du pendule est mesuré. La perte d'énergie dans le choc marteau / patin est

$$\Delta W_2 = Fdg \cos \beta - C_f \left(\beta + \frac{\pi}{2} \right), \text{ soit } \Delta W_2 = Fdg \left(\cos \beta - \frac{\beta + \frac{\pi}{2}}{\gamma + \frac{\pi}{2}} \cos \gamma \right). \quad (4.1)$$

où $g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$ est l'accélération de la pesanteur.

En supposant le choc élastique, l'énergie totale du système est conservée après le choc. L'énergie cinétique du patin au démarrage serait donc égale à l'énergie perdue par le marteau ΔW_2 . Sous cette hypothèse et en notant M la masse du patin, la vitesse théorique V de démarrage du patin est

$$V = \sqrt{\frac{2Fdg}{M} \left(\cos \beta - \frac{\beta + \frac{\pi}{2}}{\gamma + \frac{\pi}{2}} \cos \gamma \right)}. \quad (4.2)$$

Puisqu'en moyenne, l'angle β vaut 5° , la vitesse théorique de démarrage du patin donnée par (4.2) varie en fonction de sa masse entre 3,5 m/s pour 4 kg et 2,1 m/s pour 12 kg.

F_n désigne l'effort normal sur les quatre frotteurs. Les contraintes normales nominales σ_n sous les différents frotteurs sont calculées d'après l'aire de contact nominale A_n . Pour une charge de 4 à 12,5 kg, σ_n varie de 0,20 à 0,64 bar pour une surface de 19,2 cm² et de 0,61 à 1,91 bar pour une surface de 6,4 cm². Nous pouvons ainsi recouper les résultats obtenus pour un même σ_n mais avec différents A_n .

4.1.3 Conditions de test avec la piste rectiligne

Les résultats expérimentaux ont été obtenus dans une gamme $T_0 V \sigma_n$ différente de celle correspondant aux conditions sous un pneu clouté.

- Sous un pneu, l'effort normal moyen sur un clou est de 15 daN (Laulusa, 1998). Ici, l'effort normal sur un clou varie de 0,9 à 2,7 daN.

- La vitesse maximale du patin au démarrage est 3,5 m/s, soit environ 12 km/h. Ceci est assez faible mais nous sommes limités par les contraintes expérimentales de dimensionnement tenant compte de la surface de la chambre froide et de la sécurité lors des lancers.
- La température de la chambre froide varie entre -20 et -5 °C, alors que les pneus sont utilisés jusqu'à -40 °C dans les pays scandinaves et à température positive au sud de l'Europe (notons que les conditions les plus dangereuses pour les automobilistes sur chaussée verglacée sont celles où la température est négative et très proche de T_f).
- La fixation des clous est rigide afin de s'affranchir des nombreux paramètres intervenant sur la capacité d'adhérence du pneu clouté (Anttila, 1980) : les facteurs pneus et les facteurs clous. Ces facteurs, éliminés dans notre banc de test, influencent fortement deux propriétés essentielles au bon freinage du clou sur la glace en conditions réelles : la non-renversibilité du clou et la pénétration du clou dans la glace (cf. Fig. 3.1).

4.2 Protocole expérimental avec la piste rectiligne

4.2.1 Préparation des essais avec la piste rectiligne

Pour fabriquer les deux pistes de glace, de l'eau du robinet est versée sur de la neige tassée. La glace de surface est toujours fabriquée de la même façon, dans la chambre froide à la température de l'essai : après élimination des traces du passage précédent par fonte de la surface avec un décapeur thermique, quelques millimètres d'eau du robinet à environ 5 °C sont ensuite ajoutés. Quand la surface est gelée, la glace est raclée manuellement avec un rabot en acier guidé sur deux réglettes fixées sur les bords extérieurs des deux pistes afin d'assurer la planéité de la piste. L'état de surface de la glace n'est pas parfait car il reste des traces de raclage, mais il est suffisant pour les conditions expérimentales utilisées ici : les rugosités de la surface sont bien plus faibles que la taille des indenteurs. Plusieurs mesures effectuées dans les mêmes conditions expérimentales avec des pistes différentes restent très proches, indiquant une assez bonne reproductibilité.

Le patin est placé en chambre froide au moins une demi-heure avant les mesures, pour que les frotteurs soient à la température ambiante. Le circuit électronique embarqué sur le patin est branché quelques minutes avant d'effectuer les mesures afin que l'état des composants électriques soit stationnaire et que la fréquence des diodes soit stabilisée. Avant tout lancer, la surface de la piste est époussetée afin d'éliminer les copeaux de glace qui pourraient s'accrocher sous les patins recouverts de papier abrasif. Un spray Téflon est vaporisé sur les deux faces internes des deux pistes de glace afin de limiter les frottements latéraux du patin. Le patin est placé sur son support horizontal pour le surélever légèrement par rapport au niveau de la glace.

La rampe lumineuse de fibres optiques servant de réglette est placée horizontalement. Un fond noir est placé verticalement derrière la piste et la lumière de la chambre froide est éteinte afin d'obtenir une bonne qualité de prise de vue des diodes lors du déplacement du patin.

Avant de lâcher le marteau, la prise de vue est déclenchée (le marteau est bien lâché de l'horizontale grâce à un repère de butée). La distance parcourue par le patin est relevée. La surface de la piste de glace est observée qualitativement à l'oeil nu et la loupe binoculaire utilisée en réflexion permet de prendre des clichés des traces de grattage.

Le coefficient de frottement peut être évalué quantitativement de trois façons indépendantes. Le coefficient de frottement intégré $\mu_{intégré}$ est évalué d'après la distance parcourue par le patin en supposant le choc élastique. Le coefficient de frottement moyen μ_{moyen} est déterminé d'après la distance parcourue par le patin et une mesure de la vitesse de démarrage. Le coefficient de frottement instantané $\mu_{instantané}$ est obtenu par une mesure accélérométrique directe grâce à l'accéléromètre embarqué.

4.2.2 Essais avec du papier abrasif sur la piste rectiligne

Les papiers abrasifs sont ceux utilisés avec le pendule SRT (cf. § 3.4.1). Afin d'observer un effet éventuel de la contrainte normale nominale, le papier abrasif est collé sous quatre patins de surface frottante $3 \times 1,6 \text{ cm}^2$ ou $1 \times 1,6 \text{ cm}^2$.

Les lancers successifs du patin sont effectués en modifiant la charge embarquée sur le patin. La piste est toujours raclée entre deux passages afin d'éliminer les traces de grattage laissées par le papier abrasif au cours de l'essai précédent. Pour pouvoir vérifier la cohérence des mesures, nous passons dans l'ordre les masses de 4, 7,3, 9,4, 12,5, 11,5, 10,4, 8,3 puis 6,2 kg.

4.2.3 Essais avec des clous sur la piste rectiligne

Les clous vissés sous les quatre frotteurs sont de type 8-11-1 en acier (diamètre de collerette-hauteur - nombre de collerettes). La saillie d'un clou est de diamètre 2 mm et de surface sphérique. Le diamètre du corps cylindrique d'un clou est de 5 mm.

La piste de glace est refaite avant chaque essai car elle a été détériorée sur une profondeur assez importante, d'environ 1 mm, par l'essai précédent et de très nombreuses micro-fissures, plus ou moins longues, entourent la trace de grattage. Pour restaurer la piste de glace après chaque mesure, la surface est chauffée avec un décapeur thermique jusqu'à disparition des traces laissées par les clous. Nous laissons regeler, puis raclons pour obtenir une piste lisse.

4.3 Trois coefficients de frottement différents obtenus avec la piste rectiligne

4.3.1 Coefficient de frottement intégré, $\mu_{intégré}$

4.3.1.1 Principe de la mesure de $\mu_{intégré}$

Par hypothèse, toute l'énergie cinétique du patin est consommée en frottement entre son démarrage et son arrêt à la distance D du point de départ. La vitesse théorique de démarrage V est donnée par (4.2). En supposant que la seule force qui travaille est l'effort tangentiel F_t et qu'elle est constante, la perte d'énergie du patin lors du parcours est $\Delta W = F_t D = (1/2) M V^2$.

$\mu_{intégré}$ est calculé comme le quotient de l'effort tangentiel par l'effort normal,

$$\mu_{intégré} = \frac{F_t}{Mg} = \frac{1}{2} \frac{V^2}{gD}, \quad (4.3)$$

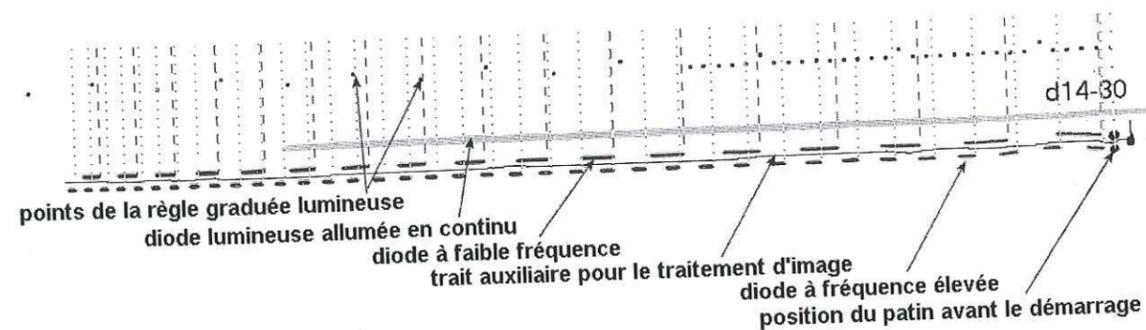
soit d'après (4.1) et (4.2) :

$$\mu_{intégré} = \frac{Fd}{MD} \left(\cos \beta - \frac{(\beta + \frac{\pi}{2})}{(\gamma + \frac{\pi}{2})} \cos \gamma \right). \quad (4.4)$$

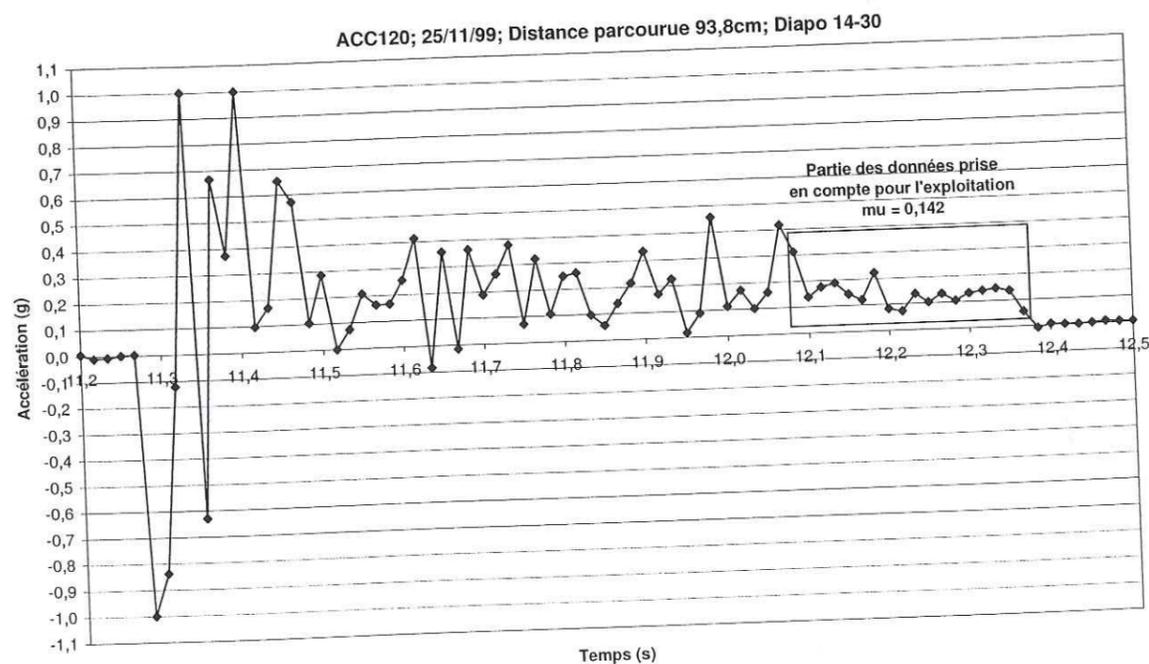
4.3.1.2 Hypothèses utilisées pour obtenir $\mu_{intégré}$

Les hypothèses utilisées pour aboutir à cette formule sont les suivantes :

- Le pendule et le banc de mesure sont un environnement neutre.
- En réalité, le bras du pendule n'est pas un solide rigide et se déforme légèrement. Les



(a) Traitement d'images sur la photo du déplacement du patin.



(b) Mesure par accéléromètre.

Fig. 4.4 - Premier lancer du patin de 7,4 kg porté par quatre clous, -5°C .

masses placées pour l'alourdir semblent vibrer entre elles après le choc, malgré les disques amortisseurs les séparant. Le comportement du banc de mesure est loin d'être parfait car il vibre assez longtemps après le choc du marteau sur le patin.

- Le choc est élastique.

Ceci est une hypothèse assez forte qui n'est pas forcément vérifiée. Le bras du pendule ne semble pas assez rigide et vibre un peu après le choc. Après de nombreuses manipulations, la cible en acier portée par le patin montre de petites traces de déformation plastique dues à la vis placée en tête du marteau.

- Les quatre patins freinent de la même manière.

En fait, la surface de la piste n'est pas parfaitement plane et l'un des quatre frotteurs peut parfois survoler la glace sur une très courte distance.

- L'énergie dépensée entre le démarrage et l'arrêt du patin est dissipée uniquement par frottement.

En réalité, le patin ne suit pas un mouvement parfaitement rectiligne horizontal. D'une part, il effectue des ricochets verticaux sur la piste de glace. D'autre part, les traces de grattage des clous peuvent être légèrement sinueuses, malgré les deux baguettes Téflon qui guident le patin.

- Le coefficient de frottement est indépendant de la vitesse et de l'aire frottée.

4.3.1.3 Incertitude sur $\mu_{\text{intégré}}$ due aux mesures

En supposant que les hypothèses conduisant à (4.4) sont vérifiées, l'incertitude sur la valeur de $\mu_{\text{intégré}}$ due uniquement à la mesure est estimée en prenant les valeurs les plus défavorables : $\Delta F/F \approx 0.1/5 = 0,02$, $\Delta d/d \approx 0,1/53 = 0,002$, $\Delta M/M \approx 10/4000 = 0,003$ et $\Delta D/D \approx 0,5/100 = 0,005$. Avec une incertitude d'évaluation des angles à 0.5° près, l'incertitude relative due au terme angulaire reste inférieure à 1%. L'incertitude relative sur $\mu_{\text{intégré}}$ due aux erreurs de mesure est donc très faible, de l'ordre de 2%.

4.3.2 Coefficient de frottement moyen, μ_{moyen}

4.3.2.1 Circuit électronique embarqué sur le patin

Nous voulons nous affranchir de deux des hypothèses utilisées pour calculer $\mu_{\text{intégré}}$. D'une part, il faut mesurer la vitesse initiale pour connaître exactement l'énergie transmise au patin. D'autre part, pour vérifier si l'effort tangentiel est indépendant de la vitesse, il suffirait de connaître la vitesse en plusieurs points au cours du déplacement. Il serait ainsi possible d'accéder au coefficient de frottement moyen pour une plage de vitesse définie.

Nous avons donc photographié en longue pose des diodes lumineuses à fréquences connues embarquées sur le patin. Grâce au traitement d'images, les erreurs de lecture sur les positions successives du patin sont limitées.

Le traitement d'images permet de connaître la position du patin à chaque allumage successif des diodes. La rampe lumineuse formée par des fibres optiques donne l'échelle de longueur pour l'exploitation des photos. Les repères proches de 1 cm au début de la rampe lumineuse permettent une évaluation très précise des vitesses au début du parcours. Pour exploiter chaque photo, la position de chaque début de trait formé par le déplacement des diodes est évaluée et calée par rapport à la rampe lumineuse. Le début de la prise de vue est antérieur au démarrage du patin. Les disques lumineux formés par les diodes à l'arrêt sont pris comme points de référence.

Les fréquences d'allumage des diodes, environ 30 et 60 Hz, sont vérifiées assez souvent au fréquencemètre car elles dépendent de nombreux facteurs qui peuvent évoluer rapidement : la

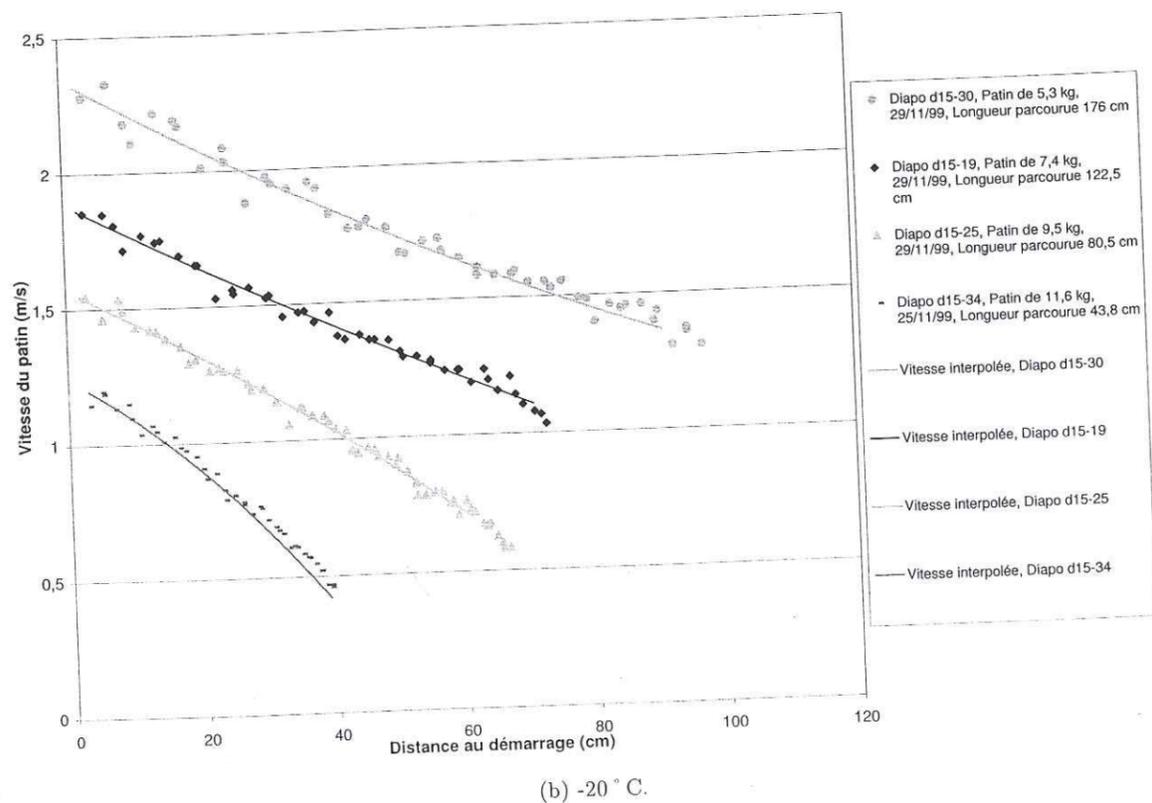
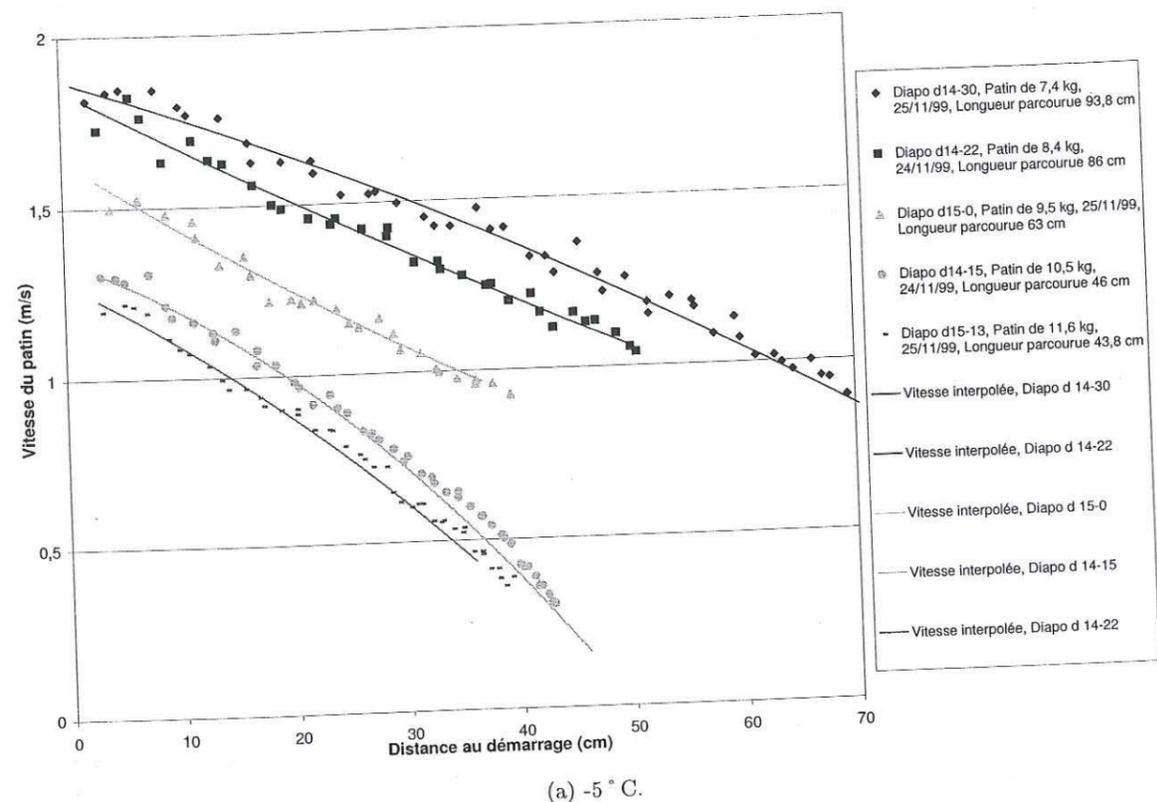


Fig. 4.5 - Diminution de la vitesse en fonction de la distance parcourue, premier lancer.

température, l'état d'usure de la pile et le chauffage par effet Joule des composants du circuit électrique. Par exemple, les fréquences augmentent de quelques centièmes de hertz après 15 min de chauffe. Pour les calculs, nous prenons une fréquence au dixième de hertz près, valeur considérée comme exacte à 3 % près dans le cas le plus défavorable.

4.3.2.2 Principe du traitement d'images

Le logiciel de traitement d'images, IPS 4.01 conçu par Alcatel TITN Answare, est assez limité en puissance, rapidité et fonctionnalités, mais suffisant pour notre application. Après le traitement d'image, le déplacement des diodes a l'allure de la photo 4.4(a). Le patin a parcouru l'image de la droite vers la gauche. En haut, les points de repère sont formés par la rampe lumineuse à fibres optiques. Au milieu de l'image, le trait continu formé par la diode lumineuse embarquée allumée en continu permet d'évaluer les oscillations verticales du patin au cours du déplacement. Plus bas, les longs traits discontinus sont créés par la diode à plus faible fréquence. Le disque lumineux à droite est formé par le patin au repos et sera le point de démarrage. Plus bas encore, un trait continu a dû être ajouté manuellement à l'image pour permettre la distinction entre les traits formés par les deux diodes lors du traitement d'images. Enfin, en bas, les courts traits discontinus sont créés par la diode à plus grande fréquence d'allumage. Lors du déplacement du patin de la droite vers la gauche, les traits sont de plus en plus courts et se rapprochent puisque le patin ralentit.

Le traitement d'image fournit, pour chaque diode, la position du début de chaque trait par rapport au point de départ. Des traits verticaux distinctifs sont tracés sur l'image pour chacun des points correspondant à l'allumage des diodes et un pixel blanc est placé au centre de chacun des points de la rampe lumineuse. Ceci permet une vérification visuelle très rapide des résultats, pour savoir si tous les objets de la photo ont bien été détectés et pris en compte de la bonne façon. Ceci permet aussi de vérifier très rapidement les positions du patin calculées par le code.

4.3.2.3 Exploitation des résultats obtenus par le traitement d'images

Afin d'exploiter au mieux les données brutes ainsi obtenues, des routines ont été écrites pour systématiser l'exploitation et la rendre plus fiable. Pour chacune des diodes, la vitesse horizontale moyenne entre deux points de positionnement est calculée comme le produit de la fréquence de la diode par la distance parcourue entre ces deux points. Cette vitesse est associée au point de positionnement médian des deux points considérés. En regroupant les données obtenues par les deux diodes, nous obtenons une distribution discrète des vitesses instantanées du patin en fonction de la distance parcourue. Les résultats d'essais effectués à -5 et -20°C sont donnés sur la figure 4.5. La première série de la figure 4.5(a) correspond au traitement de l'image 4.4(a).

Les résultats relatifs à chacune des diodes sont toujours cohérents, ce qui souligne la bonne qualité de la mesure de vitesse instantanée. Nous avons tenté d'exploiter ces points discrets, en calculant le coefficient de frottement instantané par le théorème de l'énergie cinétique sur deux points consécutifs, sans succès malheureusement : cela donnait des coefficients de frottement absurdes, avec des fluctuations pouvant aller de -3 à $+3$! En essayant de calculer des coefficients de frottement sur des périodes successives de longue durée (i.e. plusieurs périodes d'allumage des diodes), les résultats étaient plus lissés mais donnaient toujours des fluctuations originales... En fait, les mesures de vitesse instantanées semblent subir des fluctuations assez importantes. Ceci est dû à un phénomène physique et non pas à un artefact de mesure. Il semble que les clous s'enfoncent peu à peu jusqu'à une certaine profondeur au-delà de laquelle il est énergétiquement plus intéressant pour le patin de remonter en surface. Par ailleurs, la fissuration de la glace sous le grattage du clou dépend beaucoup des propriétés mécaniques de la glace, qui peuvent évoluer le long de la piste selon le processus de formation de la glace (orientation cristallographique des

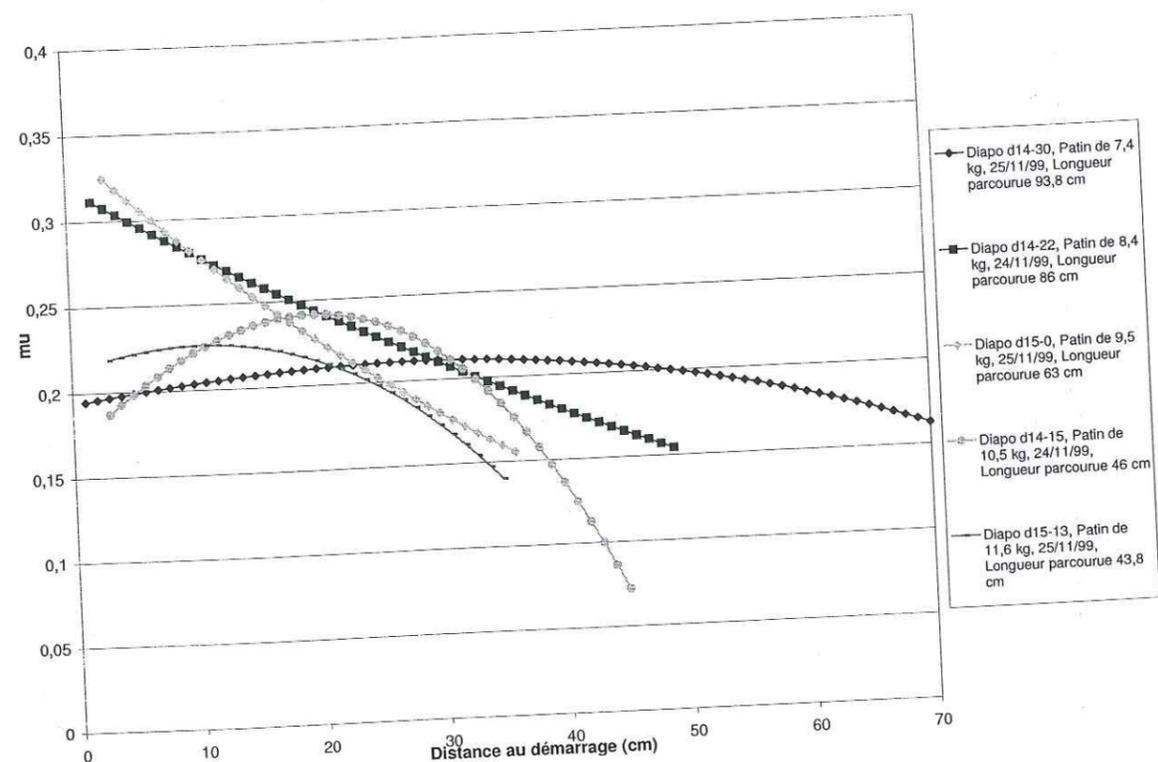
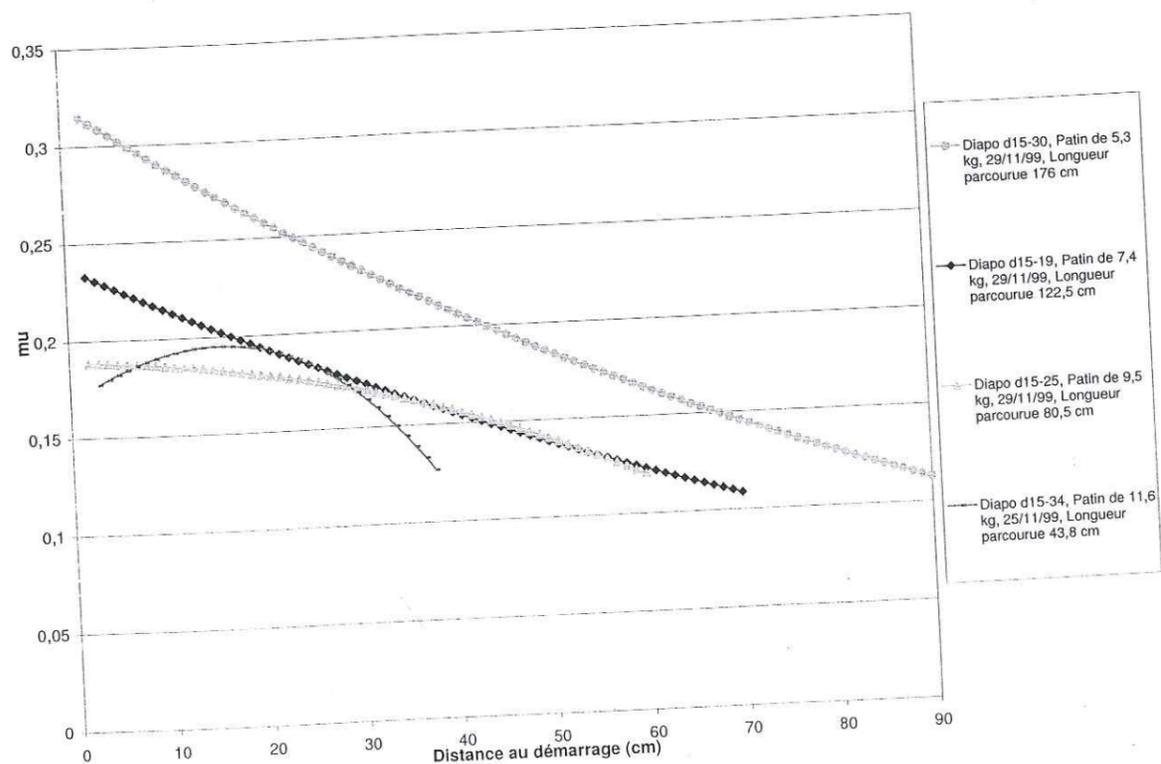
(a) $-5\text{ }^\circ\text{C}$.(b) $-20\text{ }^\circ\text{C}$.

Fig. 4.6 – Evolution du coefficient de frottement tous les centimètres en fonction de la distance parcourue lors d'un premier lancer (obtenue d'après la courbe d'interpolation quadratique de la vitesse instantanée en fonction de la distance parcourue).

grains, vitesse de cristallisation, expulsion des impuretés à l'extérieur du réseau cristallin, etc.).

Nous avons alors cherché une courbe d'interpolation quadratique pour chaque essai (Fig. 4.5). Le coefficient de corrélation s'est avéré assez bon, proche de 0,99. En supposant que la perte d'énergie cinétique entre deux points A et B de cette courbe interpolée distants de 1 cm est dissipée entièrement par frottement à effort tangentiel constant, le coefficient de frottement sur le parcours AB est $\mu_{A \rightarrow B} = (V_B^2 - V_A^2)/(2gAB)$. Nous obtenons ainsi l'évolution du coefficient de frottement tous les centimètres en fonction de la distance parcourue (Fig. 4.6). L'aspect des courbes d'évolution de ce coefficient de frottement en fonction de la vitesse est le même. Malheureusement, cette méthode de calcul du coefficient de frottement n'est pas exploitable, soumise à trop de lissages arbitraires et d'artefacts de mesure : nous observons toujours de fortes variations du coefficient de frottement avec la distance parcourue, comme les courbes en cloche présentées, difficilement explicables physiquement... L'interpolation des variations des vitesses instantanées avec la distance parcourue par un polynôme du second ordre est très critiquable, malgré les bons coefficients de corrélation. Des essais d'interpolation polynomiale d'ordre plus élevé n'ont pas fourni de meilleurs résultats.

En fait, tout le problème provient de la non-continuité de l'évolution de la vitesse avec la distance parcourue. Nous avons parfois observé une décroissance de la vitesse avec la distance parcourue s'effectuant par paliers (Fig. 4.5(b)). La vitesse oscille toujours fortement autour de la valeur moyenne déterminée par l'interpolation quadratique. L'explication à ces phénomènes a été trouvée grâce à l'utilisation ultérieure d'un accéléromètre embarqué : le banc de mesure subit d'importantes vibrations après le lancer du patin. D'ailleurs, l'accéléromètre embarqué sur le patin mesure des accélérations positives et négatives durant la première demi-seconde de déplacement. Le banc de mesure a été alourdi par plus de 150 kg placés sous la piste sur les traverses, mais cela n'a pas suffi à réduire les vibrations.

4.3.2.4 Résultats en terme de μ_{moyen}

Nous ne pouvons donc pas accéder à la décélération pendant une grande partie du parcours à cause des vibrations du banc de mesure. Malgré tout, les résultats obtenus par traitement d'images sont exploitables. En effet, de toutes les données que nous aurions pu tirer des photos si le banc de test ne vibrait pas, nous ne retiendrons finalement que la vitesse de démarrage : c'est un résultat intéressant car il permet de corriger $\mu_{intégré}$ en μ_{moyen} .

En supposant que la perte d'énergie cinétique entre le démarrage et l'arrêt final est dissipée entièrement par frottement à effort tangentiel constant, μ_{moyen} est calculé d'après la vitesse de démarrage mesurée avec les diodes V_0 et la distance parcourue D par :

$$\mu_{moyen} = \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{gD} \quad (4.5)$$

Le calcul est donc le même que celui de $\mu_{intégré}$ par (4.3) en remplaçant la vitesse de démarrage théorique par la vitesse réelle. Cette correction est très importante. Par exemple, pour le premier lancer d'un patin de 7,4 kg à $-5\text{ }^\circ\text{C}$ (Fig. 4.4(a)), la vitesse de démarrage théorique calculée par (4.2) donne 2,63 m/s alors qu'en réalité, le patin démarre avec une vitesse de 1,81 m/s (Fig. 4.5(a)). Le calcul théorique avait donné $\mu_{intégré} = 0,376$, mais $\mu_{moyen} = 0,198$.

4.3.2.5 Hypothèses pour obtenir μ_{moyen}

Les hypothèses utilisées pour calculer μ_{moyen} sont les mêmes que pour $\mu_{intégré}$, excepté qu'aucune hypothèse n'est à faire sur la nature du choc pendule/patin.

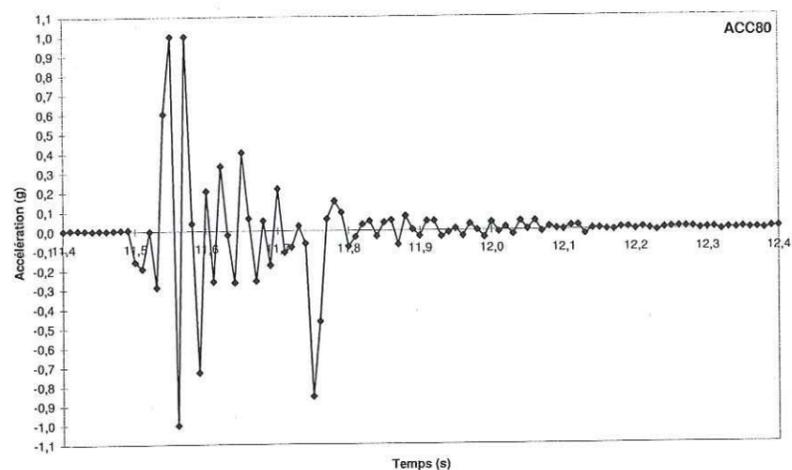
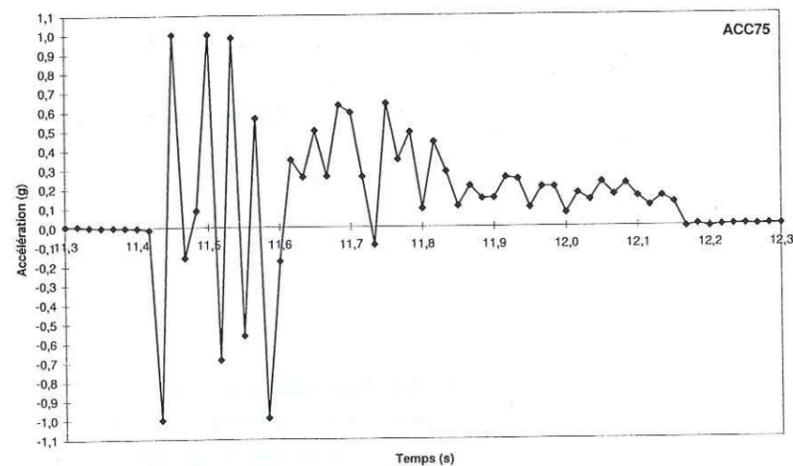
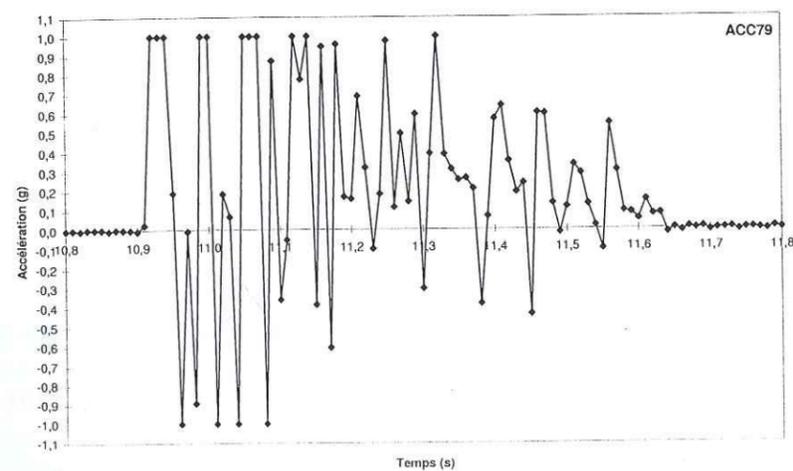


Fig. 4.7 – Accéléromètre fixé horizontalement sur un montant de la piste : sixième lancer du patin de 7,4 kg porté par quatre clous à -5°C .



(a) Premier lancer.



(b) Cinquième lancer.

Fig. 4.8 – Mesure par accéléromètre : patin de 7,4 kg porté par quatre clous à -5°C .

4.3.2.6 Incertitude due aux mesures

μ_{moyen} est calculé par (4.5), avec dans le cas le plus défavorable: $\Delta V/V \approx 0,05/2 = 0,025$, $\Delta D/D \approx 0,5/100 = 0,005$. L'erreur relative sur μ_{moyen} due uniquement à la mesure est donc de 3 %.

4.3.3 Coefficient de frottement instantané, $\mu_{instantané}$

4.3.3.1 Principe de la mesure de $\mu_{instantané}$

Un accéléromètre de marque Scheavitz et de type JT2033 est embarqué sur le patin. L'acquisition est effectuée à l'extérieur de la chambre froide avec le logiciel Labtech-Notebook. L'accéléromètre mesure, avec une précision de 0,5 %, des accélérations et décélérations horizontales γ jusqu'à $\pm 1\text{ g}$. L'accéléromètre est fixé sur le patin, parallèlement à son axe. Lors d'une mesure d'accélération sur le patin, une prise de vue effectuée simultanément permet de comparer les deux coefficients de frottement différents μ_{moyen} et $\mu_{instantané}$.

Les acquisitions sont effectuées à 60 Hz avec un filtre à fréquence de coupure de 128 Hz dans le conditionneur. Sur les graphiques présentés, une décélération correspond à une valeur positive de l'indication de l'accéléromètre. L'effort tangentiel s'exerçant sur le patin est $F_t = M\gamma$ et l'effort normal est $F_n = Mg$. D'après la définition classique du coefficient de frottement, $\mu_{instantané} = F_t/F_n$, d'où $\mu_{instantané} = \gamma/g$. Les graphiques de variations de l'accélération en fonction du temps sont donc directement exploitables. La figure 4.4(b) correspond au lancer pris en exemple précédemment.

L'évolution de l'accélération en fonction du temps s'est en fait avérée très perturbée. Nous observons d'importantes vibrations qui dépendent de la masse du patin : plus le patin est lourd, plus elles sont affaiblies. Ces fluctuations durent pendant plus de 1 s pour un patin de 5 kg, mais elles se limitent à 1/10 s pour un patin de 11 kg.

Il a donc fallu mettre en place un traitement automatique des données pour filtrer les résultats de manière objective. Le code cherche la bonne fenêtre de données à interpréter. Il part de la fin du lancer, cherche le premier point où $|\gamma|$ est supérieur à 0,05 g, puis garde toutes les valeurs d'accélération tant que γ reste supérieur à -0,1 g et inférieur à 0,4 g. $\mu_{instantané}$ est pris égal à la moyenne de toutes les mesures de la fenêtre considérée. Ces valeurs limites d'accélération imposées ont été choisies pour obtenir des fenêtres comportant dans tous les cas un nombre suffisant de points pour donner une moyenne significative, sans entrer dans la zone de vibrations résiduelles dues au choc du marteau sur le patin. $\mu_{instantané}$ représente donc un coefficient de frottement à faible vitesse, mesuré juste avant l'arrêt du patin.

4.3.3.2 Incertitude sur $\mu_{instantané}$ due à la mesure

Pour l'exemple de la figure 4.4(b), le patin est assez léger et la première demi-seconde du lancer reflète en fait les vibrations du banc de mesure. La fenêtre déterminée par le code concerne les trois derniers 1/10 s du mouvement et donne $\mu_{instantané}$ égal à 0,14. Pour ce lancer, les différentes valeurs des coefficients de frottement sont : $\mu_{intégré} = 0,36$, $\mu_{moyen} = 0,20$ et $\mu_{instantané} = 0,14$. Les trois valeurs ne sont pas comparables entre elles car elles ne représentent pas les mêmes concepts. μ_{moyen} est inférieur à $\mu_{intégré}$ car le choc du pendule sur le patin est inélastique : la vitesse réelle de démarrage est plus faible que la vitesse théorique. μ_{moyen} est plus élevé que $\mu_{instantané}$, en partie car μ_{moyen} est évalué en supposant que l'unique force qui travaille est l'effort tangentiel. D'autres phénomènes provoquent des pertes d'énergie cinétique : d'une part, le patin subit de faibles mouvements verticaux et latéraux ; d'autre part, le banc de test n'est

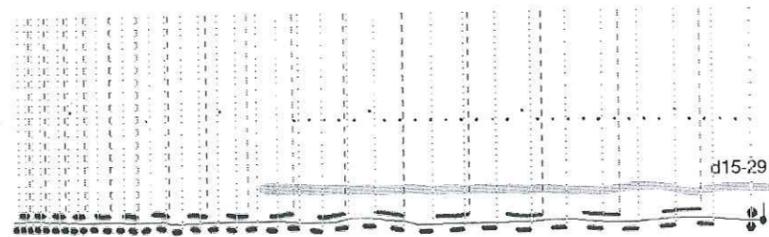
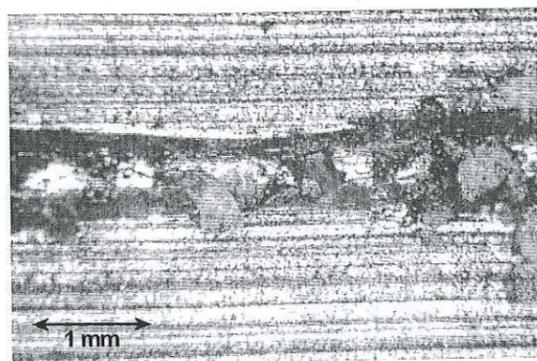
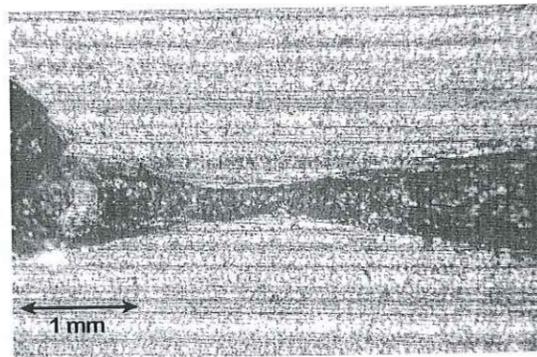


Fig. 4.9 - Traitement d'images: cinquième lancer du patin de 9,5 kg porté par quatre clous à -20°C

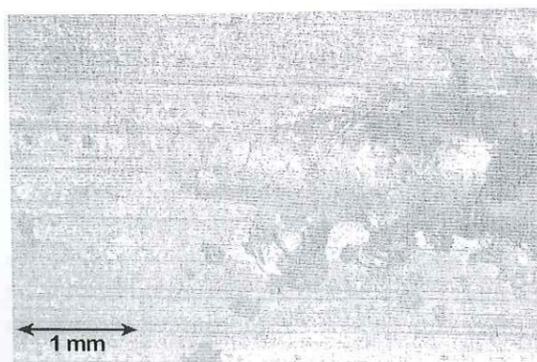


(a) Patin de 9,4 kg à -10°C .

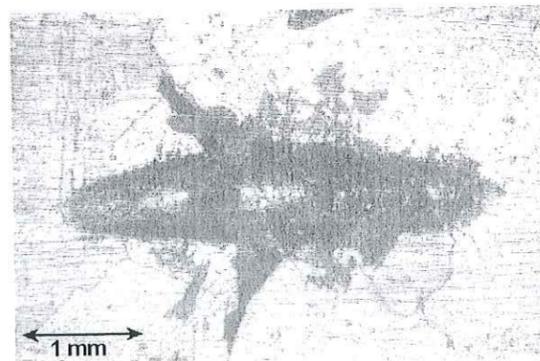


(b) Patin de 8,2 kg à -5°C .

Fig. 4.10 - Largeur de l'empreinte d'un clou variable à cause des mouvements verticaux du patin.



(a) Patin de 4 kg à -10°C .



(b) Patin de 10,4 kg à -10°C .

Fig. 4.11 - Discontinuités de l'empreinte d'un clou à cause des mouvements verticaux du patin.

pas un élément neutre au mouvement.

4.4 Observations qualitatives avec la piste rectiligne

4.4.1 Vibrations de la piste rectiligne

La piste vibre de manière très importante après un choc du marteau sur le patin comme le montre une acquisition avec l'accéléromètre fixé horizontalement sur les montants en bois de la piste (Fig. 4.7). Cette vibration de la piste de glace influence fortement le début du parcours du patin, que la piste de glace soit neuve ou usée.

La figure 4.8(a) est relative à un lancer d'un patin de 7,4 kg sur piste neuve à -5°C . L'échelle du temps s'étend sur 1 s et l'accéléromètre sature à $+1g$ et $-1g$ sur les deux premiers 1/10 s du déplacement. Les quatre premiers 1/10 s sont inexploitable car ils reflètent les vibrations du banc de mesure. Le calcul de $\mu_{\text{instantané}}$ s'effectue sur les trois derniers 1/10 s du mouvement. La figure 4.8(b), relative au cinquième lancer du même patin, montre nettement l'effet de l'usure de la piste qui rend impossible toute mesure de $\mu_{\text{instantané}}$ au moyen d'un accéléromètre embarqué. En effet, l'accéléromètre sature sur les quatre premiers 1/10 s du déplacement et seule la dernière demi-seconde serait exploitable.

Ainsi, la vibration de la piste elle-même peut expliquer la saturation de l'accéléromètre sur les premiers 1/10 s, mais n'explique pas la totalité des fluctuations de l'accélération mesurée sur le patin. Il y a bien un problème de vibrations du patin lui-même, provoquées par l'endommagement de la glace (écaillage) qui est discontinu par nature: la glace se comporte comme un organe élastique qui freine le patin, puis le patin accélère après rupture (microfissuration de la glace).

4.4.2 Mouvements verticaux du patin

Au cours des lancers, nous avons obtenu plusieurs preuves de l'existence de mouvements verticaux du patin, par les diodes ou les observations directes de la surface de glace à la loupe binoculaire. La piste est pourtant horizontale sur toute sa longueur.

Les photos du déplacement des diodes mettent directement en évidence l'existence des sauts verticaux du patin. Le trait continu épais créé par la diode allumée en permanence ne suit pas toujours une trajectoire rectiligne horizontale (cf. Fig. 4.9, relative au cinquième lancer d'un patin). A droite de l'image, le saut généré par l'atterrissage du patin sur la glace, après son décollage du support utilisé pour le démarrage, est visible. L'acquisition par l'accéléromètre relative au même lancer n'est pas exploitable: $\mu_{\text{instantané}}$ serait calculé par la moyenne de seulement huit points d'acquisition.

Les photos de la surface de glace prises à la loupe binoculaire mettent en évidence un enfoncement du clou variable le long du parcours (Fig. 4.10(a)). La photo 4.10(b) correspond à un saut peu marqué d'un clou: le clou est toujours resté en contact avec la glace mais s'enfonce beaucoup plus avant et après ce serrement. L'extrémité du clou étant circulaire, la profondeur d'enfoncement de l'indenteur peut être calculée à partir de telles photos.

Les photos de la surface mettent aussi en évidence des zones où le patin décolle complètement de la piste (Fig. 4.11(a) et 4.11(b)). Les extrémités de traces de grattage, en forme d'ogive, sont souvent assez écaillées. Avant un saut, les bords de la trace semblent s'écailler aisément. La glace n'est pas confinée et les fortes contraintes de compression dues au grattage expulsent la glace vers l'extérieur de la surface. Au contraire, la compression due à l'atterrissage du clou est très élevée mais ne peut être accommodée par un écaillage dans la directions de la masse de la glace:

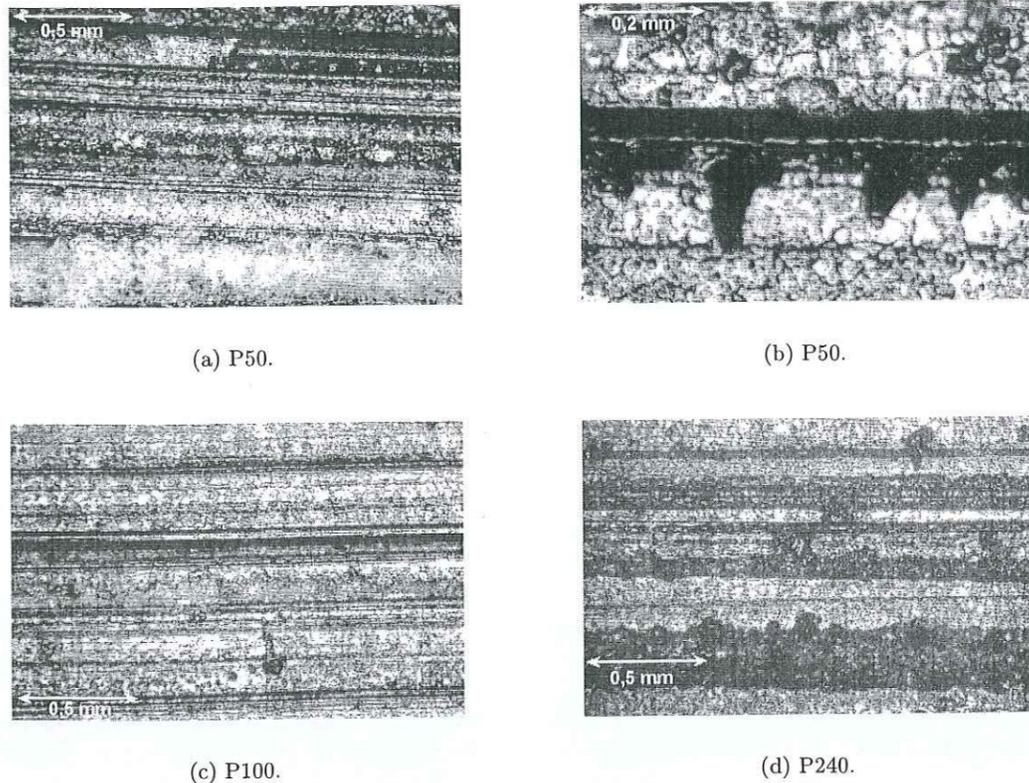


Fig. 4.12 - Surface de glace après passage du papier abrasif à -10°C .

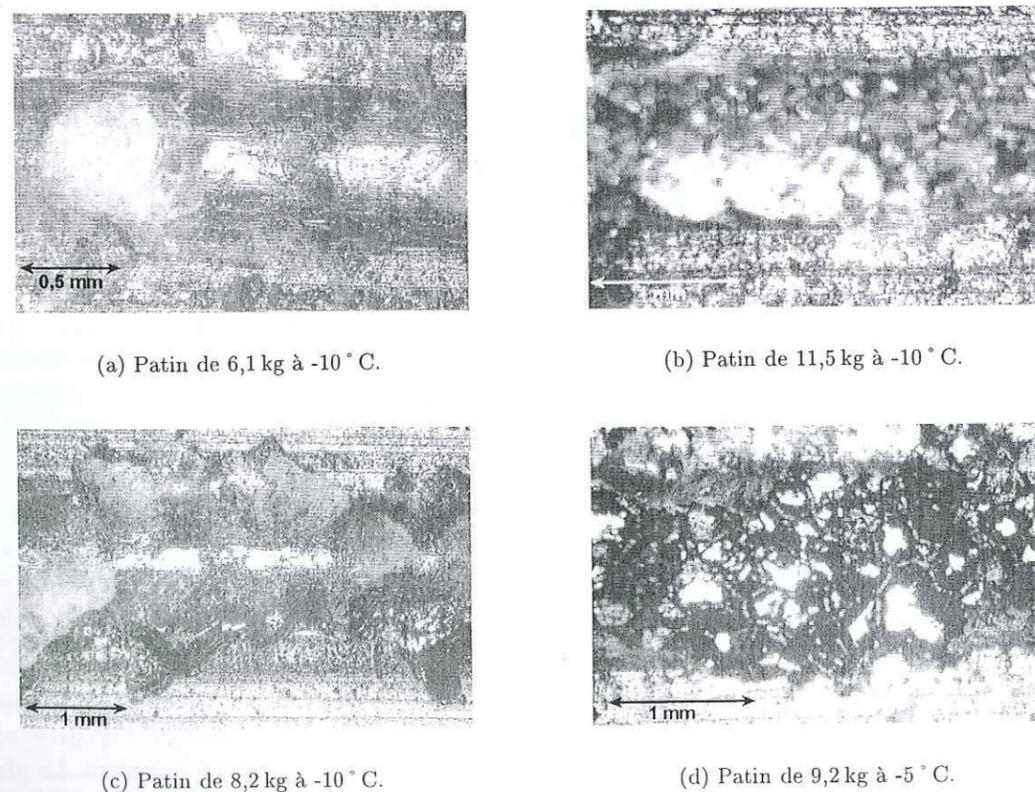


Fig. 4.13 - Aspect général de la trace d'un clou.

seules des microfissures peuvent se former.

Après les lancers avec des patins de faible masse, nous avons observé toujours des traces laissées par des sauts successifs du patin. Ceci peut avoir plusieurs causes.

- Soit la piste de glace n'est pas parfaitement plane et forme des tremplins pour le patin. A l'échelle d'un niveau à bulle de 30 cm de long, la piste est bien horizontale, mais la préparation de la piste par raclage dans la direction de la longueur peut engendrer des ondulations longitudinales.
- Soit les sauts proviennent du mode de démarrage. En effet, le patin est posé sur un support Téflon légèrement surélevé par rapport à la glace pour qu'il ne s'indente pas avant le départ et n'adhère pas à la glace. Il est possible que la différence d'altitude soit trop importante et que le patin fasse des ricochets à l'atterrissage.
- Une autre cause possible serait une résistance variable de la glace vis-à-vis du grattage. La glace peut être considérée comme fragile à ces vitesses mais l'effort s'opposant au grattage reste important. D'un point de vue énergétique, il est sans doute parfois préférable pour le patin de s'élever par moments plutôt que de rester bien enfoncé dans la glace.

4.4.3 Observation de la glace après le grattage du papier abrasif

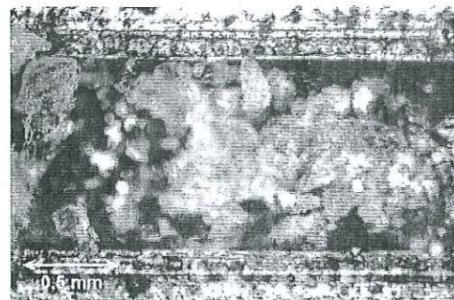
Les conditions de frottement sont différentes de celles du pendule SRT. Ici, la surface frottante est beaucoup plus longue: 1 ou 3 cm au lieu d'environ 1 mm avec le SRT (cf. § 1.4.4). Avec la piste de glace, la surface du papier abrasif se remplit assez vite de neige (une partie du contact peut être de nature neige/neige), alors qu'avec le pendule SRT, l'arête recouverte de papier abrasif repousse la neige vers l'avant. Les vitesses de glissement sont différentes: fixée à 3 m/s sur le SRT, la vitesse est plus faible ici. La contrainte normale nominale est aussi différente: proche de 3 bar sur le SRT, elle est plus faible sur la piste.

Nous retrouvons quelques observations effectuées aux cours des manipulations avec le papier abrasif et le pendule SRT:

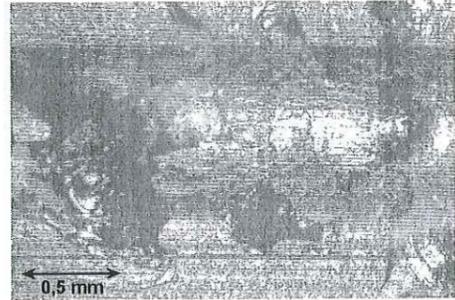
- A cause de l'implantation des grains du papier abrasif sur le support, certains sont très saillants alors que d'autres dépassent à peine. Les traces d'indenteurs très larges et profondes côtoient d'autres très fines. Par exemple, la figure 4.12(c) montre de nombreuses petites rainures et une beaucoup plus large au milieu, entourée d'un bourrelet surélevé et d'un dépôt de neige.
- Nous observons souvent simultanément des rainures à bords très écaillés et à bords lisses (Fig. 4.12(b)). La figure 4.12(d) révèle des stries très fines ou très larges avec des bords lisses, et une strie plus large en bas avec des bords un peu écaillés.

Il y a quelques différences entre les observations avec le pendule SRT et la piste de glace:

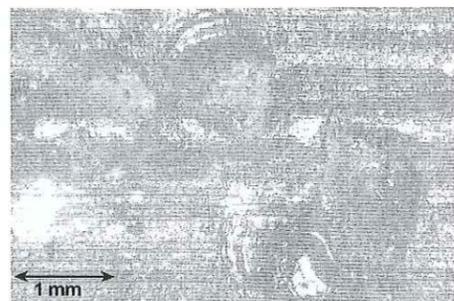
- Nous n'observons jamais de bourrelet de regel, même à -5°C .
- Beaucoup plus de neige se forme. Même si la majeure partie s'accumule sous le papier abrasif, il en reste encore sur la piste comme le montre l'amas en bas de la photo 4.12(a) (les autres photos ont été prises après avoir épousseté la surface).
- Nous distinguons moins les différents effets des papiers abrasifs selon la taille des grains. Avec le SRT, nous obtenions en simplifiant: des rainures larges à bords écaillés pour du P50 et des rainures fines avec bords lisses pour du P240. Ici, il est impossible de reconnaître le papier abrasif à la simple vue de la surface de glace. Par exemple, les photos 4.12(c) et 4.12(d), prises à même grossissement, montrent de nombreuses petites rayures pour du P100 et quelques larges rainures pour du P240.



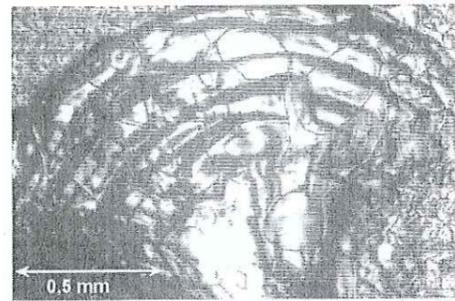
(a) Patin de 7,3 kg.



(b) Patin de 7,1 kg.



(c) Patin de 10,4 kg.



(d) Patin de 6,3 kg.

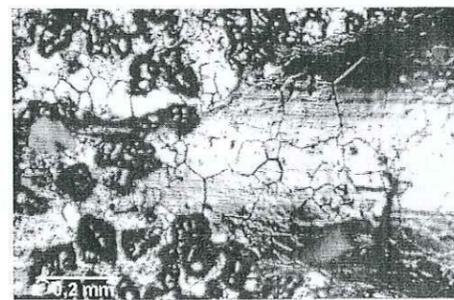
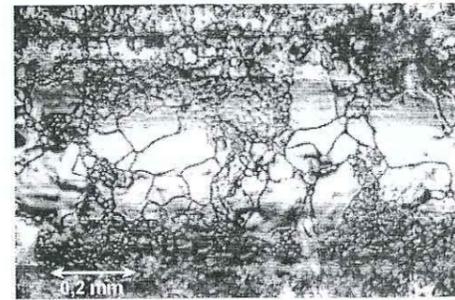
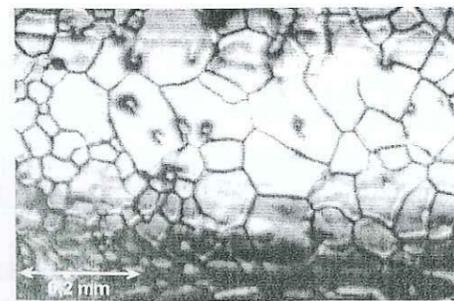
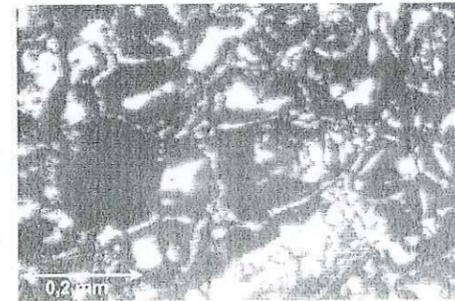
Fig. 4.14 - Bord de trace d'un clou à -10°C .(a) Patin de 11,3 kg à -10°C .(b) Patin de 4,1 kg à -10°C .(c) Patin de 6,1 kg à -5°C .(d) Patin de 6,3 kg à -10°C .

Fig. 4.15 - Fond de trace sous un clou.

4.4.4 Observation de la glace après le grattage des clous

4.4.4.1 Aspect général de la trace laissée par un clou

Le passage des clous forme de larges et profondes rainures dans la piste de glace. Le centre de la trace apparaît en clair sur les photos prises en éclairage en réflexion avec la loupe binoculaire (Fig. 4.13(a)), car le fond de la trace formé par l'extrémité sphérique du clou est quasiment perpendiculaire au faisceau lumineux. En revanche, les bords plus proches de la verticale apparaissent en sombre sur les photos. Les traces laissées par le couteau utilisé pour usiner la surface de glace sont visibles à l'extérieur de la rainure du clou.

Quelques photos prises sans ôter préalablement la neige dans la trace montrent l'importante quantité de neige formée. La trace est parfois complètement remplie de neige (Fig. 4.13(b)), mais en général les copeaux de glace semblent se regrouper et former des amas (Fig. 4.13(c)). Les débris isolés se subliment très vite : leurs bords s'arrondissent et les cristaux se collent à la piste et deviennent indiscernables pour ces échelles de prise de vue.

La glace sous-jacente peut avoir différentes qualités. Une glace lisse donne un centre de trace clair (Fig. 4.13(a)). Une glace alvéolée, semblable à un nid d'abeilles, donne un aspect particulier puisque les rayons lumineux sont moins réfléchis (Fig. 4.13(d)).

4.4.4.2 Bords de la trace d'un clou sur la glace

Les bords de la trace de grattage peuvent avoir trois aspects différents : lisse, écaillé ou mixte.

- Les bords lisses correspondent toujours à de faibles efforts normaux, moins de 2 kg par clou (Fig. 4.14(a)).
- Les bords écaillés concernent en général des clous plus fortement chargés, à plus de 2 kg (Fig. 4.14(c)). Les écailles, qui peuvent faire plus de 1 mm de rayon, sont la plupart du temps en forme d'éventail, en quarts de disques superposés : l'écaille ôtée est très profonde vers le centre de la piste, mais devient superficielle vers les bords de l'éventail (Fig. 4.14(d)).
- Il existe aussi des cas mixtes pour lesquels les bords de trace sont relativement lisses et faiblement écaillés. Sur la photo 4.14(b), le rebord est lisse mais de petites écailles se sont formées par endroit.

Il n'existe ni bourrelet de regel à côté des bords de trace, ni preuve d'expulsion d'eau qui serait formée par le passage du clou. Certains copeaux de glace fracturée sont expulsés assez loin de la trace ; les autres restent proches ou retombent dans la trace.

4.4.4.3 Fond de la trace d'un clou sur la glace

La photo 4.15(a), qui correspond à un début de saut du patin, montre la différence entre l'observation d'un fond de trace et de la surface de glace non touchée par le clou. Le clou a creusé la partie droite de la photo avant de survoler la piste vers la gauche. Le fond de trace est complètement lissé alors que la surface de glace brute présente de nombreuses aspérités.

La photo 4.15(b) est caractéristique du fond de trace habituel. Quelle que soit la masse sur le patin, nous observons des zones de grains de taille inférieure au centième de millimètre encadrées par des grains de l'ordre du dixième de millimètre. Les petits cristaux sont toujours regroupés en agglomérats. Ils ne sont pas formés par recristallisation sous contrainte (mécanisme de très longue durée). Ils proviennent sans doute d'une microfissuration de la glace pour accommoder la forte contrainte sous le clou. Une autre hypothèse est qu'ils se forment par gel de la neige

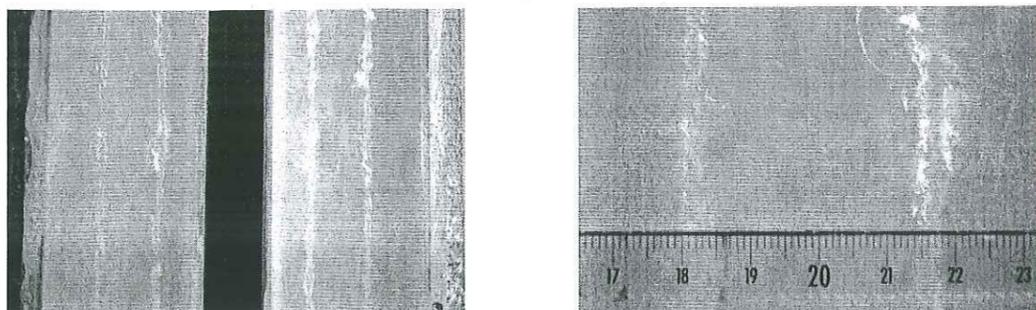


Fig. 4.16 – Hétérogénéité de l'usure de la glace après 13 lancers d'un patin de 5,2 kg à -10°C .

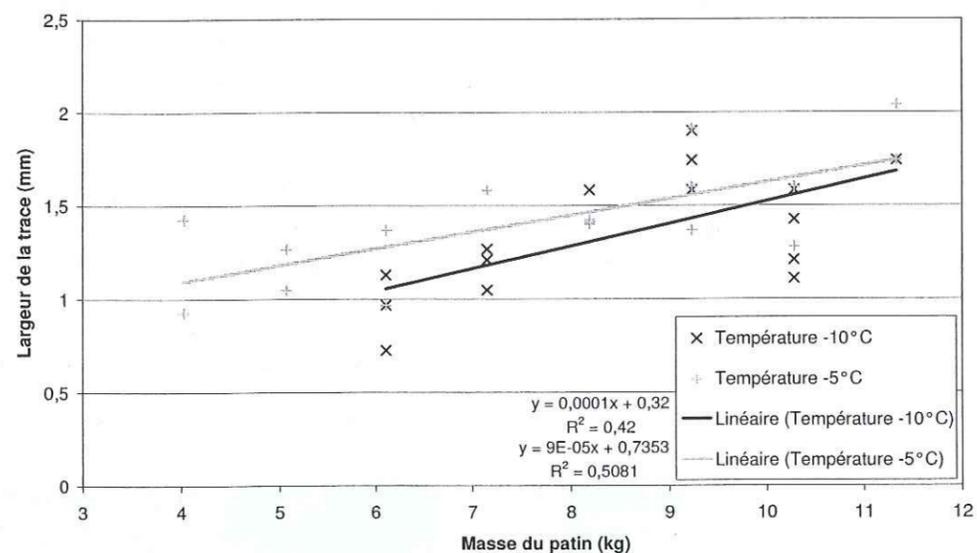


Fig. 4.17 – Largeur de la trace laissée par un clou sur la piste de glace à -10 et -5°C .

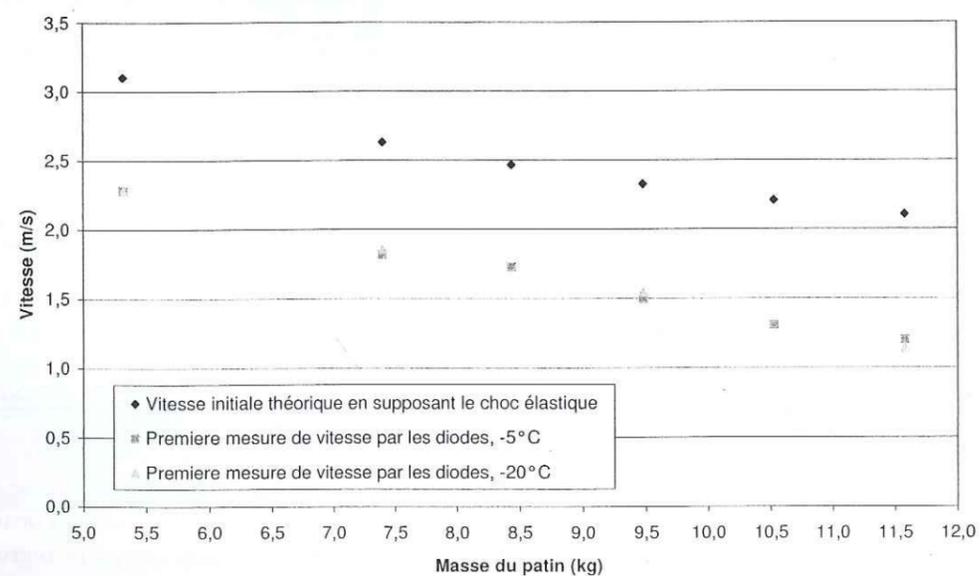


Fig. 4.18 – Vitesse de démarrage théorique et première vitesse mesurée par les diodes.

retombée au fond de la trace. Enfin, hypothèse la plus probable, ils croissent sans doute par gel très rapide de l'eau formée sous le clou, avec emprisonnement de bulles d'air.

A -5°C , nous apercevons des gouttelettes d'eau regelées qui apparaissent comme des dômes (Fig. 4.15(c)).

La photo 4.15(d) laisse apparaître à fort grossissement le faciès de la glace sous-jacente en nid d'abeille (cf. Fig. 4.13(d) à grossissement plus élevé). Cette structure cristalline est observée assez souvent pour la glace de regel à -5°C .

4.4.5 Largeur de la trace d'un clou sur la glace

Il est possible d'évaluer l'évolution de la largeur de la trace en fonction de la masse totale du patin à partir des photos prises à la loupe binoculaire. Ceci reste une évaluation très grossière car la largeur de la trace n'est pas uniforme tout au long de la piste: les photos fournissent simplement des largeurs de trace pour un effort normal donné à un endroit donné. Des photos macroscopiques donnent une idée de l'importante hétérogénéité de la trace créée par les clous (Fig. 4.16).

La figure 4.17 montre la largeur de la trace laissée par un clou sur la piste de glace en fonction de la masse du patin à -10 et -5°C . A chaque température, plusieurs largeurs sont évaluées sur des photos différentes pour chaque charge normale, et une interpolation linéaire donne un ordre d'idée de l'évolution de la largeur de la trace en fonction de la masse du patin (cette interpolation a un très faible coefficient de corrélation et n'est valable que sur la plage de charges considérées). Ces interpolations restent très critiquables (nous ne pouvons pas effectuer une moyenne statistique valable sur un échantillonnage important de points de mesure), mais semblent tout de même intéressantes et nous dégagent trois tendances :

- L'état du grattage à -5°C est plus stable qu'à -10°C car le coefficient de corrélation est meilleur pour les valeurs à -5°C en prenant en compte un nombre plus important de points. Il y a moins de variabilité spatiale sur une glace chaude: le clou indente facilement la glace et la profondeur est indépendante de l'orientation cristalline de la glace.
- La largeur moyenne du sillon sur le parcours a tendance à augmenter avec la masse du patin et la température.
- La variation de la largeur de la trace avec la charge normale est semblable pour les deux températures: les pentes des courbes de tendance sont voisines. Le phénomène mécanique principal (fracture, fissuration ou fonte) mis en jeu serait donc le même pour ces deux températures.

4.5 Discussion des résultats expérimentaux obtenus avec la piste rectiligne

4.5.1 Choc du pendule sur le patin

La figure 4.18 compare la vitesse de démarrage théorique V obtenue par (4.2) et la première vitesse mesurée par les diodes V_0 . La vitesse réelle est indépendante de la température; ceci semble logique et confirme la bonne qualité de la mesure de vitesse grâce aux diodes. L'écart de vitesse est toujours proche de $0,8\text{ m/s}$, ce qui engendre une différence importante entre $\mu_{\text{intégré}}$ et μ_{moyen}^2 .

2. Dans la suite, nous commentons donc μ_{moyen} et $\mu_{\text{instantané}}$, qui s'affranchissent de l'effet inélastique du choc du pendule, sauf pour les essais pour lesquels nous n'avons que les valeurs de $\mu_{\text{intégré}}$.



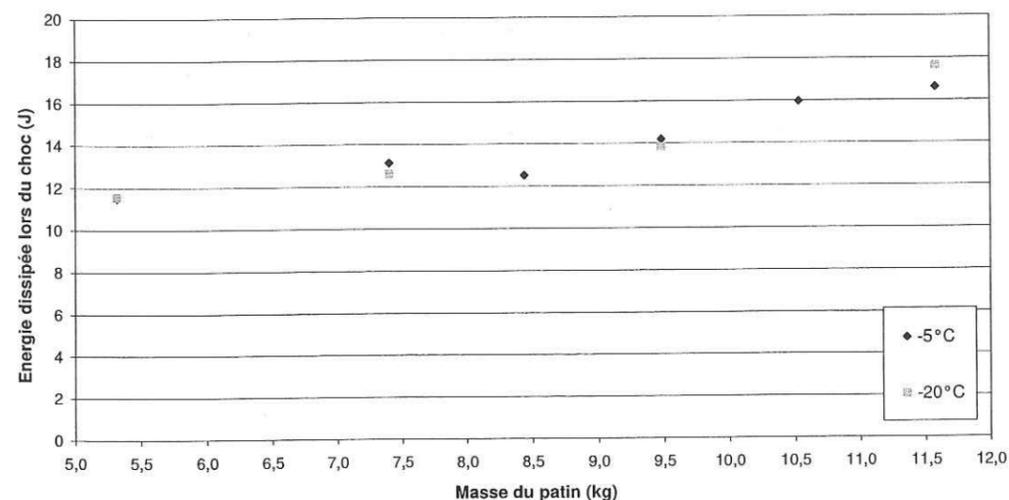
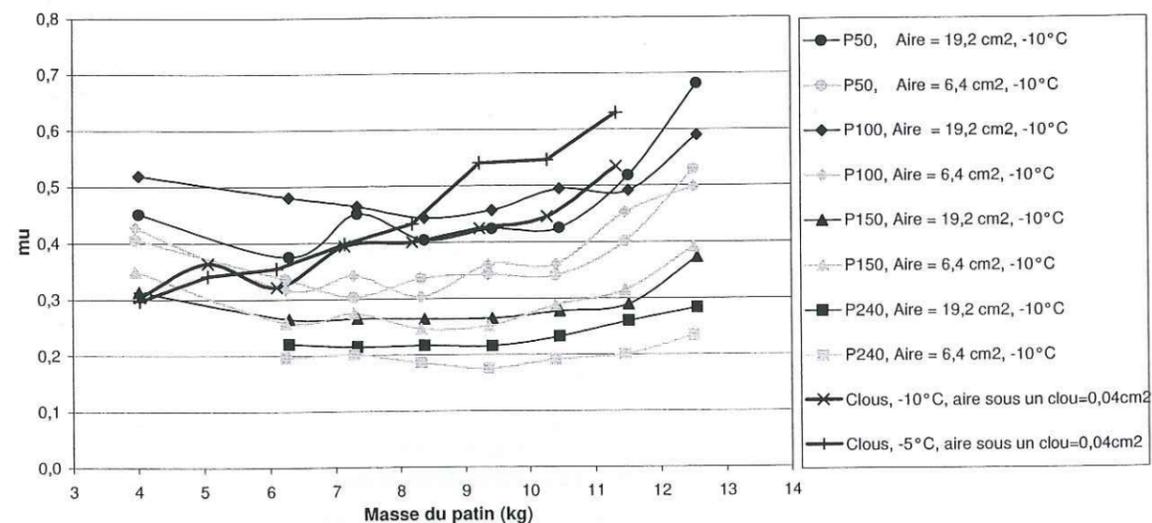
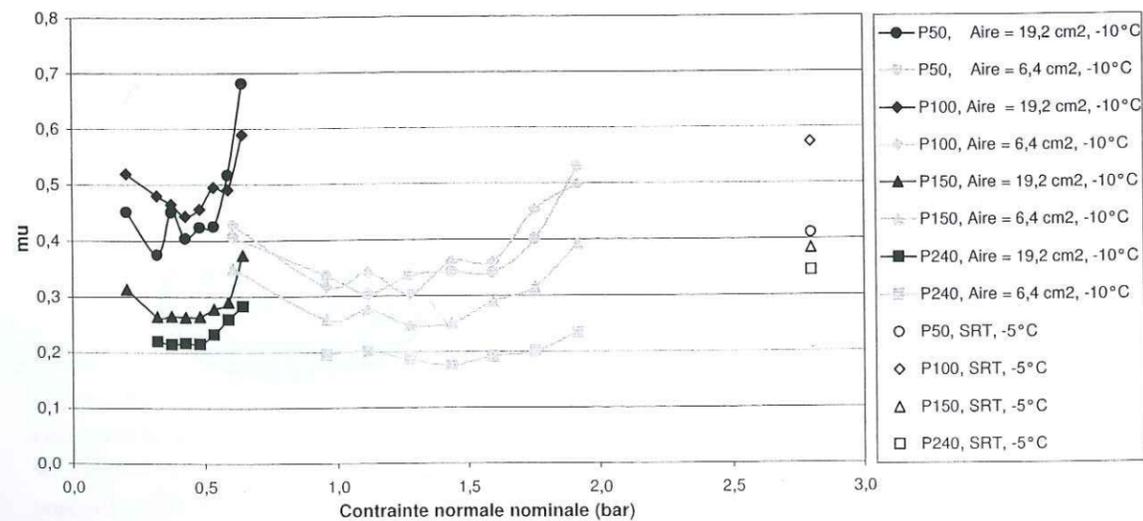


Fig. 4.19 - Energie dissipée lors du choc marteau/patin.

Fig. 4.20 - $\mu_{intégré}$ obtenus avec la piste de glace.Fig. 4.21 - μ papier abrasif/glace obtenus avec la piste de glace ou le pendule SRT, en fonction de la contrainte normale nominale.

L'énergie dissipée ΔW lors du choc est estimée à partir de ces vitesses par

$$\Delta W = \frac{1}{2}MV^2 - \frac{1}{2}MV_0^2 - \mu_{intégré}MgD_0, \quad (4.6)$$

avec M la masse du patin, g l'accélération de la pesanteur et D_0 la distance parcourue entre le démarrage et la première mesure de vitesse par les diodes. L'énergie dissipée lors du choc varie de 12 à 17 J et augmente avec la masse du patin (Fig. 4.19) : le choc est de plus en plus inélastique pour des patins lourds.

4.5.2 $\mu_{intégré}$ pour les papiers abrasifs et les clous

4.5.2.1 Différences entre les papiers abrasifs

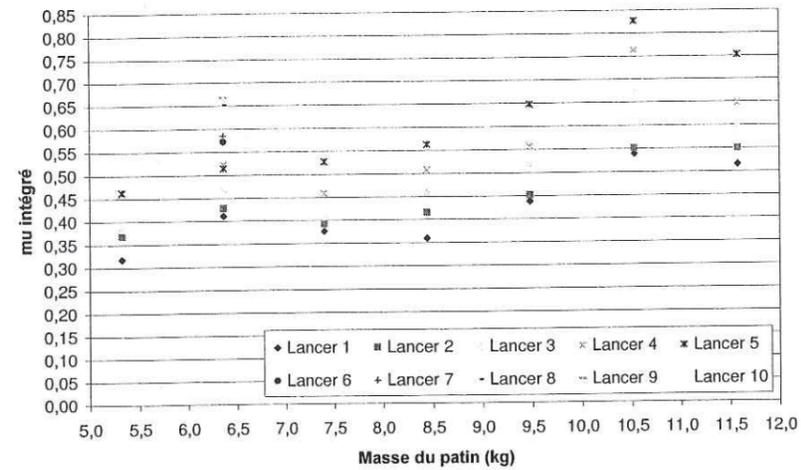
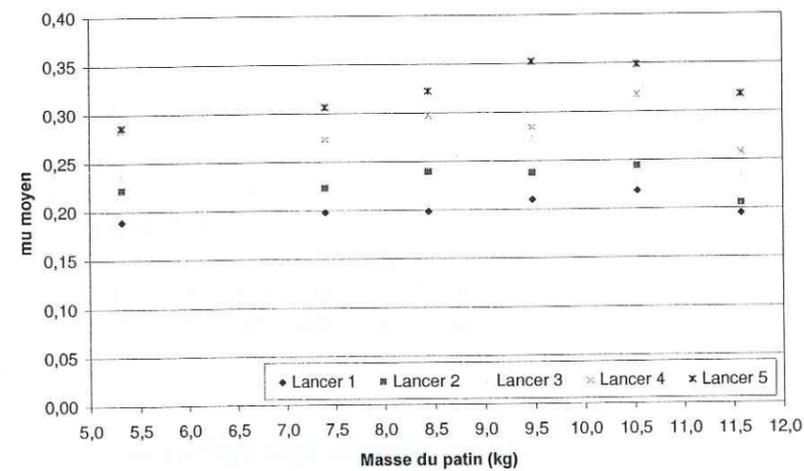
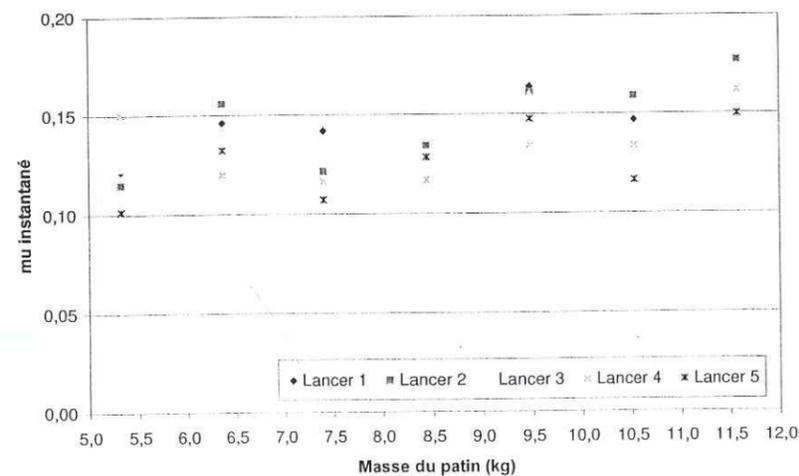
Quelle que soit l'aire de contact nominale, le classement par $\mu_{intégré}$ des différents papiers abrasifs reste le même (Fig. 4.20) : les $\mu_{intégré}$ sont assez élevés et très proches pour les papiers abrasifs P50 et P100 et ils sont plus faibles pour le P150 et encore plus pour le P240. Ces variations s'expliquent par la taille et le nombre moyen des grains de chaque papier abrasif. Il est impossible de connaître le nombre exact d'indenteurs à la surface du papier abrasif, puisque les taux de recouvrement sont variables pour chaque abrasif ; même pour un abrasif appliqué fermé (pour lequel toute la surface support est couverte de grains), le nombre de grains dépend trop du procédé d'élaboration de l'abrasif.

Pour les mesures avec le pendule SRT, nous avons obtenu des μ_{SRT} croissants du P240 au P100 en passant par le P150 ; mais μ_{SRT} était assez faible pour le P50 car toute la surface de l'arête recouverte de papier abrasif ne touchait pas la surface (cf. § 3.4.4). Ici, le P50 et le P100 frottent plus que les deux autres papiers abrasifs. Nous retrouvons donc le même résultat qualitatif : pour des indenteurs d'une taille de l'ordre du dixième de millimètre sur la glace, un petit nombre de gros indenteurs frotte plus qu'un grand nombre de petits indenteurs.

4.5.2.2 Evolution de $\mu_{intégré}$ des papiers abrasifs avec l'effort normal

Il serait intéressant de connaître l'évolution du frottement avec l'effort normal, mais ceci s'est avéré très difficile avec ce dispositif expérimental. En fait, nous ne pouvons légitimement comparer que des $\mu_{intégré}$ obtenus dans les mêmes conditions expérimentales, en changeant simplement le type de papier abrasif. Sur la figure 4.20, seuls les points correspondant à une même aire de contact nominale et à une même masse du patin sont comparables. En effet, quand la masse du patin varie, deux artefacts de mesure importants interviennent. D'une part, le choc du pendule sur le patin est plus inélastique avec un patin lourd. D'autre part, la masse du patin peut modifier les conditions de contact : nous observons des ricochets pour un patin léger et un contact plus continu pour un patin plus lourd.

L'évolution de $\mu_{intégré}$ en fonction de l'effort normal est indépendante du papier abrasif utilisé (Fig. 4.20). Pour une masse faible d'environ 4 kg, $\mu_{intégré}$ semble plus élevé que pour une masse légèrement plus importante. En fait, le contact n'est alors pas continu : les nombreux ricochets du patin engendrent une dépense d'énergie importante, qui n'est pas prise en compte pour le calcul, d'où une sur-estimation de $\mu_{intégré}$. Pour des masses proches de 12 kg, $\mu_{intégré}$ augmente avec la masse du patin mais ce n'est sans doute que l'effet d'un artefact de mesure : le calcul de $\mu_{intégré}$ considère le choc élastique, mais une proportion d'énergie plus importante est perdue par vibrations pour des patins très lourds. Ces remarques expliquent la non concordance des résultats avec deux aires de contact différentes pour une même contrainte normale nominale : sur la figure 4.21, $\mu_{intégré}$ est différent entre une masse élevée sur une surface de 19,2 cm² et une masse faible sur une surface de 6,4 cm².

(a) $\mu_{\text{intégré}}$.(b) μ_{moyen} .(c) $\mu_{\text{instantané}}$.Fig. 4.22 – Trois différents μ à -5°C , pour cinq mêmes lancers.

Les valeurs de μ_{SRT} obtenues à -5°C sont aussi reportées sur la figure 4.21. L'effort normal sur le patin SRT est de 23 N, appliqué sur une surface de 7,5 cm de long et environ 1 mm de large; la contrainte normale nominale sous un papier abrasif avec le pendule SRT est donc environ 3 bar. Pour les mesures sur la piste de glace ou avec le SRT, les classements des papiers abrasifs vis-à-vis du frottement sont les mêmes pour les P100, P150 et P240. Les ordres de grandeur de μ sont légèrement plus élevés pour le pendule SRT. Ceci s'explique sans doute parce qu'une couche de neige accumulée sous le papier abrasif avec la piste rectiligne diminue l'effet des indentateurs.

En éliminant l'effet des artefacts de mesure, nous pouvons conclure que $\mu_{\text{intégré}}$ papier abrasif / glace est constant dans la gamme de contraintes normale nominales entre 0,2 et 2 bar. Ceci s'explique sans doute par l'accumulation de neige sous le papier abrasif. Seuls les grains les plus hauts indentent la glace, car sur une fraction importante de la surface nominale, nous avons un frottement neige / glace, qui semble dépendre peu de la contrainte normale nominale sur cette plage restreinte.

4.5.2.3 Evolution de $\mu_{\text{intégré}}$ des clous avec l'effort normal

Pour une masse inférieure à 8 kg, les $\mu_{\text{intégré}}$ obtenus avec les clous à -10°C et -5°C sont proches. Au contraire, au dessus de 8 kg, $\mu_{\text{intégré}}$ est plus élevé à -5°C qu'à -10°C (Fig. 4.20). Ceci pourrait s'expliquer par la dureté de la glace vis-à-vis de l'indentation (Barnes *et al.* (1971), cf. § 1.2.2.3). A -5°C , la glace est moins résistante au grattage et les clous s'enfoncent facilement pour de fortes charges. Au contraire, la glace étant plus résistante au grattage à -10°C , le patin rebondit plus; donc la longueur parcourue est plus longue (puisque la surface frottée réelle est courte): $\mu_{\text{intégré}}$ est donc faible.

D'après la figure 4.20, l'évolution de $\mu_{\text{intégré}}$ est à peu près linéaire pour une température de -5°C : l'équation de la courbe de tendance est $\mu_{\text{intégré}} = 0,05M + 0,0966$ avec la masse M du patin exprimée en kg; le coefficient de corrélation est $R^2 = 0,96$. Au contraire, l'évolution de $\mu_{\text{intégré}}$ est plus chaotique à -10°C : l'équation de la courbe de tendance est $\mu = 0,03M + 0,194$ avec un coefficient de corrélation R^2 de seulement 0,87. Ces résultats s'expliquent aussi par la résistance au grattage de la glace: elle est plus faible à -5°C , donc il y a moins d'instabilité. La même remarque que celle émise au § 4.4.5 lors de l'exploitation de la largeur de la trace indentée par un clou à -5°C et -10°C reste valable.

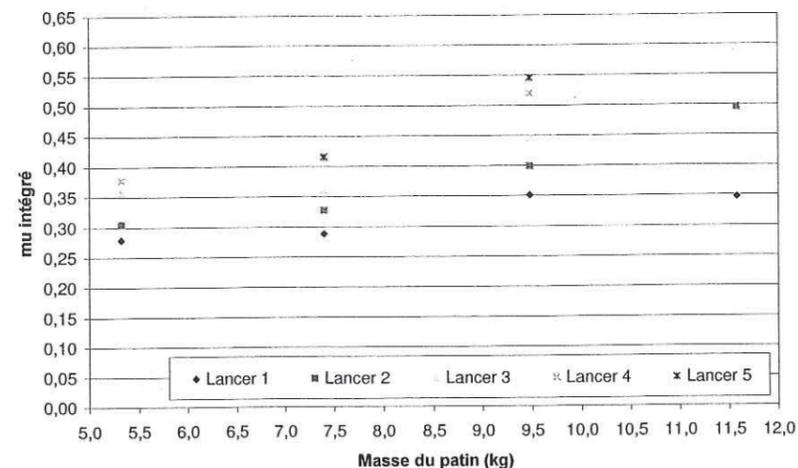
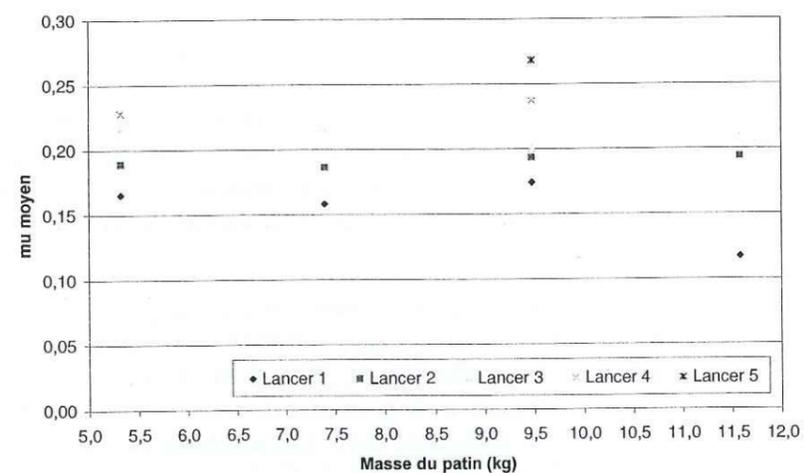
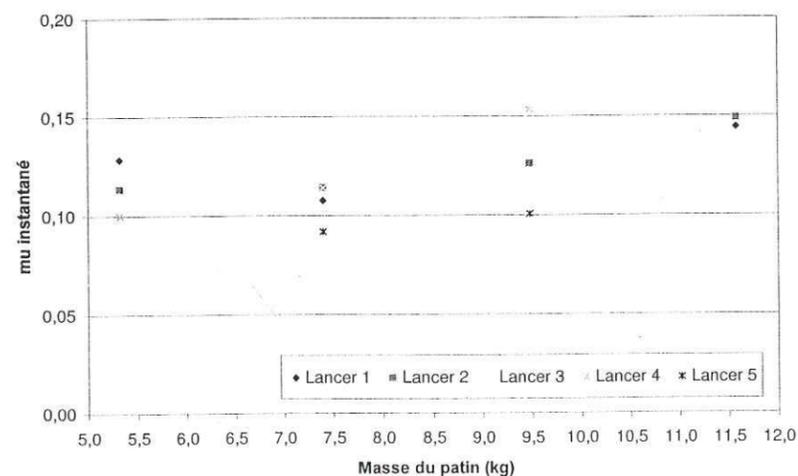
4.5.2.4 Comparaison de $\mu_{\text{intégré}}$ avec les clous et le papier abrasif

Sur la figure 4.20, la comparaison des frottements obtenus avec les clous et les papiers abrasifs révèle un effet de l'effort normal beaucoup plus marqué pour les clous. Pour une masse faible d'environ 4 kg sur quatre frotteurs, les clous donnent le même $\mu_{\text{intégré}}$ que le P150; alors que les clous frottent plus que du P50 pour une masse de 11 kg. Ceci s'explique par un grattage des clous plus marqué pour des masses élevées: le volume de glace fractionnée en neige est beaucoup plus important quand les clous creusent plus, donc le frottement est plus élevé.

4.5.3 Trois différents μ avec les clous à -20°C et -5°C

4.5.3.1 $\mu_{\text{intégré}}$

$\mu_{\text{intégré}}$ augmente avec l'usure de la piste (Fig. 4.22(a) et 4.23(a)). D'après les photos des diodes lumineuses en mouvement, plus la piste est usée, plus le patin effectue des oscillations verticales, engendrant une perte d'énergie cinétique donc une augmentation de $\mu_{\text{intégré}}$. L'in-

(a) $\mu_{intégré}$.(b) μ_{moyen} .(c) $\mu_{instantané}$.Fig. 4.23 – Trois différents μ à -20°C , pour cinq mêmes lancers.

fluence de l'usure de la piste est plus prononcé sur glace froide que sur glace chaude: pour un patin de 11,5 kg, entre le premier et le troisième lancer, $\mu_{intégré}$ passe de 0,35 à 0,60 à -20°C , mais seulement de 0,5 à 0,6 à -5°C .

$\mu_{intégré}$ augmente légèrement avec la masse du patin (Fig. 4.22(a) et 4.22(a)). L'effet de la masse du patin est plus marqué sur glace chaude que sur glace froide: pour le premier lancer, entre un patin de 5,3 kg et de 11,6 kg, $\mu_{intégré}$ passe de 0,32 à 0,52 à -5°C , mais seulement de 0,28 à 0,35 à -20°C .

Pour le premier lancer, $\mu_{intégré}$ est plus élevé sur glace chaude que sur glace froide (Fig. 4.24(a)) et l'écart semble augmenter avec la masse du patin. Par exemple, pour un patin de 11,6 kg, $\mu_{intégré}$ vaut 0,51 à -5°C et seulement 0,35 à -20°C . Ceci s'explique par la nature du contact du clou sur la glace: sur glace chaude, les sauts verticaux du patin sont moins marqués que sur glace froide, l'écart entre la longueur réelle frottée et la longueur nominale frottée est faible, le patin s'arrête rapidement et la valeur de $\mu_{intégré}$ mesurée est plus élevée.

4.5.3.2 μ_{moyen}

μ_{moyen} augmente avec l'usure de la piste, à peu près de la même façon à -20°C qu'à -5°C (Fig. 4.22(b) et 4.23(b)).

μ_{moyen} varie peu sur la plage de masse entre 5,3 et 11,6 kg. Pour le premier lancer, il vaut 0,2 à -5°C et 0,15 à -20°C . La tendance à l'augmentation de $\mu_{intégré}$ avec la masse du patin n'est donc qu'un artefact de mesure dû à la mauvaise appréciation de la vitesse de démarrage.

μ_{moyen} est plus faible que $\mu_{intégré}$ dans les mêmes conditions, à cause de la différence entre les valeurs de vitesse de démarrage réelles et théoriques (Fig. 4.24(a) et 4.24(b)).

Pour le premier lancer, μ_{moyen} est plus élevé sur glace chaude que sur glace froide (Fig. 4.24(b)). L'explication est la même que celle proposée pour $\mu_{intégré}$.

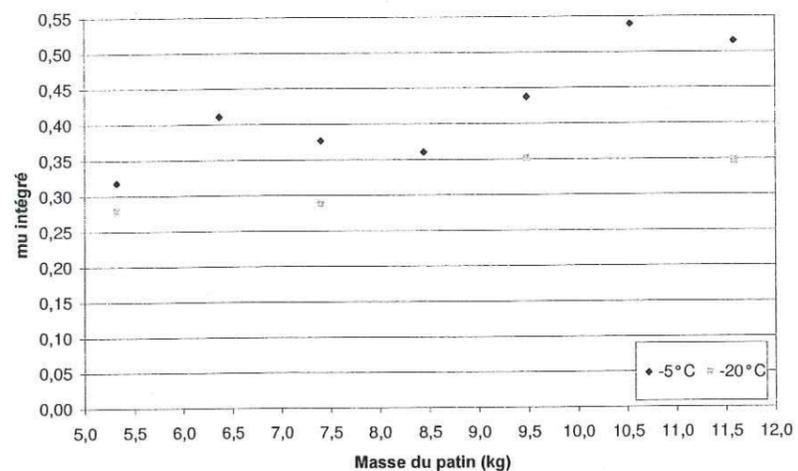
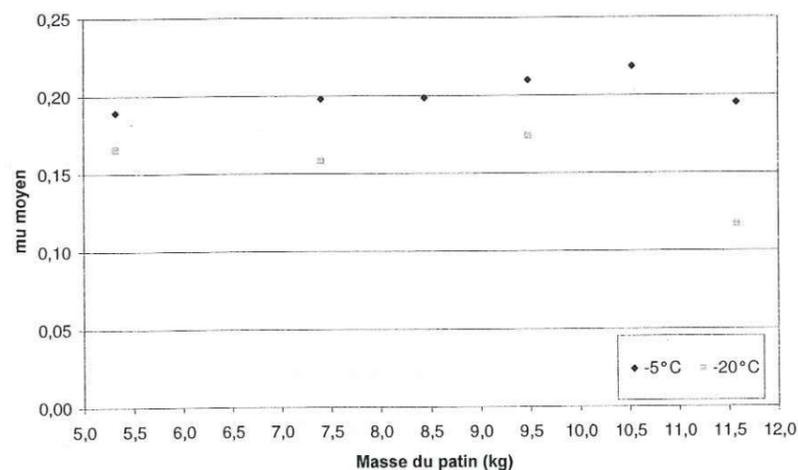
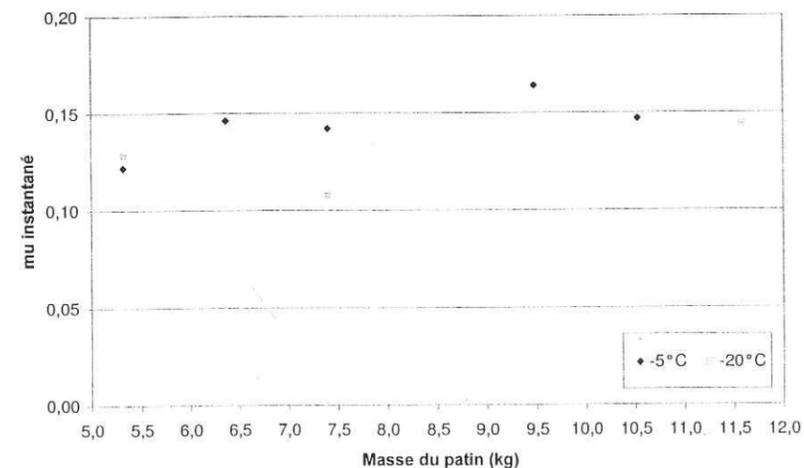
4.5.3.3 $\mu_{instantané}$

L'usure de la piste n'a pas d'influence nette sur la valeur de $\mu_{instantané}$ (Fig. 4.22(c) et 4.23(c)).

Quelle que soit la température de la glace, $\mu_{instantané}$ varie peu sur la plage de masse du patin entre 5,3 et 11,6 kg: les mécanismes de frottement, du grattage et d'écaillage mis en jeu restent donc les mêmes.

$\mu_{instantané}$ est évalué en fin de course, à faible vitesse. Il est plus faible que les deux autres μ , qui sont évalués sur le parcours entier. Ceci s'explique de deux façons. D'une part, le frottement dépend sans doute de la vitesse et ceci peut provenir d'une décroissance du frottement avec une diminution de la vitesse. D'autre part, μ_{moyen} mesuré sur la totalité du parcours est surévalué car les hypothèses utilisées pour le mesurer ne sont pas tout à fait vérifiées: la perte d'énergie autre que celle du frottement des clous (vibrations résiduelles du banc de test, tangage du patin, enfoncement dans les creux de la piste, etc.) n'est pas prise en compte pour le calcul par (4.5).

Pour le premier lancer, $\mu_{instantané}$ vaut environ 0,15 à -5°C et 0,13 à -20°C (Fig. 4.24(c)).

(a) $\mu_{\text{intégré}}$.(b) μ_{moyen} .(c) $\mu_{\text{instantané}}$.Fig. 4.24 – Comparaison des trois différents μ à -5 et -20 °C, sur piste neuve.

4.6 Conclusion pour les essais sur la piste rectiligne

Avec la piste rectiligne, nous avons observé plusieurs tendances pour le frottement des clous et des papiers abrasifs à taille de grain entre 50 et 350 μm .

- Les observations de la surface de glace à la loupe binoculaire après passage de l'indenteur, papier abrasif ou clou, sont très intéressantes mais restent malheureusement qualitatives. Elles ne permettent d'accéder à aucune estimation des phénomènes dominants lors du frottement. Les traces de grattage sont très différentes pour des grains d'un même papier abrasif: entailles profondes et fines côtoyant des empreintes superficielles et larges. Les clous ont tendance à créer un sillon à bords plus écaillés à basse température et forte charge. La largeur moyenne du sillon augmente avec la masse du patin et la température.
- Les différentes mesures des trois types de μ ont démontré l'intérêt des améliorations successives du dispositif expérimental. $\mu_{\text{intégré}}$ est évalué d'après la distance parcourue par le patin, en supposant le choc élastique. μ_{moyen} tient compte de la correction par la vitesse de démarrage réelle. $\mu_{\text{instantané}}$ est obtenu sur la dernière partie du parcours par une mesure accélérométrique directe. Le μ le plus intéressant physiquement est $\mu_{\text{instantané}}$ mesuré directement car il s'affranchit de nombreux artefacts de mesure; mais les conditions expérimentales correspondent à une vitesse expérimentale tendant vers zéro.
- Les valeurs de coefficient de frottement trouvées ne peuvent être directement appliquées à un pneu clouté. D'une part, de nombreux paramètres, dus au pneu ou aux clous, sont éliminés ici alors qu'ils interviennent en réalité fortement sur la capacité d'adhérence du pneu clouté. D'autre part, la gamme de $T_0 V \sigma_n$ balayée ici reste limitée: effort exercé par un clou de 0,9 à 2,7 daN (à comparer à l'effort normal sur chaque clou d'un pneu clouté de l'ordre de 15 daN); vitesse maximale au démarrage du patin 12 km/h; température entre -20 et -5 °C.
- Dans la gamme de taille d'indenteurs des papiers abrasifs, un petit nombre de gros indenteurs frotte plus qu'un grand nombre de petits indenteurs.
- μ_{moyen} est toujours plus faible que $\mu_{\text{intégré}}$ car la vitesse de démarrage réelle est plus faible que la vitesse théorique. $\mu_{\text{instantané}}$ mesuré sur la dernière partie du parcours est toujours encore plus faible que μ_{moyen} .
- Pour les mesures avec des clous sur ce banc de test, $\mu_{\text{intégré}}$ et μ_{moyen} sont plus élevés à -5 °C qu'à -20 °C. Pour une charge de 5,5 à 11,5 kg, $\mu_{\text{intégré}}$ augmente de 0,28 à 0,35 à -20 °C et de 0,32 à 0,55 à -5 °C. μ_{moyen} ne varie pas avec l'effort normal et vaut environ 0,16 à -20 °C et 0,20 à -5 °C.
- $\mu_{\text{instantané}}$ pour un patin supporté par quatre clous est indépendant de la température et de la masse du patin: il vaut environ 0,14. Les phénomènes physiques mis en jeu pour générer le frottement dans ces différentes conditions expérimentales restent les mêmes.

FROTTEMENT ÉLASTOMÈRE - GLACE

Chapitre 5

Présentation de la machine tournante

5.1 Présentation du dispositif expérimental ¹

5.1.1 Caractéristiques de la machine tournante

Le dispositif expérimental utilisé pour étudier le frottement gomme-glace est une machine tournante du type pion-disque: un patin d'élastomère est appliqué sur une piste de glace en rotation sous un effort normal contrôlé (Fig. 5.1). Après chaque essai, la surface de glace est observée en réflexion à la loupe binoculaire (Fig. 5.2). Les conditions expérimentales de frottement sont exprimées en gamme de $T_0 V \sigma_n$ température ambiante T_0 , vitesse relative entre le patin et la glace V et effort normal appliqué sur le patin F_n . Le cahier des charges initial, les premiers problèmes expérimentaux avec la machine tournante conçue par le bureau d'étude et les modifications apportées au dispositifs sont détaillés en annexe F.1.

5.1.1.1 Dimensionnement de la machine tournante

5.1.1.1.1 Plage d'effort normal appliqué sur le patin

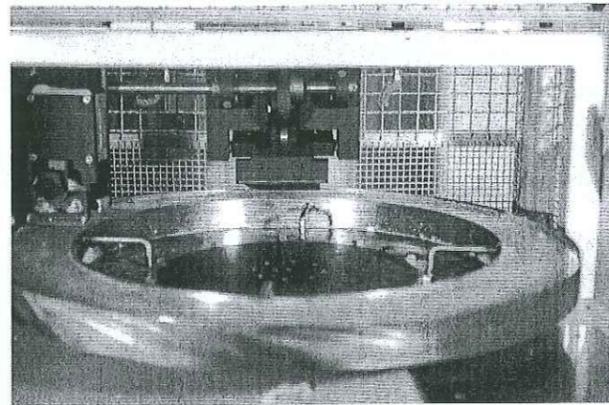
L'effort normal appliqué sur le patin, obtenu par un levier supportant une tige portant plus ou moins de contrepoids, varie entre 20 et 80 daN par incrément de 5 daN environ pour chaque contrepoids supplémentaire ajouté. La contrainte normale nominale σ_n exercée sur le patin est calculée pour une aire de contact nominale A_n de 20 cm² (Tab. 5.1).

En raison des vibrations de la machine, F_n subit des fluctuations qui peuvent être importantes. Afin d'accéder à μ , les efforts normaux et tangentiels sont enregistrés en continu. Les μ obtenus pour chaque manipulation correspondent donc à des efforts normaux appliqués réellement et connus. Le tableau 5.1 ne donne ainsi que des ordres de grandeur.

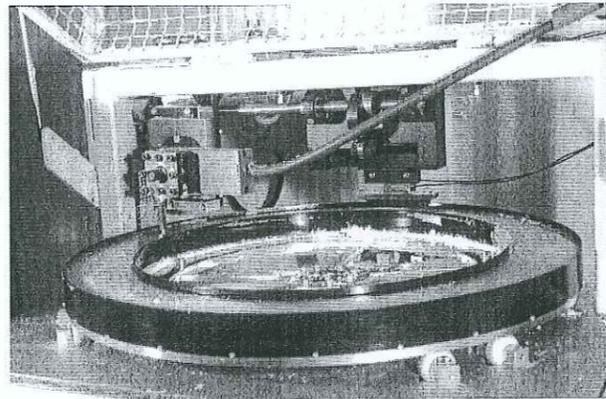
5.1.1.1.2 Plage de vitesse de rotation

La piste de glace est entraînée en rotation par un moteur asynchrone triphasé commandé par un variateur de vitesse. Un tachymètre associé à un émetteur d'impulsions affiche la vitesse instantanée de rotation de la piste. L'affichage de la vitesse a été vérifié en posant un tachymètre manuel sur l'axe de rotation de l'arbre. Le tableau 5.2 indique la correspondance entre la vitesse de rotation et des données plus directement utilisables, pour la piste extérieure de rayon moyen

¹ Les différentes évolutions du dispositif expérimental et les étapes de l'établissement du protocole expérimental sont décrites dans de nombreux rapports internes (Déloye, 2001).



(a) Avant modifications.



(b) Après modifications.

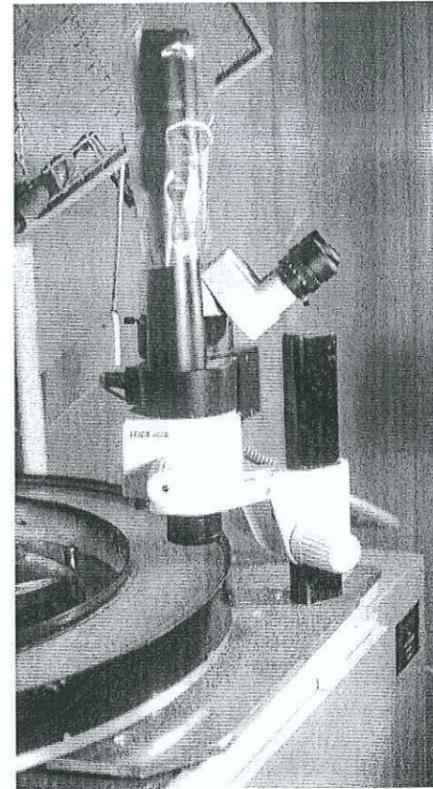
Fig. 5.1 – Vues générales de la machine tournante.

| Nombre de contrepoids sur le fléau | Effort normal moyen (daN) | Contrainte normale nominale (bar) |
|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| 3 | 24 | 1,20 |
| 7 | 42 | 2,10 |
| 12 | 65 | 3,25 |
| 16 | 83 | 4,15 |

Tab. 5.1 – Correspondance entre le nombre de contrepoids placés sur le fléau, F_n et σ_n pour $A_n = 20 \text{ cm}^2$.

| Vitesse de rotation (tours/min) | Vitesse de glissement (m/s) | Vitesse de glissement (km/h) | Durée d'un tour (s) | Nombre d'acquisitions par tour (à 100 Hz) |
|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------------------|
| 50 | 1,91 | 6,88 | 1,2 | 120 |
| 100 | 3,82 | 13,76 | 0,6 | 60 |
| 150 | 5,73 | 20,64 | 0,4 | 40 |
| 200 | 7,64 | 27,52 | 0,3 | 30 |
| 250 | 9,56 | 34,40 | 0,24 | 24 |
| 300 | 11,47 | 41,28 | 0,2 | 20 |

Tab. 5.2 – Correspondance entre la vitesse de rotation nominale et la vitesse de glissement.

Fig. 5.2 – Loupe binoculaire Leica MZ6 permettant un grossissement de $\times 80$.

365 mm (c'est en effet avec cette piste que la quasi-totalité des mesures a été effectuée afin de limiter l'effet de la courbure de la piste).

La vitesse réelle affichée décroît de quelques tours/min dès le chargement du patin sur la piste et varie légèrement au cours de l'essai. Ainsi, une vitesse de consigne de 50 tours/min peut correspondre à une vitesse instantanée variant entre 48 et 52 tours/min. La vitesse instantanée n'est pas enregistrée en continu lors des mesures. La vitesse nominale de chaque essai correspond à la vitesse réelle à mieux que 5 % près.

5.1.1.2 Epreuves de gomme

5.1.1.2.1 Formulations des mélanges de gomme

Deux formulations principales de mélanges sont utilisées, F1 et F2. Le mélange F1 est la *référence glace* pour les bandes de roulement, i.e. le mélange utilisé dans les pneus spécifiques hiver pour les pays nordiques. Le mélange F2 est la référence des pneus neige, i.e. un mélange polyvalent aussi performant en été qu'en hiver. Les propriétés viscoélastiques sont présentées en annexe F.2.

Les T_g des deux mélanges sont très différentes : -42°C pour F1 et -12°C pour F2 (cf. Fig. F.1). A -10°C , le module élastique G' du mélange F1 (1,5 MPa) est plus faible que celui du mélange F2 (6,6 MPa) (F1 est plus souple que F2²), et le module de perte G'' de F1 (0,6 MPa) est plus faible que celui de F2 (3,9 MPa), qui est donc plus hystérétique. Rappelons que sous une sollicitation sinusoïdale imposée, l'énergie ΔW dissipée par un élastomère dépend des conditions (§ 1.2.1.5) : pour une sollicitation à énergie, déformation ou contrainte imposée, ΔW est respectivement proportionnel à $\tan \delta$, G'' ou G''/G'^2 . Les valeurs de G''/G'^2 sont cohérentes avec la meilleure performance sur glace des pneus de formulation F1 que ceux de formulation F2.

5.1.1.2.2 Géométrie des patins

L'élastomère est vulcanisé sur une plaque en laiton servant de support pour le positionnement sur la machine tournante. La surface de contact nominale est de longueur 100 cm et de largeur 2 cm. L'éprouvette possède une *bascule* à l'avant du patin (i.e. une forme arrondie), afin de limiter la surpression, alors que l'arrière est coupé à angle droit. L'éprouvette est positionnée dans le *sens normal* ou dans le *sens retourné* si la bascule ou l'angle droit respectivement est en avant dans le sens de la marche. Les différentes éprouvettes utilisées (Fig. 5.3) ont les caractéristiques suivantes :

- **Eprouvette D-F1** : de formulation F1. La surface de contact gomme-glace avec cette éprouvette est décentrée à cause du grand rayon de courbure de la bascule (Fig. 5.4).
- **Eprouvette D-F1'** : de formulation F1' légèrement plus souple que F1 et de même géométrie que D-F1.
- **Eprouvette D-F2** : de formulation F2 et de même géométrie que D-F1.
- **Eprouvettes A-i-j** : de formulation F2 et de même géométrie que D-F1. Une rainure d'épaisseur 0,5 mm et de profondeur entre 1, 5 et 9 mm est usinée à 6 mm de la ligne d'attaque entre la gomme et la glace afin de former une *lamelle*. i vaut 0 si l'éprouvette ne comporte pas de lamelle, 1 quand la lamelle est placée du côté de la bascule ou 2 quand la lamelle est placée du côté de l'angle droit et j désigne la profondeur de la lamelle (exprimée en mm). Les 7 éprouvettes sont A-0-0 (mêmes géométrie et formulation que D-F2), A-1-1, A-2-1, A-1-5, A-2-5, A-1-9 et A-2-9 (e.g. Fig. 5.5). La lamelle de profondeur 1 mm est nommée *grain d'orge*.
- **Eprouvettes B-n** : de formulation F1 et de géométries tracées sur la figure 5.6. n représente

2. Dorénavant, l'appellation *mélange souple* désignera la formulation F1 et *mélange rigide* la formulation F2.

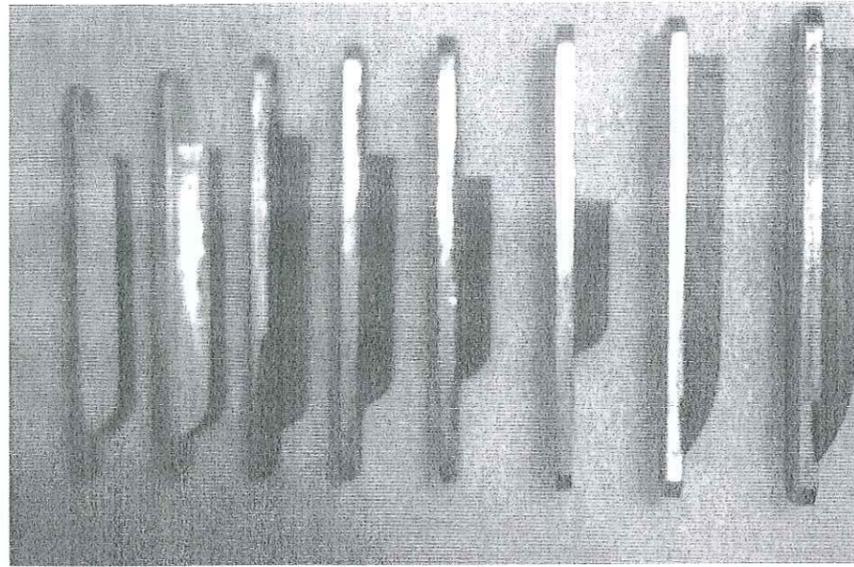


Fig. 5.3 – De gauche à droite : éprouvette bois + 1 mm de formulation F1, cuivre + 1 mm de formulation F1, éprouvettes B-10 à B-4, éprouvette A-2-9 et éprouvette A-2-5.

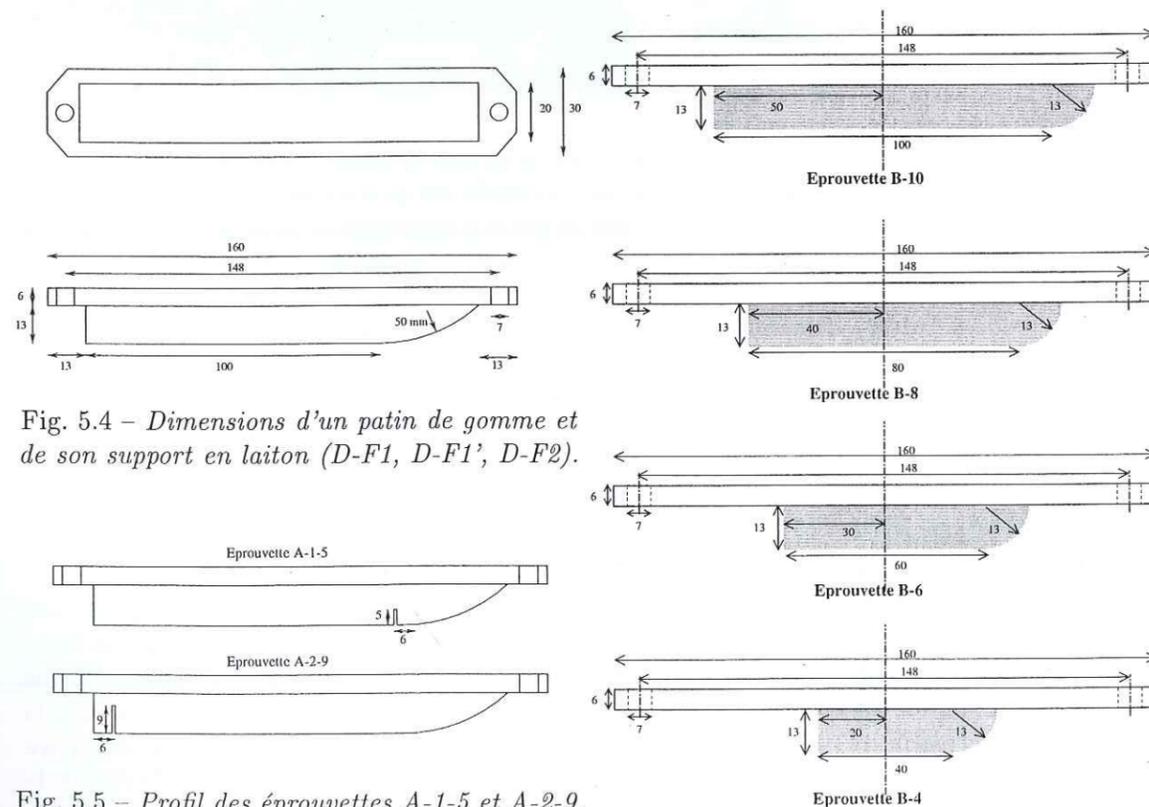


Fig. 5.4 – Dimensions d'un patin de gomme et de son support en laiton (D-F1, D-F1', D-F2).

Fig. 5.5 – Profil des éprouvettes A-1-5 et A-2-9.

Fig. 5.6 – Profil des patins B-n.

la longueur de l'éprouvette (exprimée en cm) et vaut 4, 6, 8 ou 10. La surface de contact avec la glace est centrée par rapport au support en laiton.

- **Éprouvettes en bois et en cuivre** : de même forme que le patin B-10 à surface de contact centrée. Ces éprouvettes peuvent être recouvertes de gomme ou de glace.

5.1.1.3 Dispositif d'application de la charge sur le patin

Le dispositif d'application de la charge présente une perte d'énergie par frottements internes très importante mise en évidence avec le capteur d'efforts. L'effort normal appliqué sur le patin dépend du nombre de contrepoids placés sur la tige du fléau, mais aussi de la température ambiante, de la lubrification au niveau du fléau et des vibrations de l'ensemble (Fig. 5.7). La mesure de l'effort normal appliqué par quatre contrepoids (théoriquement 20 daN) peut ainsi varier entre 10 et 30 daN selon les conditions de lubrification et de vibration. L'utilisation d'un spray Téflon vaporisé sur tous les éléments permet de réduire les frottements, mais l'utilisation du capteur de force s'avère indispensable pour connaître l'effort normal appliqué sur le patin.

Nous expliquons en annexe F.3 pourquoi nous avons supprimé les jeux entre la chape d'application de la charge et le porte-éprouvette.

5.1.2 Elaboration de la piste de glace

5.1.2.1 Méthode de fabrication de la glace

Le bac annulaire fait 300 mm de rayon intérieur, 400 mm de rayon extérieur et 50 mm de hauteur. Les tentatives d'élaboration de glace colonnaire étant restées infructueuses (cf. § F.4), nous avons mis au point une technique de préparation de la piste plus adéquate. Le bac annulaire étant fixé sur la machine, la masse de la piste est fabriquée en glace composite solide, puis la couche de surface est surimposée.

Pour la masse, une *glace composite* très solide est fabriquée de la manière suivante. Des couches successives de neige (obtenue par broyage de carottes de glace formées à partir d'eau distillée) et de filasse (longues fibres de lin enchevêtrées) sont déposées dans le bac annulaire, jusqu'à obtenir une hauteur d'environ 3 cm. Nous saturons alors d'eau distillée à 1 °C et attendons que l'ensemble gèle.

Ensuite, pour chaque couche de surface supplémentaire, la glace est fondue en surface par un jet d'air chaud afin d'assurer une meilleure cohésion avec la prochaine couche : 1,5 litre d'eau distillée, à une température entre 5 et 10 °C, est nécessaire pour former environ 5 mm d'épaisseur de nouvelle glace (l'apport de chaleur de l'eau aurait juste permis de fondre environ 0,4 mm de surface de glace). La surface de chaque couche est usinée car elle présente des irrégularités créées par le gel trop rapide de la surface en contact avec l'air ambiant. L'opération est renouvelée jusqu'à obtenir une épaisseur totale de glace d'environ 5 cm. La fabrication des couches de surface est longue à -5 °C (elle nécessite deux à trois jours) et très délicate à -20 °C (lors du chauffage au décapeur thermique et de l'arrosage à l'eau froide, les chocs thermiques peuvent fracturer la glace sur une grande profondeur).

5.1.2.2 Usinage de la surface de la glace

Le cahier des charges prévoyait un usinage de la piste par une lame de rabot à bois (Fig. 5.8(a)). Ceci s'étant révélé impossible (cf. § F.5), nous avons finalement choisi d'utiliser un outil de tour monté sur une platine horizontale, elle-même fixée sur le chariot porte-lame d'origine

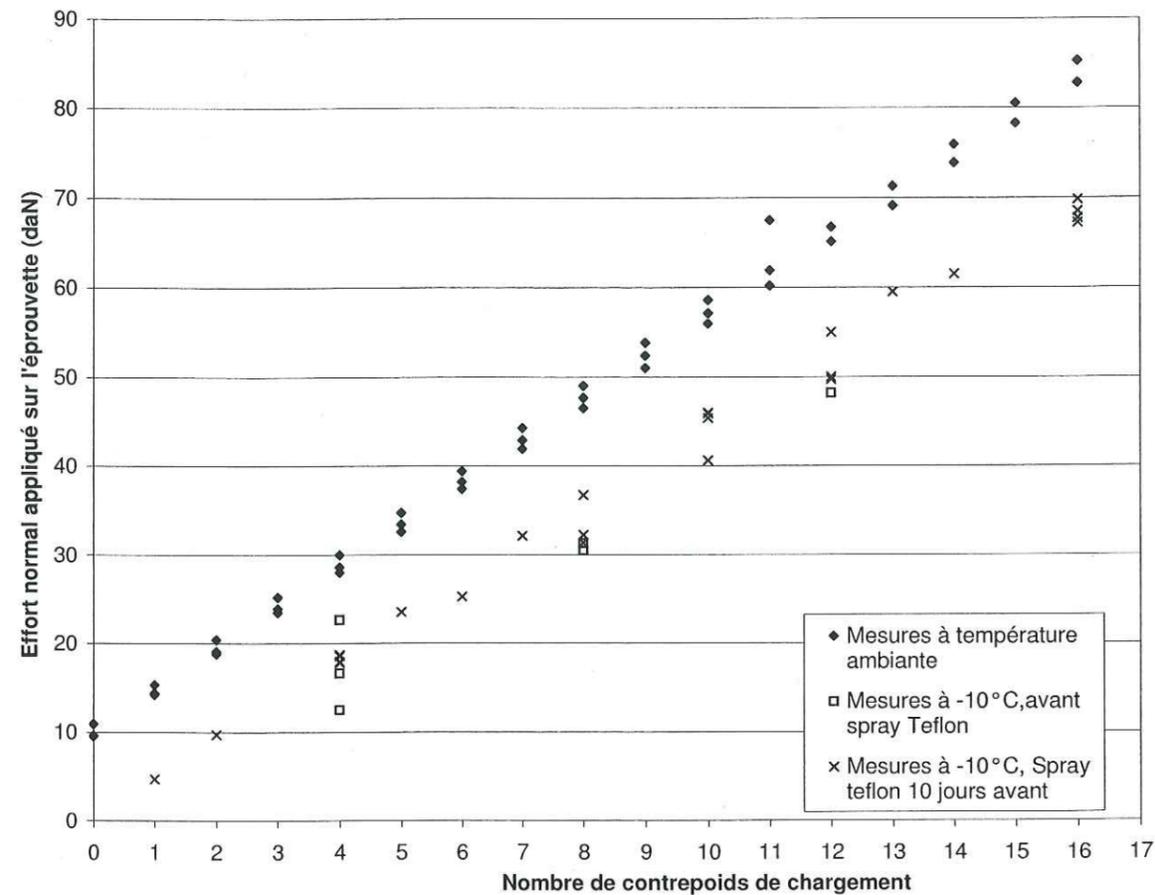
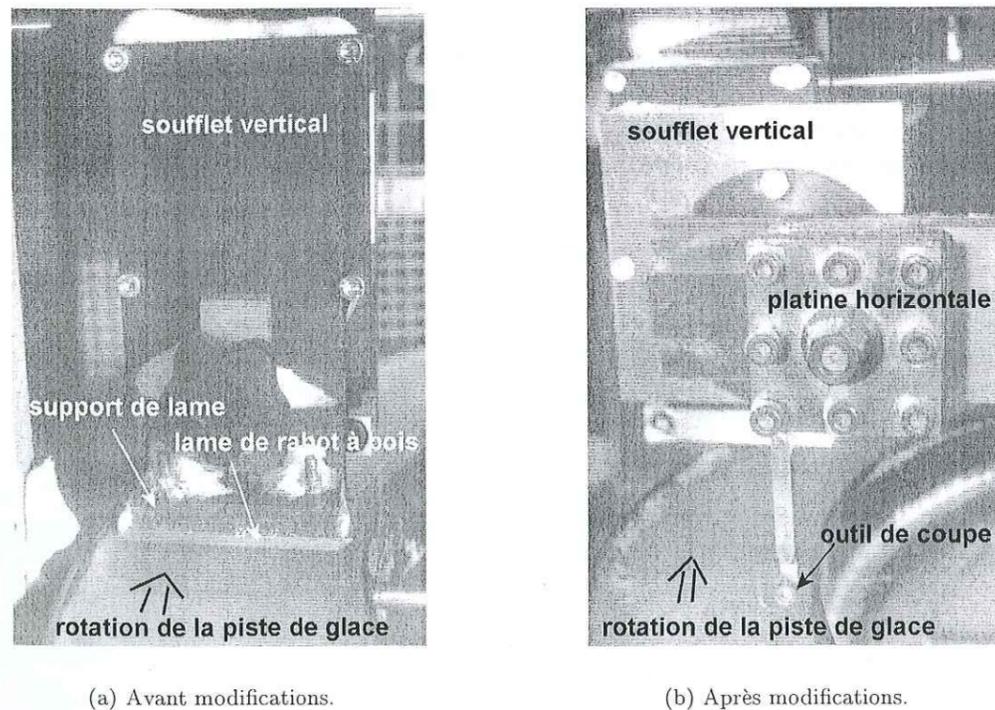


Fig. 5.7 – Frottements du dispositif d'application de la charge sur le patin.



(a) Avant modifications.

(b) Après modifications.

Fig. 5.8 – Dispositif d'usinage de la piste de glace.

(Fig. 5.8(b)). L'outil de coupe utilisé présente une tête circulaire de diamètre 10 mm afin de permettre une vitesse d'avance horizontale assez rapide. Même avec des profondeurs de passe importantes, l'effort sur la glace reste très faible, grâce à la section d'usinage très réduite. La vitesse de rotation de la piste pendant l'usinage est fixée à 200 tours/min (soit une vitesse relative outil-glace supérieure à 7 m/s). L'opérateur tourne manuellement la manivelle entraînant la platine horizontale (l'outil parcourt horizontalement 0,75 mm en 1 tour de manivelle). L'usinage de la surface de glace s'effectue en deux étapes : plusieurs passes avec une vitesse d'avance assez rapide permettent d'araser les macrorugosités de la glace ; ensuite, le surfacage final est effectué en une passe à vitesse d'avance faible. La profondeur de passe est variable et n'est pas mesurable : l'outil doit araser une très faible épaisseur de glace lors du surfacage final. Malgré la fragilité de la glace à basse température, cette méthode d'usinage ne provoque pas de fracture de la piste.

Lors du surfacage final de la piste, la vitesse d'avance horizontale de l'outil était d'environ 2.10^{-4} m/s (un quart de tour de manivelle par seconde). Compte tenu du diamètre de l'outil ($R = 10$ mm) et de la distance horizontale parcourue par l'outil en 1 tour de piste à 200 tours/min ($d \approx 0,06$ mm), la hauteur des rugosités laissées par le surfacage final est en théorie de l'ordre de 5 nm (obtenue par $R [1 - \sqrt{1 - [(d^2)/(4R^2)]}]$).

5.1.3 Capteur d'efforts bidirectionnel

5.1.3.1 Dispositif d'acquisition des efforts au niveau du patin

Le dispositif d'acquisition des efforts comprend un capteur d'efforts bidirectionnel (capteur en S à jauges de déformation, marque TME, type F501-2D, capacité 0-100 daN pour les deux efforts, hauteur 50 mm, longueur 45 mm et largeur 19 mm), un câble de transmission et un PC d'acquisition (Visual Designer) placé en salle de mesure à l'extérieur de la chambre froide (Fig. 5.9). Le réglage du capteur est tel que la valeur des deux efforts F_t et F_n exprimée en daN vaut 10 fois les signaux de sortie en $\pm 0-10$ V. Les coefficients de sécurité étant 1,5 vis-à-vis du fonctionnement électrique et 3 vis-à-vis de l'intégrité mécanique, des vibrations engendrant F_n supérieur à 150 daN endommageraient le capteur. La fréquence maximale de réponse du capteur est entre 100 et 200 Hz. Les fournisseurs affirment que ce capteur découple les deux efforts mesurés et que le capteur est symétrique en effort tangentiel. Le capteur est livré compensé mécaniquement à -30°C . Le fournisseur assure une dérive du zéro et de la sensibilité de $10^{-4}/^\circ\text{C}$ (donc inférieur à 0,5 %). Cependant, une vérification de l'étalonnage du capteur a été faite en chambre froide.

5.1.3.2 Etalonnage du capteur en effort normal

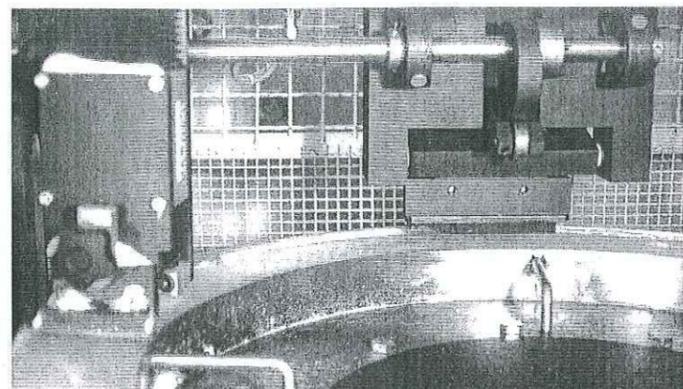
L'étalonnage en effort normal a été effectué assez aisément, après avoir monté un banc de test spécifique (cf. § F.6.1). Une légère correction doit être apportée à l'étalonnage fourni par le constructeur (i.e. effort normal en daN égal à dix fois le signal en volt) :

$$F_n = 10,2 \times x_n \quad (5.1)$$

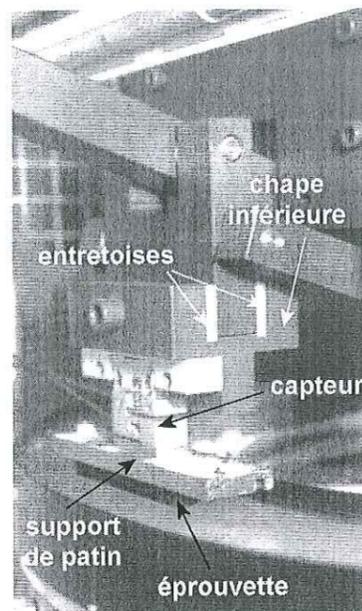
où F_n est l'effort normal en daN et x_n le signal en volt.

5.1.3.3 Evaluation du couplage interne du capteur

Au cours des étalonnages de F_n , les signaux du capteur indiquaient un effort tangentiel environ égal à $1/10^e$ de l'effort normal : l'effort tangentiel appliqué était pourtant nul, le capteur

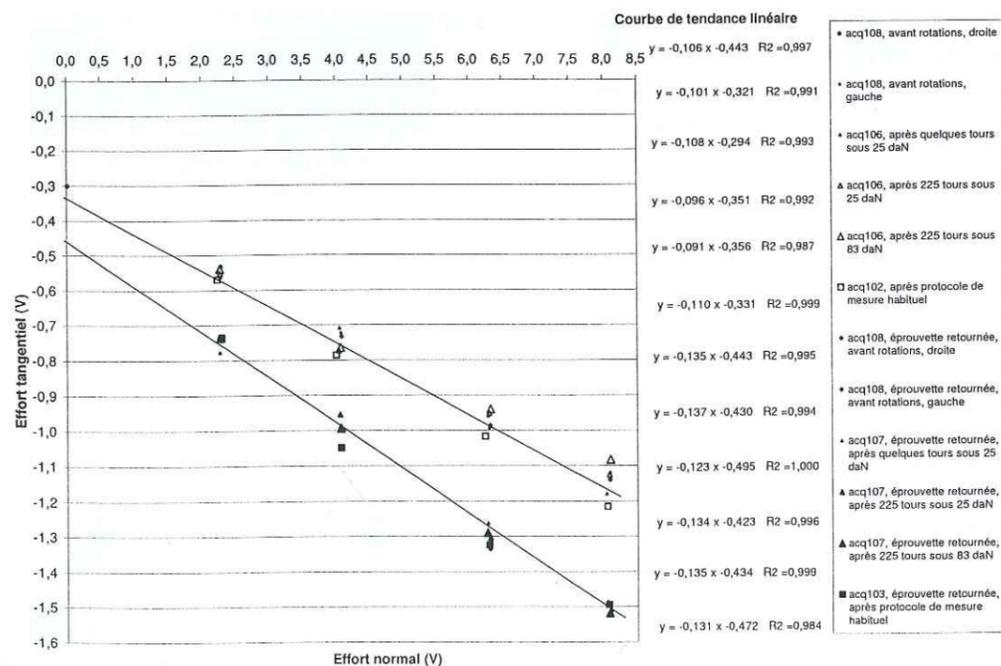


(a) Avant modifications.



(b) Après modifications.

Fig. 5.9 – Dispositif de mesure d'efforts de la machine tournante.

Fig. 5.10 – Couplage interne du capteur évalué avec l'éprouvette A-0-0 à -10°C .

étant horizontal. Cette interaction linéaire entre les efforts normal et tangentiel est due à la structure en S du capteur et nous avons dû évaluer ce couplage.

L'effort tangentiel dû uniquement au couplage interne du capteur a été estimé en effectuant quatre paliers statiques à efforts normaux correspondant à 3, 7, 12, puis 16 contrepoids placés sur le fléau d'application de la charge. Le couplage interne (effort tangentiel en fonction de l'effort normal) est linéaire (cf. les coefficients de corrélation très proches de 1 sur la figure 5.10).

La différence entre deux couplages mesurés sous le même effort normal, en posant simplement le patin sur la glace, peut aller jusqu'à 3 daN d'effort tangentiel, ce qui montre que le couplage interne du capteur dépend beaucoup de la fixation du capteur sur le système d'application de la charge. Cet écart étant trop important par rapport aux frottements à mesurer (nous souhaitons mesurer F_t variant entre 2 et 7 daN), une seule et même courbe de couplage ne peut pas être utilisée pour tous les essais. Il est indispensable d'évaluer le couplage interne après chaque mesure afin d'obtenir des valeurs correctes de l'effort tangentiel réellement appliqué. L'effet du couplage interne du capteur est corrigé de la façon suivante :

$$x_t^* = x_t - x_t^o, \quad (5.2)$$

où x_t^* est l'effort tangentiel corrigé, x_t est le signal brut et x_t^o , qui reflète le couplage interne du capteur, est le signal d'effort tangentiel obtenu en statique quand le capteur est posé sur une piste horizontale et ne supporte qu'une charge normale. x_t^o est évalué par la relation linéaire suivante (donnée par exemple par la figure 5.10), :

$$x_t^o = ax_n + b. \quad (5.3)$$

où x_n est le signal de l'effort normal. a et b sont calculés d'après les mesures en statique et varient pour chaque montage (mais restent proches de -0,1 et -0,3)

5.1.3.4 Etalonnage du capteur en effort tangentiel

L'étalonnage en effort tangentiel a pu être effectué grâce à un autre montage (cf. § F.6.2). Malgré le couplage interne très important, le capteur bidirectionnel reste fiable après la correction suivante :

$$F_t = 10,5 \times x_t^*, \quad (5.4)$$

où F_t est l'effort tangentiel en daN et x_t^* le signal en volt corrigé du couplage par (5.2).

5.1.3.5 Nécessité de la précision de l'étalonnage du capteur

En utilisant simplement l'étalonnage proposé par les fabricants (i.e. sans (5.1) et (5.4)) et sans tenir compte du couplage interne (i.e. sans (5.2) et (5.3)), l'erreur absolue sur μ pourrait atteindre 0,5. La précision de l'étalonnage est donc essentielle pour obtenir des mesures de μ fiables. Les offsets du capteurs sur les deux efforts sont négligeables (cf. § F.6.3).

Le patin est souvent relativement chaud après les tours effectués avec frottement sur la glace et adhère très fortement à la surface de glace lors des paliers statiques nécessaires pour évaluer le couplage du capteur. Parfois, de la glace se colle sous le patin qui ne repose alors plus à l'horizontale sur la piste lors des paliers statiques. Dans ce cas, l'effort tangentiel à vide est mal évalué par (5.3) et la relation linéaire du couplage obtenue n'est pas valable (l'erreur qui en résulte sur μ peut atteindre 0,5). L'étalonnage doit donc être effectué avec un patin nettoyé et suffisamment refroidi pour qu'il n'adhère pas sur la piste.

5.1.3.6 Etalonnage à effectuer avant, pendant ou après les mesures ?

La dernière question est de savoir s'il est préférable d'évaluer le couplage après chaque usure de la piste sous F_n donné ou s'il est suffisant d'effectuer un étalonnage à la fin de chaque série de mesures avec un même patin. La question est délicate pour deux raisons. D'une part, le positionnement du capteur dépend de l'usure de la piste, qui dépend elle-même du nombre de tours effectués et de l'effort normal appliqué. D'autre part, le capteur est aisément déformable et quand nous plaçons l'éprouvette sur la piste en rotation, les frottements provoquent une déformation en torsion du capteur visible : à cause de la courbure de la piste, le patin a tendance à se positionner avec l'avant dérivant vers l'extérieur de la piste.

Afin d'évaluer l'évolution du couplage au cours du temps lors d'une manipulation, nous avons effectué plusieurs tests avec l'éprouvette A-0-0, reportés sur la figure 5.10. Les couplages avant que le patin ait frotté sur la piste, en dirigeant volontairement l'avant du patin vers la droite ou vers la gauche (deux premières séries), sont les mêmes. Si le patin n'est pas démonté, le couplage change très peu après quelques tours sous faible effort normal ou de nombreux tours sous effort normal élevé.

Les deux coefficients a et b de (5.3) n'évoluent donc pas au cours d'un essai et sont indépendants de l'effort normal appliqué durant l'essai et du nombre de tours de piste effectués. L'étalonnage effectué en fin d'essai peut donc à juste titre être appliqué à toutes les mesures de coefficient de frottement sous efforts normaux différents effectués au cours de cet essai.

5.1.3.7 Influence du sens du patin

La figure 5.10 montre que, lors des paliers statiques d'évaluation du couplage, les mesures effectuées avec le patin dans le sens normal et avec le patin retourné donnent deux droites d'étalonnage différentes. Les pentes sont similaires car le comportement élastique du capteur reste inchangé. L'écart observé pour les ordonnées pourrait provenir de l'usure de la piste, le patin ne se positionnant pas de la même façon selon le profil d'usure de la piste : avec un patin retourné, la trace du patin forme une marche très marquée sur le bord extérieur qui n'est pas observée lorsque le patin est dans le sens normal (cf. § 6.2.1.1).

Cependant, les observations précédentes conduisent à supposer que cet écart entre les étalonnages avec la bascule vers l'avant ou vers l'arrière provient du fait que le capteur de force subit une charge décentrée parce que la surface de contact gomme-glace est décentrée par rapport au support en laiton du patin, lui-même centré par rapport au capteur. L'effort étant décentré, à cause de la forme en S du capteur, sa réponse est différente selon qu'il appuie plus d'un côté ou de l'autre du patin. Nous avons remarqué que les couplages pour les éprouvettes B-10, d'aire de contact centrée, sont indépendants du sens de l'éprouvette, ce qui soutient cette théorie.

5.1.3.8 Vibrations de la machine

Malgré un état de surface de la piste parfait, le patin entre en résonance dès la mise en rotation du plateau à cause des vibrations de la machine. Quand le plateau tourne, que le patin soit en l'air ou appliqué sur la glace, les deux efforts instantanés mesurés subissent d'importantes fluctuations. Selon la vitesse de rotation du plateau, les courbes des efforts en fonction du temps présentent des nœuds et des ventres très nets (environ toutes les 7 s à 50 tours/min et 6 s à 300 tours/min). La fréquence de vibration dépend de très nombreux facteurs : masse de la machine, balourd du plateau tournant, élasticité de l'ensemble du système d'application l'effort normal, etc.

Il serait illusoire de faire équilibrer le plateau tournant. Les dimensions du plateau rendent

l'équilibrage délicat à réaliser et la méthode de fabrication de la glace (composite mélange de filasse et de neige) ajoute de toute façon un déséquilibre de quelques grammes (donc un balourd non négligeable aux vitesses de rotation élevées). Les différentes tentatives pour éliminer les vibrations de la machine n'ont pas abouti (solidarisation des contrepoids, calage de la machine avec des tapis antivibration, alourdissement du bâti, etc.).

Les perturbations des efforts mesurés dépendent de différents paramètres.

- Les oscillations verticales du fléau d'application de la charge s'accroissent au cours du temps lors d'une manipulation.
- A V donné, les fluctuations des efforts instantanés augmentent avec F_n .
- Les efforts instantanés indiqués par le capteur sont toujours beaucoup plus perturbés à grande vitesse qu'à faible vitesse. Sous 83 daN, le capteur sature pour V supérieur à 200 tours/min, alors que sous 65 daN, le capteur ne sature pas, même à 300 tours/min.
- Nous n'avons pas observé de variation des fluctuations avec la température.
- Dès qu'une fissure apparaît en surface de la glace, même si la piste ne se fracture pas sur toute son épaisseur, les fluctuations des efforts mesurés sont tellement importantes que toute exploitation est impossible.

5.1.4 Conclusion sur les modifications apportées à la machine tournante

De nombreux auteurs ont utilisé des machines tournantes pour mesurer des μ sur la glace (cf. § 1.4.3), mais ce n'était pas toujours avec des élastomères et les conditions expérimentales étaient toujours moins contraignantes que les nôtres, en termes de V et σ_n . Après la réception de la machine tournante au LGGE, douze mois d'améliorations successives ont été nécessaires pour résoudre les problèmes expérimentaux.

Nous n'avons pas réussi à annuler les vibrations de la machine lors de la rotation de la piste, mais nous avons pu les limiter au mieux. Nous avons développé un protocole de fabrication de la piste de glace tel qu'elle puisse supporter, sans se fracturer, 83 daN d'effort normal exercés par le patin, même avec une vitesse de rotation de 300 tours/min.

Suite à l'ajout de roulettes pour supporter la piste de glace et éliminer le fléchissement du bac annulaire (cf. § F.1), il était indispensable d'effectuer une acquisition des efforts au niveau du patin, puisque les deux modes d'obtention de μ initialement prévus devenaient impossibles (§ F.1). Nous avons montré que le capteur F501-2D présente un couplage très important entre les deux efforts orthogonaux qu'il mesure. Cependant, une correction de ce couplage nous permet d'accéder aux efforts F_n et F_t réellement exercés sur le patin (§ 5.1.3).

5.2 Procédure d'acquisition et évaluation du frottement

5.2.1 Premier protocole expérimental

5.2.1.1 Obtention des données

5.2.1.1.1 Acquisition des efforts normal et tangentiel

Dans un premier temps, les mesures de μ ont été effectuées pour différents F_n sur la même piste de glace. La piste de glace était entraînée à vitesse constante et F_n et F_t étaient enregistrés en continu, ainsi que la durée écoulée depuis le début de l'acquisition (Fig. F.7 et F.8).

Le patin était posé sur la piste en rotation, avec successivement 3, 7, 12 puis 16 contrepoids sur le fléau, afin d'obtenir des paliers pour des efforts normaux nominaux sur le patin de 24,

42, 65 et 83 daN. Après avoir relevé le patin et avoir arrêté la rotation de la piste, le patin était reposé sur la glace avec les 16 contrepoids sur le fléau. Ensuite, le patin était relevé et reposé sur la piste arrêtée avec successivement 12, 7, puis 3 contrepoids. A chaque palier, la piste était tournée à la main pour que le patin ne repose pas au même endroit (en effet, si la surface de glace était encore recouverte d'un fin film d'eau, le patin collait très facilement). L'acquisition n'était arrêtée qu'après ces mesures destinées à évaluer le couplage du capteur de force.

5.2.1.1.2 Fréquence d'acquisition des efforts

Le pas de temps d'échantillonnage était fixé à 10 ms, afin d'avoir le plus grand nombre possible de points d'acquisition par tour (cf. Tab. 5.2). Ceci tient compte de deux contraintes. D'une part, le temps de réponse du capteur à jauge ne permet pas de fréquences d'acquisition supérieures à 100 ou 200 Hz d'après le fournisseur. D'autre part, le PC d'acquisition ne permet pas de stocker des valeurs et d'effectuer simultanément des calculs de moyennes pour des pas de temps plus courts. Malgré ses potentialités, le logiciel d'acquisition Visual Designer n'est donc utilisé que pour stocker les données dans un fichier, sans aucun traitement de données préalable.

5.2.1.2 Exploitation des données

5.2.1.2.1 Paliers des efforts

Les deux exemples d'acquisition présentés au § F.7.1 montrent bien que les perturbations des efforts mesurés augmentent avec V et F_n . A 50 tours/min, les quatre paliers correspondant aux acquisitions d'efforts à 3, 7, 12 et 16 contrepoids sont visibles (Fig. F.7(a)), alors qu'à 300 tours/min, le signal est complètement bruité (Fig. F.8(a)). Dans tous les cas, pour faire apparaître les paliers des efforts normal et tangentiel, la moyenne de dix acquisitions successives de chaque effort est tracée toutes les 10 ms.

Les quatre paliers statiques permettent d'obtenir l'effort normal nominal pour un nombre de contrepoids donné, ainsi que les deux coefficients a et b de la relation linéaire du couplage du capteur (5.3).

5.2.1.2.2 Calcul des efforts

F_n est obtenu directement à partir du signal du capteur par (5.1).

L'effort tangentiel est corrigé de l'effort tangentiel à vide par (5.2). Cet effort tangentiel à vide, dû au couplage interne du capteur, est donné par la relation (5.3), dans laquelle il s'est avéré plus judicieux de tenir compte de l'effort normal instantané que de l'effort normal nominal pour deux raisons. D'une part, la moyenne de l'effort normal instantané lors d'un palier dynamique est souvent légèrement supérieure à l'effort normal nominal correspondant. D'autre part, le signal d'effort normal instantané x_n varie de $\pm 0,5$ V environ à 50 tours/min et de plus de ± 2 V à 300 tours/min, ce qui engendre des fluctuations sur le signal d'effort tangentiel à vide x_t^0 trop importantes (jusqu'à $\pm 0,05$ V à 50 tours/min et $\pm 0,2$ V à 300 tours/min) pour être négligeables devant les signaux d'efforts tangentiels absolus mesurés x_t . Enfin, l'effort tangentiel F_t est calculé à partir du signal d'effort tangentiel corrigé x_t^* par (5.4).

5.2.1.2.3 Evaluation du coefficient de frottement

Coefficient de frottement instantané

Un coefficient de frottement calculé toutes les 10 ms comme le rapport de l'effort tangentiel instantané à l'effort normal moyen sur le palier subit d'importantes fluctuations. En revanche, le μ instantané calculé comme le rapport de l'effort tangentiel réel à l'effort normal réel au même instant a plus de sens physique et ses fluctuations sont amenuesées : ceci montre que le capteur

réagit assez rapidement aux sollicitations et que les valeurs instantanées des efforts tangentiel et normal mesurées toutes les 10 ms sont significatives.

Coefficient de frottement moyen sur un palier

Le μ moyen sur chaque palier est obtenu comme le rapport de l'effort tangentiel moyen sur chaque palier à l'effort normal moyen sur chaque palier (e.g. Fig. F.7 et F.8).

5.2.1.3 Effet de la saturation du capteur en effort normal

Dans les cas où le capteur sature en effort normal à cause des vibrations, le μ instantané est sur-évalué par rapport à la réalité, puisqu'il est calculé par le rapport de l'effort tangentiel instantané à l'effort normal instantané qui est sous-évalué. Nous obtenons alors seulement une borne supérieure de μ , qui est néanmoins intéressante car elle correspond à des conditions expérimentales pour lesquelles le frottement est très faible (effort normal important et vitesse élevée, cf. Fig. F.8).

5.2.1.4 Résultats obtenus avec le premier protocole expérimental

L'ensemble des résultats obtenus avec le premier protocole expérimental est donné en annexe F.7.2. Nous rappelons ici uniquement les principales conclusions des différents essais effectués. L'incertitude sur la mesure est inférieure à 10 % pour μ supérieur à 0,05, mais elle est bien plus élevée pour μ inférieur à 0,05. μ est indépendant de la piste de glace utilisée (intérieure ou extérieure) et du nettoyage de la surface de la gomme. Deux mélanges très proches ne peuvent être distingués avec la machine. Un patin retourné donne μ plus faible que dans le sens normal. μ décroît quand T_0 , V ou F_n augmentent. La valeur de μ dépend de l'histoire de la piste, du chargement ou déchargement du fléau et de la longueur des paliers d'acquisition : le protocole expérimental doit donc être amélioré.

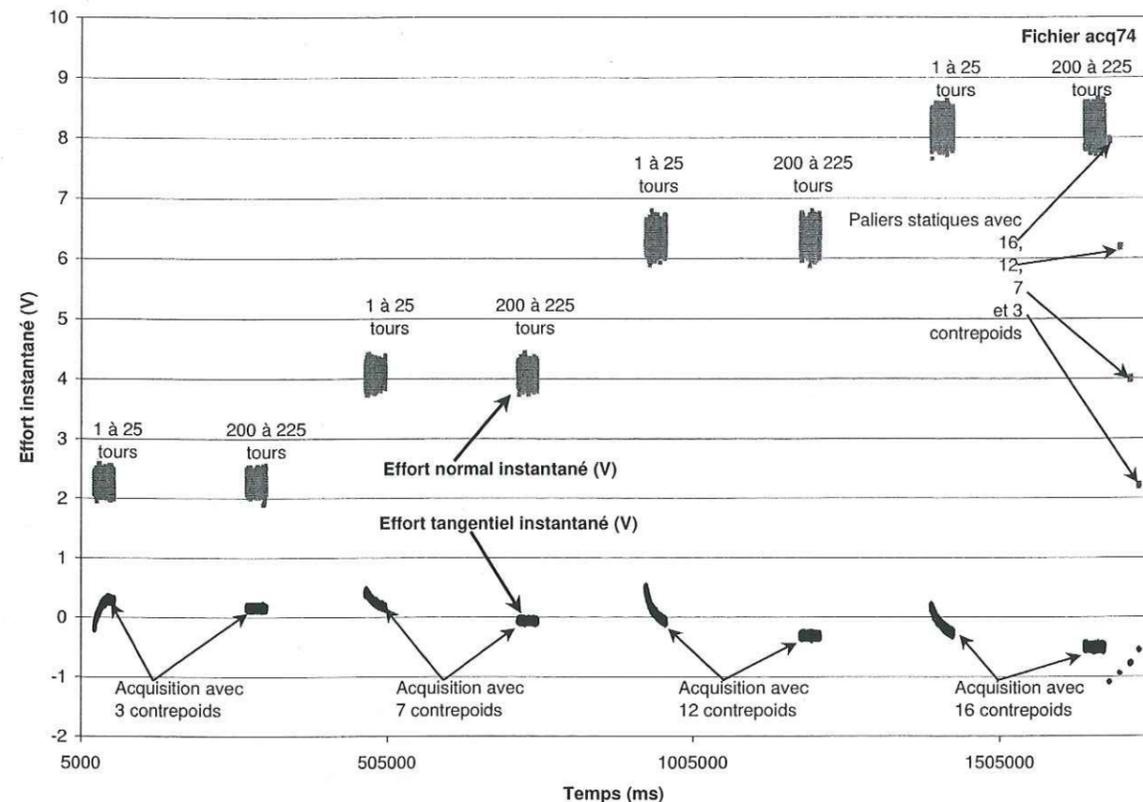
5.2.2 Elaboration d'un protocole expérimental définitif

5.2.2.1 Principe du protocole expérimental définitif

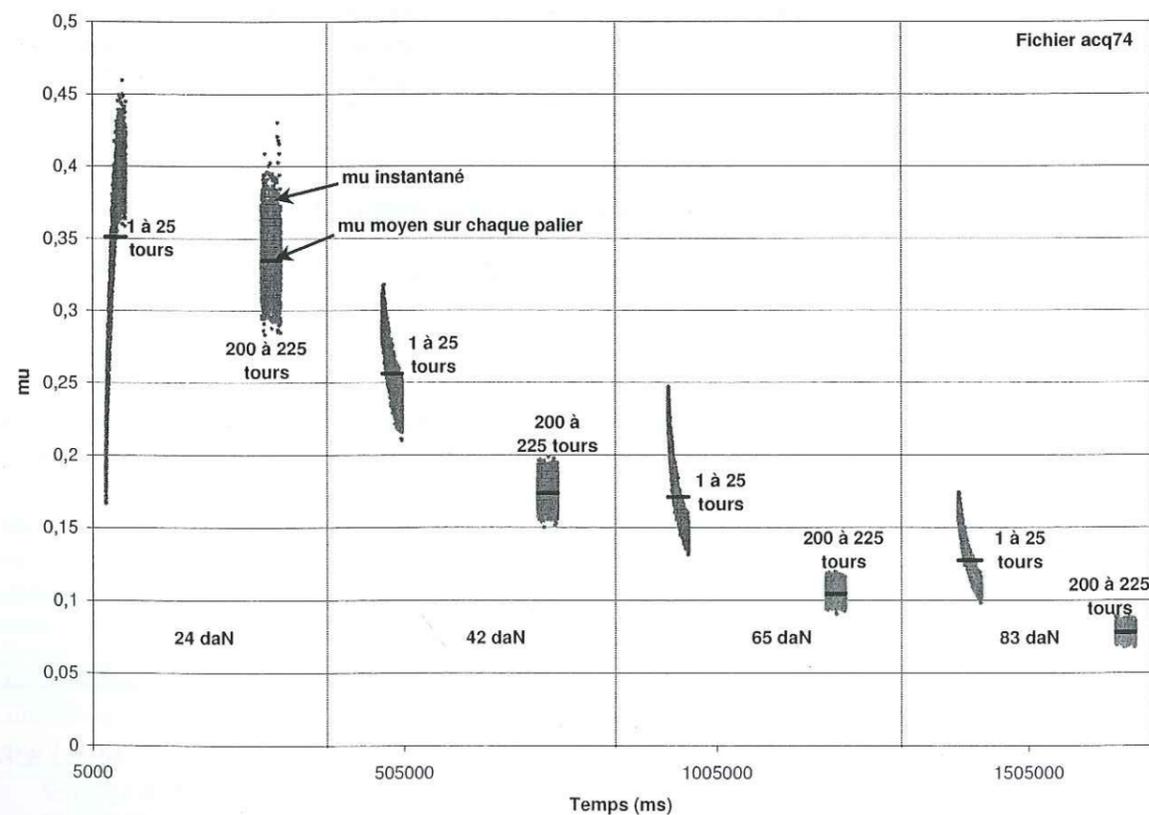
Il est indispensable d'usiner la piste entre chaque mesure pour limiter l'effet de l'histoire de la piste. Ceci permet d'éliminer toute trace de fonte et d'usure de la glace. Le temps passé à usiner permet aussi de laisser aux surfaces de la glace et du patin le temps de retrouver leur équilibre thermique avec l'air ambiant. Un compromis doit être trouvé entre la durée nécessaire à chaque mesure pour un palier (assez longue pour atteindre un état stationnaire, assez courte pour ne pas allonger la durée totale d'une manipulation), la signification physique de la mesure (μ doit correspondre à un nombre de tours connu sur la glace) et la précision de la mesure (μ ne doit pas dépendre de l'effet des tours précédents). Nous avons donc défini un nouveau protocole expérimental.

Pour chaque patin, à température ambiante donnée, et pour une vitesse de rotation de la piste fixée, les mesures de μ sont effectuées avec successivement 3, 7, 12 puis 16 contrepoids sur le fléau, en usinant la surface de la piste entre chaque palier d'effort normal (Fig. 5.11(a)). Pour chaque effort normal, μ est calculé entre les tours 1 à 25 et 200 à 225 (Fig. 5.11(b)).

Les 25 premiers tours permettent d'observer les effets transitoires du frottement gomme-glace. La variation qualitative de μ instantané durant les 25 premiers tours est intéressante, mais la valeur absolue est peu significative car μ dépend de nombreux paramètres : l'usinage de la glace, la présence de neige sur la piste, le positionnement du patin et du capteur sous l'effet



(a) Signaux des efforts instantanés en fonction du temps.



(b) Coefficients de frottement instantanés et moyens sur chaque palier en fonction du temps.

Fig. 5.11 – Acquisition à 50 tours/min et paliers statiques avec l'éprouvette D-F1 à -20°C .

du frottement latéral dû à la courbure de la piste, l'aire réelle frottée variable selon la souplesse de l'élastomère et le parallélisme des surfaces de l'élastomère et de la glace.

Le μ moyen entre les tours 200 et 225 (rapport de l'effort tangentiel moyen à l'effort normal moyen entre les tours 200 et 225) correspond à un état stationnaire et sa valeur absolue est beaucoup plus fiable que lors des premiers tours. Le patin s'échauffe au cours des rotations; la piste se lisse et subit des cycles de chauffage-refroidissement à chaque passage du patin. Le μ moyen entre les tours 200 et 225 est assez représentatif du frottement en roue bloquée et sera celui que nous commenterons dorénavant³.

5.2.2.2 Evaluation de la reproductibilité des mesures et de la précision

La reproductibilité des mesures obtenues en suivant ce protocole expérimental ne pourrait être établie qu'après un grand nombre de manipulations, mais nous pouvons en donner une idée indicative (cf. § F.8.1). L'incertitude relative sur μ supérieur à 0,05 vaut 10%. L'erreur absolue sur μ inférieur à 0,05 vaut 0,005.

Il serait très intéressant de savoir à partir de quelle différence entre deux μ mesurés nous pouvons conclure qu'un mélange est meilleur qu'un autre pour la bande de roulement. Il faudrait pour cela effectuer de très nombreuses mesures de μ sous différentes conditions pour chaque mélange afin d'obtenir des résultats statistiquement significatifs.

5.3 Comparaison avec les conditions de frottement sous un pneu

Avec notre dispositif expérimental, nous ne tenons bien sûr pas compte de l'ensemble des phénomènes complexes intervenant sous un pneu: facteurs pneu (effet de la structure interne du pneu, dissipation d'énergie par déformation viscoélastique macroscopique de l'élastomère du pneu, effet de la sculpture et de la lamellisation, etc.), facteurs glace (impuretés dans la glace, présence de sel ou de sable, fonte due au rayonnement solaire, givre, taille de cristaux, amas de neige, etc.), conditions de frottement (répartition de la contrainte normale sous le pneu, longueur de l'aire de contact, vitesse de glissement, vent, température ambiante, températures dans la masse du pneu et de la glace, températures en surfaces du pneu et de la glace, etc.) et mode de fonctionnement (roulage, traction, freinage en roue bloquée ou en ABS, virage du véhicule, refroidissement des blocs du pneu entre deux contacts, etc.).

Nous pouvons simplement agir sur trois conditions expérimentales importantes et mesurables, T_0 , V et F_n . Les conditions de frottement sont définies en T_0VF_n (ou $T_0V\sigma_n$) dans la gamme suivante:

- température ambiante de la chambre froide T_0 , comprise entre -20 et -5°C ;
- vitesse relative entre le patin et la glace V , comprise entre 1,9 et 11,5 m/s;
- effort normal F_n , compris entre 24 et 83 daN sur $A_n = 20\text{ cm}^2$, soit une contrainte normale nominale sous le patin σ_n , comprise entre 1,2 et 4,15 bar.

L'écrasement du patin D-F1 a été évalué avec un comparateur sous l'application d'un effort normal statique F_n . L'écrasement du patin y (exprimé en mm) augmente linéairement avec F_n (exprimé en daN): $y = 0,0017F_n$ (i.e. 0,04 mm sous 24 daN et 1,45 mm sous 83 daN). L'importance de la déformation macroscopique du patin peut avoir trois conséquences importantes. Tout d'abord, le défaut de centrage de l'application de F_n dû à la géométrie du patin influence fortement la répartition de la contrainte normale. Ensuite, les vibrations du fléau d'application

3. Sauf mention contraire, les μ expérimentaux donnés dans la suite correspondent au μ moyen entre les tours 200 et 225, afin de refléter un état stationnaire.

de la charge influencent la réponse dynamique du patin aux variations de sollicitations car la gomme est viscoélastique (cf. Lehtovaara (1987)). Enfin, l'échauffement thermique de la gomme dû à la dissipation d'énergie par déformation joue certainement un rôle non négligeable et peut même être supérieur à celui causé par le frottement à l'interface.

Pour un pneu en freinage avec un taux de glissement quelconque, au cours de chaque cycle, chaque contact de la bande de roulement subit un échauffement rapide suivi d'une décroissance de la température de surface de type exponentielle au contact avec l'air froid. La différence fondamentale avec une machine tournante d'étude du frottement élastomère-glace est que le patin ne se refroidit pas. D'autre part, Hayhoe et Shapley (1989) avaient souligné une autre différence : avec une machine tournante, la glace subit un échauffement rapide sous le patin, suivi d'une décroissance de la température avant le passage suivant sous la gomme. Au contraire, sous un véhicule, un point de glace ne voit passer un pneu qu'une seule fois. En conditions d'utilisation réelles, Colbeck avait remarqué les cycles d'échauffement et refroidissement successifs lors de ses mesures de température d'un patin à glace (Colbeck *et al.*, 1997) et d'un ski de fond (Colbeck, 1994).

Des trois phénomènes physiques du frottement global pneu-glace (hystérèse, adhésion et effet de grattage) décrits au § 1.4.1, le système pion-disque met surtout en évidence l'adhésion d'un élastomère sur la glace. Les propriétés d'hystérèse de l'élastomère sont sollicitées par les vibrations du système d'application de la charge, mais pas par des rugosités de surface de la glace. L'effet de grattage peut être appréhendé par une lamellisation des éprouvettes, mais s'exprime peu (voire pas du tout) lors des mesures avec éprouvette dans le sens normal.

Ainsi, même μ calculé entre les tours 200 et 225 est très éloigné de celui correspondant à des conditions de sollicitations réelles sous un pneu en freinage en roue bloquée, la différence principale étant que la piste est modifiée par l'effet des passages précédents.

Chapitre 6

Variations du frottement et observations qualitatives

6.1 Variation de μ en fonction des conditions expérimentales ¹

6.1.1 Evolution du frottement avec le temps

6.1.1.1 Cas d'un mélange souple

6.1.1.1.1 Durée du régime transitoire avant l'état stationnaire

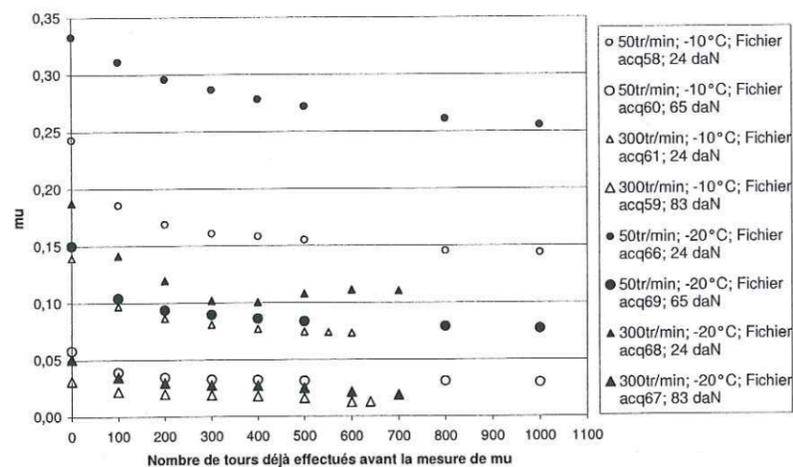
La figure 6.1 montre l'évolution de μ avec le nombre de tours déjà parcourus avant la mesure avec l'éprouvette D-F1 à -20 et -10 °C, sous plusieurs efforts normaux et à différentes vitesses. Chaque point correspond à μ moyen sur 10 tours, à partir du nombre de tours indiqué en abscisse (μ moyen est calculé à partir du quotient des moyennes de l'effort tangentiel et de l'effort normal sur ces 10 tours).

Dans la plupart des conditions expérimentales, μ décroît avec le temps, au fur et à mesure de l'usure de la piste (sauf pour acq68 qui présente un comportement inhabituel). μ décroît assez rapidement jusqu'à 300 tours, puis atteint une limite inférieure. Cette limite est atteinte d'autant plus rapidement que les conditions de frottement permettent une fonte plus rapide de l'interface. Le paramètre qui gouverne la rapidité d'établissement du régime stationnaire semble être F_n . 75 % de l'écart entre μ au démarrage et μ asymptotique sont comblés en moins de 200 tours de rotation pour F_n supérieur à 65 daN, alors qu'il faut attendre au moins le 400^e tour pour 24 daN.

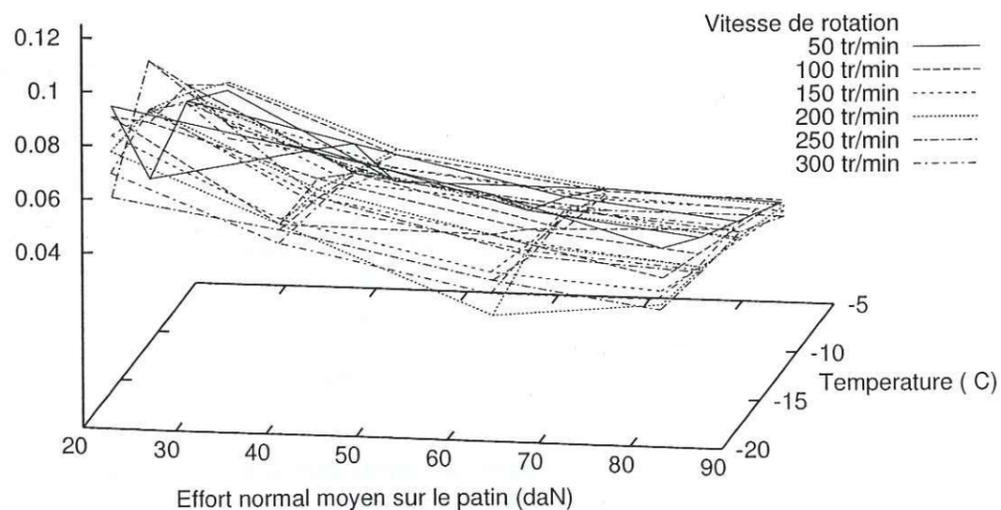
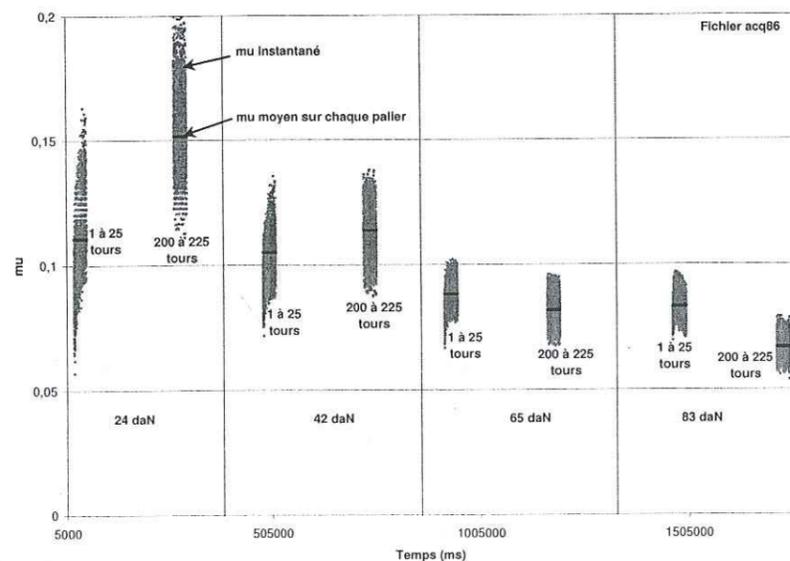
6.1.1.1.2 Apparition de l'aspect miroir sur la surface de glace

μ se rapproche plus rapidement de sa limite inférieure dans les conditions expérimentales pour lesquelles la fonte apparaît tôt, i.e. sous F_n élevé (sur la figure 6.1, les courbes avec des symboles de petite taille atteignent l'asymptote plus lentement que les courbes formées par les symboles de grande taille). Les observations visuelles lors des mesures à F_n élevé mettent en évidence l'apparition très rapide d'un lissage de la piste : dès les premiers tours de rotation, la trace du patin brille (*aspect miroir*), alors que l'extérieur de la trace reste mat à cause des aspérités générées par l'usinage. En revanche, sous faible F_n , ce lissage n'apparaît visuellement qu'au bout de nombreux tours.

1. L'ensemble des résultats expérimentaux est présenté dans divers rapports internes (Déloye, 2001). Les programmes d'essais effectués avec la machine tournante en suivant le protocole expérimental définitif sont indiqués sous forme de tableau au § F.8.2.

Fig. 6.1 - Evolution de μ avec le nombre de tours effectués par l'éprouvette D-F1.

mu(1 25)-mu(200 225)

Fig. 6.2 - Différence entre μ du 1^{er} au 25^e tour et μ du 200 à 225^e tour pour le patin D-F1.Fig. 6.3 - μ à -20°C pour le mélange formulation F2 à 50 tours/min.

La vitesse ne semble pas affecter ce phénomène (sur la figure 6.1, les courbes formées par des symboles de mêmes taille et couleur se superposeraient après un décalage vertical).

Aucune différence n'apparaît entre les deux températures (-20 et -10°C) (sur la figure 6.1, les courbes formées par les mêmes symboles, évidés ou pleins, se superposeraient après un décalage vertical). Ceci s'explique par le fait que dans la gamme de température explorée (supérieure à -20°C), l'énergie nécessaire pour réchauffer la glace jusqu'à T_f est négligeable devant celle due à l'enthalpie massique de fusion (cf. § 1.2.2.4).

6.1.1.1.3 Effet de l'effort normal

L'abaissement du point de fusion avec la pression ne suffit pas pour expliquer la rapidité d'apparition de l'aspect miroir sous F_n élevé. D'après la loi de Clausius-Clapeyron (cf. § 1.2.2.5), le point de fusion est à environ -9.10^{-3}°C sous 24 daN et -3.10^{-2}°C sous 83 daN si F_n est appliqué sur toute l'aire de contact nominale. Ceci ne peut pas expliquer l'importante différence sur le nombre de tours nécessaire à l'apparition d'une couche lubrifiante à l'interface, entre des expérimentations sous F_n faible ou élevé. Une aire réelle valant $1/1000^e$ de l'aire de contact nominale pourrait expliquer la fonte plus rapide sous F_n élevé. Mais ceci est impensable en raison de la grande souplesse de l'élastomère : la gomme répartit bien la contrainte normale en se déformant pour épouser les rugosités de surface et augmenter le ratio A_r/A_n (cf. § 1.1.2 et la faible valeur de G' , cf. § F.2).

6.1.1.1.4 Effet du flux de chaleur

La rapidité d'apparition de l'aspect miroir de la trace pour F_n élevé pourrait résulter d'un réchauffement par frottement plus important sous ces conditions. En considérant que la chaleur est générée à l'interface par le frottement, la densité de flux de chaleur est $\phi = \mu\sigma_n V$. Avec les valeurs correspondant aux essais de la figure 6.1, les μ entre les tours 500 et 510 pour les mesures à -10°C sont :

0,155 sous 24 daN et 0,031 sous 83 daN pour 50 tours/min ;

0,075 sous 24 daN et 0,016 sous 83 daN pour 300 tours/min.

Les densités de flux de chaleur ϕ générées par le frottement correspondantes, en prenant en compte l'aire de contact nominale $A_n = 20\text{ cm}^2$ sont :

34 kW/m² sous 24 daN et 26 kW/m² sous 83 daN pour 50 tours/min ;

100 kW/m² sous 24 daN et 74 kW/m² sous 83 daN pour 300 tours/min.

L'apparition de l'aspect miroir de la piste n'est donc pas dû à un simple effet de flux de chaleur moyen à l'interface. En effet, d'une part, à V égal, quand F_n augmente, ϕ diminue alors que l'apparition de l'aspect miroir est plus rapide. D'autre part, la vitesse n'affecte pas la rapidité d'apparition de l'aspect miroir, alors que ϕ augmente avec V .

6.1.1.1.5 Proportion lubrifiée de l'aire de contact

La décroissance de μ au cours du temps peut s'interpréter comme l'apparition progressive de la lubrification dans l'aire de contact. Au début du frottement, l'aire de contact est sèche et μ est assez élevé. Puis, un film d'eau se forme peu à peu par fonte de la glace par réchauffement. μ décroît alors jusqu'à ce que le frottement atteigne un équilibre.

La différence entre μ final et μ initial de chaque essai de la figure 6.1 pourrait s'expliquer physiquement par l'augmentation d'aire de contact en régime lubrifié (cf. § 2.7.2 et Veith (1996a,b)). En négligeant la contribution de la fraction lubrifiée Φ_{lub} de l'aire de contact, $\sigma_n = F_n/A_n$ et $\sigma_t = F_t/((1 - \Phi)A_n) = \mu_s\sigma_n$. Par suite, le frottement sur glace en partie lubrifiée est $\mu_{humide} = F_t/F_n = (1 - \Phi_{lub})\mu_s$, avec μ_s une constante qui représente le frottement sec et qui pourrait être déduite des mesures SRT avec le même mélange.

6.1.1.1.6 Evolution du frottement lors des 25 premiers tours

La figure 5.11 montre un exemple de mesure avec l'éprouvette D-F1 à 50 tours/min à -20°C . Sous 24 daN, μ augmente lors des 25 premiers tours car l'aire réelle frottée augmente. Cependant, sous F_n plus élevé, μ décroît fortement lors des 25 premiers tours car le régime lubrifié apparaît rapidement localement et s'accroît progressivement dans l'aire de contact.

La différence entre le μ moyen du 1^{er} au 25^e tour et le μ moyen du 200^e au 225^e tour varie entre 0,005 et 0,095 dans les gammes de $T_0 V F_n$ (Fig. 6.2). Elle diminue quand T_0 , V ou F_n augmentent. Ceci soutient bien la thèse que cette différence est liée à la proportion d'aire lubrifiée. En effet, sous des conditions de sollicitation très dures (T_0 , V et F_n élevés), la lubrification est présente dès les premiers tours sous l'aire de contact : la différence de frottement entre les tours 1 à 25 ou 200 à 225 est alors faible.

6.1.1.2 Cas d'un mélange rigide

6.1.1.2.1 Résultats expérimentaux

Pour les mesures avec la formulation F2, μ augmente parfois au début de l'essai sur glace neuve, avant de décroître et d'atteindre une limite inférieure. Ce mélange est relativement rigide et une mauvaise horizontalité du patin a une conséquence directe sur A_r . La figure 6.3 montre un essai avec l'éprouvette D-F2 à 50 tours/min à -20°C . L'évolution de μ au cours des 25 premiers tours est totalement différente de celle obtenue avec la formulation souple (e.g. Fig. 5.11 obtenue dans les mêmes conditions expérimentales).

Avec le mélange rigide, μ présente une évolution particulière en fonction du temps et différente selon les conditions expérimentales (Fig. 6.3). Quand F_n est faible, au début du frottement, μ croît si A_r augmente avec l'usure de la piste; ensuite, μ décroît car un film d'eau se forme sous le patin. Quand F_n est élevé, μ décroît dès les premiers tours car le film d'eau se forme très rapidement. A_r ne varie pas au cours du temps, mais les températures des deux solides en contact (gomme et glace) augmentent, ainsi que la quantité de lubrifiant présente dans le contact (si l'eau n'a pas le temps de regeler en un tour, elle est réinjectée à chaque tour sous l'interface).

6.1.1.2.2 Observations qualitatives de la surface de glace

Lors de l'essai correspondant à la figure 6.3, les observations qualitatives de la surface de glace expliquent les évolutions de μ avec le temps. Sous 24 daN, après 100 tours, la piste est seulement légèrement usée sur son bord extérieur; après 250 tours, la piste est lissée sur environ 10 mm sur son bord extérieur et 2 mm sur le bord intérieur; μ augmente donc lors des 225 premiers tours car A_r augmente. Sous 42 daN, après 200 tours, la piste est lissée sur plus de 10 mm au bord extérieur et environ 3 mm sur le bord intérieur; μ augmente puis semble rester stationnaire entre les tours 200 et 225. Sous 65 daN, après 200 tours, presque toute la surface de contact nominale est usée. Sous 83 daN, après seulement 25 tours, presque toute la surface nominale est lissée: μ décroît dès les premiers tours car le contact est rapidement lubrifié.

6.1.1.3 Conclusion

Le conditionnement de la piste joue un rôle très important pour la valeur instantanée de μ . μ évolue très rapidement au cours des 25 premiers tours de piste et ses variations diffèrent totalement selon la souplesse du mélange. Ceci reflète une importante évolution des conditions de frottement à l'interface: en particulier la lubrification progressive sous le patin et l'augmentation du rapport A_r/A_n .

L'évolution de μ avec le temps dépend de la souplesse du mélange:

- Pour un patin souple, la déformation de l'élastomère compense les défauts de réglage d'horizontalité du patin. μ décroît avec le temps jusqu'à atteindre une limite inférieure. Ce régime stationnaire est atteint d'autant plus rapidement que la fonte de l'interface est plus aisée, apparemment sous F_n élevé. Le μ moyen entre les tours 200 et 225 est toujours plus faible que le μ sur les tours 1 à 25.
- Pour un patin rigide, μ peut croître au début d'une manipulation si le parallélisme de la face inférieure du patin et la surface de glace est mal réglé. A_r augmente progressivement grâce à la fonte des aspérités de la surface de glace. Ensuite, quand la lubrification commence, μ diminue jusqu'à une limite inférieure.

La valeur limite de μ dépend d'un équilibre entre les températures des deux corps en contact et de la quantité d'eau à l'interface (réinjectée dans le contact à chaque tour). Le nombre de tours effectués avant que μ soit proche de sa limite inférieure ne dépend pas de T_0 et semble ne pas être influencé par V . Il ne dépend apparemment que de F_n . Aucun modèle simple ne peut décrire ces comportements.

Deux valeurs de μ sont retenues pour chaque essai: μ moyen sur les tours 1 à 25 et μ moyen sur les tours 200 à 225. μ sur les tours 1 à 25 met en évidence les instabilités du frottement qui disparaissent au fur et à mesure de l'usure de la piste: rugosités de la piste laissées par l'usinage, mauvais placement du patin dans un plan horizontal, etc. μ sur les tours 200 à 225 s'affranchit de ces évolutions rapides et devrait correspondre à un régime stationnaire pour lequel les équilibres thermiques et dynamiques du frottement sont atteints. En réalité, l'évolution de μ avec le temps est rapide au démarrage mais atteint assez lentement une limite. Les μ moyens mesurés sur les tours 200 à 225 sont donc comparables entre eux mais ne correspondent pas forcément à un état stationnaire (même s'ils en sont proches).

6.1.2 Variation de l'effort tangentiel avec l'effort normal

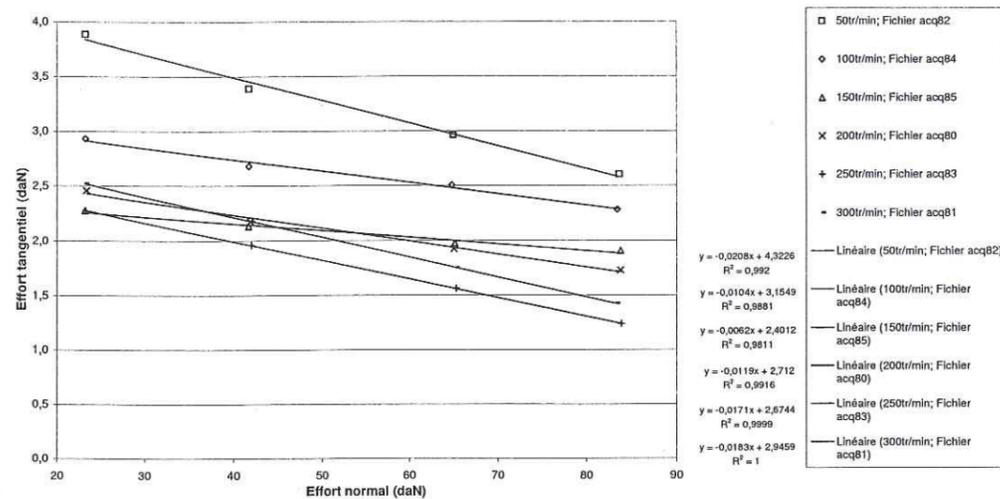
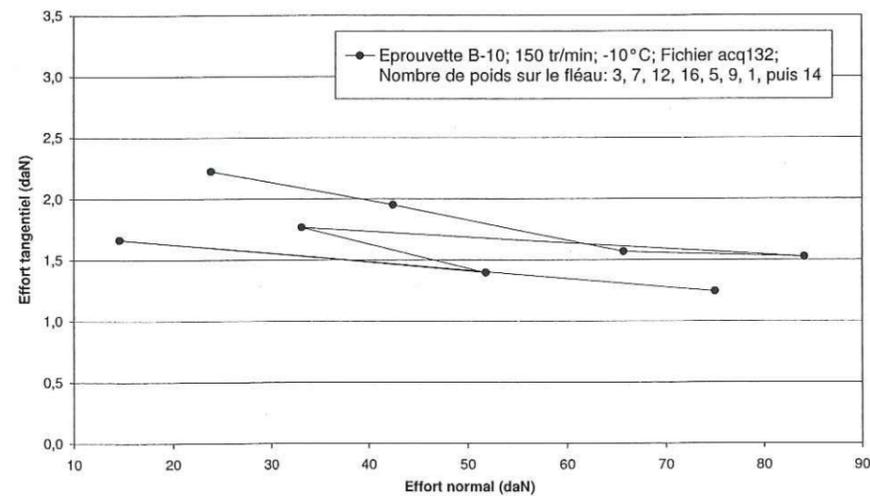
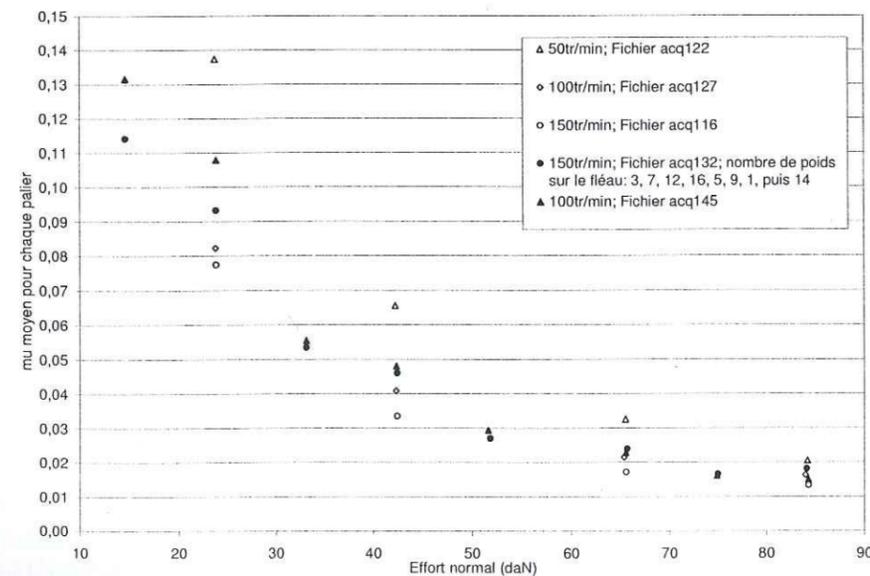
6.1.2.1 Objectif

Certains auteurs ont appliqué la relation du frottement de Coulomb au cas de la glace: F_t est fonction linéaire de F_n , $F_t = C_1 F_n + C_2$ (e.g. Forland et Tatinclaux, 1985; Tatinclaux et Martinson, 1990; Fiorio, 2000). C_1 est caractéristique du frottement et C_2 décrit l'adhésion. Il s'ensuit que $\mu = F_t/F_n = C_1 + C_2/F_n$. L'objectif de cette section est de voir si nos résultats expérimentaux vérifient cette relation.

6.1.2.2 Résultats expérimentaux

Lors des mesures avec le protocole de mesure usuel pour l'éprouvette D-F1 entre -20 et -5°C et de 50 à 300 tours/min, nous avons observé que F_t varie linéairement avec F_n . Les efforts sont des moyennes des efforts instantanés entre les tours 200 et 225; le nombre de contrepoids sur le fléau est augmenté progressivement (3, 7, 12, puis 16 contrepoids). Par exemple, le coefficient de corrélation de la relation linéaire entre les deux efforts mesurés est assez élevé sur la figure 6.4, tracée pour différentes vitesses à -10°C .

Afin de vérifier si cette relation linéaire entre les deux efforts ne correspond pas à un artefact de mesure, nous avons effectué un essai pour lequel les variations de F_n sont différentes. F_t et F_n ont été évalués entre les tours 200 et 225 sous un nombre de contrepoids variable (i.e. 3, 7, 12, 16, 5, 9, 1, puis 14) en usinant la piste entre chaque mesure (Fig. 6.5). La décroissance est linéaire pour l'accroissement du nombre de contrepoids de 3 à 16, mais lorsque F_n diminue, la

Fig. 6.4 - Efforts mesurés avec l'éprouvette D-F1 à -10°C .Fig. 6.5 - Variation de l'effort tangentiel avec l'effort normal à -10°C .Fig. 6.6 - Variation de μ avec l'effort normal pour l'éprouvette B-10 à -10°C .

relation n'est plus linéaire.

Nous avons vérifié qu'aucun problème de mesure n'a eu lieu au cours de cet essai : l'évolution de μ moyen pour chaque F_n (calculé comme F_t/F_n , rapport des efforts moyens sur les paliers de F_n) avec F_n est habituelle (Fig. 6.6). Nous avons aussi comparé les résultats avec d'autres mesures réalisées dans des conditions proches : à l'incertitude expérimentale près, les μ mesurés avec l'éprouvette B-10 à -10°C à différentes V sont proches de cet essai avec des variations de F_n particulières.

6.1.2.3 Conclusion

F_t varie linéairement avec F_n quand F_n augmente continûment. En revanche, si nous augmentons puis diminuons F_n , la linéarité disparaît. D'autre part, dans l'hypothèse où la relation $F_t = C_1 F_n + C_2$ est vérifiée, les coefficients C_1 et C_2 doivent être positifs. D'après nos résultats, on devrait avoir $C_1 < 0$ (il pourrait alors exister F_n assez grand pour que μ devienne négatif), ce qui rend le modèle difficile à justifier.

6.1.3 Température ambiante, vitesse de glissement et effort normal

6.1.3.1 Objectif

Nous avons effectué de très nombreux essais afin de pouvoir évaluer l'évolution de μ avec les trois conditions expérimentales ajustables, T_0 , V et F_n . L'éprouvette utilisée était D-F1 qui représente le mélange de référence glace. L'ensemble de ces résultats permet d'estimer qualitativement l'influence relative des différents paramètres et de comparer les variations quantitatives de μ avec celles issues des modèles décrits dans le chapitre 2.

6.1.3.2 Résultats expérimentaux

La figure 6.7 représente l'évolution de μ du patin D-F1 avec les trois paramètres T_0 , V et F_n . Chaque surface correspond à une valeur donnée de la vitesse de rotation, les deux autres paramètres variant selon les axes horizontaux du diagramme. D'autres diagrammes présentent les mêmes résultats expérimentaux en annexe F.8.3.

En règle générale, μ décroît quand l'un des trois paramètres augmente. Les observations qualitatives sont les mêmes que celles effectuées avec le premier protocole expérimental, sans usinage entre les différents F_n au cours d'une manipulation (Fig. F.13).

En utilisant les mesures de la figure 6.7, nous avons ajusté μ en fonction de puissances de la vitesse et de l'effort normal.

- A -20°C et -15°C , entre 50 et 300 tours/min, μ varie en V^m avec m compris entre $-0,6$ et $-0,4$ avec de bons coefficients de corrélation, quel que soit F_n (Fig. 6.8). Les mesures à -10°C et -5°C sont peu exploitables : μ est faible et varie peu en fonction de V .
- Dans les gammes de température et de vitesse balayées, l'expression de μ en F_n^m a fourni m entre -1 et -2 , mais souvent proche de -1 .

6.1.3.3 Comparaison avec la littérature

6.1.3.3.1 Effet de la température

Coefficient de frottement

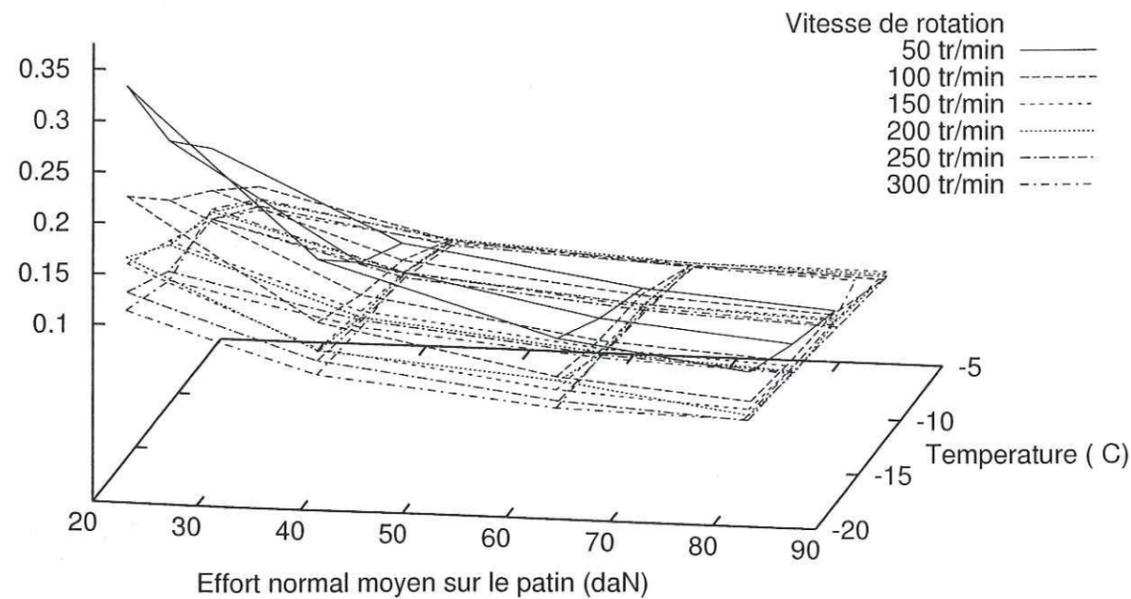


Fig. 6.7 – Evolution de μ avec l'effort normal F_n et la température T_0 pour une éprouvette D-F1.

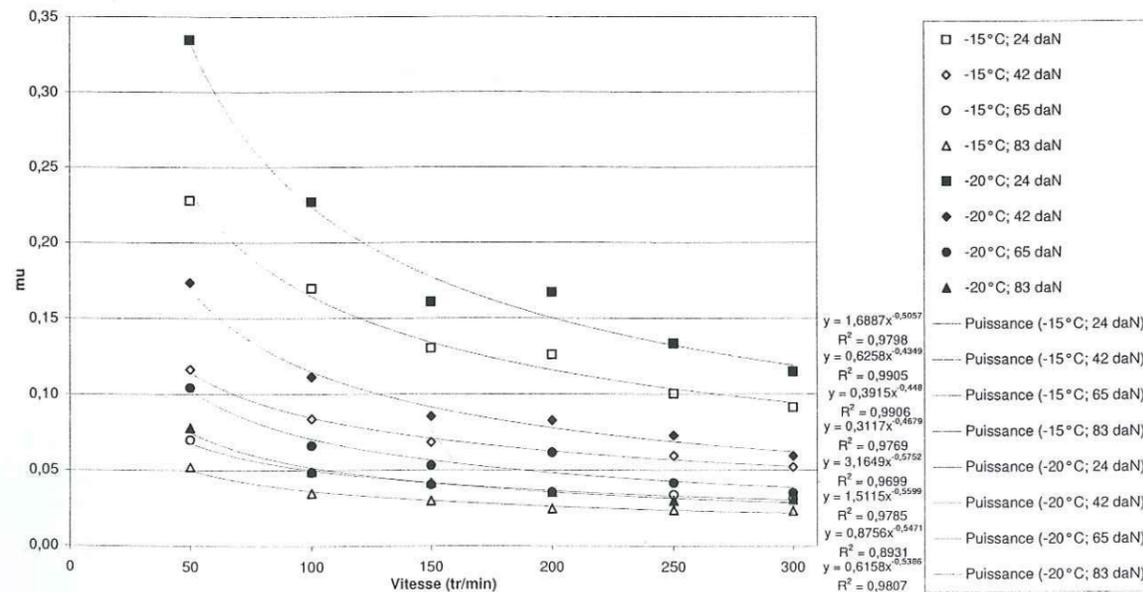


Fig. 6.8 – Evolution de μ avec la vitesse V pour une éprouvette D-F1.

Pour le frottement gomme / glace, nous obtenons toujours une augmentation de μ quand T_0 décroît, même à V très élevé.

Ce résultat a souvent été observé entre différents matériaux et la glace (e.g. Bowden et Hugues (1939), cf. Fig. 2.2; Evans *et al.* (1976), cf. Fig. 2.4). De nombreux auteurs ont remarqué ce phénomène pour le frottement gomme-glace lors de mesures avec un pendule SRT (e.g. Lenoël (1998), cf. Fig. E.2; Takino *et al.* (1991), cf. Fig. E.5; Ahagon *et al.* (1988), cf. Fig. E.4(b)) ou avec des machines tournantes (e.g. Roberts (1980), cf. Fig. 2.36). Les modèles soulignent aussi une augmentation de μ avec une décroissance de T_0 (e.g. Hayhoe et Shapley (1989), cf. Fig. 2.13); Dorémieux (1990), cf. Fig. 2.10). Avec une machine tournante, Oksanen (1980) a observé une variation de μ glace / glace avec T_0 dépendant de V (Fig. 2.19): à 0,5 m/s, μ augmente bien quand T_0 décroît; mais à 3 m/s, μ augmente avec T_0 , ce qu'Oksanen a expliqué par les conditions d'essai (σ_n faible, rugosité).

6.1.3.3.2 Effet de la vitesse

Nous obtenons toujours une décroissance de μ quand V augmente entre 50 et 300 tours/min. L'expression de μ en fonction de puissance de V a permis de montrer que μ décroît en $V^{-1/2}$ sur toute la gamme de $T_0 V \sigma_n$ balayée lors de nos essais (cf. Fig. 6.8).

Pour le frottement entre un matériau quelconque et la glace, Evans *et al.* (1976) et Akkok *et al.* (1987) ont montré une décroissance de μ en $V^{-1/2}$, à la fois par l'expérience (figures 2.3 et 2.7) et la théorie (équations (2.5) et (2.9)). Le phénomène de conduction domine alors le frottement et explique l'exposant $-1/2$. D'autres auteurs ont obtenu expérimentalement cette relation en $V^{-1/2}$ (e.g. Southern et Walker (1974), cf. Fig. 2.35) ou ont simplement noté la décroissance sans la quantifier (e.g. Roberts (1980), cf. Fig. 2.36). De nombreux modèles expriment aussi une décroissance de μ avec une augmentation de V (e.g. Hayhoe et Shapley (1989), cf. Fig. 2.12; Peng *et al.* (1999), cf. Fig. 2.31; Dorémieux (1990), cf. Fig. 2.10). Le modèle de frottement de Oksanen (1980) prévoit une dépendance de μ avec V variable selon la valeur de T_0 (cf. eq. 2.33): μ décroît en $V^{-1/2}$ à T_0 faible (quand la conduction domine) mais augmente en $V^{1/2}$ à T_0 élevé (quand le cisaillement visqueux domine). Les mesures de frottement glace / glace de Oksanen (1980) ont confirmé ces variations (Fig. 2.19).

6.1.3.3.3 Effet de la contrainte normale nominale

Nous obtenons toujours une décroissance de μ quand σ_n augmente entre 1,2 et 4,15 bar. L'expression de μ en fonction de puissance de F_n a permis de montrer que μ décroît en F_n^m avec m compris entre -1 et -2, et assez souvent proche de -1 (cf. Fig. 6.9).

Bowden et Hugues (1939), Southern et Walker (1974) ont observé une décroissance de μ quand σ_n augmente entre deux surfaces de glace (Fig. 2.1) et un contact gomme-glace (Fig. 1.2). Evans *et al.* (1976) et Akkok *et al.* (1987) ont proposé des modèles qui expriment aussi cette décroissance de μ avec une augmentation de σ_n : leurs mesures ont donné une évolution de μ en F_n^m avec m compris entre $-1/4$ et -1 . D'autres modèles prévoient aussi une décroissance de μ avec F_n (e.g. Hayhoe et Shapley (1989), cf. Fig. 2.14; Peng *et al.* (1999), cf. Fig. 2.32; Dorémieux (1990), cf. Fig. 2.10).

6.1.3.3.4 Ordres de grandeur de μ

Les niveaux de frottement que nous avons obtenus (entre 0,02 et 0,35 pour les essais de la figure 6.7) sont difficilement comparables aux différents résultats expérimentaux présentés dans la littérature. En effet, les conditions de frottement sont toujours différentes, soit en terme de valeur des trois paramètres ajustables T_0 , V et σ_n , soit en raison du dispositif expérimental (gomme utilisées, type de dispositif expérimental, longueur de l'éprouvette, caractéristiques de la glace, etc.). Il est impossible de comparer des frottements mesurés sous des conditions de frot-

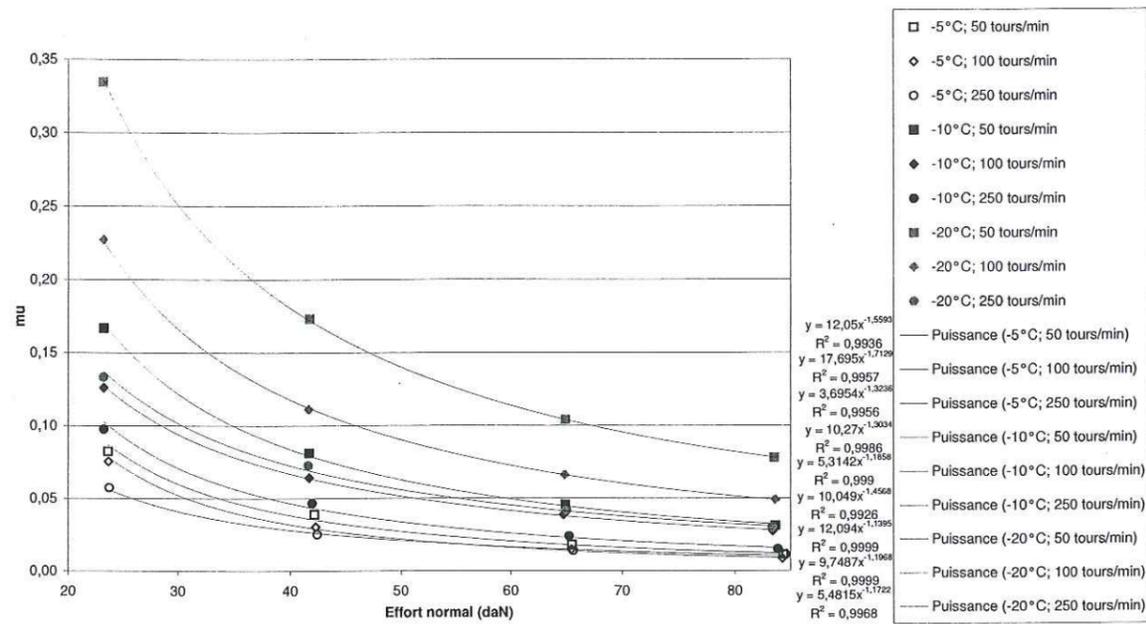


Fig. 6.9 - Evolution de μ avec l'effort normal F_n pour une éprouvette D-F1.

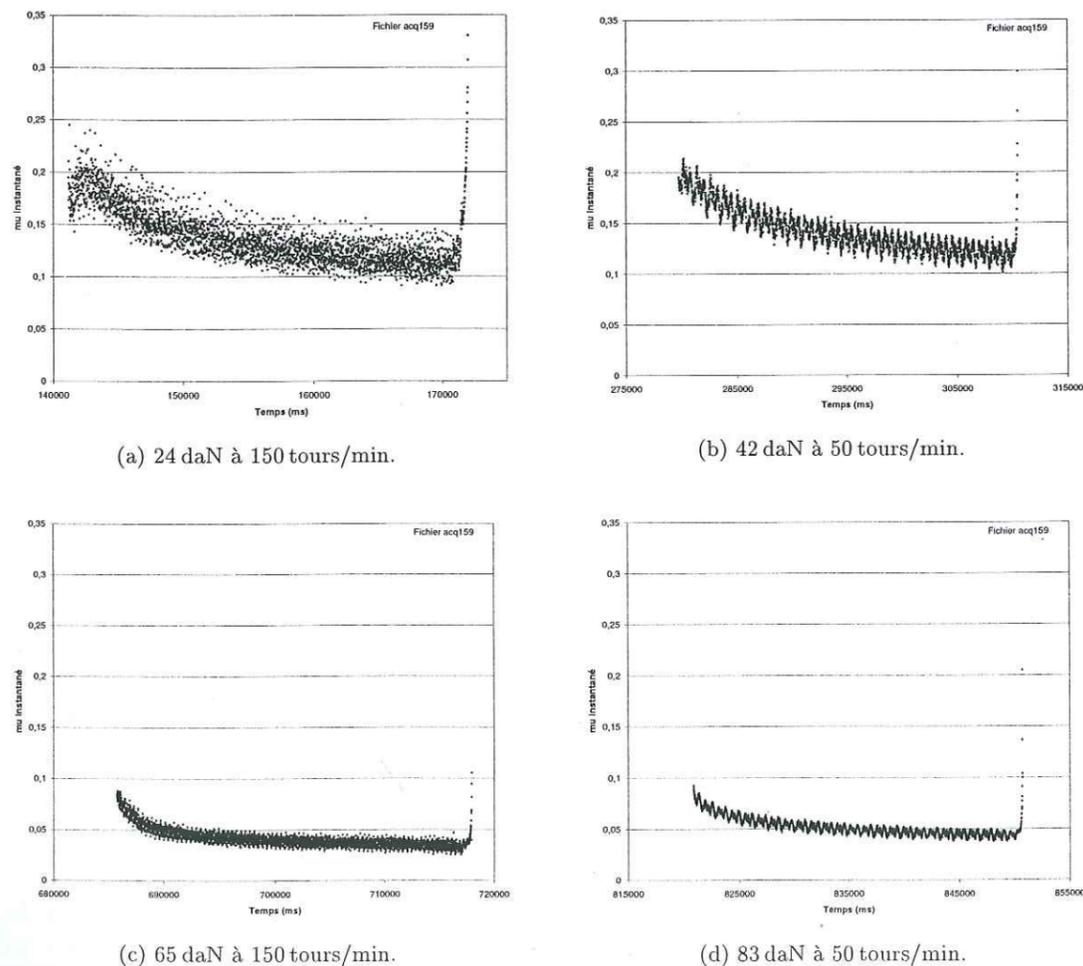


Fig. 6.10 - μ instantané mesuré avec un pas de 10 ms lors d'un arrêt de la piste après 30 s de rotation à vitesse constante avec l'éprouvette B-10 à -10°C .

tements locaux qui peuvent être si différentes (lubrification, températures de surface, rugosités, etc.) : l'ordre de grandeur de μ peut être très faible (μ inférieur à 0,1, e.g. Roberts (1980)) ou très élevé (μ proche de 4, e.g. Southern et Walker (1972)).

6.1.3.4 Conclusion

Les mesures de μ avec le mélange de référence glace donnent des valeurs entre 0,007 (obtenu à -5°C pour 300 tours/min sous 83 daN) et 0,335 (obtenu à -20°C pour 50 tours/min sous 24 daN). L'influence des variations des conditions expérimentales est nette quand μ est élevé, mais est peu visible quand μ est faible. Chacun des trois paramètres $T_0 V \sigma_n$ semble avoir une importance égale par rapport au processus du frottement. μ augmente quand l'un de ces paramètres diminue :

- μ augmente avec une diminution de σ_n , entre 1,20 à 4,15 bar.
- μ augmente avec une diminution de V . L'effet de V reste marqué entre 1,9 et 5,7 m/s mais semble négligeable entre 5,7 et 11,5 m/s.
- μ augmente avec une diminution de T_0 , entre -20 et -5°C .

6.1.4 Mesures à basse vitesse

6.1.4.1 Objectif

Il serait intéressant de modifier le dispositif expérimental pour permettre des mesures de μ à basse vitesse. Ceci serait utile pour la modélisation de l'aire de contact aux faibles taux de glissement en tenant compte des parties collantes et glissantes, en particulier en roulage ou lors d'un freinage ABS.

6.1.4.2 Résultats expérimentaux

Nous avons essayé de mesurer μ en faisant tourner la piste manuellement, mais ceci s'est avéré impossible car la force de collage du patin sur la piste est très élevée. Nous pouvons tourner la piste à la main sur un angle de quelques degrés, mais les variations de V engendrent une discontinuité de F_t et il est impossible de calculer μ dans ces conditions.

Nous avons mesuré μ après 30 s de rotation à V constante, lors d'un arrêt du moteur. Ceci a été effectué à 50 et 150 tours/min, avec 3, 7, 12 et 16 contrepoids sur le fléau. La piste était usinée entre chaque changement de conditions expérimentales. Dans tous les cas, μ augmente juste avant l'arrêt définitif de la piste (Fig. 6.10). Ceci pourrait s'expliquer par un collage du patin sur la piste, quand V est très faible.

6.1.4.3 Conclusion

Suite à un arrêt du moteur, μ augmente juste avant l'arrêt de la piste : ceci pourrait s'expliquer par des efforts d'adhésion élevés à V très basse ou par un gel rapide de la fine pellicule d'eau formée pendant la phase de frottement à V constant. Un changement de moteur est en cours d'étude pour modifier le dispositif d'entraînement afin de continuer d'utiliser cette machine tournante dans la modélisation du frottement élastomère-glace à faibles taux de glissement.

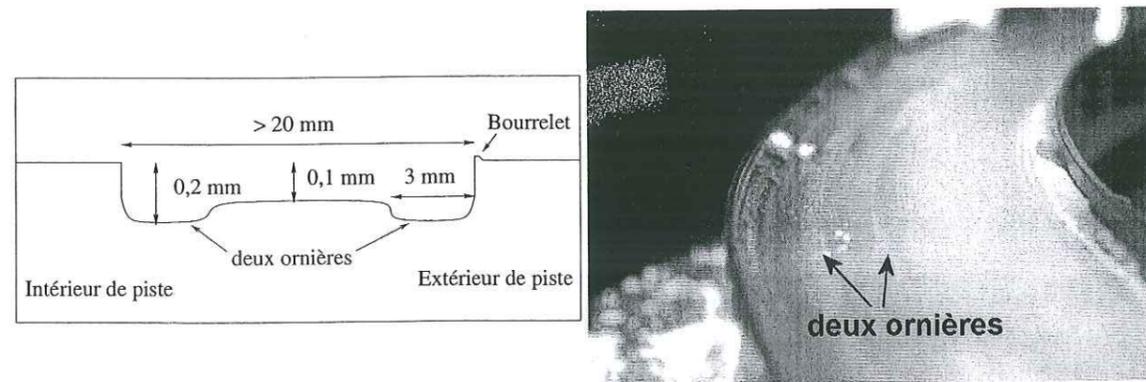


Fig. 6.11 – Dimensions indicatives et vue macroscopique du profil de la glace après environ 1000 tours du patin D-F1 à -10°C et 50 tours/min sous 65 daN.

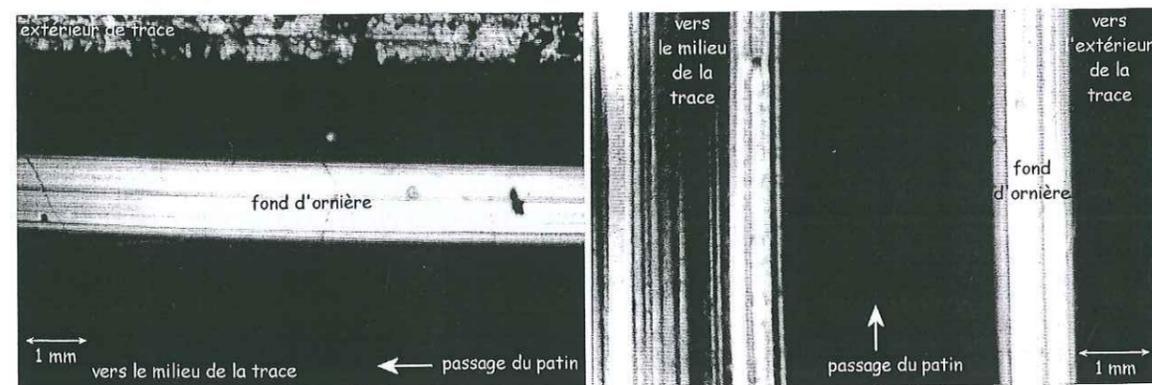


Fig. 6.12 – Ornières sous le patin D-F1 après environ 1000 tours à -10°C et 50 tours/min sous 65 daN.

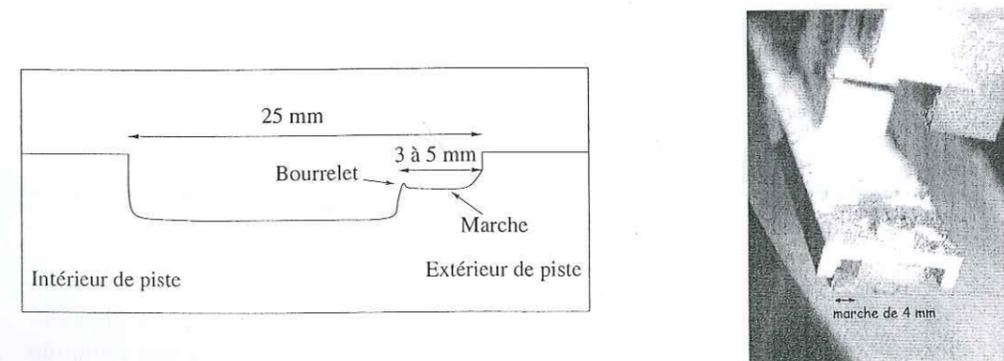


Fig. 6.13 – Marche formée sur la glace par une éprouvette retournée lamellisée à 6 mm de l'attaque après 225 tours à -10°C sous 83 daN.

6.2 Observations qualitatives de la piste de glace²

6.2.1 Usure de la piste de glace

6.2.1.1 Profil d'usure de la surface de glace selon le mélange du patin

L'influence du type de mélange se manifeste de trois façons observables sur la glace.

- Tout d'abord, nous avons déjà remarqué la différence de variation de μ lors des premiers tours, selon la formulation du patin (§ 6.1.1) : μ décroît dès les premiers tours et l'aspect miroir apparaît très rapidement avec le mélange F1 ; en revanche, avec le mélange F2, plus de 225 tours sont souvent nécessaires pour obtenir un aspect miroir et μ augmente en général lors des premiers tours à cause de l'augmentation de A_r .
- Ensuite, le mélange rigide F2 semble beaucoup moins se réchauffer par frottement que le mélange souple F1. En effet, au cours de toutes les manipulations effectuées avec la formulation F2, le patin ne colle pas sur la piste quand nous le reposons sur la glace pour effectuer les quatre paliers statiques. Au contraire, pour la majorité des mesures avec le mélange F1, l'éprouvette colle sur la piste lors de l'étalonnage du couplage du capteur (cf. § 5.1.3.5).
- Enfin, nous allons montrer que les profils d'usure de la piste de glace sont très différents selon la formulation du patin.

6.2.1.2 Cas d'un mélange souple

Avec la formulation F1, la trace du patin présentait deux ornières latérales, profondes et larges. La figure 6.11 donne une idée qualitative de l'usure de la piste après un grand nombre de tours. Les deux ornières sont bien marquées dès les premiers tours. Elles étaient aisément mises en évidence au cours de l'usinage de la piste après une usure significative de la piste : après 100 tours de rotation, l'usinage vertical de la piste, par paliers progressifs, mettait en évidence le plateau central : il était usiné bien plus tôt que le fond des deux ornières. Ceci a été mis en évidence pour toutes T_0 entre -20 et -5°C et V entre 50 et 300 tours/min. Les photos 6.12 montrent le fond des ornières, plus clair à la loupe binoculaire car il réfléchit bien la lumière.

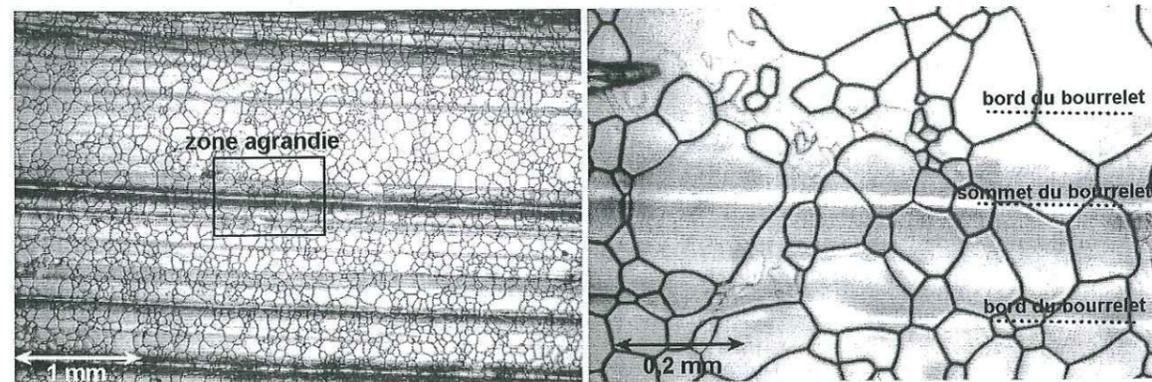
Ces deux ornières peuvent s'expliquer par l'effet tonneau ou le viscoplanage :

- L'effet tonneau résulte de la répartition non uniforme de la contrainte normale sur la surface de contact, à cause de la déformation latérale du patin (effet Poisson). Lorsque F_n est appliqué sur le patin, ses bords verticaux ont tendance à se gonfler en forme de tonneau et il existe des surpressions importantes sous les bords de l'éprouvette.
- Le viscoplanage résulte de la présence du lubrifiant formé lors du tour précédent ou par la partie avant du patin. Il y a compétition entre la durée de portance qui permet l'évacuation de l'eau (cf. § E.3) et la durée de transition d'un élément du patin sur la glace. L'eau présente sous les bords du patin a le temps de s'évacuer par les côtés, mais l'eau située au centre du patin ne peut s'échapper et elle décolle l'élastomère de la glace.

6.2.1.3 Cas d'un mélange rigide

En revanche, avec le patin de formulation F2 dans le sens normal, la piste creusée était parfaitement plane. Si le plan de contact entre la surface de l'éprouvette et la glace n'était pas

2. Sauf mention contraire, le patin de gomme est passé de la droite vers la gauche sur les photos prise à la loupe binoculaire.



(a) Aspect à faible grossissement.

(b) Zoom sur un bourrelet de regel.

Fig. 6.14 – Vers le bord intérieur de la trace, très petits cristaux, éprouvette A-2-1 retournée, après 225 tours à -10°C et 150 tours/min sous 83 daN.

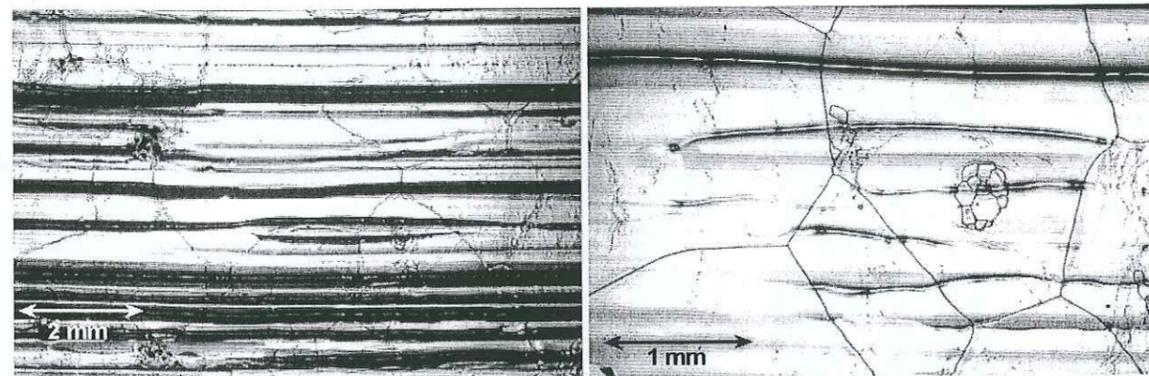
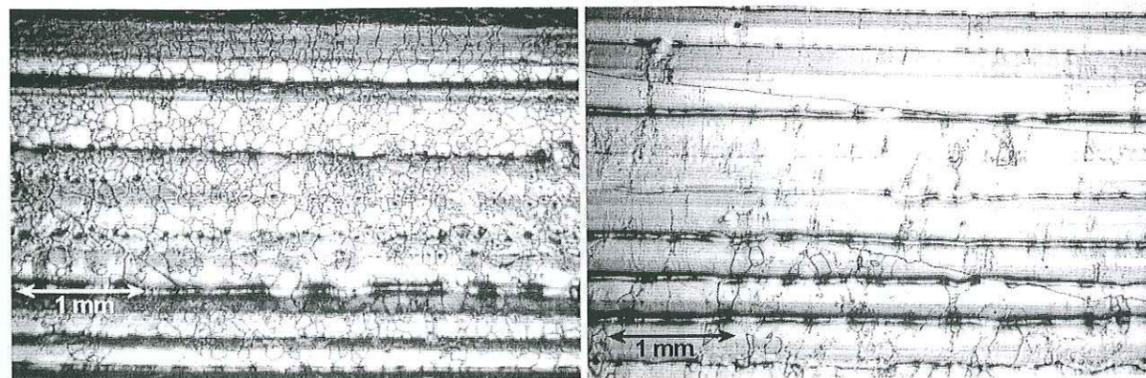


Fig. 6.15 – Grands cristaux, bourrelets de regel discontinus et non rectilignes, éprouvette A-1-5, après 225 tours à -10°C et 150 tours/min sous 83 daN.



(a) Milieu de trace, petits cristaux, bourrelets d'eau et gouttelettes regelés.

(b) Vers le bord extérieur de la trace, gros cristaux, bourrelets d'eau regelée.

Fig. 6.16 – Après 225 tours de l'éprouvette A-2-1 retournée à -10°C et 150 tours/min sous 83 daN.

horizontal, seule une petite fraction des 20 mm de la largeur du patin frottait sur la piste lors des premiers tours. Il fallait alors attendre de nombreux tours avant qu'une proportion importante de la piste présente un aspect miroir. L'élastomère lissait peu à peu une plus grande surface avec l'accroissement de l'enfoncement du patin dans la glace. A -20°C par exemple, à 50 tours/min sous 24 daN, il fallait attendre 250 tours pour que la piste soit à peine lissée sur près de 10 mm d'un côté; à 50 tours/min sous 83 daN, presque toute la surface était usée au bout de 25 tours; alors qu'à 300 tours/min, tout était lissé en un ou quelques tours, quel que soit σ_n (cf. § 6.1.1.2.2).

6.2.1.4 Cas d'une éprouvette retournée d'un mélange rigide

Les mesures avec les éprouvettes A-i-j lamellisées ont souligné l'important rôle d'assouplissement joué par la lamelle, toujours placée vers l'avant du patin, lors de la déformation macroscopique du patin. Aucun phénomène particulier n'a été observé quand la bascule était placée vers l'avant. En revanche, lorsque que l'éprouvette était retournée, une marche se formait sur le rebord extérieur de la trace (Fig. 6.13). Ceci a été mis en évidence à -10°C , pour des mesures à 150 tours/min quel que soit F_n et avec toutes les éprouvettes A-i-j retournées, comportant une entaille ou non à l'avant du patin. Avec les éprouvettes lamellisées retournées A-2-j, la marche était très chaotique, touchée par à coups, alors qu'elle présentait un aspect lisse avec l'éprouvette non lamellisée A-0-0 retournée.

6.2.2 Aspect de la surface de glace observé avec la loupe binoculaire

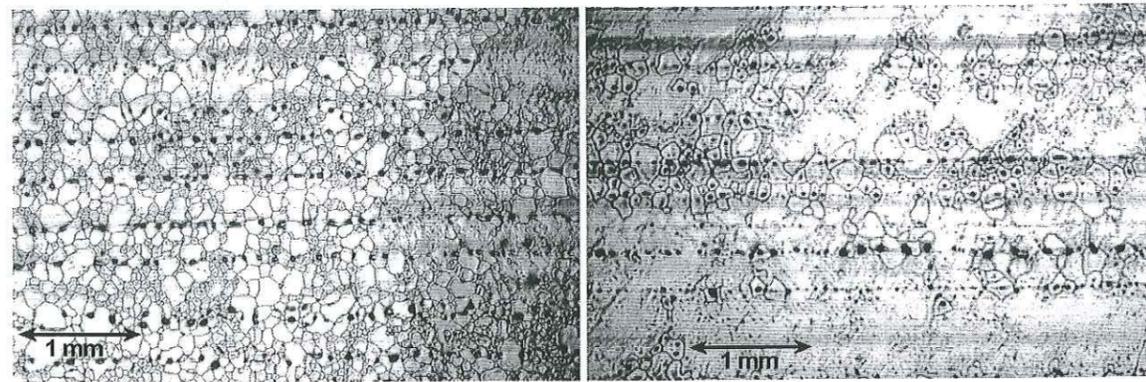
6.2.2.1 Partie centrale de la trace

Quelles que soient les conditions expérimentales, le type de mélange et le sens de l'éprouvette, l'aspect de la partie centrale de la trace était toujours le même. L'apparition d'eau sous le patin était mise en évidence en observant la trace à la loupe binoculaire: les stries sombres visibles à faible grossissement se révélaient être des bourrelets de regel à fort grossissement.

Les bourrelets d'eau regelée présentaient toujours le même aspect. A faible grossissement, ils apparaissaient comme des stries plus ou moins épaisses (Fig. 6.14(a)). Leur couleur sombre sur les photos provient du fait que leurs bords ne réfléchissent pas la lumière vers l'objectif de la loupe binoculaire. La visualisation à fort grossissement montrait que leur section était triangulaire ou en forme de demi-cercle: la crête d'un bourrelet apparaît brillante et les flancs inclinés plus sombres que le fond horizontal de la trace (cf. un bourrelet de 0,5 mm de largeur en Fig. 6.14(b)). Les photos 6.15 montrent des bourrelets de regel larges d'environ 0,05 mm, discontinus et non rectilignes.

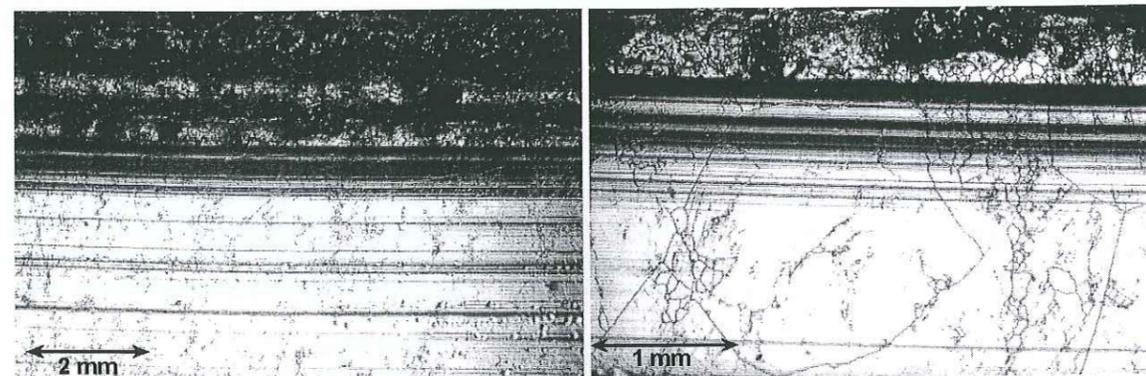
Avec les éprouvettes souples D-F1, la taille des cristaux de glace de regel dans la trace semblait dépendre de la zone observée: elle était typiquement de plus de 1 mm dans les deux ornières, mais elle était de l'ordre du dixième de mm dans le milieu de la trace. Ceci pourrait s'expliquer par la quantité d'eau formée et la durée nécessaire à son regel. Dans les ornières, beaucoup d'eau se forme et est réchauffée par le frottement: elle doit regeler lentement grâce à son inertie thermique en formant de gros cristaux. Au contraire, sous le milieu du patin, le peu d'eau formé doit regeler très rapidement en petits cristaux.

Avec les éprouvettes de formulation rigide F2, cette distinction entre les tailles de cristaux de regel disparaît. Par exemple, la figure 6.16(a), prise vers le milieu de la trace, laisse apparaître de petits cristaux de diamètre maximum 0,1 mm. Les dépôts d'eau regelée se sont effectués en bourrelets plus ou moins larges ou en gouttelettes espacées. Au contraire, de très grands cristaux, de dimensions supérieures à quelques millimètres, sont formés vers le bord extérieur de la trace (cf. Fig. 6.16(b), avec des dépôts d'eau regelée constitués de fins bourrelets).



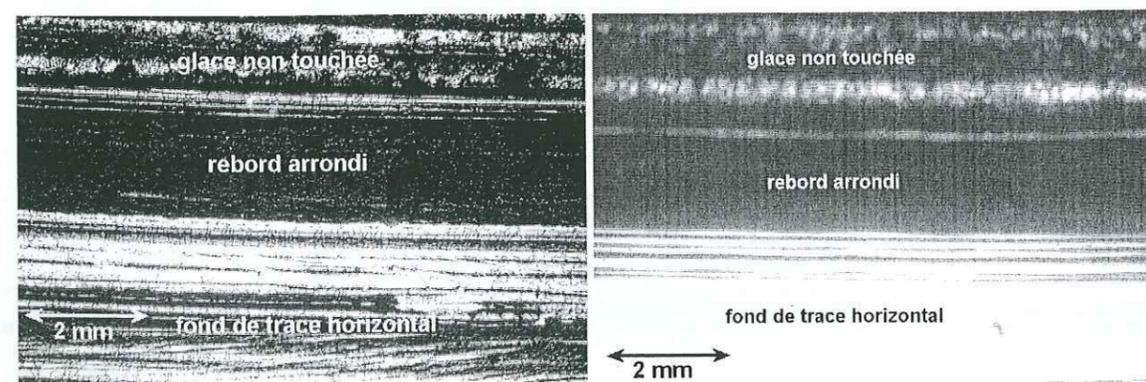
(a) Epreuve B-10.

(b) Epreuve A-1-9.

Fig. 6.17 – Après 225 tours à -10°C et 150 tours/min sous 83 daN.

(a) Epreuve A-0-0.

(b) Epreuve A-0-0.



(c) Epreuve A-2-1 retournée.

(d) Epreuve A-1-9.

Fig. 6.18 – Bord intérieur de la trace après 225 tours à -10°C et 150 tours/min sous 83 daN.

Les dépôts d'eau regelée s'effectuaient aussi sous forme de gouttelettes espacées, avec les mélanges souple (Fig. 6.17(a)) ou rigide (Fig. 6.17(b)). Nous supposons que l'eau était alors très réchauffée et recristallisait lentement : la tension superficielle de l'eau était suffisante pour que le film se sépare en gouttelettes sphériques bien distinctes, avant de regeler. L'espacement entre les gouttelettes, qui semble constant, doit dépendre de la température ambiante, des tensions superficielles de l'eau et de la glace, de la quantité d'eau formée et de son réchauffement. Nous supposons que quand des bourrelets continus se formaient, l'eau générée sous le patin était très peu réchauffée et regelait dès qu'elle avait quitté la zone de contact, en cordons qui s'allongeaient au fur et à mesure de l'avancée du patin sur la glace.

6.2.2.2 Bord intérieur de la trace

Le bord intérieur de la trace avait toujours la même allure quelles que soient les conditions expérimentales, légèrement arrondi à cause de la souplesse de l'élastomère. Sur les photos 6.18, les sillons laissés par l'usinage sont encore visibles sur la partie supérieure du cliché, i.e. la partie de la piste non touchée par le patin. La partie inférieure des photos est la zone intérieure de la trace du patin. Les stries qui apparaissent noires à ce grossissement ne sont pas des stries d'indentation mais des bourrelets de regel. Le bord intérieur de la trace était toujours lisse et ne présentait aucun bourrelet de regel. Le rebord arrondi de la trace apparaissait sombre car il ne réfléchissait pas la lumière : il est par exemple large d'environ 3 mm sur la photo 6.18(d).

6.2.2.3 Bord extérieur de la trace

Avec les éprouvettes souple ou rigide non lamellisée, le bord extérieur présentait à peu près le même aspect que le bord intérieur. Il avait le même aspect arrondi que le bord intérieur, avec en plus un bourrelet de regel déposé juste sur le bord non touché par le patin (cf. Fig. 6.11). Les photos 6.19 donnent une idée de la topographie d'un tel bord, avec quatre zones distinctes. La largeur du bourrelet mesurable sur la photo de droite est d'environ 0,5 mm. La surface du bourrelet sur cette photo a été lissée par le patin, mais le côté situé vers l'extérieur de la piste n'est pas rectiligne car l'eau était éjectée par la force centrifuge avant de regeler.

Le rebord extérieur de la trace avait un aspect très particulier avec les éprouvettes A-i-j quand elles étaient retournées. Une marche apparaissait alors entre le fond horizontal de la trace et la partie de la piste non touchée par le patin (cf. Fig. 6.13). Pour les éprouvettes lamellisées A-2-j, cette marche était touchée par à-coups, la lamelle assouplissant fortement l'angle avant droit de l'éprouvette (Fig. 6.20). La marche d'environ 5 mm de large laissée par le patin A-2-5 retourné (Fig. 6.20(b)) était encore moins lisse que la marche de 3 mm formée par le patin A-2-1 retourné (Fig. 6.20(a)) : en effet, l'entaille de 5 mm de profondeur assouplit beaucoup plus l'arête d'attaque du patin qu'un simple grain d'orge. La surface de la marche obtenue avec l'éprouvette A-0-0 retournée était lisse (Fig. 6.21) car l'angle (à l'avant du patin et vers l'extérieur de la piste) de cette éprouvette était assez rigide compte tenu du mélange.

6.2.3 Usure prolongée de la piste de glace

6.2.3.1 Mesure du profil transversal de la piste de glace

Nous souhaitons connaître le profil d'une section de la piste, afin d'accéder à la quantité d'eau formée au cours de la fonte de la surface de glace selon les conditions expérimentales et le patin utilisé. Pour cela, un comparateur d'axe vertical a été fixé sur la platine horizontale servant à l'usinage de la piste (Fig. 6.22). L'altitude indiquée par le comparateur était notée en fonction du déplacement horizontal du comparateur. La pointe du comparateur faisait 3 mm

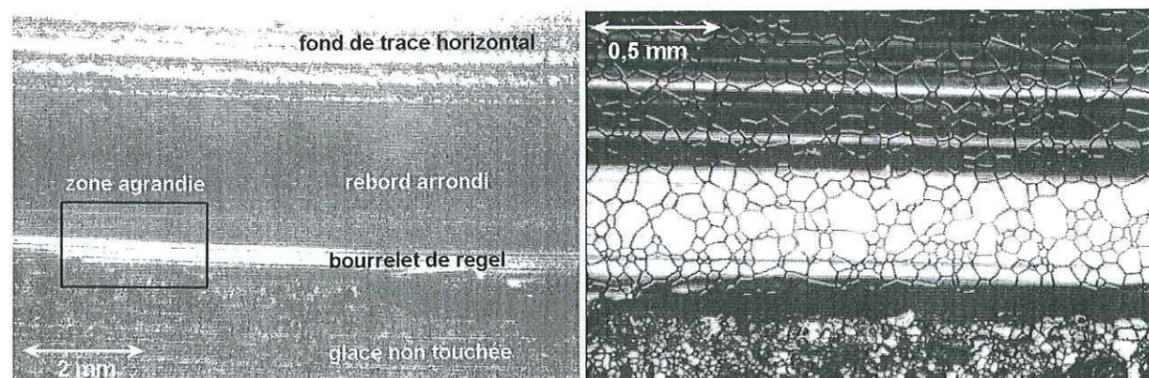
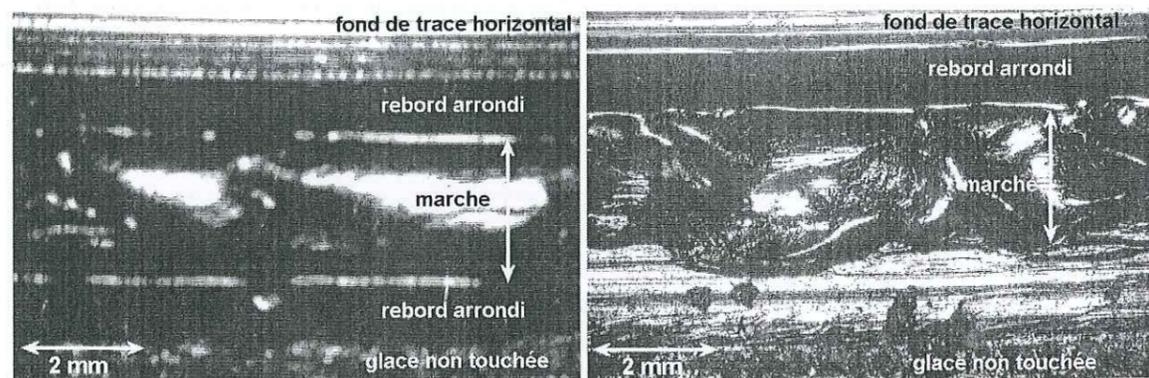


Fig. 6.19 – Vue générale et zoom sur un bourrelet du bord extérieur de la trace après 225 tours avec le patin D-F2 à -10°C et 150 tours/min sous 83 daN.



(a) Epreuve A-2-1 retournée.

(b) Epreuve A-2-5 retournée.

Fig. 6.20 – Marche du bord extérieur, touchée par à coups, après 225 tours à -10°C et 150 tours/min sous 83 daN.

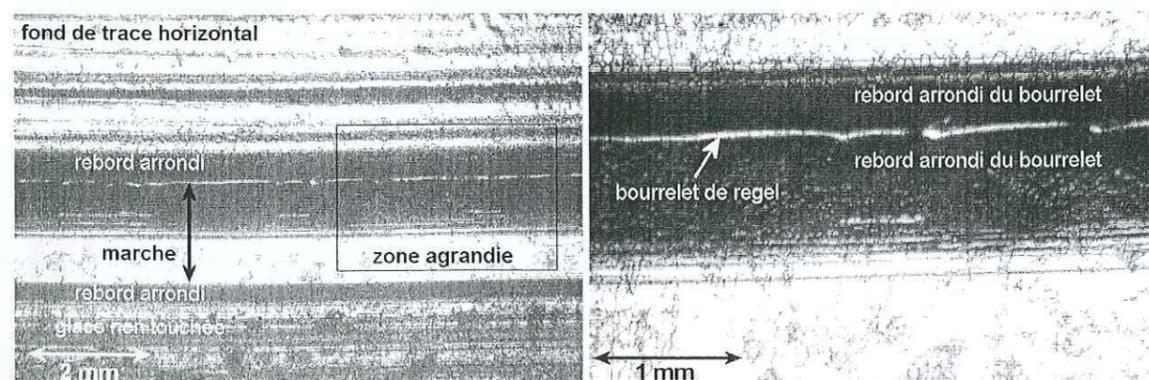


Fig. 6.21 – Vue générale et zoom sur la marche lisse, large d'environ 4 mm, au bord extérieur de la trace du patin A-0-0 retourné, après 225 tours à -10°C et 150 tours/min sous 83 daN.

de diamètre et empêchait de mesurer des ondulations de courte longueur d'onde. La précision du comparateur était de $1/100^{\text{e}}$ de mm et avec les erreurs de lecture, l'erreur de mesure était estimée à $2/100^{\text{e}}$ mm.

La piste devait être assez usée pour que les mesures soient significatives. Nous avons donc mesuré le profil après 1400 tours de piste avec le patin chargé. Au cours de l'essai, l'acquisition de F_t et F_n était effectuée sur des plages de 25 tours à partir des nombres de tours suivants: 0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 et 1400. Ceci permet de comparer la quantité d'eau fondue estimée par la mesure du profil transversal à celle qui serait produite par l'énergie apportée par le frottement.

6.2.3.2 Frottements mesurés

Cette mesure de profil a été effectuée après plusieurs essais avec la formulation F1. La décroissance de μ avec le nombre de tours est toujours à peu près la même (Fig. 6.23). En comparant les μ mesurés dans les mêmes conditions (à -10°C et 150 tours/min sous 24 daN) pour deux éprouvettes de géométries différentes, nous remarquons qu'une éprouvette décentrée (e.g. D-F1) frotte plus qu'une éprouvette centrée (e.g. B-10) (cf. § 7.2). Avec le patin B-10, μ est beaucoup plus faible sous 83 daN que sous 24 daN, comme nous l'attendions d'après l'augmentation de μ avec une décroissance de F_n (cf. § 6.1.3). Le cuivre recouvert de 2 mm de formulation F1 présente un μ étonnamment faible.

6.2.3.3 Corrections à apporter aux mesures de profondeur

Deux corrections, l'une verticale et l'autre horizontale, devaient être effectuées pour obtenir le profil d'une section de la piste usée par le patin.

D'une part, à cause d'un voilage léger du plateau support de la piste, la surface de glace n'était pas parfaitement horizontale quand elle n'était pas maintenue entre les roulettes de roller et le patin chargé. Après usinage, la surface pouvait présenter une amplitude de $15/100^{\text{e}}$ de mm sur un tour (la piste étant usinée, la pointe du comparateur légèrement comprimé était placée sur la surface et l'altitude de la piste était mesurée sur une circonférence en tournant la piste manuellement). A cause de cette faible déflexion, une section de la surface n'était pas forcément horizontale et il est donc nécessaire de corriger l'altitude brute mesurée au comparateur par la pente de la partie de piste non usée par le patin. Pour cela, des relevés d'altitude étaient effectués sur une distance supérieure à la largeur de la trace (e.g. 40 mm), afin de déterminer la pente de la piste sur cette section.

D'autre part, il fallait corriger le fait que le déplacement du comparateur n'était pas exactement radial. Cette correction modifiait la longueur horizontale mesurée pour obtenir la distance réelle à l'axe de rotation de la machine.

6.2.3.4 Profils d'usure de la surface glace

6.2.3.4.1 Premières constatations

La figure 6.25 présente deux profils évalués après 1400 tours de l'éprouvette B-10. Avant la manipulation sous 24 daN, deux rigoles avaient été usinées de part et d'autre de la position de la trace, afin de permettre à l'eau formée de s'évacuer (surtout dans la rigole extérieure grâce à la force centrifuge). En fait, nous n'avons pas observé d'eau dans les rigoles après 1400 tours du patin: la fine pellicule formée par le frottement du patin devait regeler sur place immédiatement et avoir un temps de portance insuffisant pour s'évacuer.

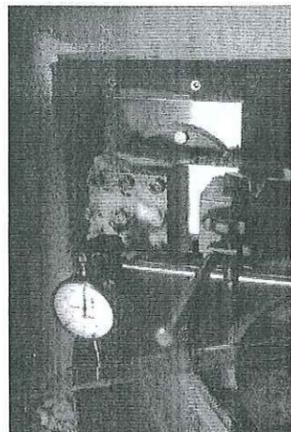


Fig. 6.22 - Dispositif d'évaluation du profil avec un comparateur monté sur une platine horizontale.

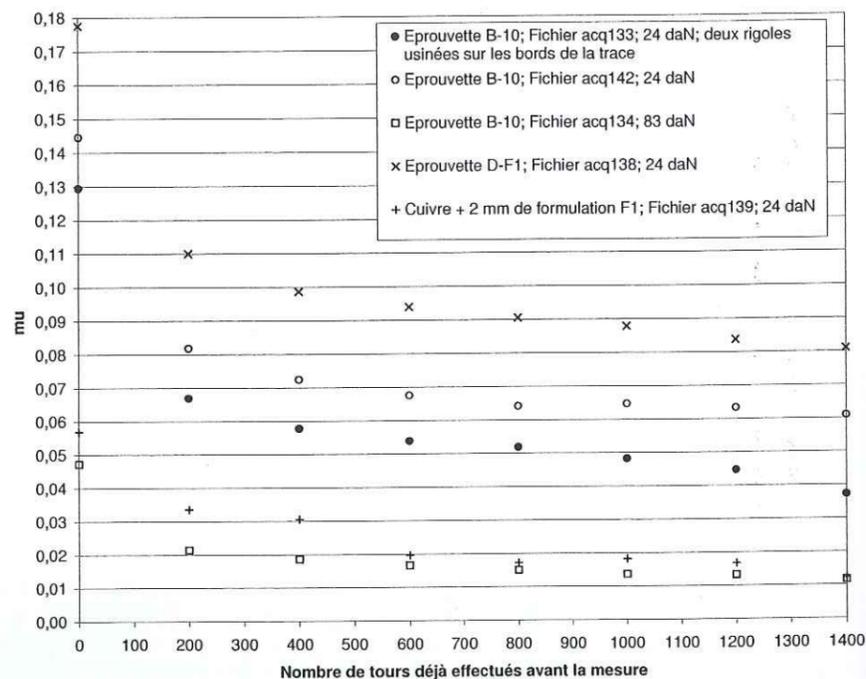


Fig. 6.23 - Evolution de μ lors de 1400 tours du patin sur la piste à -10°C et 150 tours/min.



Fig. 6.24 - Deux rigoles d'évacuation d'eau avant l'essai avec le patin B-10.

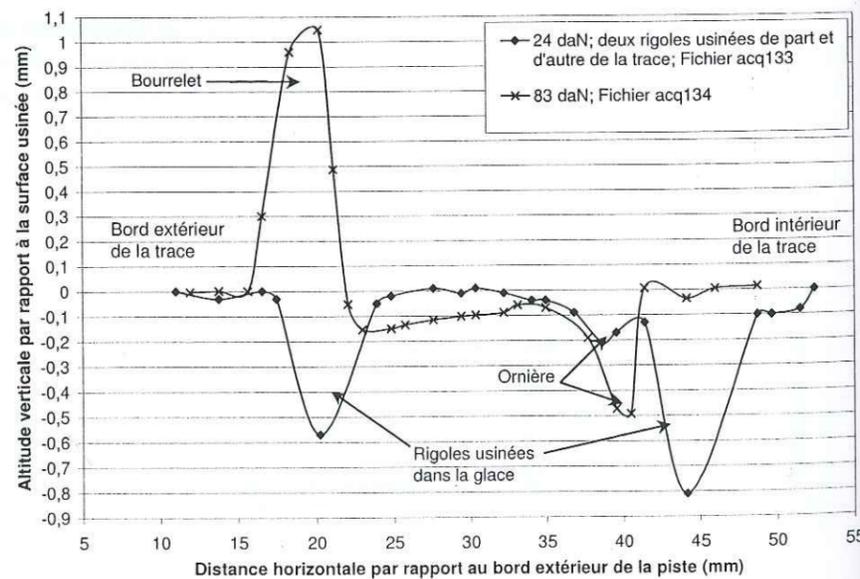


Fig. 6.25 - Profils transversaux mesurés avec l'éprouvette B-10 à -10°C et 150 tours/min.

Sous 24 daN avec les rigoles, la trace usée par le patin est très légèrement penchée, plus profonde vers l'intérieur. Nous observons aussi une ornière assez marquée juste sous le bord intérieur du patin, due au mauvais centrage du patin sous la chape d'application de la charge. La gomme accommodait le mauvais parallélisme du support de patin en laiton avec la glace, résultant en un gradient de contrainte de cisaillement latérale et la surpression sous le bord intérieur générant une ornière plus profonde.

Sous 84 daN sans rigoles, un gros bourrelet de regel, d'une hauteur de 1 mm, apparaissait sur le bord extérieur de la piste. De même qu'avec 24 daN, une ornière plus profonde s'était formée sous le bord intérieur du patin. Cette ornière était beaucoup plus marquée, comme si elle était accentuée par une différence de contrainte normale locale appliquée plus élevée.

La comparaison entre les μ obtenus sous 24 daN montre que le frottement était plus faible avec la rigole que sans rigole (Fig. 6.23). Ceci est probablement dû au fait que l'aire de contact était plus faible avec les rigoles, donc la contrainte normale locale était plus élevée et μ était plus faible à cause d'une meilleure lubrification : les rigoles étaient usinées de telle façon que les bords latéraux du centre du patin soient dans le vide, afin que l'eau s'échappe ; et par suite, à cause de la courbure de la piste, les deux coins dirigés vers l'extérieur de la piste, à l'avant et à l'arrière du patin, étaient sur le vide.

La profondeur usinée était légèrement plus grande sous 84 daN que sous 24 daN. La comparaison des valeurs de μ (Fig. 6.23) montre que, pour un même patin, μ était plus élevé si la surface de glace fondait peu et μ était plus faible si la surface de glace fondait beaucoup.

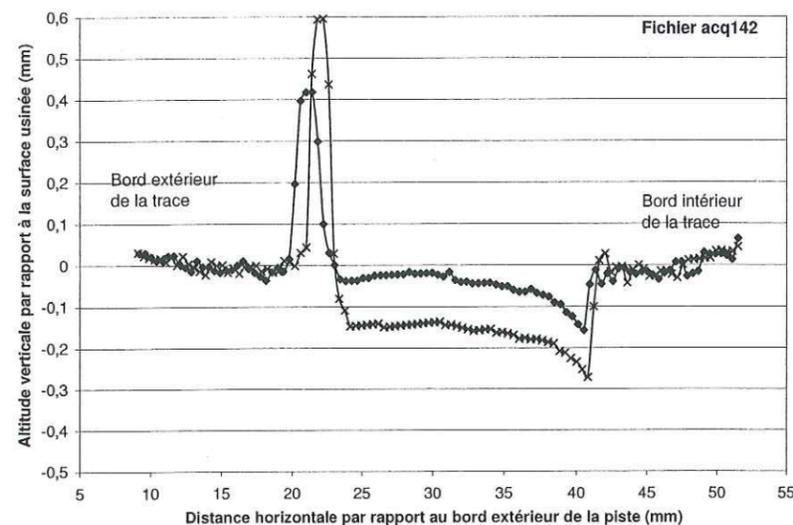
6.2.3.4.2 Profils avec la formulation souple

Les figures 6.26(a) à 6.26(c) correspondent à des conditions expérimentales constantes (à -10°C et 150 tours/min sous 24 daN) et sont tracées avec les mêmes échelles pour faciliter les comparaisons. Pour chaque essai, deux relevés de profils diamétralement opposés ont été effectués. Dans chaque cas, ces profils diffèrent d'environ 0,1 mm. Cet écart ne dépendait ni de la déflexion de la piste (ce paramètre ayant été corrigé), ni de l'erreur de mesure ($2/100^\circ$ de mm). Cet écart s'explique par les vibrations du fléau. En effet, la moindre perturbation de l'horizontalité de la piste s'accroissait au fur et à mesure de son usure. Les mouvements du fléau lors d'une manipulation avaient tendance à s'accroître, surtout à vitesse élevée (cf. § 5.1.3.8). σ_n pouvait donc présenter une variation importante au cours du temps et le patin formait peu à peu des creux et laissait des ondulations sur la piste.

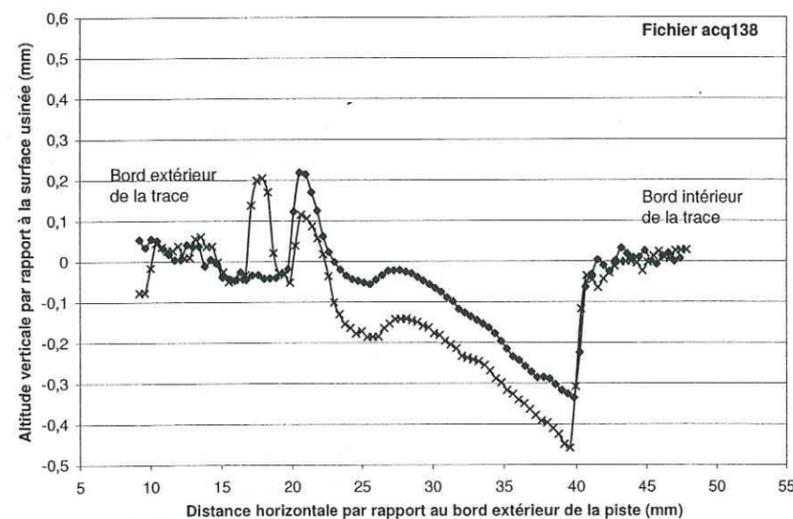
Dans tous les cas, un bourrelet de regel important était formé sur le bord extérieur de la trace. La hauteur du bourrelet était proportionnelle à la profondeur fondue sous le patin : le bourrelet était petit si le patin avait peu fondu la piste (Fig. 6.26(c)) et épais dans le cas contraire (Fig. 6.26(a) et 6.26(b)).

Le profil usé dépend de la géométrie des patins en élastomère. Avec l'éprouvette B-10, le profil est incliné et profond vers l'intérieur (Fig. 6.26(a)) ; après 1400 tours, μ vaut 0,06 et la profondeur moyenne de la trace est de 0,1 mm. Avec l'éprouvette D-F1, le profil est beaucoup plus incliné (Fig. 6.26(b)) ; après 1400 tours, μ vaut 0,08 et la profondeur moyenne de la trace est de 0,3 mm. L'éprouvette D-F1 frotte plus que la B-10 (Fig. 6.23), mais ceci s'explique plus par le décentrage (répartition de la contrainte normale très différente) que par l'épaisseur de lubrifiant formé.

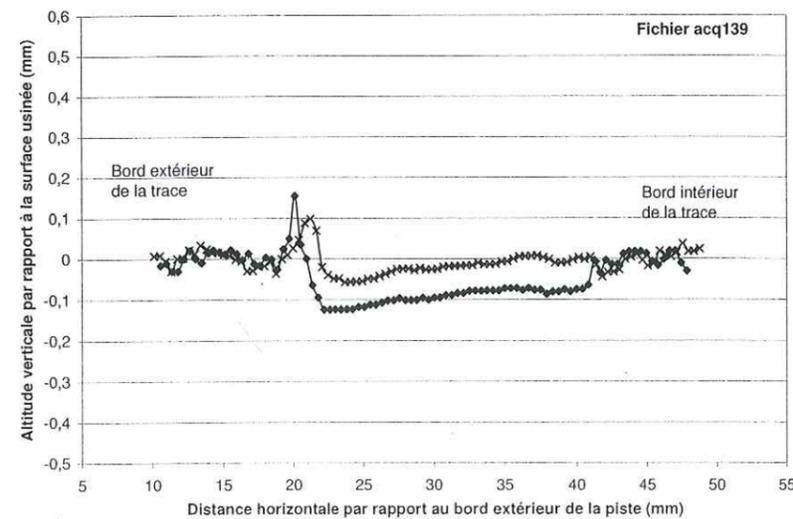
Avec le patin en cuivre recouvert de 2 mm de gomme, le profil usé est quasiment horizontal (Fig. 6.26(c)) ; après 1400 tours, μ est étonnamment faible, 0,01, et la profondeur moyenne de la trace est également faible, 0,05 mm.



(a) Patin B-10.



(b) Patin D-F1.



(c) Patin en cuivre (forme de B-10) recouvert de 2 mm de gomme F1.

Fig. 6.26 – Profils après 1400 tours de rotation avec la formulation F1 à -10°C et 150 tours/min sous 24 daN.

6.2.3.5 Observations qualitatives

La photo 6.24 montre les deux rigoles usinées pour évacuer l'eau formée sous le patin B-10. Sur les photos 6.27 à 6.30, le patin est passé du bas vers le haut. Nous pouvons comparer l'aspect des rigoles avant et après les 1400 tours du patin. Le centre des rigoles apparaît toujours clair car il reflète bien la lumière. Avant passage du patin, les traces d'usinage sont visibles sur la piste. Sur la photo 6.28 de la rigole intérieure, le patin a lissé la partie droite de la photo, où les joints des cristaux de glace sont visibles. La photo 6.30, centrée sur la rigole extérieure, laisse apercevoir le bourrelet de regel obtenu sur le profil (Fig. 6.26(a)).

Sur les deux photos 6.31 et 6.32, le patin est passé de la droite vers la gauche. L'aspect du fond de la trace est indépendant de μ . Le bord intérieur de la trace obtenu avec l'éprouvette D-F1 est bien lisse (Fig. 6.31). L'eau a formé des gouttelettes sur les stries de regel sous le patin D-F1 (Fig. 6.32). L'aspect après 1400 tours de l'éprouvette B-10 est le même.

6.2.3.6 Fonte de la glace

Sous 24 daN, μ est plus élevé quand la surface de glace fond plus et que la répartition de la contrainte normale n'est pas uniforme. En effet, après 1400 tours, μ vaut 0,06 avec le patin B-10 présentant une forte surpression sous son bord intérieur (Fig. 6.26(a)); alors que μ vaut 0,01 avec l'éprouvette de cuivre recouverte de gomme F1 sous laquelle la glace fond peu (Fig. 6.26(c)) (cf. Fig. 6.23).

Comparons l'épaisseur de glace fondue mesurée avec celle calculée d'après l'apport d'énergie par le frottement. En considérant un coefficient de partage $K = 0,75$ (cf. § D.10), si toute l'énergie apportée par le frottement sert uniquement à fondre la glace, l'épaisseur d'eau formée h est calculée en régime stationnaire comme (D.16) : $h = (K\mu_h\sigma_n a)/(\rho_i L)$. Par exemple, avec $\mu = 0,1$, l'épaisseur d'eau fondue par un passage de patin est $3\ \mu\text{m}$ sous 24 daN et $10\ \mu\text{m}$ sous 83 daN en régime stationnaire.

On suppose maintenant que les épaisseurs d'eau fondues s'additionnent à chaque tour. Soit N_T le nombre de tours parcourus et R le rayon moyen de la piste. La chaleur Q_m nécessaire pour fondre une épaisseur h sur la totalité de la piste est $Q_m = 2\pi R b h \rho_i L$. La chaleur fournie par le frottement $dQ_f(N)$ pendant le tour N est $dQ_f(N) = K F_i 2\pi R = K \mu(N) \sigma_n a b 2\pi R$, avec $\mu(N)$ le frottement mesuré pendant le tour N . Pendant N_T tours, $Q_f = K 2\pi R a b \sigma_n \sum_{N=1}^{N_T} \mu(N)$. En supposant que toute la chaleur dissipée par frottement sert à fondre la glace, $Q_m = Q_f$ et $h \rho_i L = K a \sigma_n \sum_{N=1}^{N_T} \mu(N)$, d'où

$$h = \frac{K a \sigma_n}{\rho_i L} \sum_{N=1}^{N_T} \mu(N). \quad (6.1)$$

En supposant que μ est constant par plage de 200 tours (la valeur μ_{200i} de μ (Fig. 6.23) est supposée valable entre les tours $200i - 100$ et $200i + 100$ pour i entier entre 0 et 7), l'épaisseur d'eau théoriquement fondue en 1400 tours est proche de

$$h = \left(\frac{K a \sigma_n}{\rho_i L} \right) \left(100\mu_0 + \sum_{i=1}^6 200\mu_{200i} + 100\mu_{1400} \right). \quad (6.2)$$

Pour le patin B-10, les valeurs de frottement (Fig. 6.23) conduisent à $h = 3,0\ \text{mm}$ sous 24 daN et $h = 2,6\ \text{mm}$ sous 83 daN. Ces épaisseurs sont supérieures d'un ordre de grandeur aux épaisseurs observées expérimentalement, soit environ $0,1\ \text{mm}$ (cf. Fig. 6.26(a)). Ceci signifierait qu'à -10°C , seulement 10% de la chaleur produite par le frottement est utilisé pour la fonte de la glace, et que la majorité est évacuée par conduction. Ceci rejoint les résultats de Evans *et al.* (1976); Oksanen (1980); Ettles (1986b) et Akkok *et al.* (1987) à basse température.

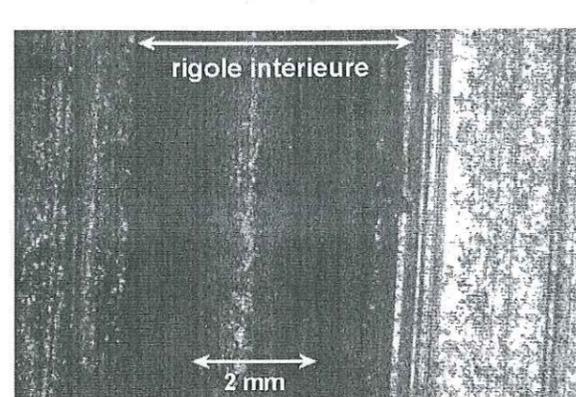


Fig. 6.27 – Bord intérieur de la trace avant passages du patin B-10.

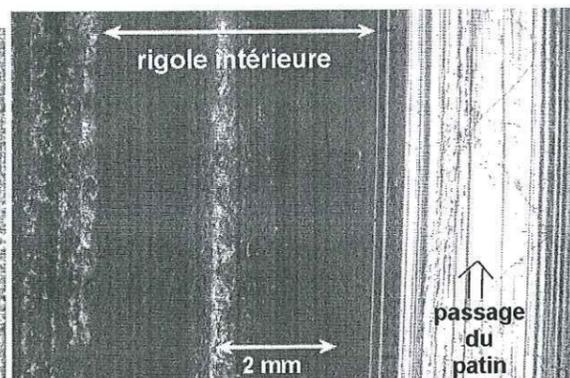


Fig. 6.28 – Bord intérieur de la trace après 1400 tours du patin B-10 à 150 tours/min sous 24 daN.

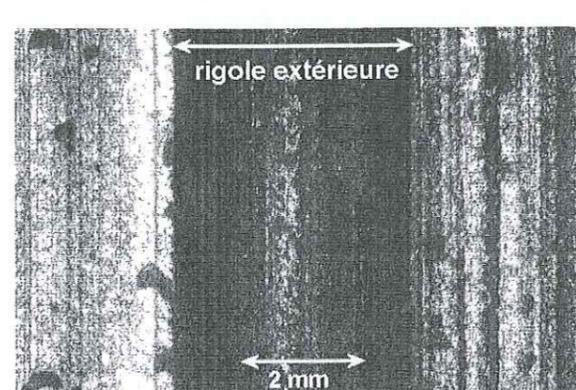


Fig. 6.29 – Bord extérieur de la trace avant passages du patin B-10.

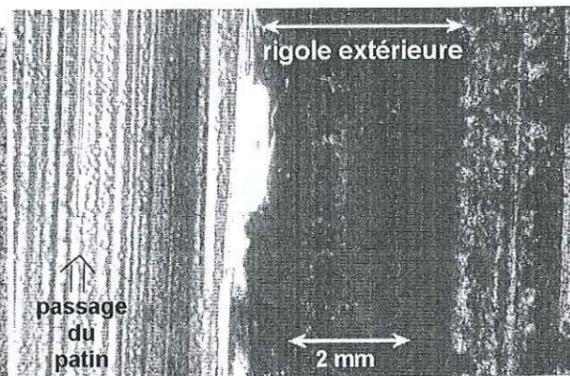


Fig. 6.30 – Bord extérieur de la trace après 1400 tours du patin B-10 à 150 tours/min sous 24 daN.

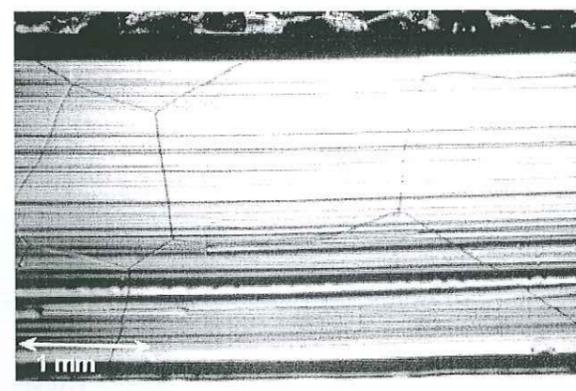


Fig. 6.31 – Bord intérieur de la trace, après 1400 tours du patin D-F1 à 150 tours/min sous 24 daN.

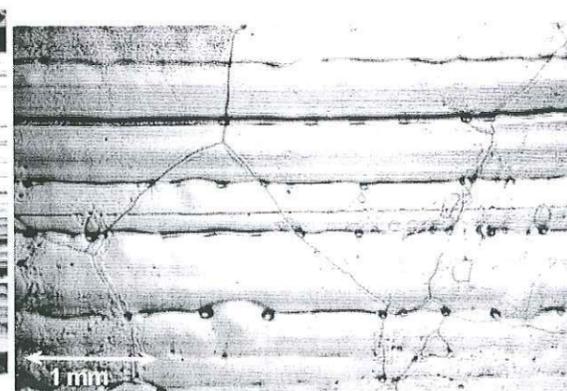


Fig. 6.32 – Milieu de trace, après 1400 tours du patin D-F1 à 150 tours/min sous 24 daN.

6.3 Conclusion sur les variations du frottement et les observations qualitatives

μ atteint une limite inférieure après un grand nombre de tours. μ entre les tours 1 et 25 reflète donc un état transitoire alors que le μ entre les tours 200 et 225 se rapproche d'un état stationnaire. L'évolution de μ au cours des premiers tours diffère selon la souplesse de l'élastomère. Avec une gomme souple, μ décroît dès les premiers tours car A_r est très rapidement égal à A_n . Avec une gomme rigide, μ augmente en début de manipulation, à cause du défaut de parallélisme entre le patin et la glace et d'un accroissement progressif de A_r dû à la fonte progressive des aspérités de la glace.

μ augmente avec une diminution de T_0 , V ou σ_n , dans les gammes balayées, i.e. de -20 à -5 °C, de 1,9 à 11,5 m/s et de 1,2 à 4,15 bar. Ces variations sont bien documentées dans la littérature, aussi bien par les mesures que les modèles.

Avec la formulation souple, la trace présente deux ornières sous ses bords. Avec les patins lamellisés rigides retournés A-i-j, une marche existe sous le bord extérieur de la trace. L'observation à la loupe binoculaire de la partie centrale de la trace montre l'existence de dépôts d'eau regelée, en bourrelets ou en gouttelettes espacées.

Les observations qualitatives de la surface de glace après usure prolongées de la piste illustrent la difficulté d'appliquer un modèle théorique à nos résultats expérimentaux. Les phénomènes très complexes dus à la géométrie du dispositif expérimental et aux propriétés viscoélastiques des élastomères engendrent une distribution non uniforme de la contrainte normale sous le patin. Le profil de la piste de glace après un grand nombre de tours du patin en est une preuve évidente, avec deux ornières créées sous un patin souple ou une marche sur le bord extérieur de la trace d'une éprouvette rigide retournée. L'usure de la glace n'est pas horizontale, conséquence d'une surpression sous le bord intérieur du patin due au dispositif d'application de l'effort normal.

Chapitre 7

Effet des différents paramètres sur le frottement

7.1 Influence du matériau constituant le patin sur le frottement

7.1.1 Effet de la formulation sur le frottement

7.1.1.1 Résultats expérimentaux

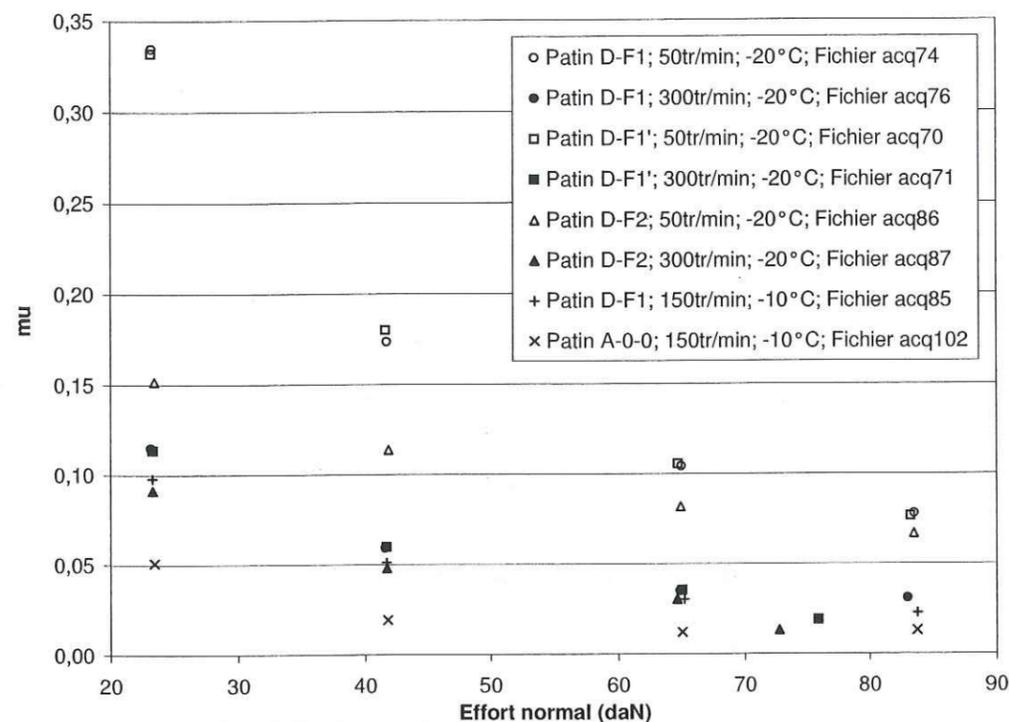
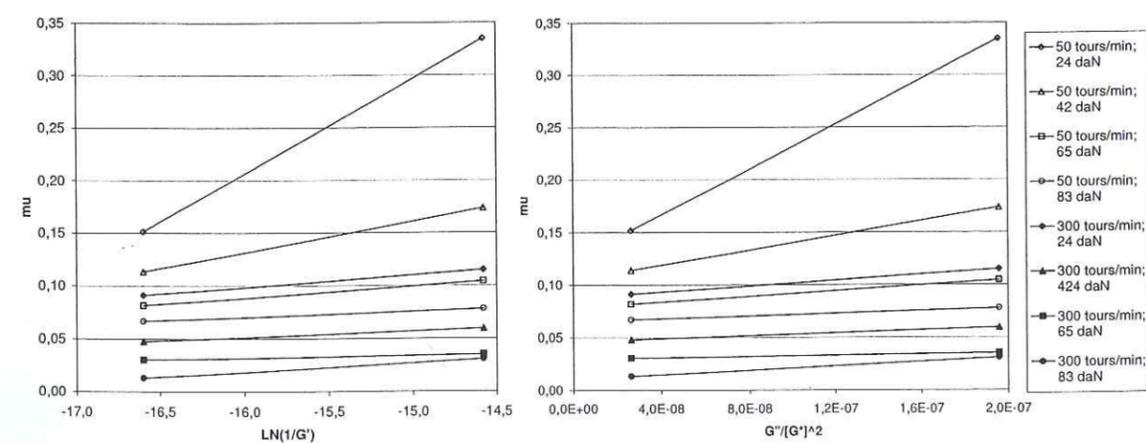
La figure 7.1 montre l'effet du mélange sur μ , à trois vitesses et deux températures, avec des éprouvettes de même géométrie (Fig. 5.4). Les μ sont élevés et les tendances sont nettes à -20°C . Pour les V extrêmes, 50 et 300 tours/min, les μ mesurés pour les deux formulations proches (patins D-F1 et D-F'1) sont quasiment égaux sous toutes conditions de F_n . En revanche, le mélange plus rigide (patins D-F2 et A-0-0) donne un μ beaucoup plus faible. L'écart entre ce mélange rigide F2 et le mélange souple F1 est d'autant plus grand que V est faible. A -10°C et 150 tours/min, l'éprouvette D-F1 donne des μ presque doublés par rapport à A-0-0: une formulation souple permet d'obtenir un meilleur frottement qu'une formulation rigide (résultat bien illustré dans la bibliographie).

La machine tournante permet de bien distinguer des mélanges aux propriétés viscoélastiques très différentes: les mélanges plus rigides frottent moins que les mélanges plus souples. Ce phénomène a déjà été souvent observé, aussi bien en conditions réelles sur pneu qu'en laboratoire (e.g. Ahagon *et al.*, 1988; Futamura, 1996; Lenoël, 1998).

L'évolution de μ avec l'usure de la piste était variable pour un patin souple ou rigide (§ 6.1.1). Avec une formulation rigide, sous F_n faible, μ augmentait au début de l'essai avec l'accroissement de A_r , puis diminuait avec l'apparition de la lubrification. Pour un patin souple, l'évolution de μ avec le nombre de tours parcourus semblait uniquement dépendre de F_n , et non pas de T_0 ou de V : μ diminuait au cours du temps, jusqu'à atteindre une limite inférieure d'autant plus rapidement que F_n était élevé.

7.1.1.2 Aire de contact réelle

Considérons une aspérité de gomme de rayon de courbure $R = 1\text{ mm}$ en appui sur un plan du même matériau sous l'effort normal $F_n = 24\text{ daN}$. Le module d'Young E de la gomme s'exprime en fonction du module de cisaillement G' et du coefficient de Poisson ν (considéré égal à 0,3) par (1.8). D'après le modèle élastique de Hertz (1896), le rayon de contact r est donné par (1.1). Pour la formulation F1 à -10°C , $G' = 1,5\text{ MPa}$ et $r = 3,5\text{ mm}$. Pour la formulation F2 à -10°C ,

Fig. 7.1 - Effet du mélange sur le μ mesuré avec la machine tournante.Fig. 7.2 - Variation de μ à -20°C avec les propriétés viscoélastiques des mélanges: $\ln(1/G')$ et G''/G'^2 .

$G' = 6,5 \text{ MPa}$ et $r = 1,5 \text{ mm}$. Le ratio A_r/A_n est donc cinq fois plus élevé, et donc la contrainte normale locale σ_{nl} est cinq fois moindre, pour une formulation souple qu'une formulation rigide.

L'écart de frottement observé entre les mélanges souple et rigide semble ici ne dépendre que de A_r . La déformation viscoélastique du patin très aisée pour un patin souple permet à l'éprouvette d'épouser les aspérités microscopiques de la surface de glace. Au contraire, une éprouvette de formulation rigide a une aire de contact discrète formée par des aspérités ponctuelles de la glace qui devraient donc fondre rapidement (car la contrainte normale locale σ_{nl} est élevée aux zones de contact).

7.1.1.3 Conclusion

L'effet du mélange est bien mis en évidence avec ce type de machine tournante: un mélange souple frotte plus qu'un mélange rigide, dans toute la gamme de $T_0 V \sigma_n$ parcourue. Cet écart est dû à la variation de A_r avec la souplesse du mélange: un mélange souple se déforme aux aspérités pour recouvrir toute la surface réelle de glace, alors qu'un mélange rigide a une A_r faible et fond les sommets des aspérités aux zones de contact.

7.1.2 Propriétés viscoélastiques des mélanges

7.1.2.1 Corrélation entre le frottement et les propriétés viscoélastiques

7.1.2.1.1 Objectif

Il est intéressant d'étudier l'effet de la variation des propriétés viscoélastiques sur les μ obtenus avec la machine tournante. Lors d'une étude similaire menée avec le pendule SRT (Lenoël, 1998), les mesures de frottement (§ E.6.1.2) avaient nettement montré une augmentation de μ_{SRT} gomme-glace avec $\ln(1/G')$ et G''/G'^2 , quel que soit T_0 . L'augmentation était d'autant plus marquée que T_0 était faible.

7.1.2.1.2 Résultats expérimentaux

La figure 7.2 présente les variations de μ avec les deux indicateurs de propriétés viscoélastiques couramment utilisés: $\ln(1/G')$ et G''/G'^2 . Les μ ont été mesurés à -20°C à deux V , sous quatre σ_n et avec deux formulations F1 et F2. Cette température basse a été choisie afin d'accentuer l'effet des propriétés viscoélastiques des mélanges, μ étant plus élevé sur glace froide.

Dans ces conditions expérimentales, μ augmente avec ces deux indices. L'augmentation du frottement avec $\ln(1/G')$ est marquée, car les deux mélanges présentent des souplesses très différentes (à 24 daN et 50 tours/min, μ est doublé). Elle est plus nette à V faible qu'à V élevé et sous σ_n faible que sous σ_n élevé.

L'augmentation du frottement avec G''/G'^2 est aussi visible. Les deux figures 7.2 sont semblables: l'effet de l'hystérèse G'' est négligeable devant celui du module de cisaillement G' . Par ailleurs, nous avons constaté que l'effet des propriétés viscoélastiques de la gomme sur le niveau de frottement n'est pas plus marqué lors des 25 premiers tours parcourus par le patin, au cours desquels la surface de glace garde encore une certaine rugosité.

7.1.2.1.3 Comparaison avec les résultats de la littérature

L'augmentation du frottement avec un assouplissement de l'élastomère est très bien documentée dans la littérature, soit par des tests SRT (Ahagon *et al.*, 1988; Takino *et al.*, 1991; Futamura, 1996; Lenoël, 1998), soit par des essais sur pneus (Horiuchi, 1991; Newell et Wallace, 1995).

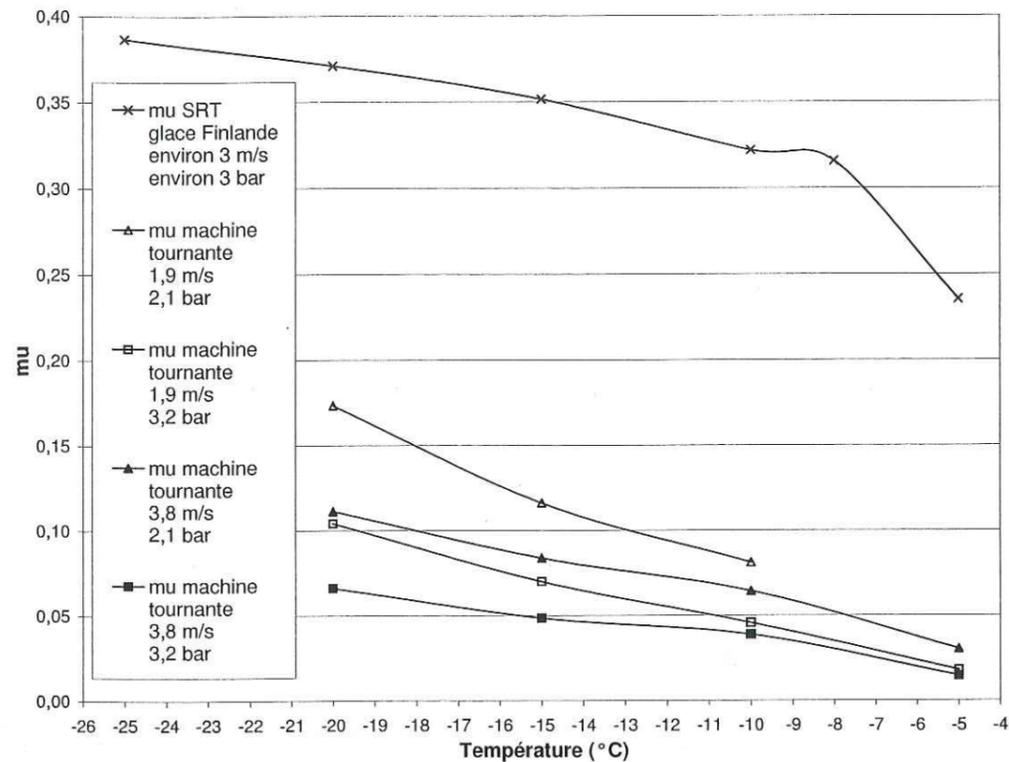


Fig. 7.3 - μ pour la formulation F1 avec le pendule SRT et la machine tournante (épreuve D-F1).

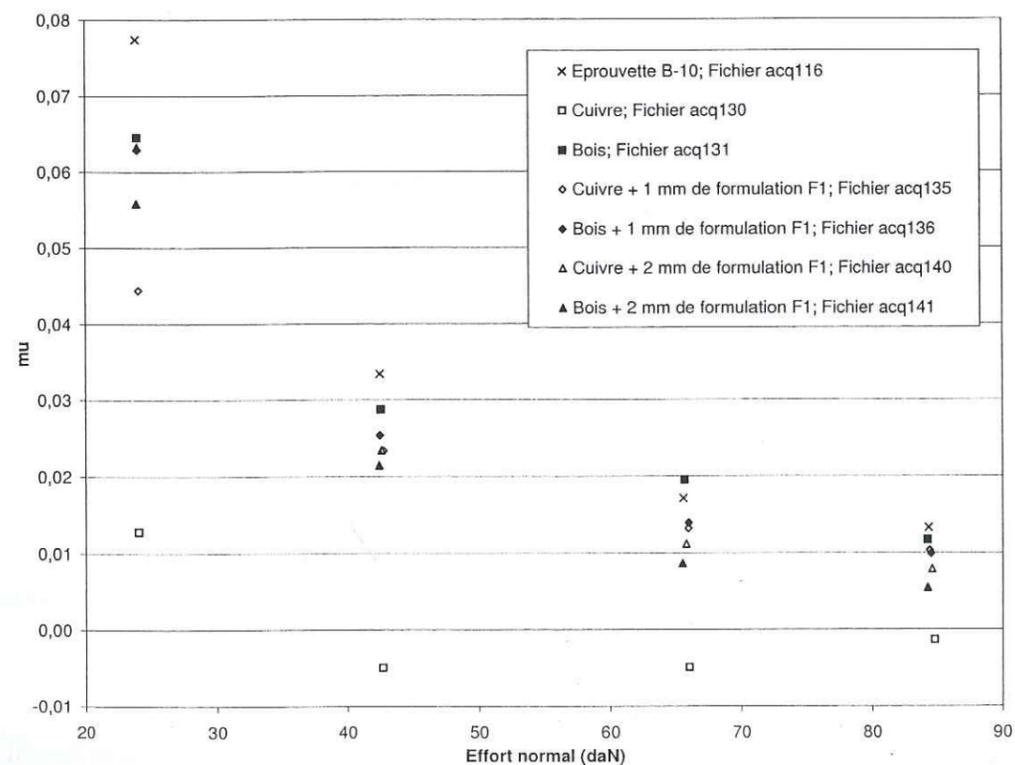


Fig. 7.4 - Effet du support sur μ à -10°C et 150 tours/min.

L'influence de l'élastomère se manifeste d'autant plus à T_0 faible. Comme Roberts et Lanes (1983) l'avaient souligné, d'une part, près du point de fusion, la fonte de la glace domine le processus de frottement; d'autre part, les propriétés viscoélastiques de l'élastomère permettent de changer le frottement à T_0 faible (la dissipation d'énergie se fait dans l'élastomère dans ce cas-là). Nous avons aussi montré ce résultat (Lenoël, 1998) (cf. Fig. E.2).

7.1.2.1.4 Conclusion

Avec les deux mélanges utilisés, μ semble augmenter légèrement avec deux indices de propriétés viscoélastiques, $\ln(1/G')$ et G''/G'^2 . L'augmentation était beaucoup plus nette pour les mesures de frottement effectuées avec le pendule SRT, dans les mêmes gammes de propriétés viscoélastiques (Fig. E.3). Avec la machine tournante, les différences de comportement viscoélastiques des mélanges ne jouent qu'un rôle secondaire. En particulier, à V et F_n élevés, les phénomènes thermiques imposent seuls le niveau de frottement.

7.1.3 Comparaison des mesures avec le pendule SRT et la machine tournante

7.1.3.1 Objectif

Des mesures de μ ont été effectuées avec le mélange de référence glace F1 en utilisant deux dispositifs expérimentaux différents: le pendule SRT et la machine tournante. Ces deux dispositifs permettent de comparer des μ mesurés sous des conditions $T_0 V \sigma_n$ similaires, mais avec des conditions de frottement local très différentes: les longueurs frottante et frottée sont bien plus faibles avec le pendule SRT qu'avec la machine tournante. Alors qu'un point de glace ne voit passer qu'une seule fois une longueur de gomme d'environ 1 mm avec le pendule SRT (cf. 1.4.4), il voit passer un grand nombre de fois une longueur de gomme de 100 mm avec la machine tournante; le frottement sur glace lisse est alors lubrifié et le patin et la glace sont réchauffés par la chaleur générée lors des tours précédents.

7.1.3.2 Résultats expérimentaux

La figure 7.3 montre une comparaison des évolutions de μ avec la température. Les résultats expérimentaux obtenus avec le pendule SRT correspondent à $\sigma_n \approx 3$ bar et $V \approx 3$ m/s. Les mesures avec la machine tournante ont été effectuées sous des conditions proches du SRT: V égale à 1,9 et 3,8 m/s, et σ_n égale à 2,1 et 3,2 bar.

Quel que soit le dispositif expérimental utilisé, μ diminue avec une augmentation de T_0 . En revanche, les niveaux de frottement obtenus avec la machine tournante sont beaucoup plus faibles qu'avec le pendule SRT. D'une part ceci s'explique par la lubrification dans le contact sous le patin de la machine tournante. La fonte est assez importante sous l'éprouvette de la machine tournante, comme le prouve l'importance de la profondeur usée après un grand nombre de tours. En revanche, le frottement de la gomme sur la glace peut être considéré comme sec sous le pendule SRT, malgré l'observation de gouttelettes d'eau régelée à la loupe binoculaire après passage du patin. En effet, sous le SRT, l'eau formée ne peut pas se mettre sous pression et établir une couche liquide entre la glace et la gomme: les longueurs frottante et frottées sont trop courtes pour permettre une fonte suffisante à l'établissement d'une couche liquide entre les rugosités des surfaces. D'autre part, le pendule SRT met en jeu une déformation locale du patin sur les aspérités de la surface de glace rugueuse. Cette dépense d'énergie par dissipation viscoélastique dans la gomme augmente le frottement par rapport au contact lisse avec la machine tournante.

7.1.3.3 Evaluation de la longueur sèche à l'avant du patin

De nombreux auteurs ont séparé la surface de contact en deux parties : l'avant du contact est sec et un flux de chaleur constant chauffe l'interface (Evans *et al.*, 1976; Hayhoe et Shapley, 1989) ; l'arrière du contact est lubrifié. En notant μ_s le coefficient de frottement sec, la longueur sèche à l'avant du patin est donnée par (D.18) :

$$x_s = \frac{\pi}{\alpha_i V} \left(\frac{(T_f - T_0)\lambda_i}{2\mu_s \sigma_n} \right)^2 \quad (7.1)$$

Si on suppose que le coefficient de frottement sec est bien représenté par μ_{SRT} , en adoptant les valeurs de la figure 7.3, on trouve bien une diminution de x_s avec une augmentation de T_0 : 9,7 cm à -20 ° C, 6,2 cm à -15 ° C, 3,2 cm à -10 ° C et 1,54 cm à -5 ° C.

On peut obtenir une évaluation de la fraction d'aire de contact en zone sèche Φ_s d'une autre façon. En négligeant le frottement généré par la zone humide devant celui de la zone sèche et en considérant que μ_{SRT} est le coefficient de frottement en zone sèche, μ peut se calculer comme $\mu = \Phi_s \mu_{SRT}$. D'après la figure 7.3, Φ_s vaut 27% à -20 ° C, 21% à -15 ° C, 15% à -10 ° C et 10% à -5 ° C.

La longueur sèche obtenue par (7.1) avec μ_{SRT} représentant le coefficient de frottement sec est bien plus élevée que celle obtenue par le calcul de $\Phi_s = \mu/\mu_{SRT}$. A -5 ° C, on trouve x_s proche de 1 cm dans les deux cas, mais à -20 ° C, presque toute la surface est sèche d'après (7.1) alors que moins d'un tiers ne devrait être sèche d'après la valeur de $\Phi_s = \mu/\mu_{SRT}$.

7.1.3.4 Conclusion

Des mesures de μ ont été effectuées sous des conditions de $T_0 V \sigma_n$ similaires avec le pendule SRT et la machine tournante. Le frottement augmente toujours quand T_0 décroît. En revanche, les niveaux de frottement mesurés avec la machine tournante sont beaucoup plus faibles que ceux obtenus avec le pendule SRT. Ceci pourrait s'expliquer par les fractions d'aire de contact sèche et humide. Même si on observe de l'eau avec le SRT, on peut supposer que μ_{SRT} , très élevé, représente le coefficient de frottement en condition sèche : en effet, l'eau ne peut pas se mettre sous pression sous le SRT. L'évaluation de la longueur sèche de l'aire de contact x_s par (7.1) requiert de nombreuses hypothèses et donne une augmentation de x_s quand T_0 décroît : 1,54 cm à -5 ° C et 9,7 cm à -20 ° C. Un autre calcul de la fraction sèche de l'aire de contact demande juste trois hypothèses : l'aire de contact est séparée en deux zones ; la contribution de la zone lubrifiée est négligeable devant celle de la zone sèche, μ_{SRT} reflète le coefficient de frottement sec. Ce calcul donne une augmentation de Φ_s quand T_0 décroît : 10% à -5 ° C et 27% à -20 ° C. Cette évaluation avec une faible fraction d'aire sèche quelle que soit T_0 est beaucoup plus crédible : même à -20 ° C sous faible F_n , la surface de glace apparaît recouverte d'eau regelée à la loupe binoculaire.

7.1.4 Effet des propriétés thermiques du support sur le frottement

7.1.4.1 Objectif

Pour un même contact gomme-glace, nous souhaiterions connaître l'effet des propriétés thermiques du support et comparer nos résultats expérimentaux avec ceux de Bowden et Hugues (1939) et Evans *et al.* (1976). Ces auteurs avaient observé qu'un bon conducteur thermique frotte plus qu'un mauvais conducteur thermique. Selon Bowden et Hugues (1939), un bon conducteur thermique laisse échapper la chaleur de l'interface, fond moins de glace, lubrifie moins, donc

frotte plus (cf. § 2.2.1). Selon Evans *et al.* (1976), la fonte de la glace étant négligeable devant la diffusion de chaleur dans la glace et le patin, les métaux qui permettent d'évacuer plus facilement la chaleur frottent plus que les polymères (cf. § 2.2.2).

Pour cela, deux patins, l'un en cuivre et l'autre en bois, ont été recouverts d'une feuille de gomme de 1 ou 2 mm d'épaisseur. La géométrie des patins est centrée avec une aire de contact de 100 mm de longueur. Les ordres de grandeurs des modules d'Young E du cuivre et du bois (respectivement 124 GPa et 10 GPa) sont bien plus élevés que le module de cisaillement G' de l'élastomère. Le cuivre et le bois sont donc considérés comme des supports rigides, recouverts d'une fine épaisseur viscoélastique d'élastomère. Nous avons aussi mesuré le frottement avec du cuivre et du bois bruts (i.e. non recouverts d'élastomère), afin d'observer l'effet du matériau au contact avec la glace (nature et rugosité).

7.1.4.2 Frottement du cuivre et du bois bruts sur la glace

A -10 ° C et 150 tours/min, le cuivre génère un μ plus faible que l'erreur de mesure de 0,005 (Fig. 7.4). Lors de ces essais, la surface de glace est à peine lissée après 225 tours : seule une bande d'environ 1 mm de large est lissée à 1 cm du bord intérieur sous 24 daN ; seuls les 6 mm du bord intérieur sont lissés sous 84 daN.

A -10 ° C et 150 tours/min, le μ du bois brut décroît de 0,065 à 0,01 quand F_n augmente (Fig. 7.4). Ce μ beaucoup plus élevé que celui du cuivre est en apparence contradiction avec les affirmations de Bowden et Hugues (1939) et Evans *et al.* (1976). En fait, les aires réelles frottées sont très différentes. La surface de glace est plus lissée qu'avec le cuivre : après seulement 25 tours sous 24 daN, une bande d'environ 1 cm de large est lissée au bord intérieur ; sous 84 daN, toute la surface semble lissée en 5 tours. L'aspect microscopique de la glace est normal et aucune trace d'indentation par les fibres du bois n'apparaît.

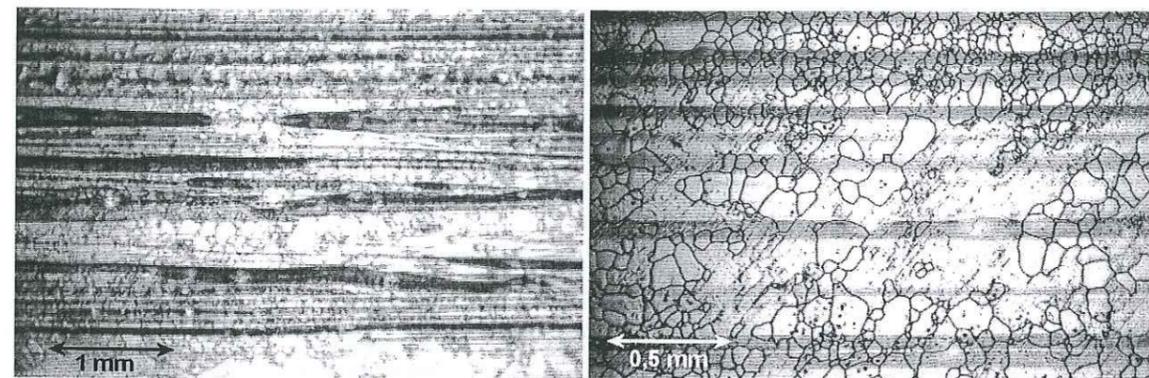
7.1.4.3 Frottement du cuivre et du bois recouverts d'élastomère sur la glace

A -10 ° C et 150 tours/min, quel que soit F_n , le bois brut frotte toujours plus que lorsqu'il est recouvert d'élastomère (Fig. 7.4). Le bois recouvert de 2 mm d'élastomère frotte moins qu'avec une épaisseur d'élastomère de 1 mm. Ceci peut s'expliquer par une différence de comportement mécanique de l'ensemble selon les propriétés amortissantes de l'élastomère. Le comportement viscoélastique de la gomme s'exprime plus avec une grande épaisseur d'élastomère et l'aire de contact microscopique est très élevée mais il existe une très bonne lubrification locale, donc un faible μ . En revanche, un élastomère de faible épaisseur ne suffit pas pour accommoder les vibrations du fléau d'application de la charge, et le patin ne lisse la piste que du côté intérieur et après un grand nombre de tours.

Le phénomène est à peu près la même pour le cuivre : la feuille de 2 mm d'épaisseur donne un μ légèrement plus faible que la feuille de 1 mm pour un effort normal supérieur à 42 daN (Fig. 7.4). Sous un effort normal de 24 daN, le μ plus faible avec 1 mm de gomme que 2 mm s'explique par une lubrification inhabituelle (en général, la lubrification est plus rapide sous 2 mm que sous 1 mm de gomme ; mais pour cet essai, la piste est lissée après environ 100 tours avec 1 mm de gomme, alors qu'il faut 225 tours pour lisser la piste avec 2 mm de gomme).

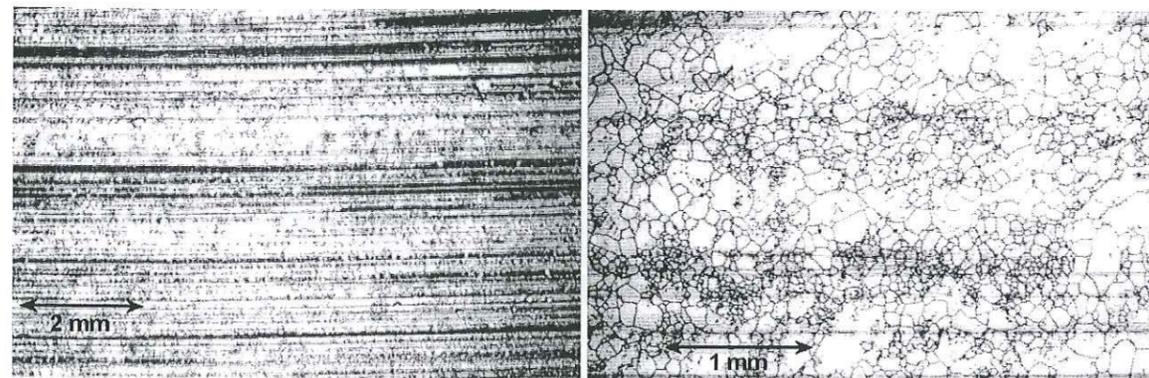
7.1.4.4 Observations qualitatives de la surface de glace

Les photos 7.5 montrent les fonds de trace obtenus avec un support cuivre ou bois recouvert de 1 ou 2 mm de gomme. Aucune différence notable n'apparaît et les frottements mesurés sont d'ailleurs très proches.



(a) Patin en cuivre + 1 mm de formulation F1.

(b) Patin en bois + 1 mm de formulation F1.



(c) Patin en cuivre + 2 mm de formulation F1.

(d) Patin en bois + 2 mm de formulation F1.

Fig. 7.5 – Fond de la trace après 225 tours du patin à -10°C et 150 tours/min sous 83 daN.

7.1.4.5 Conclusion

Etant donnée l'incertitude expérimentale, le frottement mesuré est le même avec une feuille d'élastomère collée sur un support bois ou cuivre : au delà de 1 mm d'épaisseur d'élastomère, les propriétés thermiques du support n'influencent pas le frottement mesuré. En revanche, l'effet de la rigidité du support est net : le patin entièrement en élastomère frotte toujours plus que les patins rigides recouverts d'une feuille d'élastomère, car A_r est alors élevée grâce à la déformation de l'élastomère. La différence relative est d'autant plus forte que μ est élevé (i.e. à F_n faible).

7.1.5 Frottement glace - glace

7.1.5.1 Objectif

Nous souhaitons mesurer le μ glace-glace sous différentes conditions, afin de comparer nos résultats avec ceux de la littérature, qui est plus documentée pour ce type de frottement (Bowden et Huggins, 1939; Oksanen, 1983).

Pour cela, un patin en cuivre a été recouvert par de la glace. Un bloc de glace était posé sur le cuivre chaud et après gel de l'interface, la surface et les bords de la glace étaient usinés pour avoir la géométrie souhaitée. Il s'est avéré très difficile de préparer de telles éprouvettes (Fig.7.6(a)) car la glace se fracturait au niveau de l'interface lors du refroidissement pour accommoder les différences de dilatation (le coefficient de dilatation thermique vaut $\approx 53.10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ pour la glace et $\approx 15.10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ pour le cuivre, Gray (1957)). Ces fractures rendaient toute mesure impossible car la fine plaque de glace se désagrégeait rapidement lors des rotations avec les vibrations du fléau.

7.1.5.2 Résultats expérimentaux

La figure 7.7 donne les μ mesurés à 50 et 150 tours/min avec une pellicule de glace d'épaisseur 2 ou 7 mm. Le coefficient de frottement glace-glace est très faible, d'ordre de grandeur inférieur à 0,01.

Avec une machine tournante, sous une σ_n de 3,7 kPa, Oksanen (1983) a mesuré μ glace-glace entre 0,015 et 0,017 pour V entre 2 et 3 m/s et T_0 entre -15 et -5°C . Les μ mesurés lors de nos essais à des σ_n cent fois plus élevées (entre 1 et 4 bar) sont inférieurs à ceux mesurés par Oksanen (1983), ce qui est en accord avec la décroissance de μ avec une augmentation de σ_n .

7.1.5.3 Observations qualitatives pendant et après le frottement

A 50 tours/min, nous entendions un bruit de frottement assez aigu, similaire à un froissement de papier amplifié par un micro. Ce bruit se manifestait pendant les 50 premiers tours sous 24 daN, et seulement pendant les 25 premiers tours sous 83 daN. Il provenait sans doute d'un frottement complètement sec.

Au cours des rotations, le patin de glace se fissurait peu à peu et particulièrement sous F_n élevé. En fin de manipulation, la couche de glace était souvent complètement fracturée sur toute son épaisseur (Fig.7.6(b)). Des morceaux de glace s'échappaient parfois et l'acquisition devait être arrêtée.

Dans tous les cas, la surface de la piste de glace était très peu lissée. A 50 tours/min, la glace de la surface de la piste était très peu usée : après 225 tours sous 83 daN, l'aspect miroir était présent sur 1 cm au bord intérieur du patin, mais la piste n'était pas du tout lissée sous

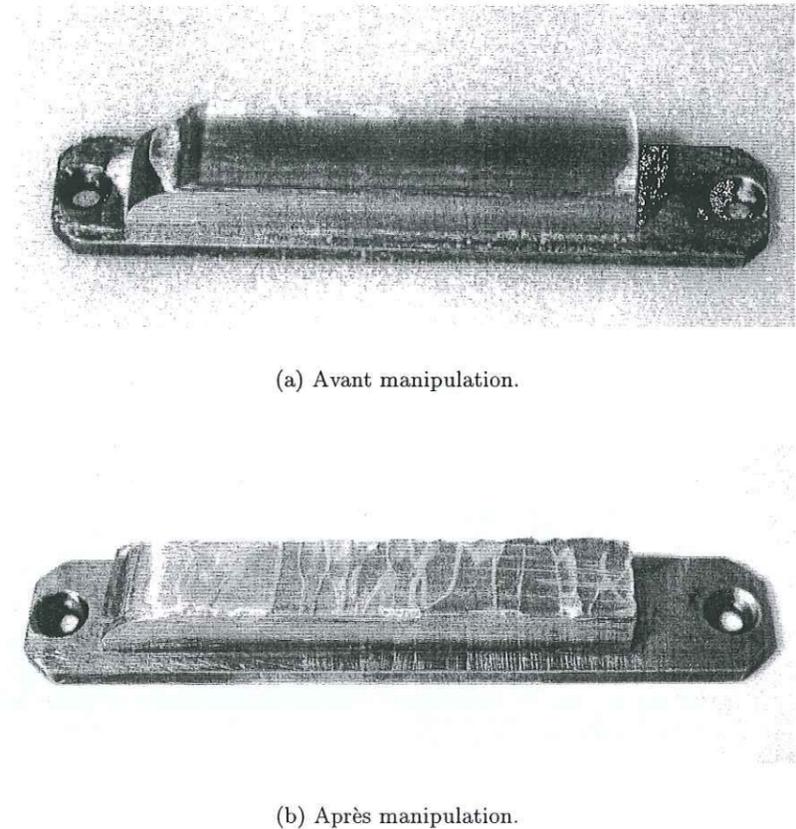
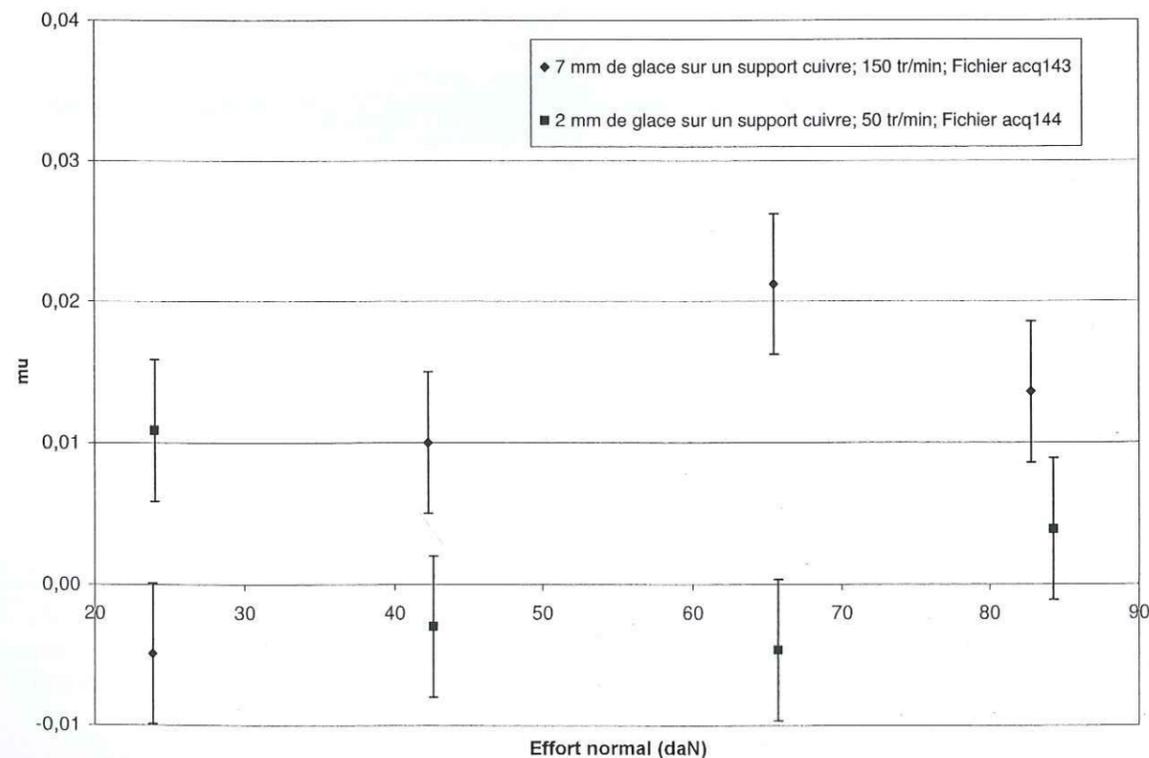


Fig. 7.6 - Epreuve de cuivre recouverte d'un film de glace.

Fig. 7.7 - Mesures de frottement glace-glace à -10°C , marges d'erreur absolue de 0,005.

24 daN. Les observations étaient les mêmes à 150 tours/min (cf. Fig. 7.8) : sous 24 daN, la piste était à peine lissée (sur la photo 7.8(a), les trous créés par les bulles d'air crevées n'étaient pas rebouchés, même dans les zones lissées). En fait, seuls les sommets des stries laissées par l'usinage de la glace étaient touchés par le patin de glace. Sous 42 daN, certaines zones étaient bien lissées et les trous étaient rebouchés (Fig. 7.8(b)), mais d'autres zones n'avaient pas été touchées par le patin (Fig. 7.8(c)). Sous 83 daN, des zones plus importantes avaient fondu (Fig. 7.8(d)).

7.1.5.4 Conclusion

Le frottement entre un patin de glace et une piste de glace en rotation est malheureusement trop faible pour que les mesures faites avec la machine tournante soient significatives. La surface du patin fondait peu à peu et apparaissait complètement lissée par 225 tours sur la piste car elle restait constamment en frottement. En revanche, la surface de la piste fondait très peu. La quantité de chaleur générée par le faible frottement s'échappait donc principalement dans le patin.

7.2 Influence de la géométrie du patin sur le frottement

7.2.1 Courbure de la piste et positionnement de la surface de contact

7.2.1.1 Objectif

Le dispositif expérimental permet d'utiliser deux pistes sur la couronne de glace. La piste extérieure, de rayon de courbure moyen 365 mm, a été utilisée afin de réduire l'effet de la courbure de la piste. D'autres caractéristiques de la géométrie du dispositif expérimental sont susceptibles d'influencer le frottement (dans cette éventualité, les μ obtenus pour une éprouvette donnée ne dépendent pas uniquement de la formulation du mélange). En particulier, l'effet du système d'application de l'effort normal par l'intermédiaire du capteur d'efforts doit être étudié sous toutes les configurations possibles (cf. Fig. 7.9).

7.2.1.2 Géométrie des éprouvettes

Les éprouvettes représentées sur la figure 5.4 présentent une bascule de grand rayon de courbure (50 mm, e.g. patins D-F1 et D-F2). La surface de contact gomme-glace est donc fortement décentrée par rapport au support du patin en laiton. Les figures 7.10 représentent la surface de contact rectangulaire nominale gomme-glace, notée *ABCD* et vue du dessus. Le patin est statique et le sens de rotation de la piste de glace est indiqué. Le support en laiton est symétrique par rapport au rayon de la machine, mais l'aire de contact ne l'est pas à cause de la présence de la bascule. Le point *E* est l'intersection du côté intérieur du patin et du rayon perpendiculaire passant par le centre de la machine.

La largeur du patin est 20 mm, mais la largeur théorique de la trace est toujours plus élevée. En tenant compte de la courbure de la piste et du défaut de centrage de la surface de contact par rapport au support en laiton, la largeur théorique de la trace est 25,9 mm. L'éprouvette étant rectiligne, un point de la glace voit passer des longueurs de gomme variables selon sa distance au centre de rotation de la piste. Un point proche du rayon de courbure moyen voit passer une longueur de gomme importante. En revanche, un point proche du bord intérieur de la trace voit passer une longueur de gomme plus petite. Un point placé tout près du bord extérieur de la trace voit passer encore moins de gomme. Les 5,9 mm extérieurs de la trace sont peu touchés par le patin.

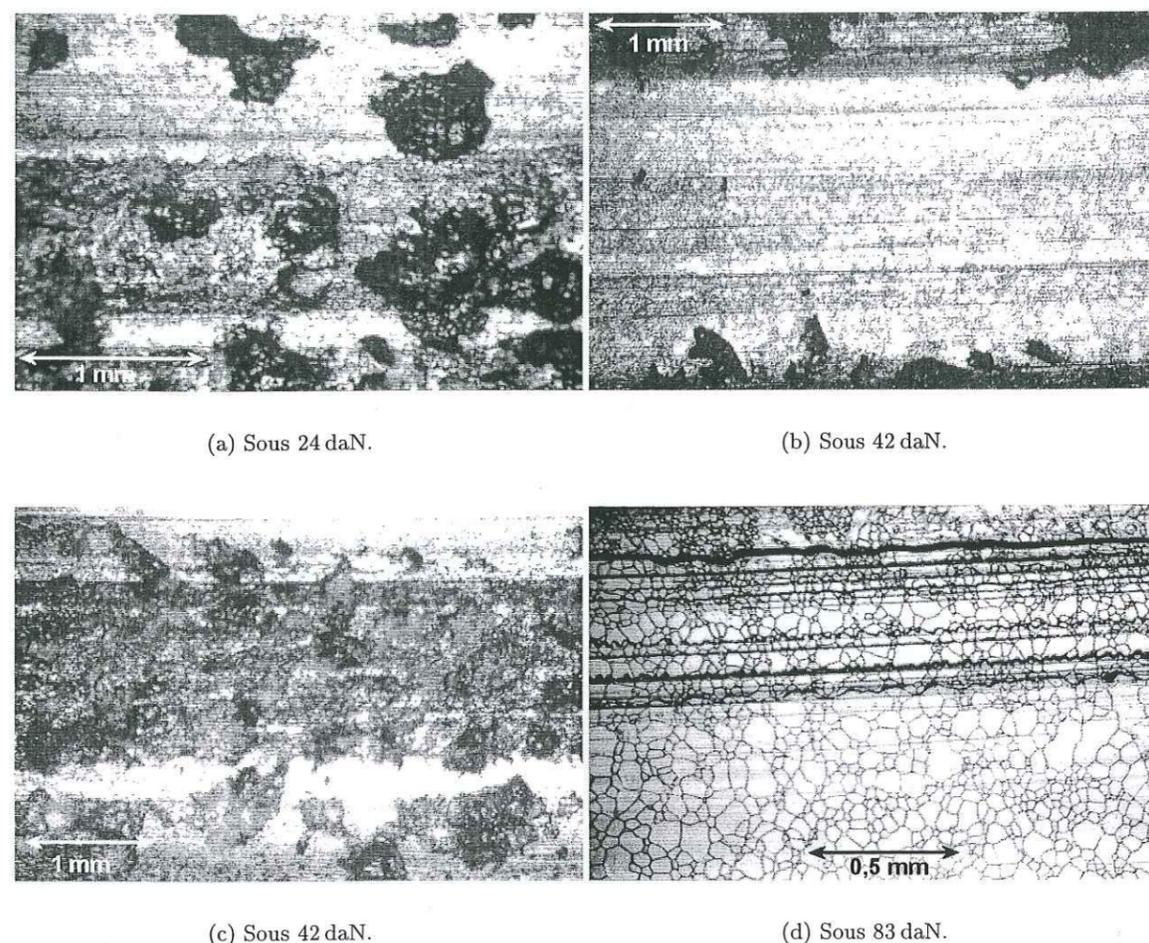


Fig. 7.8 – Fond de trace après 225 tours de l'éprouvette cuivre + 7 mm de glace à -10°C et 150 tours/min.

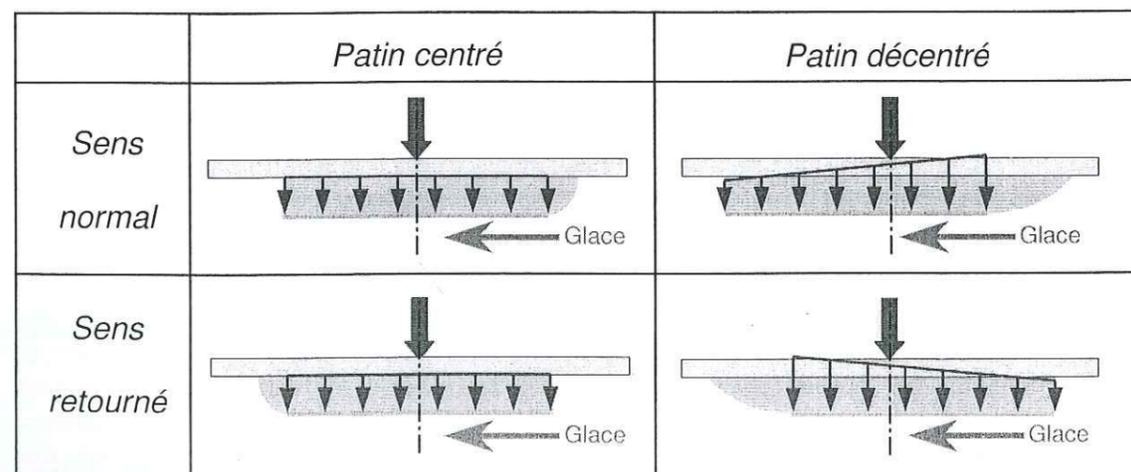


Fig. 7.9 – Répartition de la contrainte normale selon la géométrie et le sens du patin

Un patin décentré dans le sens normal présente une surpression sous la bascule, à l'avant du contact (Fig. 7.9). Quand l'éprouvette est dans le sens normal, l'application de la charge par le capteur s'effectue sur la partie avant de la surface de contact (Fig. 7.10(a)). Les arêtes d'attaque *AB* et *AE* frottent sur la trace déjà bien formée par les passages précédents de tout le patin et ne subissent pas de contrainte particulière sur les bords. Les 4,5 mm extérieurs ne sont touchés que par l'angle arrière extérieur du patin.

Un patin décentré dans le sens retourné présente une surpression sous la bascule, à l'arrière du contact (Fig. 7.9). Quand l'éprouvette est retournée, l'application de la charge par l'intermédiaire du capteur s'effectue sur la partie arrière de l'aire de contact (Fig. 7.10(b)). Les segments d'attaque sont *CD* et *CE*. Les 5,9 mm extérieurs de la piste participent pour une grande part à la déformation de l'avant du patin dirigé vers l'extérieur de la piste. Les 4,5 mm extérieurs de la trace ne sont touchés que par l'avant du patin, donc voient passer beaucoup moins de gomme qu'un point situé sur le cercle de rayon moyen. Par conséquent, la piste s'use moins vite et si l'angle avant extérieur du patin est assoupli par une lamelle, il aura tendance à se soulever plutôt que d'user la glace en formant une marche sur l'extérieur de la piste (cf. Fig. 6.13).

La bascule de l'éprouvette B-10 a un rayon de courbure de 13 mm et l'aire de contact est centrée par rapport au support en laiton (Fig. 5.6). Quel que soit le sens de cette éprouvette, l'application de la charge s'effectue toujours au milieu de la surface de contact, qui est symétrique par rapport à un rayon de la machine. La répartition de la contrainte normale est uniforme sous un patin centré, quel que soit son sens (Fig. 7.9).

La figure 7.11 permet de comparer les surfaces de contact en fonction de la géométrie et du sens de l'éprouvette. Les quatre zones hachurées marquent la position des zones de contact selon le cas considéré. L'application de la charge par l'intermédiaire du capteur de 45 mm de longueur s'effectue entre *D* et *E*, perpendiculairement à un rayon de la machine. La surface de contact est symétrique par rapport à ce rayon de la machine pour une éprouvette centrée, retournée ou non, et s'étend de *B* à *G*. La largeur de la trace vaut 23,3 mm pour un patin centré et 25,9 mm pour un patin décentré. Avec un patin décentré, la trace s'étend de *A* à *F* quand la bascule est en arrière et de *C* à *H* quand la bascule est en avant.

7.2.1.3 Résultats expérimentaux avec une éprouvette retournée

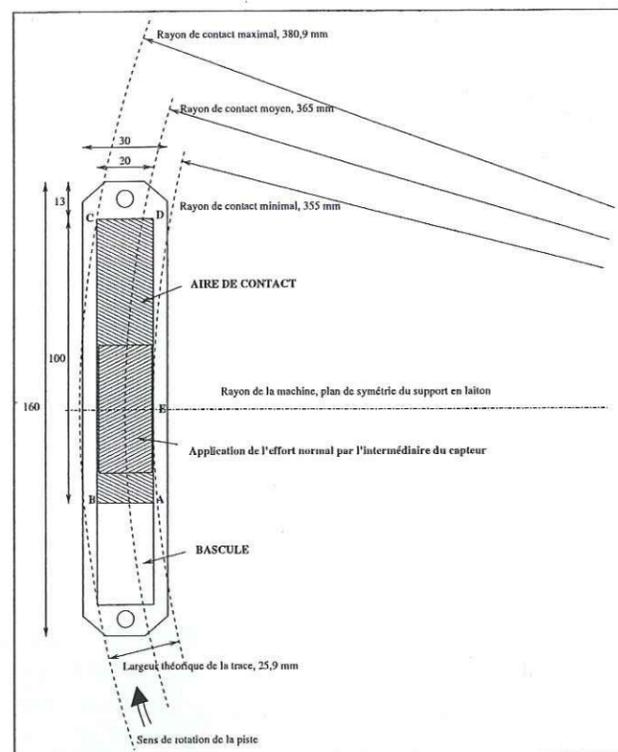
L'influence de la répartition de la contrainte normale nominale dans le contact pourrait apporter un élément de réponse à certains phénomènes observés expérimentalement (Fig. 7.9). La figure 7.12 donne les μ obtenus pour une même formulation F1 avec des éprouvettes de géométries différentes (éprouvette décentrée D-F1 et centrée B-10) dans le sens normal ou retourné.

Un changement du sens de l'éprouvette B-10 ne modifie pas μ . Sous ces conditions expérimentales (éprouvette orthogonale à un rayon de la machine, formulation F1, -10°C , 100 tours/min, entre 24 à 83 daN), la géométrie du bord d'attaque n'a aucune influence sur la valeur de μ . En revanche, avec l'éprouvette D-F1, μ est plus élevé quand la bascule est en avant que quand elle est en arrière.

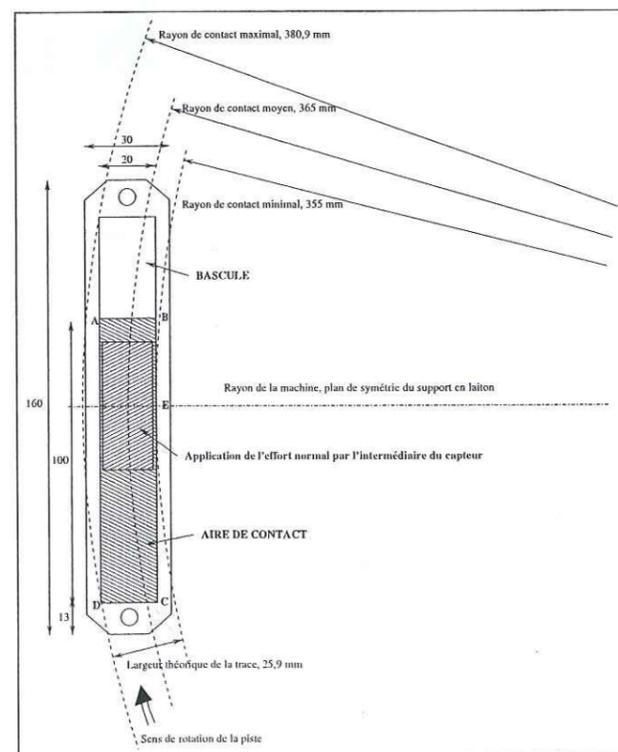
7.2.1.4 Interprétation

Cette diminution du μ de D-F1 quand la bascule est en arrière au lieu d'être en avant s'explique par une différence de répartition de la contrainte normale locale σ_{nl} dans la surface de contact, puisque le frottement est identique dans les deux sens dans le cas de l'éprouvette centrée B-10.

- D'un point de vue qualitatif (cf. Fig. 7.9), quand la bascule de D-F1 est en avant (Fig. 7.10(a)),



(a) Bascule en avant



(b) Epreuve retournée.

Fig. 7.10 – Surface de contact nominale en tenant compte du défaut de centrage d'un patin de même géométrie que la figure 5.4.

l'application de la charge s'effectue plus sur l'avant du contact que sur l'arrière. Au contraire, quand la bascule de D-F1 est vers arrière (Fig. 7.10(b)), l'application de la charge s'effectue sur l'arrière du contact.

- Considérons l'hypothèse que le contact est sec à l'avant du patin et lubrifié à l'arrière : l'épaisseur de l'eau augmente de l'avant à l'arrière du contact, quel que soit le sens du patin. Dans ce cas, le coefficient de frottement local est toujours plus élevé à l'avant qu'à l'arrière de l'interface, quel que soit le sens du patin. Le sens de D-F1 pour lequel le frottement est le plus élevé correspond à σ_{nl} plus élevé dans la zone sèche, i.e. à l'avant du patin : le frottement du patin D-F1 est maximum dans le sens normal. Quand le patin D-F1 est retourné, σ_{nl} est élevé dans une zone à faible coefficient de frottement local (partie arrière du patin lubrifiée), donc μ est faible.

Pour l'éprouvette B-10, σ_{nl} est constante (donc égale à sa moyenne sur le patin) et environ égale à σ_n . Le sens du patin n'influence pas la valeur de μ car la répartition de la contrainte normale est uniforme (Fig. 7.9). Les μ obtenus avec l'éprouvette centrée sont plus faibles que ceux obtenus avec l'éprouvette D-F1 dans le sens normal. Ceci s'explique en partie par la diminution de l'aire de la piste creusée dans la glace. La piste est en effet plus étroite de 2 mm, soit 10 % de la largeur totale, avec l'éprouvette B-10. Cet argument n'est cependant pas suffisant puisque μ est le même avec l'éprouvette B-10 et l'éprouvette D-F1 retournée pour laquelle la surface de contact nominale est plus importante.

Une variation de la fraction de contact sèche pourrait expliquer le même μ mesuré avec B-10 dans les deux sens et D-F1 dans le sens retourné. En négligeant le frottement dû à la zone arrière lubrifiée, une longue zone sèche sous σ_{nl} faible à l'avant de D-F1 retournée peut générer le même frottement total qu'une courte zone sèche sous σ_{nl} élevé à l'avant de B-10.

7.2.1.5 Conclusion

Les mesures de μ dépendent de la formulation du mélange mais sont aussi grandement influencées par la géométrie du dispositif expérimental. Plusieurs phénomènes extrêmement complexes se cumulent :

- La répartition de la contrainte normale n'est pas uniforme dans la surface de contact.
- La largeur de la trace du patin varie.
- La longueur des arêtes arrivant sur de la glace vierge est différente.
- La flexion du dispositif d'application de la charge par le fléau génère une surpression vers l'intérieur du patin.
- Les vibrations du fléau engendrent un échauffement supplémentaire par pertes viscoélastiques dans l'élastomère, ainsi qu'une variation temporelle des sollicitations.

Pour une éprouvette sur laquelle l'application de la charge est centrée et la surface de contact est symétrique par rapport à un rayon de la machine, la géométrie du bord d'attaque (bascule ou angle droit) n'a aucune influence sur la valeur de μ . Ceci tendrait à supposer que l'effet prédominant dans le frottement gomme-glace est l'échauffement sous le patin. En revanche, une éprouvette décentrée frotte plus quand sa bascule est en avant. Son frottement est moindre et égal à celui d'une éprouvette centrée de même longueur quand elle est retournée.

Il apparaît indispensable de connaître précisément la répartition de l'effort normal sur la surface de contact. L'influence de σ_{nl} semble en effet jouer un rôle essentiel dans les mesures de μ . Afin d'obtenir μ maximum pour une aire de contact donnée, il est préférable d'appliquer l'effort normal sur l'avant de l'éprouvette. Il faudrait pouvoir placer des capteurs de contrainte normale sous le patin, avec une assez bonne précision et une bonne résolution spatiale. Ceci est possible en statique, mais serait très délicat à mettre en œuvre en dynamique.

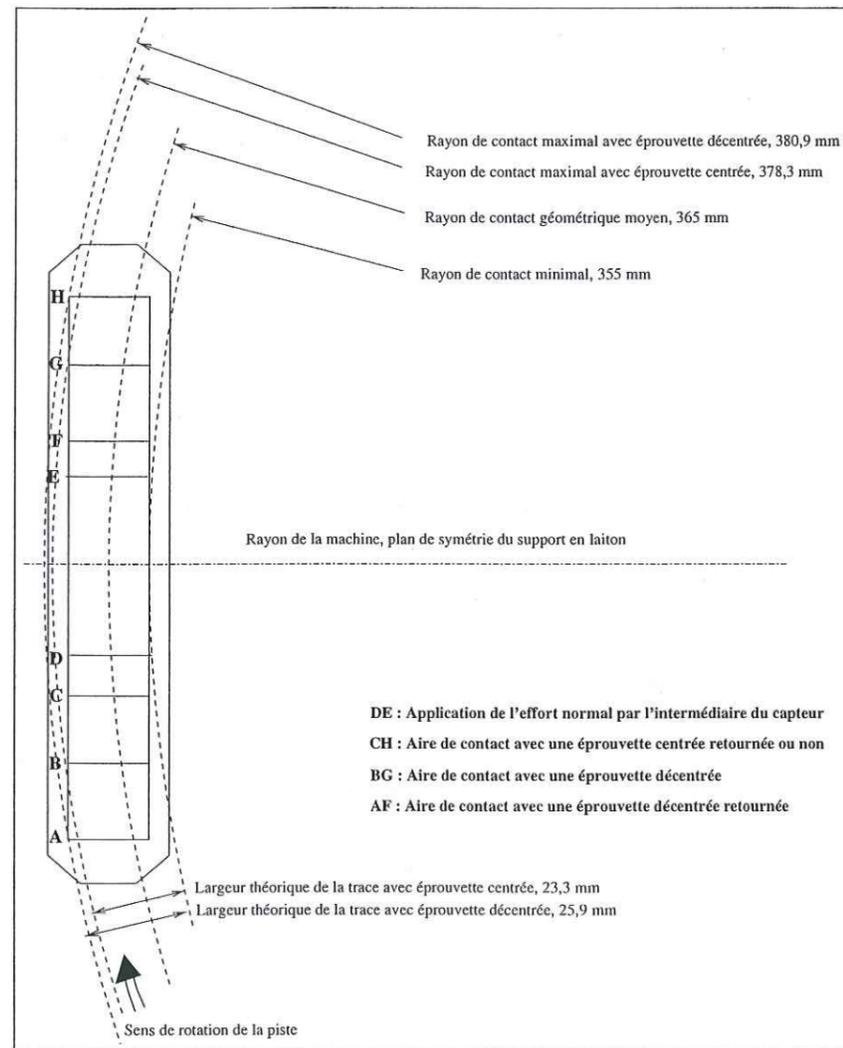


Fig. 7.11 – Surface de contact nominale d'une éprouvette de 10 cm de long, centrée ou décentrée, retournée ou non.

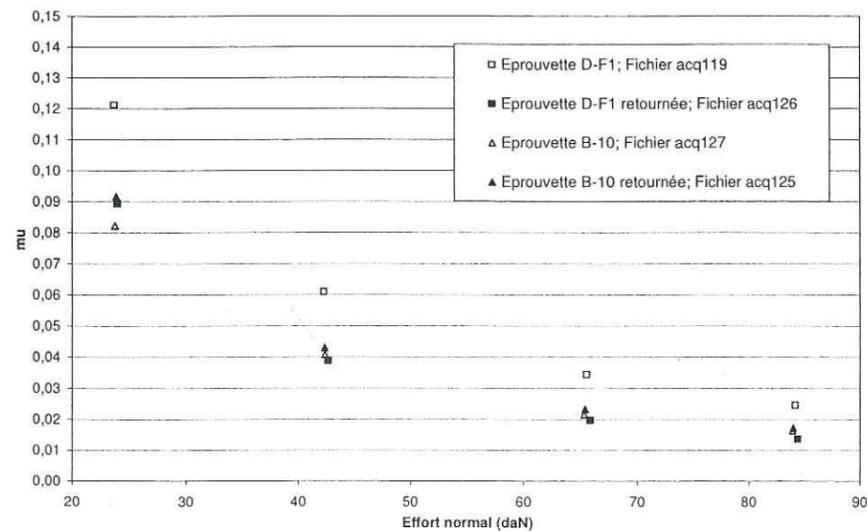


Fig. 7.12 – Effet de la géométrie de l'éprouvette avec la formulation F1 à -10°C et 100 tours/min.

7.2.2 Effet de la forme d'éprouvettes de même formulation

7.2.2.0.1 Objectif

Il faut vérifier si l'effet de la forme de l'éprouvette observé précédemment est le même pour toutes les vitesses. Il serait alors peut-être possible d'effectuer une correction des μ obtenus expérimentalement avec les éprouvettes décentrées pour obtenir les μ théoriques correspondants à une éprouvette centrée.

7.2.2.1 Résultats expérimentaux

La figure 7.13 expose les μ obtenus à trois V pour les éprouvettes D-F1 et B-10 vulcanisées à partir d'une même formulation F1. A V donnée, l'éprouvette D-F1 frotte toujours plus que la B-10. Les symboles gris expriment les différences entre les μ obtenus avec l'éprouvette D-F1 et B-10, pour chaque V . L'effet d'une augmentation de F_n est le même sur les deux éprouvettes, quelle que soit V : en effet, une translation verticale des trois points correspondants à une géométrie à trois V distinctes se superpose bien sur ceux de l'autre géométrie.

7.2.2.2 Conclusion

Compte tenu de l'incertitude expérimentale, l'effet du décentrage sur le μ mesuré peut être corrigé en retranchant simplement à μ une valeur de 0,03 sous 24 daN, 0,02 sous 42 daN, 0,015 sous 65 daN et 0,01 sous 83 daN. A température et formulations données, cette diminution ne semble dépendre que de F_n .

7.2.3 Effets du sens et de la géométrie du patin selon le mélange

7.2.3.1 Objectif

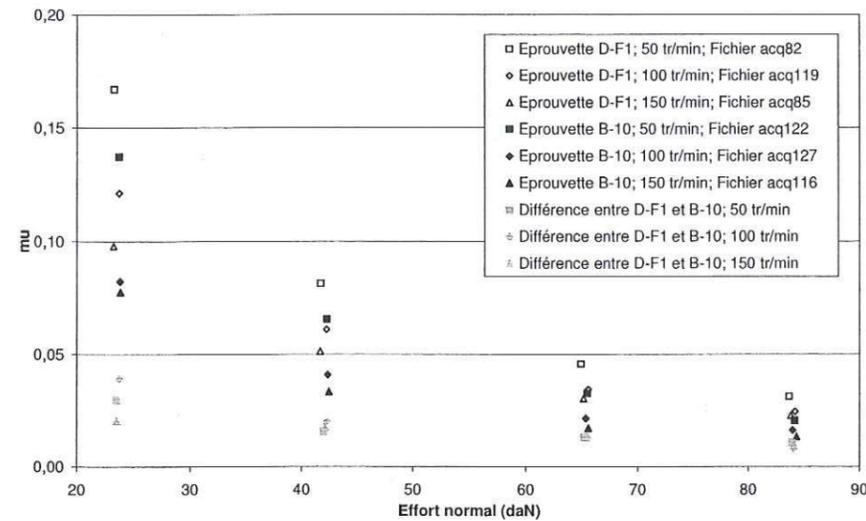
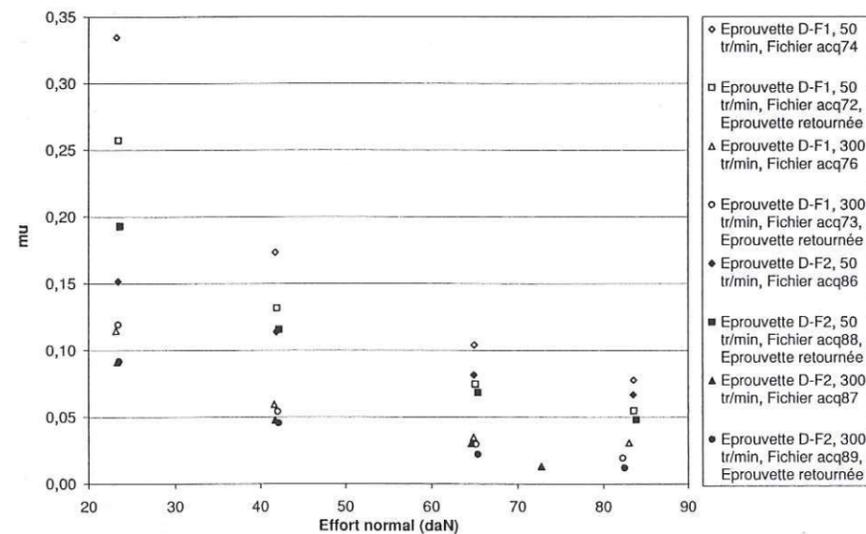
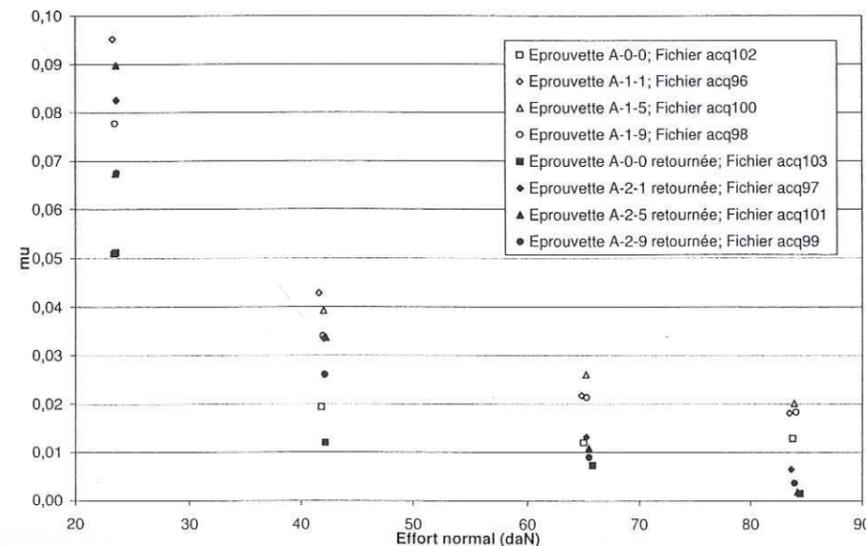
Il faut vérifier si les variations observées, à la fois pour la différence de frottement entre B-10 et D-F1 et pour l'effet d'un retournement de l'éprouvette D-F1, dépendent de la vitesse et des propriétés viscoélastiques du mélange.

7.2.3.2 Résultats expérimentaux

La figure 7.14 montre l'effet de la répartition de la contrainte normale pour chaque mélange sur μ , observé à -20°C et 50 ou 300 tours/min, sens du patin normal ou retourné. Pour la formulation souple F1, aux V faibles (50 tours/min), μ subit une forte diminution quand la contrainte normale est plutôt répartie sur l'arrière. Ceci est vérifié quel que soit F_n . Ce phénomène avait déjà été observé de manière très nette pour 100 tours/min à -10°C (Fig. 7.12). En revanche, pour le même mélange aux V élevées (300 tours/min), μ reste très faible et semble indépendant de la répartition de la contrainte normale : ceci s'explique car le contact est rapidement lubrifié donc le coefficient de frottement local est constant sur la longueur de l'éprouvette. Pour la formulation rigide F2, le bord d'attaque influence très peu la valeur de μ aux V faibles. L'effet est nul aux V élevées, de même qu'avec le mélange plus souple.

7.2.3.3 Observations qualitatives

7.2.3.3.1 Avec une formulation souple

Fig. 7.13 - μ pour la formulation F1 avec deux géométries à -10°C .Fig. 7.14 - Effet du bord d'attaque sur μ à -20°C .Fig. 7.15 - Effet d'une lamelle à l'avant des patins A-i-j à -10°C et 150 tours/min.

Au cours des manipulations à 50 tours/min, l'angle d'attaque de D-F1 présentait un comportement très particulier. Avec le patin retourné, nous entendions un crissement très aigu sous 24 daN du début à la fin de la manipulation. L'angle d'attaque rectangulaire de l'éprouvette était assez déformé. Nous observions un *effet escargot* très limité en volume à l'avant de l'éprouvette (l'angle droit s'enroule, son arête est en contact avec la glace mais le millimètre suivant est décollé). L'arête de contact n'était plus rectiligne et orthogonale à l'axe du patin : l'élastomère semblait repoussé vers l'arrière et l'extérieur de la piste par le frottement. Sous 42 daN, nous entendions un crissement un peu moins aigu. Sous 65 daN, le crissement était plus grave et la déformation de l'arête de contact variait au cours de la manipulation. Au début, le milieu de l'arête d'attaque semblait creusé par le frottement, comme si l'élastomère était repoussé en arrière par un effort tangentiel plus important vers le centre de l'arête. Ensuite, la déformation n'était plus visible : l'arête reprenait sa forme normale. Sous 83 daN, le crissement était très grave. Nous observions une légère déformation macroscopique du patin : l'éprouvette apparaissait comme cisailée en bloc par le frottement à l'interface. Au cours de ces manipulations, la glace fondait très peu, et moins que lorsque le patin était en position normale.

Les observations au cours des mesures à 300 tours/min étaient différentes. Nous n'entendions jamais de crissement. Un amas de neige très humide grossissait au cours des rotations devant la face avant du patin et restait collé, même après la manipulation. La taille de cet amas diminuait quand l'effort normal augmentait. La trace de fonte présentait deux ornières sur les bords ; l'ornière extérieure était visiblement plus profonde que celle située vers l'intérieur de la piste.

7.2.3.3.2 Avec une formulation rigide

Les mesures avec l'éprouvette de formulation rigide F2 présentent un comportement qualitatif différent. Nous n'entendions aucun bruit particulier au cours des mesures et aucune déformation du patin n'était observable à l'œil nu.

Quand l'éprouvette de formulation F2 est dans le sens normal, la piste commence toujours à s'user sur le bord extérieur aux faibles F_n . Sous F_n élevé, la trace entière présente un aspect lisse après un faible nombre de tours. Quand l'éprouvette est retournée, la piste s'use d'abord par le côté intérieur. La mauvaise horizontalité du plan de contact entre l'éprouvette et la glace est donc due à un mauvais moulage de la gomme. Aucune différence d'épaisseur de la gomme entre les deux côtés n'est cependant mesurable au pied à coulisse. Ce défaut n'est pas aisément rattrapable par un rodage de l'éprouvette car la rugosité de surface serait modifiée.

De toute façon, ce léger défaut d'horizontalité ne se manifeste sur A_r qu'au cours des premiers tours et sous faible F_n . Il n'est pas préjudiciable pour nos expériences pour trois raisons. D'une part, les mesures significatives de μ sont obtenues entre les tours 200 et 225, pour lesquels nous pouvons considérer que la totalité de la surface nominale est frottée. D'autre part, l'interface entre l'élastomère et la glace n'est de toute façon pas plane : les éprouvettes souples se déforment par *effet tonneau* (la contrainte normale locale est beaucoup plus importante sous les bords que sous le centre de l'éprouvette ; l'usure de la piste trace deux ornières sous les deux bords de la trace). Enfin, les vibrations de la machine sont très importantes et nous ne pouvons pas affirmer que le frottement est représenté par un frottement parfait patin rectangulaire / plan à contrainte normale constante et uniforme sur le contact.

7.2.3.4 Conclusion

Il est impossible d'avoir un *effet escargot* marqué à l'avant du patin, même quand l'arête d'attaque est rectangulaire. En effet, le pain est trop rigide à cause de sa forme massive et les contraintes appliquées ne sont pas très importantes.

L'effet du retournement d'une éprouvette décentrée sur μ dépend de la vitesse :

- A V faible, quels que soient T_0 et F_n , une répartition de la contrainte normale sur l'arrière du patin provoque une diminution de μ par rapport à une répartition de la contrainte normale sur l'avant du patin. Cette diminution est d'autant plus marquée que le mélange est souple : la répartition de la contrainte normale n'étant pas uniforme, la viscoélasticité et les propriétés de déformation du mélange jouent un rôle important pour ce phénomène.
- A V élevée, μ est très faible et ne semble pas influencé par la répartition de la contrainte normale, quelle que soit la formulation du mélange, car l'interface est lubrifiée très rapidement dès l'avant du patin.

7.2.4 Effet d'une rainure proche du bord d'attaque

7.2.4.1 Objectif

La question est de savoir si une rainure (formant une *lamelle*) placée à l'avant du patin permet d'évacuer suffisamment d'eau pour augmenter le frottement. Généralement, l'effet de surpression est défavorable s'il n'y a aucune possibilité d'évacuation de l'eau à l'arrière du patin : celui-ci décolle, la surface de contact diminue, donc μ décroît. Nous avons souvent observé qu'il faut diminuer F_n pour augmenter μ , afin d'augmenter les possibilités d'évacuer l'eau grâce aux aspérités de la glace.

7.2.4.2 Résultats expérimentaux

Sept éprouvettes A-i-j de formulation F2 sont entaillées par une rainure usinée avec une fraise de 0,5 mm d'épaisseur à 6 mm du bord d'attaque (la rainure est sous la bascule pour les patins A-1-j et sous l'angle droit pour les patins A-2-j).

La figure 7.15 montre l'effet d'une lamelle placée à l'avant du patin sur μ (patins A-1-j dans le sens normal et patins A-2-j dans le sens retourné). Les μ sont faibles à cause de la rigidité élevée de la formulation. L'effet de la géométrie du bord d'attaque est faible mais supérieur aux incertitudes de mesure. Nous retrouvons l'idée générale du paragraphe 7.2.3 : l'éprouvette retournée (surpression à l'arrière) donne un μ légèrement plus faible que quand la bascule est en avant (surpression à l'avant) (cf. Fig. 7.9).

Quel que soit F_n , l'augmentation de μ due à la lamelle est plus marquée si le patin est dans le sens normal (i.e. quand la lamelle est dans une zone à fort σ_{nl}) : μ augmente presque d'un facteur deux en ajoutant une lamelle proche de la bascule. L'influence de la profondeur de la lamelle dépend de F_n . Sous F_n faible, un grain d'orge est préférable pour obtenir un μ élevé. Sous F_n élevé, une lamelle de profondeur moyenne, 5 mm, semble intéressante. La lamelle de 9 mm de profondeur est sans doute trop souple pour pouvoir jouer un rôle important de grattage ou d'évacuation d'eau pour retrouver un frottement sec.

μ est aussi amélioré en ajoutant une lamelle près du bord d'attaque rectangulaire (cas d'une éprouvette retournée, i.e. la lamelle est dans une zone à faible σ_{nl}). Le gain est assez faible, moins net que quand la bascule est en avant. Sous F_n faible, une lamelle de 5 mm de profondeur est préférable. Au contraire, sous F_n élevé, un simple grain d'orge est plus intéressant (l'effet est inversé par rapport au cas où la bascule est en avant).

En comparant les mesures avec la même lamelle, placée vers la bascule ou l'angle droit, nous pouvons conclure que μ est toujours plus élevé quand la bascule est placée vers l'avant (i.e. surpression à l'avant).

7.2.4.3 Observations qualitatives

7.2.4.3.1 Lamelle du patin

Le rôle de raclage de l'eau est le même pour toutes les lamelles, quelle que soit leur profondeur. En effet, la rainure se remplit d'eau très rapidement. La lamelle n'est pas assez souple pour évacuer l'eau longitudinalement et la faible évacuation de l'eau latéralement sous la surpression n'est pas suffisante pour éliminer toute l'eau et obtenir un contact sec. Rappelons que le régime stationnaire de frottement gomme-glace lisse est particulier à ce dispositif de type pion-disque : le comportement est complètement différent sous un véhicule car l'eau est évacuée par la force centrifuge dès que la lamelle est sortie de l'empreinte.

La lamelle du patin se remplit peu à peu d'eau au cours des rotations. Après démontage du patin de son support, de l'eau regelée est visible dans la lamelle. La photo 7.16 est une vue du patin qui a parcouru 225 tours sous 24, 42, 65 puis 83 daN. Le fond de l'entaille rempli de glace entre les deux bords de la gomme est observé à la loupe binoculaire (cristaux d'environ 0,2 mm de diamètre sur la figure 7.17). Dans les cas où la lamelle est du côté de la bascule, toute la lamelle est remplie de glace après les manipulations. En revanche, quand la lamelle est du côté du bord rectangulaire, seule la moitié intérieure de la lamelle est remplie de glace.

7.2.4.3.2 Effet de la rigidité du bord d'attaque

L'aspect de la trace après passage d'un patin est le même avec ou sans lamelle (Fig. 7.18 similaire à celles du § 6.2.2.1). L'usure de la glace ne correspond pas toujours à la totalité de l'aire nominale. Sur la figure 7.19, la largeur de la piste usinée vaut environ 25 mm mais la partie plane de la trace ne représente que les 21 mm intérieurs. Nous avons déjà remarqué (Fig. 7.10(b)) que lorsque l'éprouvette est retournée, l'avant droit du patin a du mal à usiner la glace. Quand il est assoupli par une rainure, une marche se forme à l'extérieur de la trace : le profil d'usure de la glace est alors le même que celui de la figure 6.13.

7.2.4.4 Conclusion

Une lamelle placée près de la bascule est plus efficace qu'une lamelle placée près de l'angle droit pour augmenter μ . Ceci s'explique par la surpression locale sur la rainure : quand la bascule est en avant, la forte surpression sur la rainure permet d'évacuer un peu d'eau et d'augmenter μ , alors que quand l'éprouvette est retournée, la surpression n'est pas exercée sur la lamelle mais à l'arrière du patin.

L'effet d'une lamelle sur μ amène deux conclusions. D'une part, une lamelle placée à 6 mm de l'arête d'attaque est toujours intéressante pour augmenter μ . D'autre part, l'augmentation de μ obtenue par une lamelle est plus marquée lorsque la surpression est à l'avant.

7.2.5 Mesures de frottement avec une longueur du patin variable

7.2.5.1 Objectif

Afin de connaître l'effet de l'aire de contact nominale A_n sur la mesure de μ , à mêmes valeurs de T_0 , V et σ_n , quatre patins B-n de longueurs différentes (n désigne la longueur en centimètres) et de formulation F1 ont été utilisés. Ces éprouvettes sont centrées par rapport au support en laiton, afin que F_n exercé par l'intermédiaire du capteur soit centré par rapport à la surface de contact (cf. Fig. 5.6). Par un choix judicieux du nombre de contrepois sur le fléau, μ est mesuré à σ_n égale et avec quatre A_n différentes.

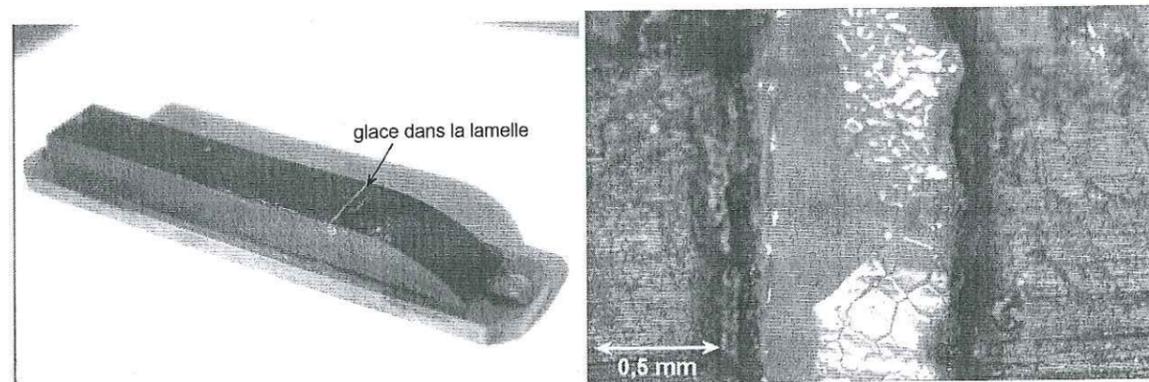


Fig. 7.16 – Glace dans l'entaille du patin A-1-9 après 225 tours à -10°C et 150 tours/min sous 83 daN.

Fig. 7.17 – Lamelle remplie de glace du patin A-2-1 après 225 tours retourné à -10°C et 150 tours/min sous 83 daN.

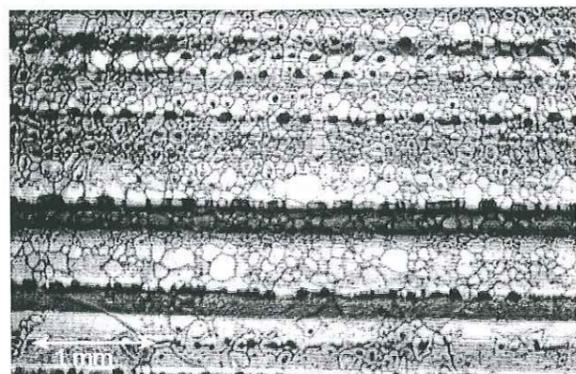


Fig. 7.18 – Trace du patin après 225 tours du patin A-2-5 retourné à -10°C et 150 tours/min sous 83 daN.



Fig. 7.19 – Patin A-2-5 retourné posé sur la piste après 225 tours à -10°C et 150 tours/min sous 83 daN.

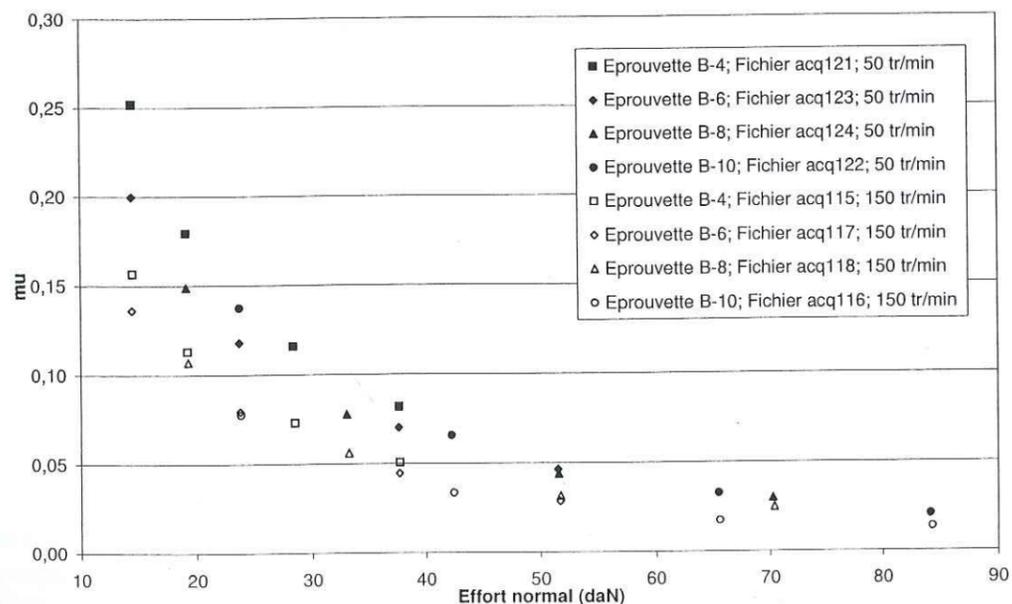


Fig. 7.20 – Variation de μ avec l'effort normal pour des patins de différentes longueurs à -10°C .

7.2.5.2 Résultats expérimentaux

Toutes les mesures d'évolution du μ en fonction de F_n ont été effectuées à -10°C et 50 ou 150 tours/min (Fig. 7.20). Pour F_n donné, μ varie légèrement avec un changement de A_n et diminue beaucoup avec une augmentation de V : à l'incertitude de mesure près, les mesures à 50 tours/min se regroupent en un faisceau et les mesures à 150 tours/min en un autre. Pour F_n donné, μ est plus élevé à 50 qu'à 150 tours/min. Ce résultat est en accord avec ceux exposés précédemment.

D'après la figure 7.21, μ décroît quand σ_n ou V augmentent. μ ne dépend pas que de σ_n , il varie aussi avec la longueur du patin: à iso-contrainte normale, il est plus élevé pour des patins courts. La figure 7.22 exprime les mêmes résultats d'une autre façon: en terme de F_t et F_n .

7.2.5.3 Interprétation

La figure 7.23 trace la contrainte tangentielle nominale σ_t , calculée d'après A_n , en fonction de la contrainte normale nominale σ_n . Nous constatons plusieurs phénomènes.

σ_t décroît légèrement avec une augmentation de σ_n sur la plage balayée (pour chaque patin et V donnés, la pente des interpolations linéaires vaut environ -0,01).

Sous une condition expérimentale donnée, σ_t décroît quand V augmente. Ceci est couramment observé: un patin frotte toujours moins à V élevée qu'à V faible.

Pour σ_n donnée, σ_t est plus élevée pour un patin court que pour un patin long. Ceci s'explique qualitativement en supposant le contact lubrifié. Considérons deux patins (référéncés 1 et 2) de longueurs a_1 et a_2 , avec $a_1 < a_2$, soumis à la même σ_n . Sous le patin 2, la répartition de la contrainte tangentielle locale σ_{tl} est supposée identique à celle sous le patin 1 sur la longueur a_1 , et σ_{tl} est supposé nul sur la longueur $a_2 - a_1$ lubrifiée. Les efforts tangentiels sont les mêmes pour les deux patins, mais l'effort normal nominal sur 2 est plus élevé que celui sur 1.

Supposons que l'avant de l'aire de contact est sèche sur une longueur x_s inférieure à 4 cm. L'effort tangentiel correspondant au contact sec est F_{ts} . L'effort tangentiel correspondant à la zone humide est supposé négligeable devant celui dans la zone sèche (cf. Douce (1993)). La contrainte normale locale est supposée constante et égale à σ_n . Pour un patin de longueur i cm et de largeur b , la contrainte tangentielle nominale est $\sigma_{ti} \approx F_{ts}/(ib)$. Expérimentalement, σ_{t6}/σ_{t4} vaut 0,51 à 50 tours/min et 0,55 à 150 tours/min, inférieur à la valeur théorique 0,66. σ_{t8}/σ_{t4} vaut 0,35 à 50 tours/min et 0,41 à 150 tours/min, inférieur à la valeur théorique 0,5. σ_{t10}/σ_{t4} vaut 0,3 à 50 tours/min et 0,25 à 150 tours/min, inférieur à la valeur théorique 0,4.

L'influence de l'augmentation de la longueur du patin sur une diminution du frottement semble atteindre une limite. En effet, quand nous augmentons la longueur d'un patin entre 4 cm et 10 cm par palier de 2 cm, σ_t décroît fortement de 4 à 6 cm, mais très faiblement de 8 à 10 cm. L'effet de l'allongement du patin est très marqué pour un patin court, mais s'atténue pour un patin long. Le frottement lubrifié n'est donc pas totalement négligeable, surtout aux niveaux de frottement considérés.

7.2.5.4 Comparaison avec les résultats de la littérature

Nous retrouvons les résultats de Hayhoe et Shapley (1989). Leur modèle de frottement avec séparation de l'aire de contact en deux parties, sèche et lubrifiée, prévoyait la même évolution de μ : μ décroît quand la longueur de l'aire lubrifiée augmente tout en conservant une longueur sèche constante. Pour obtenir les valeurs théoriques (Fig. 2.14), ils ont considéré des patins de

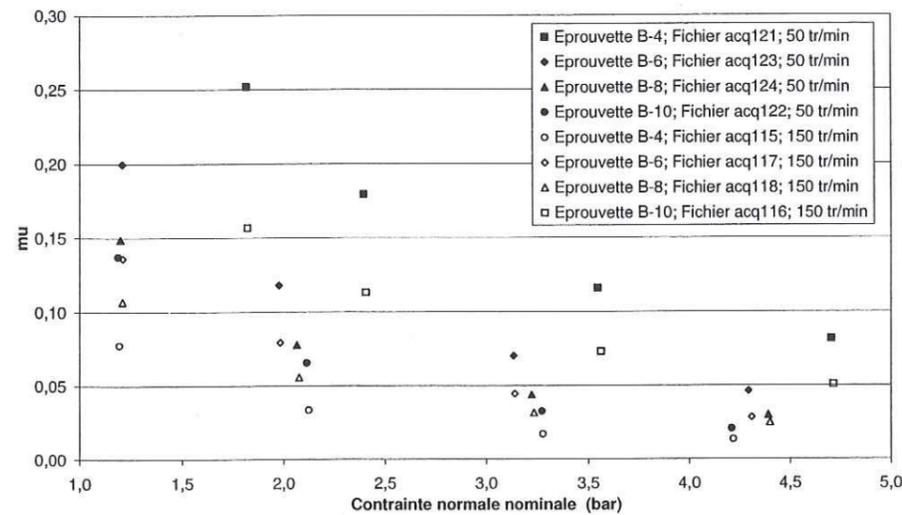


Fig. 7.21 – Variation de μ avec la contrainte normale nominale pour des patins de différentes longueurs à -10°C .

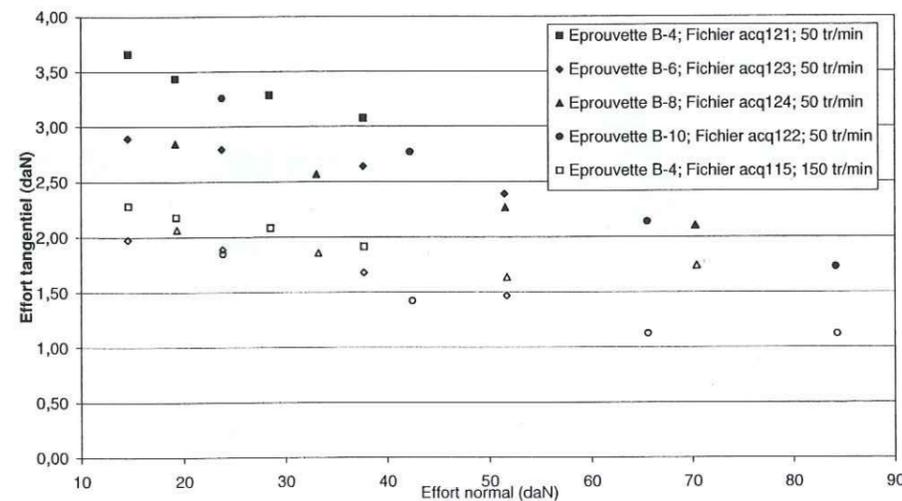


Fig. 7.22 – Variation de l'effort tangentiel avec l'effort normal pour des patins de différentes longueurs à -10°C .

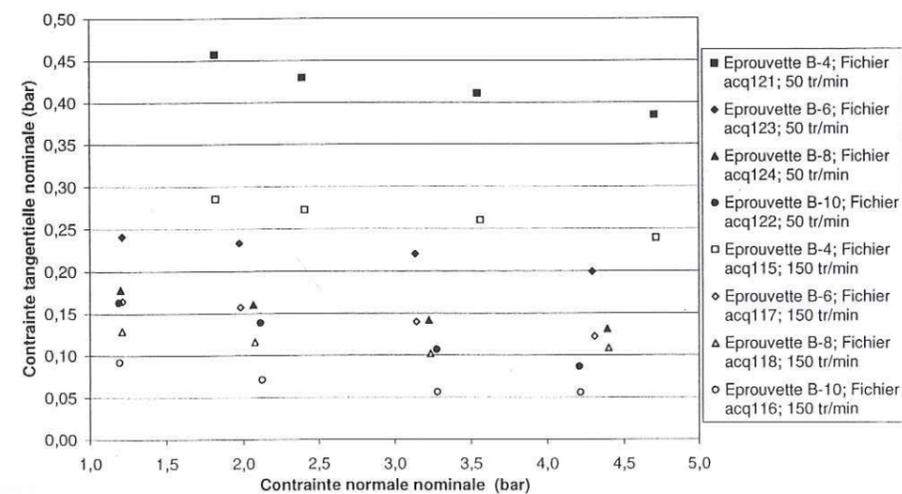


Fig. 7.23 – Variation de la contrainte tangentielle nominale avec la contrainte normale nominale pour des patins de différentes longueurs à -10°C .

même largeur de contact sous des contraintes normales données, et fait varier le rapport d'aspect largeur/longueur du contact en modifiant l'effort normal. Nous avons utilisé la même méthode expérimentalement (Fig. 7.20).

Vidal (1997) était arrivé à la conclusion que pour limiter l'échauffement de la glace sous un pneu, puisqu'il ne faut pas que σ_n augmente, il faut raccourcir et élargir l'empreinte (§ 2.6.2.2). En effet, il avait montré que l'échauffement est proportionnel à $\sigma_n V \sqrt{t}$, avec t la durée du passage d'un pain de gomme. Autrement dit, l'échauffement est proportionnel à $\sigma_n \sqrt{V} \sqrt{a}$, avec a la longueur du patin. Nous retrouvons le même résultat : pour σ_n donnée, σ_t est plus élevée pour un patin court que pour un patin long (Fig. 7.23).

7.2.5.5 Conclusion

Pour des conditions de frottement imposées en V et T_0 , σ_t varie peu avec σ_n sur la plage balayée. σ_t diminue quand V ou la longueur du patin augmentent, ce qui s'explique par la proportion d'aire de contact lubrifiée.

7.3 Etude des effets thermiques

7.3.1 Influence de l'échauffement du patin sur le frottement

7.3.1.1 Objectif

Au cours d'un essai, le patin chauffe peu à peu, comme le montre le collage lors des paliers statiques à la fin d'une manipulation. Il se refroidit lors de l'usinage de la piste entre chaque mesure. Il faut vérifier si cet échauffement du patin ne modifie pas les valeurs de μ obtenues en fin de manipulation pour les F_n élevés.

7.3.1.2 Résultats expérimentaux

La figure 7.24 permet d'évaluer l'effet du réchauffement du patin D-F1 sur les μ mesurés avec la bascule vers l'avant à -10°C et 100 tours/min. Les symboles blancs correspondent au protocole expérimental usuel. Les carrés pleins ont été obtenus par décroissance de F_n , en mesurant successivement μ sous 83, 65, 42 puis 24 daN.

L'ensemble des mesures est cohérent avec l'hypothèse du réchauffement du patin au cours d'une manipulation. Lors des mesures avec F_n décroissant, μ est légèrement plus élevé qu'avec le protocole usuel lors de la première mesure sous 83 daN. Le patin froid a du mal à fondre la glace et μ est assez élevé car le lubrifiant n'est sans doute pas présent partout sous le contact. En revanche, à la fin des mesures avec F_n décroissant, μ sous 42 et 25 daN est plus faible qu'avec le protocole usuel. Le patin est alors chaud et fond plus facilement la glace : la présence de lubrifiant tout le long de l'aire de contact fait chuter le frottement.

Lors des mesures avec F_n décroissant mais avec des paliers de refroidissement de 30 min entre chaque mesure, les niveaux de μ sont semblables à ceux obtenus avec le protocole usuel.

Tout ceci conforte le choix du protocole expérimental. Le réchauffement du patin dû au frottement n'influence pas les valeurs de μ mesurées sous F_n élevé, en fin de manipulation.

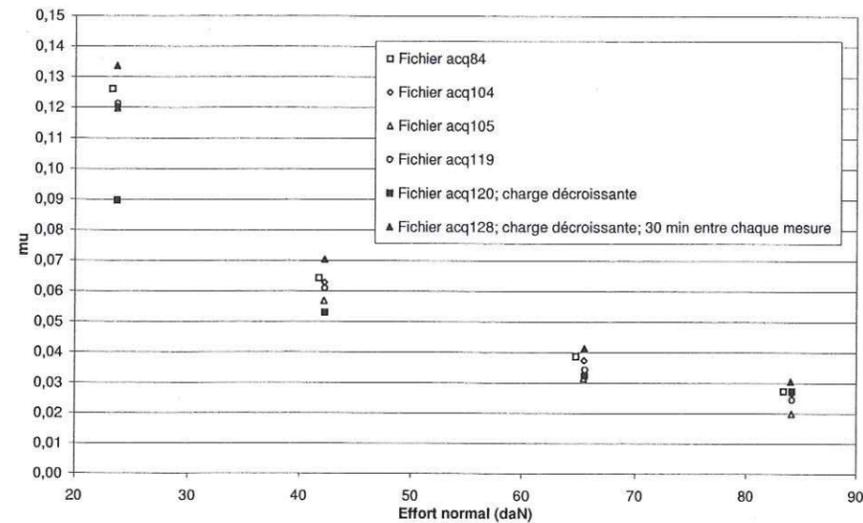


Fig. 7.24 - Effet du protocole expérimental: mesure de μ moyen entre les tours 200 et 225 du patin D-F1 à -10°C et 100 tours/min.

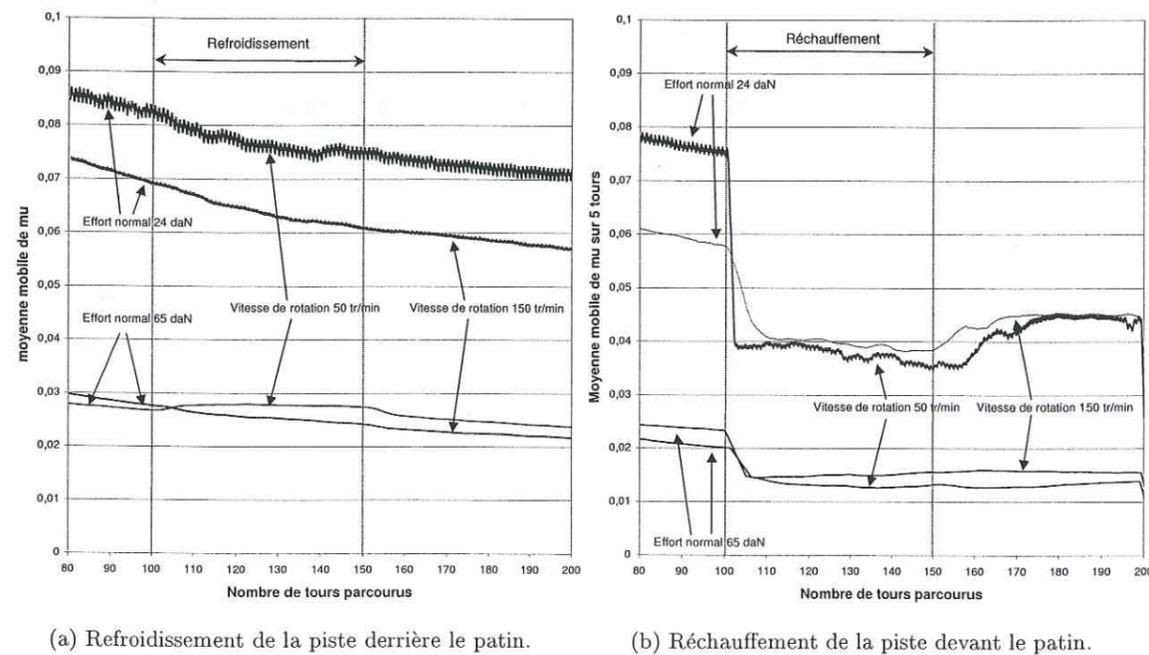


Fig. 7.25 - Effet d'un changement d'état de la piste avec l'éprouvette B-10 à -10°C .

| Vitesse (tours/min) | Effort normal (daN) | Coefficient de frottement | Epaisseur en μm donnée par (7.11) | Hauteur en μm donnée par (7.10) |
|---------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 50 | 24 | 0,035 | 0,8 | 0,94 |
| 50 | 65 | 0,013 | 0,8 | 0,95 |
| 150 | 24 | 0,039 | 2,1 | 1,1 |
| 150 | 65 | 0,015 | 2,1 | 1,1 |

Tab. 7.1 - Epaisseur théorique de la couche d'eau.

7.3.1.3 Discussion

D'après ces mesures de μ , il semble que le réchauffement du patin pendant les mesures sous 25 et 42 daN en paliers ascendants est plus faible que celui se produisant pendant les essais à 83 puis 65 daN au cours des paliers descendants. En effet, l'écart entre les carrés pleins et les symboles creux sur la figure 7.24 est beaucoup plus élevé sous F_n faible que sous F_n élevé. Les mesures sous F_n élevé avec un patin froid ou avec un patin chauffé par 500 tours sous 25 et 42 daN sont équivalentes. En revanche, sous F_n faible, un patin chauffé par 500 tours sous 82 et 65 daN est tellement chaud qu'il fond aisément la glace et donne un μ beaucoup plus faible qu'un patin froid.

Comparons la chaleur due au frottement Q_f et la chaleur dissipée par la déformation du patin Q_{def} pendant un tour.

La chaleur due au frottement pendant un tour est calculée par $Q_f = (1 - K)\mu\sigma_n Vabt$, avec K le coefficient de partage et t la durée du tour. Pour les mesures obtenues par le protocole expérimental usuel (cf. Fig 7.24), à 100 tours/min avec $K = 0,75$, Q_f vaut 17 J/tour sous 24 daN et 12 J/tour sous 83 daN. Le flux de chaleur produit par le frottement est donc plus important sous F_n faible que sous F_n élevé.

L'énergie dissipée par la déformation de l'élastomère Q_{def} lors d'un cycle de sollicitation à contrainte imposée σ_0 est $Q_{def} = (\pi/\omega)\sigma_0^2(G''/G'^2)vol$ (cf. § 1.2.1.5), où vol est le volume du patin ($vol = 20\text{ cm}^3$). Avec $G'' = 0,6\text{ MPa}$ et $G' = 1,5\text{ MPa}$ pour la formulation F1 à -10°C , $\omega = 0,6\text{ s}^{-1}$ à 100 tours/min (en supposant les vibrations en phase avec la rotation), Q_{def} vaut 0,4 J/tour sous 24 daN et 5 J/tour sous 83 daN. Le patin chauffe plus lors des vibrations sous F_n élevé que sous F_n faible.

7.3.1.4 Conclusion

Les tests effectués justifient bien le choix du protocole expérimental: le réchauffement du patin ne semble pas influencer les valeurs de μ obtenues en fin de manipulation. En effet, les μ obtenus pour chaque F_n avec le protocole usuel correspondent aux μ obtenus en diminuant F_n et en attendant que le patin se refroidisse entre chaque mesure. L'énergie dissipée par la déformation viscoélastique de l'élastomère est négligeable devant l'énergie due au frottement pour σ_n faible, mais représente presque 50% de l'énergie due au frottement pour σ_n élevé.

7.3.2 Effet d'un changement d'état de la piste sur le frottement

7.3.2.1 Objectif

En chauffant, la piste devant le patin ou le refroidissant derrière lui, on peut faire évoluer l'état de la piste à l'avant du patin et d'observer les modifications de μ sur deux états de piste différents. Une piste sèche est obtenue en refroidissant à l'arrière, afin que le temps de rotation de la piste permette un assèchement supplémentaire. Une piste humide est obtenue en chauffant juste devant le patin, afin que la couche d'eau formée ne regèle pas avant d'atteindre l'élastomère.

Nous souhaitons ainsi savoir si la surface à l'avant du patin est encore lubrifiée par la couche d'eau fondue sous le patin au tour précédent. Si μ ne varie pas lors du refroidissement, cela signifierait que la piste est sèche à l'entrée du patin lors du protocole expérimental usuel. Si μ ne varie pas lors de la formation d'une couche liquide, cela signifierait que la surface de la piste est encore recouverte d'eau à l'entrée du patin.

7.3.2.2 Etude théorique du regel de la surface

On suppose que tout le frottement sert à fondre la glace. En un passage du patin, l'énergie reçue sur une longueur a , $Q_f = \mu\sigma_n a^2 b$, est égale à celle utilisée pour fondre la glace $Q_m = \rho_i L a b h$, avec h la hauteur d'eau formée. La glace est réchauffée à chaque passage du patin.

Considérons le premier tour du patin sur la glace. La température initiale est T_0 dans tout l'espace. Immédiatement après le passage du patin à $t = 0$, le film d'eau formé impose la condition $T(0, t) = T_f$. En considérant la glace comme un espace semi-infini, la solution est donnée par (2.2) :

$$T = T_f - (T_f - T_0) \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha_i t}} \right). \quad (7.2)$$

En négligeant le flux de chaleur dans le patin, le flux dans la glace est donné par (2.3) et diminue avec le temps en $t^{-1/2}$:

$$\phi = \frac{\lambda_i (T_f - T_0)}{\sqrt{\pi \alpha_i t}}. \quad (7.3)$$

La chaleur qui est fournie par la glace pour regeler le film d'eau liquide de 0 à t est

$$Q_i = ab\lambda_i \frac{(T_f - T_0)}{\sqrt{\pi \alpha_i}} \int_0^t \frac{du}{\sqrt{u}} = 2\lambda_i \frac{(T_f - T_0)}{\sqrt{\pi \alpha_i}} \sqrt{tab}. \quad (7.4)$$

En écrivant que $Q_i = Q_m = Q_f$, le temps nécessaire pour regeler est

$$\sqrt{t} = \frac{\mu\sigma_n a \sqrt{\pi \alpha_i}}{2\lambda_i (T_f - T_0)}. \quad (7.5)$$

Dans le cas le plus défavorable, si $\mu = 0,2$, $\sigma_n = 4$ bars et $T_0 = -5^\circ \text{C}$, t vaut environ 0,5 s. La durée d'un tour varie entre 0,2 s à 300 tours/min et 1,2 s à 50 tours/min : il n'est donc pas certain que l'eau formée sous le patin durant le premier tour ait le temps de regeler avant le deuxième tour.

Après de nombreux tours, la glace s'est réchauffée progressivement lors des tours précédents. Pour le tour n , on peut approcher Q_i par $Q_i = ab\phi(t_n)\Delta t$, avec Δt la durée du tour n . D'après (7.3), on a

$$Q_i \approx ab\lambda_i \frac{(T_f - T_0)}{\sqrt{\pi \alpha_i t_n}} \Delta t, \quad (7.6)$$

et le temps de regel est obtenu par

$$\Delta t = \frac{\mu\sigma_n a \sqrt{\pi \alpha_i t_n}}{\lambda_i (T_f - T_0)}. \quad (7.7)$$

Par exemple, au 200^e tour, à 50 tours/min $t_n = 240$ s et $\Delta t = 22$ s ; à 300 tours/min $t_n = 40$ s et $\Delta t = 9$ s. La surface de glace n'a pas le temps de regeler entre deux tours.

Si on suppose l'état stationnaire atteint, (la solution de (7.2) n'est plus valide), on a :

$$\phi = \frac{\lambda_i (T_f - T_0)}{|e|}, \quad (7.8)$$

avec e l'épaisseur de la glace (5 cm), et

$$\Delta t = \frac{\mu\sigma_n a e}{\lambda_i (T_f - T_0)}. \quad (7.9)$$

L'épaisseur de glace fondue h sous un patin de longueur a frottant sur une surface de glace à la vitesse V , sous la contrainte normale nominale σ_n est d'après (D.15) :

$$h = \frac{\mu\sigma_n a}{\rho_i L}. \quad (7.10)$$

Avec les ordres de grandeur suivants ($\mu = 0,2$, $\sigma_n = 4$ bar, $T_0 = -5^\circ \text{C}$; donc h est égal à $26 \mu\text{m}$ d'après (D.15)), le temps nécessaire au regel est égal à 36 s. En état stationnaire, l'eau n'a pas le temps de regeler en un tour, ce que nous allons essayer de vérifier expérimentalement.

7.3.2.3 Protocole expérimental pour la mesure

La piste semble sèche à l'avant du patin d'après une observation très simple effectuée en appuyant légèrement un papier absorbant sur la piste derrière le patin. A 50 tours/min sous 24 daN, le papier n'absorbe pas d'eau et μ ne varie pas. A 150 tours/min sous 83 daN, le papier est humide, mais μ ne varie toujours pas. Nous avons effectué des mesures de μ afin de confirmer ceci.

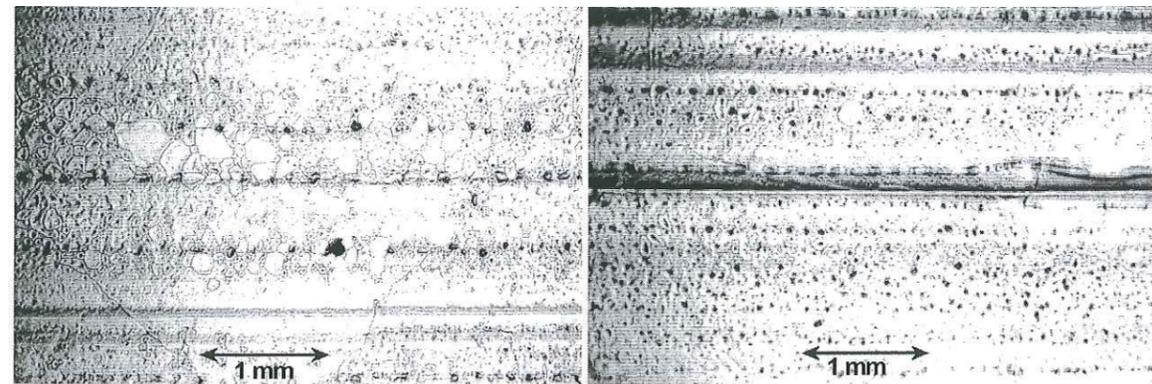
La piste est usinée avant de la lancer. Le patin est posé avec un nombre de contrepoids donné sur le fléau. L'acquisition des efforts débute après 75 tours parcourus par le patin. Durant les tours 100 à 150, la piste est refroidie derrière le patin avec un souffleur d'air froid peu puissant. L'enregistrement est arrêté après 200 tours. Nous réusinons et effectuons les mêmes opérations mais en chauffant devant le patin entre les tours 100 et 150, avec un décapeur thermique très puissant. Les paliers statiques sont effectués en fin de manipulation afin d'obtenir le couplage interne du capteur.

7.3.2.4 Résultats expérimentaux

Les mesures de μ ont été effectuées à -10°C avec l'éprouvette B-10 dans quatre configurations différentes : F_n de 24 ou 65 daN, V de 50 ou 150 tours/min (Fig. 7.25(a) pour le refroidissement et Fig. 7.25(b) pour le réchauffement). Une moyenne mobile de μ sur 5 tours est représentée, afin de lisser les fluctuations de μ dues aux vibrations de la machine.

Le refroidissement derrière l'éprouvette n'a aucun effet sur μ à faible F_n . En revanche, à 50 tours/min sous 65 daN, le refroidissement augmente légèrement le frottement (Fig. 7.25(a)). Ces conditions correspondent à celles où la fonte est maximale (F_n élevé) et où le refroidissement a le plus de chance d'être efficace (V faible). μ augmente sans doute car la couche de lubrifiant formée par le passage du patin est évacuée avant le passage suivant. L'aspect de la surface de glace après les passages du patin est identique avec ou sans refroidissement : les dépôts d'eau s'effectuent en bourrelet de regel ou en gouttelettes (Fig. 7.26).

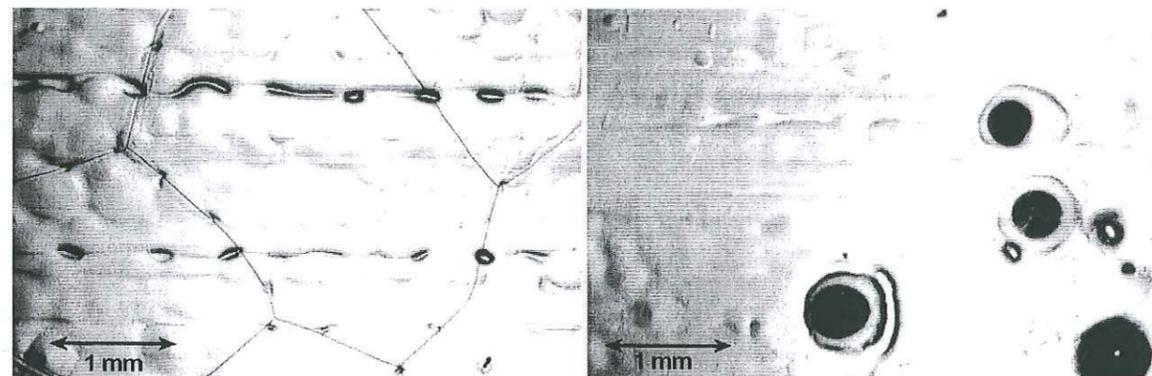
Le réchauffement au décapeur thermique a un effet très net. Dès le début de la fonte, μ décroît énormément sous F_n faible et beaucoup sous F_n élevé. L'effet s'atténue quand V augmente, sans doute car la couche formée par le chauffage est alors plus faible (Fig. 7.25(b)). Lors du chauffage, une couche d'eau assez épaisse se forme. De l'eau gicle même à l'extérieur de la piste à cause de la force centrifuge. Le frottement est alors totalement lubrifié à l'avant du patin et est divisé par deux par rapport au frottement en condition normale. L'aspect de la surface de glace observé après une mesure avec réchauffement au décapeur thermique montre l'importance de la quantité d'eau formée (Fig. 7.27).



(a) Gouttelettes.

(b) Gouttelettes et bourrelet de regel.

Fig. 7.26 – Après refroidissement par le souffleur d'air froid : éprouvette B-10 à -10°C et 50 tours/min sous 83 daN.



(a) Gouttelettes.

(b) Bulles d'air enchassées dans la glace.

Fig. 7.27 – Après chauffage par le décapeur thermique : éprouvette B-10 à -10°C et 150 tours/min sous 24 daN.



Fig. 7.28 – Dispositif d'acquisition de température avec les deux pyromètres.

7.3.2.5 Fonte due à l'échauffement par frottement ou au cisaillement visqueux

L'épaisseur de l'eau formée en un tour en considérant que la fonte est uniquement due à l'échauffement par frottement est donnée par (7.10).

En considérant que μ est généré par le cisaillement d'un film d'eau, l'épaisseur du film entre deux plans infinis est d'après (C.5) :

$$h = \frac{\eta V}{\mu \sigma_n}, \quad (7.11)$$

avec $\eta = 1,76 \cdot 10^{-3}$ Pa s pour l'eau à 0°C .

Le tableau 7.1 permet de comparer l'épaisseur de film obtenu par (7.11) et par (7.10). Ces deux épaisseurs sont du même ordre de grandeur, augmentent avec V et sont indépendantes de F_n . Dans ces conditions expérimentales, les apports d'énergie par frottement et par cisaillement visqueux du film d'eau contribuent de manière égale à la fonte de la glace.

7.3.2.6 Conclusion

En théorie, la couche d'eau fondue peut avoir le temps de regeler après le premier tour mais ne regèle pas après un grand nombre de tours. Le faible effet du refroidissement provient peut-être du manque de puissance du souffleur d'air froid. La formation d'une couche liquide par chauffage réduit considérablement le frottement car le contact patin-glace est totalement lubrifié. D'après les observations faites en refroidissant la piste derrière le patin, nous pouvons supposer que la surface à l'entrée du patin est sèche, mais nous ne pouvons pas l'assurer. Dans certains cas, l'échauffement par frottement et le cisaillement du film contribuent à parts égales à la fonte sous le patin.

7.3.3 Mesures de température de la surface de glace

7.3.3.1 Objectif

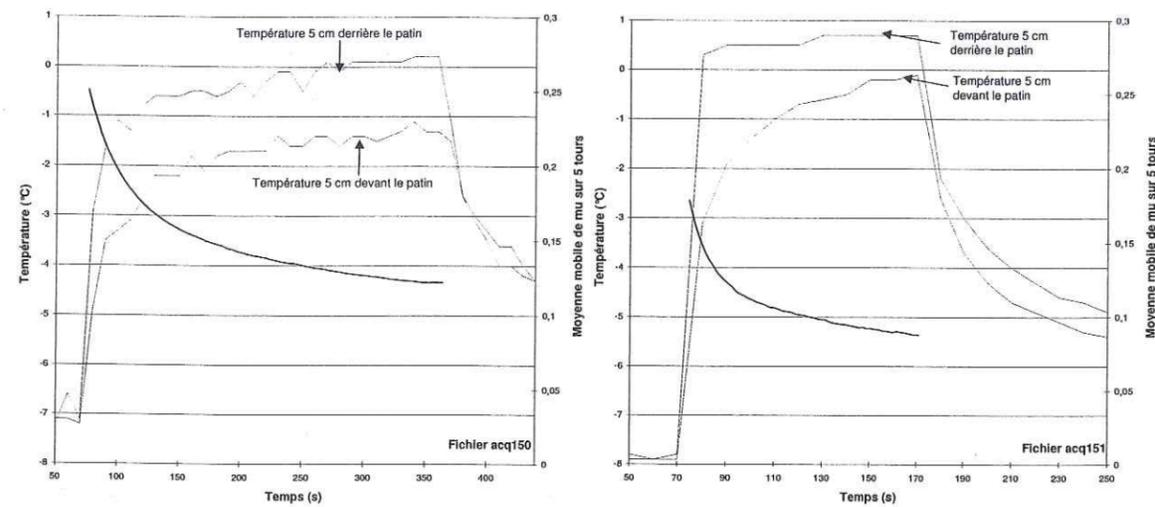
La température de la piste a été mesurée devant et derrière le patin, afin de mesurer l'échauffement de la glace au passage du patin et de comparer nos observations avec celles de Roberts (1987, 1993).

7.3.3.2 Méthode expérimentale

Nous disposons de deux pyromètres infrarouge portables INFRADIG 2010 (Fig. 7.28). L'appareil capte le rayonnement infrarouge émis par chaque objet dans un domaine spectral compris entre 8 et $14 \mu\text{m}$. Le signal est corrigé en fonction du facteur émissif du corps, rapport du rayonnement du corps par rapport au corps noir idéal à la même température. Ce facteur est fixé à 0,96, qui convient en première approximation à la fois pour la glace et l'eau. Chaque pyromètre mesure une température de surface moyenne sur une profondeur malheureusement inconnue.

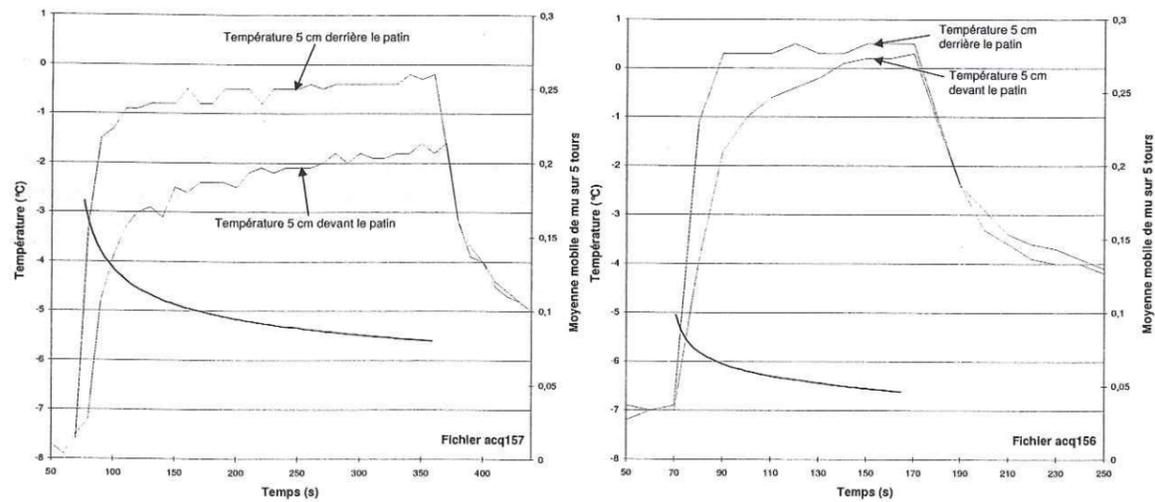
Les détecteurs sont placés verticalement à 1 cm de la surface de glace, à une distance de 5 cm à l'avant et l'arrière du patin. Le diamètre du spot de lecture est environ 8 mm et est centré sur la surface lissée par le patin. Les détecteurs sont entourés par une mousse isolante et les boîtiers d'acquisition sont maintenus au chaud dans une boîte chauffée.

La précision de l'affichage est de $0,1^{\circ}\text{C}$. Quand les pyromètres visent la même surface, l'écart à l'affichage est inférieur ou égal à $0,1^{\circ}\text{C}$. La résolution de la mesure est donc estimée à $0,2^{\circ}\text{C}$.



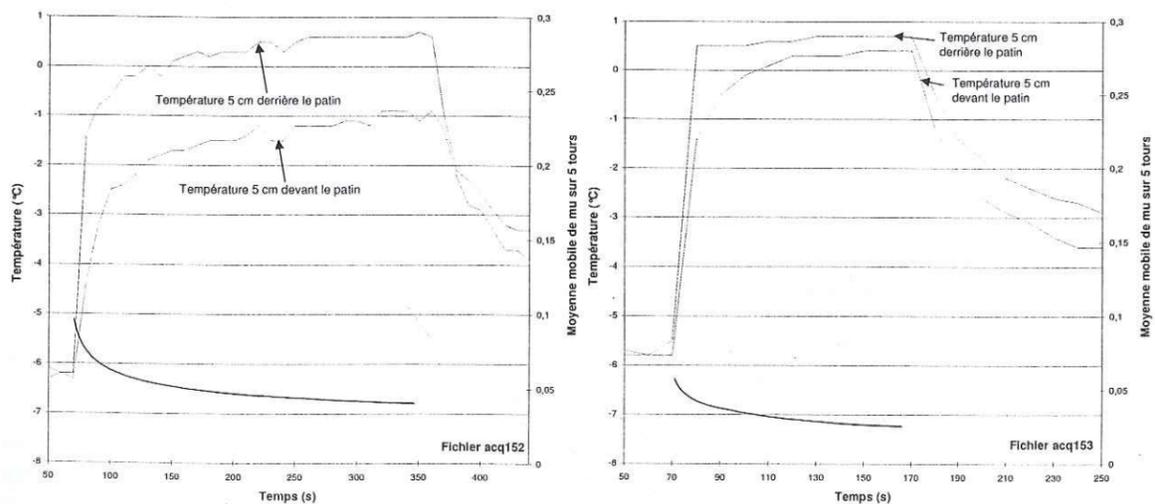
(a) A 50 tours/min sous 24 daN.

(b) A 150 tours/min sous 24 daN.



(c) A 50 tours/min sous 42 daN.

(d) A 150 tours/min sous 42 daN.



(e) A 50 tours/min sous 65 daN.

(f) A 150 tours/min sous 65 daN.

Fig. 7.29 - μ (trait épais) et réchauffement de la piste au passage de l'éprouvette B-10 à -10°C .

Lors de la rotation de la piste, aucun changement de température affichée n'est observé si la glace est bien usinée. En revanche, la température décroît de quelques degrés si la piste comporte des fractures qui apparaissent en surface. Ceci est alors dû à une turbulence créée par les lèvres de la fracture.

Le patin est posé sur la piste en rotation et l'acquisition des capteurs débute simultanément. Les pyromètres effectuent 40 enregistrements de la température avec un pas de temps de 10 s. Les mesures sont arrêtées après 240 tours. Ces mesures ont été effectuées pour une température ambiante de -10°C à 50 ou 150 tours/min sous 24, 42 ou 65 daN.

7.3.3.3 Echauffement théorique

En tenant compte des diffusivités et des conductivités du patin (référéncé 2) et du substrat (référéncé 1), la variation de température ΔT à l'interface après une exposition au flux de chaleur constant ϕ est donnée par (D.12) :

$$\Delta T(0,t) = \frac{2\phi}{\lambda_1\sqrt{\alpha_2} + \lambda_2\sqrt{\alpha_1}} \sqrt{\frac{\alpha_1\alpha_2 t}{\pi}} \quad (7.12)$$

La durée de l'échauffement est égale au temps de passage du patin de longueur a : $t = a/V$. Avec $\phi = \mu\sigma_n V$, l'échauffement de la surface doit être proportionnel à $\mu\sigma_n\sqrt{V}$. C'est ce qu'avait aussi souligné Roberts (1987, 1993).

7.3.3.4 Résultats expérimentaux

La figure 7.29 montre toutes les mesures effectuées. Une moyenne mobile de μ sur 5 tours est représentée afin de lisser les fluctuations du μ dues aux vibrations de la machine. Les températures tracées sont les températures brutes, mesurées 5 cm devant et derrière le patin. Tous les graphiques sont présentés avec les mêmes échelles en ordonnée afin de faciliter les comparaisons. Nous observons bien le réchauffement de la piste entre l'avant et l'arrière du patin.

Avec un dispositif pinon-disque, Roberts (1987, 1993) avait aussi mesuré la température de surface de la glace à une distance d de l'arrière d'un patin de longueur a . Il avait proposé une formule de correction pour obtenir l'échauffement de la glace ΔT_0 juste derrière le patin à partir de l'échauffement mesuré ΔT_d à la distance d , en tenant compte du refroidissement de la surface dû à l'air ambiant.

$$\Delta T_d = \Delta T_0 \sqrt{\frac{a+d}{a}} \left(1 - \sqrt{\frac{d}{a+d}}\right) \quad (7.13)$$

Cette formule est valable seulement pour une très faible distance d entre l'arête arrière du patin et le point de mesure et ne peut pas être appliquée ici.

Nous avons observé le refroidissement de la surface à l'air libre, pendant environ 100 s après l'arrêt de la piste. La température se rapproche toujours de la même façon de la température d'équilibre initiale (de manière exponentielle comme l'avaient aussi observé Colbeck *et al.* (1997), cf. Fig. E.9). En considérant un refroidissement maximum de 1°C en 10 s, cela correspond à $3 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}$ pour 5 cm parcouru à 50 tours/min. L'effet du refroidissement entre l'arrière du patin et le point de mesure étant négligeable devant l'incertitude de mesure, nous considérons à juste titre que les températures mesurées à 5 cm devant et derrière le patin sont les températures d'entrée et de sortie aux extrémités du patin.

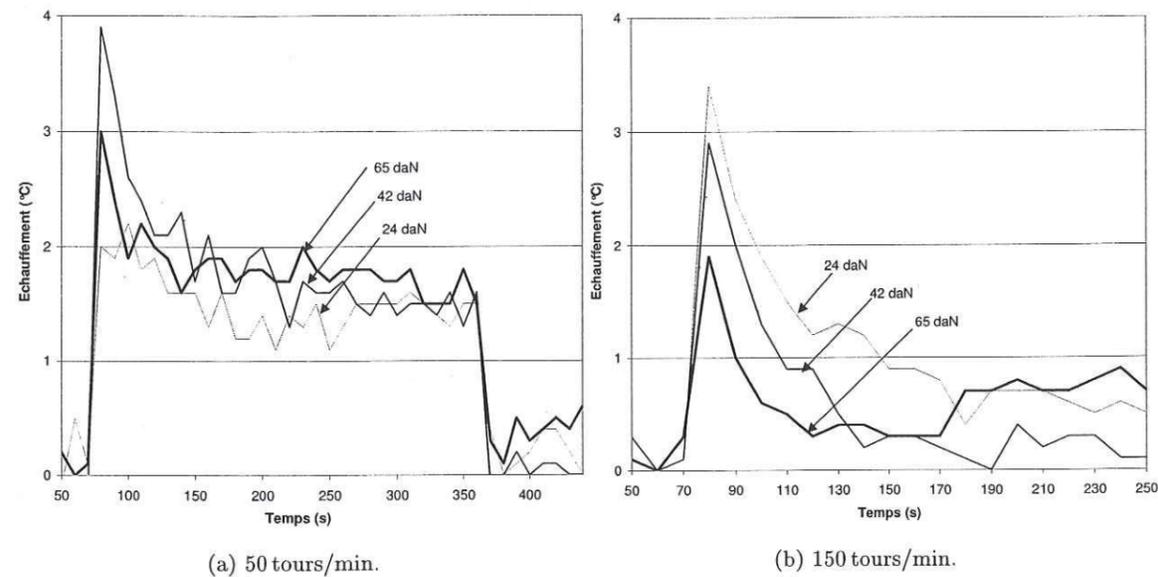


Fig. 7.30 – Echauffement de la piste au passage de l'éprouvette B-10 à -10°C .

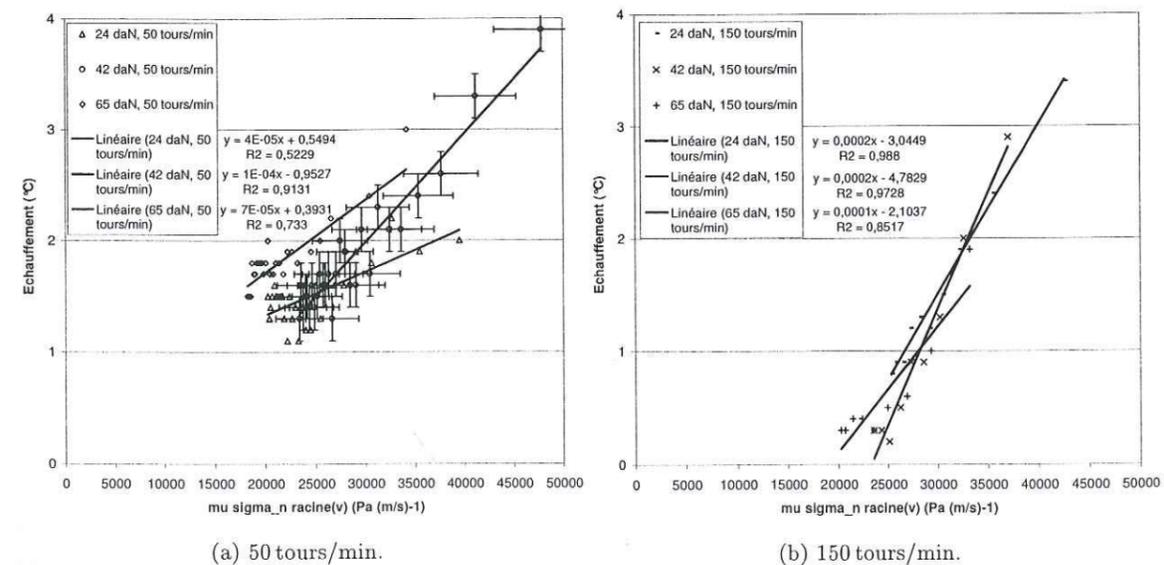


Fig. 7.31 – Echauffement de la piste en fonction de $\mu\sigma_n\sqrt{V}$ pour l'éprouvette B-10 à -10°C .

7.3.3.5 Exploitation

La température à l'avant du patin augmente beaucoup au cours des tours. Nous ne pouvons donc pas considérer que le patin frotte sur une piste vierge en permanence à la température de consigne de la chambre froide. Le temps de refroidissement de la piste entre deux passages est très insuffisant, même pour notre plus faible vitesse de rotation.

L'échauffement entre l'avant et l'arrière du patin est représenté pour deux vitesses (Fig. 7.30). Lors des premiers tours, l'échauffement est toujours maximum et peut dépasser 3°C . Pour 50 tours/min, l'échauffement se stabilise à un palier d'environ $1,5^{\circ}\text{C}$, quel que soit F_n .

La figure 7.31 exprime l'échauffement en fonction de $\mu\sigma_n\sqrt{V}$. La précision de la mesure d'échauffement est indiquée à $0,2^{\circ}\text{C}$. La marge d'erreur sur le produit $\mu\sigma_n\sqrt{V}$ correspond à celle du μ , soit 10%, car les autres erreurs sont négligeables. En tenant compte de l'erreur de mesure, il existe bien une relation linéaire entre l'échauffement et le produit $\mu\sigma_n\sqrt{V}$. Pour les mesures à 50 tours/min, la fonction est bien linéaire mais pour 150 tours/min, la fonction est affine avec une ordonnée à l'origine négative, entre -4 et -2°C . Cela signifie que le flux réel reçu par la glace est inférieur à $\mu\sigma_n\sqrt{V}$. Une partie du flux est en effet utilisée en enthalpie massique de fusion pour fondre la glace. C'est d'ailleurs souvent à V élevée que nous avons remarqué le lissage rapide de la piste lors des premiers tours, signe d'une fonte plus importante qu'à V faible.

7.3.3.6 Conclusion

L'échauffement entre l'avant et l'arrière du patin est mesurable avec des pyromètres infra-rouge. L'échauffement atteint 3°C lors des premiers tours, puis décroît pour se stabiliser vers $1,5^{\circ}\text{C}$. L'échauffement est proportionnel à $\mu\sigma_n\sqrt{V}$.

7.4 Conclusion sur l'effet des paramètres sur le frottement

La machine tournante permet de distinguer les formulations des mélanges : une gomme souple frotte plus qu'une gomme rigide. La différence s'explique par l'augmentation de A_r avec la souplesse du mélange.

Les frottements obtenus avec le pendule SRT représentent un régime sec, alors que le système pion-disque caractérise un régime lubrifié, avec une petite longueur sèche à l'avant du patin.

La géométrie influence fortement les valeurs de μ mesurées, à cause d'une répartition de la contrainte normale non uniforme sous le patin. Pour une même σ_n , une surpression sur l'avant du patin génère un frottement plus élevé qu'une surpression sur l'arrière. Ceci est net avec un patin souple à V faible, mais l'effet est négligeable avec un patin rigide.

L'effet d'une lamellisation à l'avant du patin permet d'augmenter μ fortement s'il y a surpression à l'avant du patin et faiblement s'il y a surpression à l'arrière du patin.

À V et T_0 imposés, σ_t varie peu avec σ_n . σ_t augmente quand V ou la longueur du patin diminuent, car la fraction d'aire lubrifiée décroît.

L'échauffement de la glace dû au passage du patin est de environ 3°C lors des premiers tours puis décroît ; il varie linéairement par rapport à $\mu\sigma_n\sqrt{V}$. La couche d'eau formée à chaque passage du patin n'a théoriquement pas le temps de regeler avant le passage suivant. Ceci explique la diminution de μ observée au cours du temps, de par la modification de l'épaisseur du film d'eau et des conditions de contact locales entre le patin et la glace.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail comportait deux parties. Nous souhaitons, grâce à des observations expérimentales, d'une part améliorer la connaissance du grattage de la glace et d'autre part déterminer les mécanismes prépondérants lors du frottement élastomère-glace.

Conclusion sur les mesures de grattage de la glace

L'objectif de cette étude expérimentale était de déterminer les mécanismes physiques mis en jeu lors du grattage de la glace, afin d'améliorer la conception des pneus cloutés ou d'utiliser d'autres concepts pour mettre en jeu la décohésion de la glace. Pour dégager les mécanismes importants à chaque échelle, des indenteurs de tailles très variées ont été utilisés.

Par les mesures SRT avec des inclusions solides de $50 \mu\text{m}$, nous n'avons observé aucune trace de grattage sur la glace. Les inclusions solides augmentent μ_{SRT} uniquement après rodage de l'éprouvette.

L'utilisation des papiers abrasifs à taille moyenne de grain entre 50 et $350 \mu\text{m}$ avec le pendule SRT a montré que μ_{SRT} est indépendant de la température. Cependant, l'aspect de la surface de glace dépend de la température. La surface de glace fond plus facilement sur glace chaude que sur glace froide: les rainures laissées sur la glace par les grains avaient des bords lisses et encadrés de fins bourrelets de regel vers 0°C , mais elles étaient fortement écaillées à basse température. Pour une température donnée, les gros indenteurs ont tendance à écailler la surface alors que les petits indenteurs ont tendance à former des bourrelets de regel. A surface nominale frottée égale, un petit nombre de gros grains frotte plus qu'un grand nombre de petits grains. Un frottement élevé s'accompagne en général d'un écaillage de la glace plutôt que de fonte de la glace sur les bords des rainures.

De même qu'avec le pendule SRT, l'utilisation des papiers abrasifs avec la piste rectiligne a montré que dans cette gamme de taille d'indenteurs, un petit nombre de gros indenteurs frotte plus qu'un grand nombre de petits indenteurs. Avec la piste rectiligne, les bords des traces des clous étaient plus écaillés à basse température et effort normal élevé et la largeur moyenne du sillon augmentait avec la masse du patin et la température.

Pour les mesures avec la piste rectiligne, $\mu_{\text{instantané}}$ est mesuré directement sans artefact de mesure, mais il est évalué seulement à basse vitesse sur la dernière partie du parcours. Le μ le plus intéressant physiquement est μ_{moyen} car il tient compte de la vitesse de démarrage réelle. μ_{moyen} est toujours plus faible que $\mu_{\text{intégré}}$ et $\mu_{\text{instantané}}$ est encore plus faible que μ_{moyen} . Pour les mesures avec des clous, $\mu_{\text{intégré}}$ et μ_{moyen} sont plus élevés à -5°C qu'à -20°C . $\mu_{\text{instantané}}$ pour un patin supporté par quatre clous vaut environ $0,14$, indépendamment de la température et de la masse du patin.

Axes de recherche pour améliorer la compréhension du grattage de la glace

Par rapport au pendule SRT, la réalisation de la piste de glace a permis d'effectuer des mesures de frottement avec des clous. Les conditions de frottement clou-glace sont très différentes sous un pneu, mais il semble impossible de réaliser un banc de test prenant en compte tous les paramètres qui interviennent sous un pneu clouté, sans utiliser un pneu réel.

Un nouveau dispositif expérimental pourrait permettre d'obtenir des résultats très intéressants, grâce à un tour utilisé pour l'usinage. Un indenteur remplacerait l'outil de coupe et serait pressé contre un cylindre de glace en rotation, avec une vitesse d'avance lui permettant de ne jamais passer sur la même trace. Il faudrait que le support de l'indenteur soit muni d'un capteur d'efforts tridimensionnel, afin d'accéder à la valeur du frottement. Le clou utilisé comme indenteur serait fixé de manière rigide sur son support ou enfoncé dans une alvéole d'un patin de gomme afin de mieux simuler l'effet des propriétés viscoélastiques du pneu.

Il semble inutile de tenter d'évaluer la quantité de copeaux de glace formés et de mesurer leur aire spécifique (afin d'accéder à la dépense d'énergie théorique due à la formation des interfaces glace-air), car ceci donne toujours des prévisions bien inférieures aux mesures en terme de consommation d'énergie.

L'étude du grattage que nous avons menée reste expérimentale mais pourrait permettre l'élaboration d'un modèle théorique après des investigations beaucoup plus approfondies. Des mesures de température en surface de la glace permettraient de mettre en évidence et de quantifier la fonte sous le passage de l'indenteur. Il faudrait passer par un modèle d'indentation et effectuer des mesures de la dureté de la glace pour la vitesse de déformation considérée, afin de les utiliser pour valider le modèle de grattage.

Conclusion sur l'ensemble des mesures effectuées avec la machine tournante

L'objectif de cette étude était de dégager les paramètres influents sur le frottement gomme-glace. Dans ce but, nous avons mis au point un protocole d'acquisition du frottement avec un dispositif expérimental du type pion-disque.

Nous avons montré que μ atteint une limite inférieure après un grand nombre de tours : les premiers tours reflètent un état transitoire, variable selon la souplesse de l'élastomère et F_n . En régime stationnaire, la machine tournante permet de distinguer les formulations : une gomme souple frotte plus qu'une gomme rigide. La différence s'explique par l'augmentation de l'aire de contact réelle avec la souplesse du mélange.

μ augmente avec une diminution de T_0 , V ou σ_n , dans les gammes de -20 à -5 °C, de 1,9 à 11,5 m/s et de 1,2 à 4,15 bar. A V et T_0 imposées, σ_t varie peu avec σ_n . σ_t augmente quand V ou la longueur du patin diminuent, car la fraction d'aire lubrifiée décroît.

Une répartition de la contrainte normale non uniforme sous le patin modifie fortement μ . Sous une même σ_n , une surpression sur l'avant du patin génère un frottement plus élevé qu'une surpression sur l'arrière. Ceci est net avec un patin souple à V faible, mais l'effet est négligeable avec un patin rigide. L'effet d'une lamellisation à l'avant du patin permet d'augmenter μ fortement s'il y a surpression à l'avant du patin et faiblement s'il y a surpression à l'arrière du patin.

La géométrie du patin et la souplesse de l'élastomère influencent l'aspect de la trace d'usure de la glace (e.g. ornières sous les bords, marche vers l'extérieur de la trace). L'observation à la loupe binoculaire de la partie centrale de la trace montre l'existence de dépôts d'eau regelée, en bourrelets ou en gouttelettes espacées.

Les frottements obtenus avec le pendule SRT se rapprochent d'un régime sec, alors que le système pion-disque caractérise un régime lubrifié, avec une petite longueur sèche à l'avant du patin. La couche d'eau formée à chaque passage du patin n'a théoriquement pas le temps de regeler avant le passage suivant. Un refroidissement de la glace derrière le patin ne modifie pas le frottement. Une fonte de la glace juste devant le patin fait diminuer μ . L'échauffement de la glace dû au passage du patin est important et varie linéairement par rapport à $\mu\sigma_n\sqrt{V}$.

Axes de recherche pour améliorer la connaissance du frottement gomme-glace

Les observations qualitatives de la surface de glace après usure prolongée de la piste illustrent la difficulté d'appliquer un modèle théorique à nos résultats expérimentaux. Les phénomènes très complexes dus à la géométrie du dispositif expérimental et aux propriétés viscoélastiques des élastomères engendrent une distribution non uniforme de la contrainte normale sous le patin. Le profil de la piste de glace après un grand nombre de tours du patin en est une preuve évidente. L'usure de la glace n'est pas horizontale, conséquence d'une surpression sous le bord intérieur du patin due au dispositif d'application de l'effort normal.

Afin de continuer cette étude, des modifications de la machine sont en cours. Une plage de vitesse de glissement allant de quelques millimètres à quelques dizaines de centimètres par seconde permettrait d'étudier le passage du frottement statique au frottement dynamique.

Il serait souhaitable d'étendre l'étude vers une modélisation complète des phénomènes thermiques de transfert de chaleur à l'interface gomme-glace et de conduction dans les deux matériaux. Pour cela, des mesures de gradients de température dans la glace et le patin à l'aide de thermocouples pourraient être envisagées.

En particulier, afin de déterminer les conditions expérimentales pour lesquelles la conduction ou le cisaillement visqueux du film domine, il faudrait effectuer à plusieurs températures des mesures d'usure de la piste après un grand nombre de tours, avec une acquisition simultanée des températures en surface de la glace et dans les volumes de glace et du patin. Ceci permettrait de savoir si la conduction domine à basse température et le cisaillement domine près du point de fusion.

Annexe A

Notations

A.1 Propriétés des matériaux

(indice i pour la glace, g pour la gomme et e pour l'eau)

| | | |
|------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| λ | (W m ⁻¹ K ⁻¹) | Conductivité thermique du matériau |
| α | (m ² s ⁻¹) | Diffusivité thermique du matériau ($\alpha = \lambda/(\rho C_p)$) |
| C_p | (J kg ⁻¹ K ⁻¹) | Capacité thermique massique du matériau |
| ρ | (kg m ⁻³) | Masse volumique du matériau |
| e | (J s ^{-1/2} m ⁻² K ⁻¹) | Effusivité thermique ($e = \lambda/\sqrt{\alpha} = \sqrt{\lambda\rho C_p}$) |
| H | (N m ⁻²) | Dureté du matériau |
| L | (J kg ⁻¹) | Enthalpie massique de fusion de la glace |
| T_f | (°C) | Température de fusion de la glace |
| E | (Pa) | Module d'Young du matériau |
| G' | (Pa) | Module de cisaillement d'un polymère |
| G'' | (Pa) | Module de perte d'un polymère |
| δ | | Angle de perte (viscoélasticité d'un polymère) ($\tan \delta = G''/G'$) |
| T_g | (°C) | Température de transition vitreuse d'un polymère |
| ϵ | | Déformation de l'éprouvette de polymère |
| ν | | Module de Poisson du matériau |

A.2 Frottement d'un patin sur la glace

| | | |
|------------------|-----|-----------------------------------------------|
| F_t | (N) | Effort tangentiel nominal |
| F_n | (N) | Effort normal nominal |
| μ | | Coefficient de frottement ($\mu = F_t/F_n$) |
| $\mu_{statique}$ | | Coefficient de frottement statique |
| μ_s | | Coefficient de frottement pour un contact sec |

| | | |
|---------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------|
| a | (m) | Longueur du patin |
| b | (m) | Largeur du patin |
| A_n | (m ²) | Aire de contact nominale |
| A_r | (m ²) | Aire de contact réelle |
| σ_n | (Pa) | Contrainte normale nominale ($\sigma_n = F_n/A_n$) |
| σ_{nl} | (Pa) | Contrainte normale locale |
| σ_t | (Pa) | Contrainte tangentielle nominale ($\sigma_t = F_t/A_n$) |
| σ_{tl} | (Pa) | Contrainte tangentielle locale |
| τ | (Nm ⁻²) | Contrainte de cisaillement |
| x | (m) | Distance dans le sens du déplacement par rapport à l'avant du patin |
| x_s | (m) | Longueur de la zone sèche |
| x_h | (m) | Longueur de la zone humide |
| y | (m) | Distance dans le sens latéral au déplacement |
| z | (m) | Distance dans le sens orthogonal au plan d'interface |
| V | (ms ⁻¹) | Vitesse de glissement du patin ou du pneu par rapport au sol |
| V_0 | (ms ⁻¹) | Vitesse du véhicule par rapport au sol |
| g_V | | Taux de glissement (pneu) sur le sol ($g_V = V/V_0$) |
| T | (°C) | Température variable |
| T_0 | (°C) | Température ambiante initiale et température des deux solides initiale |
| T_f | (°C) | Température de fusion de la glace |
| $T_{réf}$ | (°C) | Température de référence pour WLF |
| T_c | (°C) | Température critique pour le frottement contrôlé thermiquement |
| ϕ | (W m ⁻²) | Densité de flux de chaleur |
| ϕ_s | (W m ⁻²) | Densité de flux de chaleur pour un contact sec |
| ϕ_h | (W m ⁻²) | Densité de flux de chaleur pour un contact humide |
| ϕ_c | (W m ⁻²) | Densité de flux de chaleur évacué par conduction |
| ϕ_m | (W m ⁻²) | Densité de flux de chaleur pour fondre la glace |
| Q | (J) | Quantité de chaleur |
| ΔW | (J) | Perte d'énergie |
| h | (m) | Épaisseur du film fluide |
| u | (ms ⁻¹) | Vitesse longitudinale locale dans le fluide |
| η | (Pa s) | Viscosité dynamique du fluide |
| P | (Pa) | Pression dans un fluide |
| g | (ms ⁻²) | Accélération de la pesanteur ($g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$) |

Annexe B

Propriétés physiques des matériaux

B.1 Glace Ih à 0 ° C (Hobbs, 1974)

Masse volumique $\rho_i = 917 \text{ kg m}^{-3}$
 Capacité thermique massique $C_{pi} = 2,010 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 Enthalpie massique de fusion $L = 334 \text{ kJ kg}^{-1}$
 Conductivité thermique $\lambda_i = 2,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 Diffusivité thermique $\alpha_i = 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
 Effusivité thermique $e_i = 1,994 \text{ kJ s}^{-1/2} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
 Loi de Clausius-Clapeyron $dT_f/dP = -0,074 \text{ K MPa}^{-1}$

B.2 Eau (Gray, 1957)

Capacité thermique massique $C_{pe} = 4,220 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 Viscosité dynamique $\eta = 1,76 \cdot 10^{-3} \text{ Pa s}$

B.3 Gomme (propriétés moyennes)

Masse volumique $\rho_g = 1120 \text{ kg m}^{-3}$
 Capacité thermique massique $C_{pg} = 1,700 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 Conductivité thermique $\lambda_g = 0,24 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 Diffusivité thermique $\alpha_g = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
 Effusivité thermique $e_g = 641 \text{ J s}^{-1/2} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Annexe C

Écoulement d'un fluide

C.1 Définitions

Pour un fluide s'écoulant entre deux parois horizontales, la contrainte de cisaillement τ dans le fluide est reliée au gradient de vitesse par :

$$\tau = \frac{F_t}{A_n} = \eta \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (\text{C.1})$$

où η est la viscosité dynamique du fluide, F_t est l'effort tangentiel exercé pour déformer le fluide, A_n est l'aire de contact nominale, u est la vitesse locale du fluide dans le sens de l'écoulement et z l'altitude par rapport à l'une des parois.

Un fluide est dit *newtonien* si, à température constante, sa viscosité est indépendante de la contrainte appliquée.

Un écoulement est dit *laminaire* si tous les vecteurs-vitesse sont parallèles à un instant donné.

C.2 Écoulement d'un fluide entre deux plans parallèles

Considérons deux solides à surfaces planes parallèles distantes de h , l'un étant fixe et l'autre mobile à la vitesse V , séparés par un fluide visqueux newtonien (de viscosité η). F_t et F_n sont respectivement les composantes tangentielle et normale de l'effort exercé entre les deux solides, $\mu = F_t/F_n$ est le coefficient de frottement entre les deux solides dû au cisaillement visqueux du fluide et A_n est l'aire de contact nominale.

Le nombre de Reynolds de l'écoulement défini par $Re = hV/\eta$. L'écoulement est laminaire si Re est inférieur à une valeur limite (≈ 2000) et turbulent sinon.

Dans le cas de l'écoulement laminaire, la vitesse dans le film est une fonction linéaire de l'altitude et (C.1) devient :

$$\tau = \frac{F_t}{A_n} = \eta \frac{V}{h}. \quad (\text{C.2})$$

L'effort tangentiel s'exprime par

$$F_t = \frac{\eta V A_n}{h}. \quad (\text{C.3})$$

Le coefficient de frottement est calculé comme

$$\mu = \frac{\eta V A_n}{h F_n}. \quad (\text{C.4})$$

En notant $\sigma_n = F_n/A_n$ la contrainte normale nominale, l'épaisseur du film d'eau h s'exprime par

$$h = \frac{\eta V}{\mu \sigma_n}, \quad (\text{C.5})$$

En écoulement laminaire sous un patin de largeur b , avec une vitesse dans le fluide fonction linéaire de l'altitude, le débit volumique est

$$q = \frac{1}{2} b V h. \quad (\text{C.6})$$

La puissance dissipée par unité de volume dans le fluide liquide est $\mathcal{P} = 2\tau V/h = 2\eta V^2/h^2$. En supposant que la chaleur dissipée est évacuée à parts égales normalement aux deux parois, le flux de chaleur par unité d'aire perpendiculairement aux surface est :

$$\phi = \frac{\eta V^2}{h}. \quad (\text{C.7})$$

Annexe D

Echauffement d'un substrat sous l'action un flux de chaleur

D.1 Echauffement d'un solide semi-infini dû à un flux de chaleur

Considérons un solide semi-infini, initialement à la température uniforme T_0 , soumis à sa surface à un flux de chaleur ϕ à partir du temps $t = 0$. D'après Carslaw et Jaeger (1958), la température $T(z,t)$ dans le corps à la distance de l'interface z et au temps t est solution du système :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad \text{équation de diffusion de la chaleur} \quad (\text{D.1})$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = \phi \quad \text{condition à la limite} \quad (\text{D.2})$$

$$T(z,0) = T_0 \quad \text{condition initiale} \quad (\text{D.3})$$

avec λ la conductivité thermique et $\alpha = \lambda/(\rho C_p)$ la diffusivité thermique du matériau, C_p étant la capacité thermique massique et ρ la masse volumique du matériau.

En utilisant la transformée de Laplace, on montre que la solution de ce système est ¹

$$T(z,t) - T_0 = \frac{2\phi\sqrt{\alpha t}}{\lambda} \operatorname{ierfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} \right) = \frac{2\phi\sqrt{\alpha t}}{\lambda\sqrt{\pi}} \exp \left(-\frac{z^2}{4\alpha t} \right) - \frac{\phi z}{\lambda} \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} \right). \quad (\text{D.4})$$

L'échauffement de l'interface $\Delta T(0,t) = T(0,t) - T_0$ est

$$\Delta T(0,t) = \frac{2\phi}{\lambda} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}} = 2\phi \sqrt{\frac{t}{\pi\lambda\rho C_p}} = \frac{2\phi}{e} \sqrt{\frac{t}{\pi}}, \quad (\text{D.5})$$

avec e l'effusivité du solide semi-infini.

D.2 Echauffement d'un solide dû au passage d'un patin

Considérons le flux de chaleur ϕ généré par le frottement lors du passage sur un substrat plat d'un patin de longueur a à la vitesse de glissement V sous une contrainte normale nominale σ_n . F_n et F_t désignent respectivement les efforts normal et tangentiel sur le patin.

1. La fonction erreur est définie par $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du$. On note $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$ et $\operatorname{ierfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) - x \operatorname{erfc}(x)$.

D.2.1 Effets de bords

D'après (D.4) et (D.5), la perturbation de température à la profondeur z et au temps t s'écrit

$$\Delta T(z,t) = \beta \Delta T(0,t), \quad (D.6)$$

avec

$$\beta = \beta(z,t) = \sqrt{\pi} \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} \right). \quad (D.7)$$

Dans le cas de la glace, la température limite en $z=0$ étant la température de fusion (0°C), l'échauffement maximum de la surface est $\max(\Delta T(0,t)) = (T_f - T_0)$.

A la profondeur z et à t , l'échauffement est donc inférieur à $\beta(z,t)(T_f - T_0)$.

β_0 étant une valeur de β telle que $\beta_0(T_f - T_0)$ puisse être considérée comme négligeable, la perturbation de température à la profondeur de pénétration $z=z_0$ telle que $\beta(z_0,t) = \beta_0$ sera aussi négligeable.

Quand la profondeur de pénétration de la chaleur z_0 pendant la durée du passage du patin a/V est négligeable devant les dimensions du patin, on peut considérer que la diffusion de la chaleur s'effectue dans deux solides semi-infinis: la conduction de la chaleur s'effectue alors dans une direction perpendiculaire à l'interface (cf. Carslaw et Jaeger (1958); Evans *et al.* (1976)) et les effets de bords sont négligeables

En se plaçant à $z_0 = 4\sqrt{\alpha t}$, β est inférieur à 2.10^{-3} de sorte qu'à $T_0 = -20^\circ \text{C}$, l'échauffement à cette profondeur reste inférieur à $0,04^\circ \text{C}$ et peut être raisonnablement négligé.

D.2.2 Flux de chaleur

La densité de flux de chaleur ϕ est égale au rapport de la puissance fournie par le frottement $F_t V$ à la surface de contact A_n : $\phi = F_t V / A_n$. Puisque $\mu = F_t / F_n$, ϕ s'exprime par

$$\phi = \mu \sigma_n V. \quad (D.8)$$

D.2.3 Cas où le flux dans le patin est négligeable

Si les propriétés thermiques du patin et du substrat sont similaires et si le flux de chaleur dans le patin est négligeable devant celui dans le substrat, l'échauffement de la surface du substrat en régime stationnaire est d'après (D.5):

$$\Delta T(0,t) = \frac{2\mu\sigma_n V}{\lambda} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}} = 2\mu\sigma_n V \sqrt{\frac{t}{\pi\lambda\rho C_p}}, \quad (D.9)$$

avec α , λ , ρ et C_p respectivement la diffusivité thermique, la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité thermique massique du matériau du substrat.

D.2.4 Cas où les propriétés thermiques des deux corps sont différentes

Si les propriétés thermiques du substrat (référéncé par l'indice 1) du patin (référéncé par l'indice 2) sont différentes, le flux de chaleur global ϕ se partage entre le substrat (ϕ_1) et le

patin (ϕ_2). Le coefficient de partage K dépend des effusivités e_1 et e_2 des deux matériaux ($e_n = \lambda_n / \sqrt{\alpha_n}$, avec λ_n conductivité thermique et α_n diffusivité thermique du matériau n):

$$\phi_1 = K\phi \text{ et } \phi_2 = (1-K)\phi \text{ avec } K = \frac{e_1}{e_2 + e_1} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_2/\sqrt{\alpha_2}}{\lambda_1/\sqrt{\alpha_1}}}. \quad (D.10)$$

Quand un patin de gomme passe sur de la glace, l'ordre de grandeur des effusivités (cf. annexe B) conduit à $K = 0,75$: 75 % du flux de chaleur à l'interface est évacué par conduction dans la glace.

D'après (D.5) et (D.10), l'échauffement du substrat lors du passage d'un patin en régime stationnaire augmente avec la durée écoulée depuis le début du passage du patin et dépend des propriétés thermiques des deux corps.

$$\Delta T(0,t) = \frac{2K\phi}{e_1} \sqrt{\frac{t}{\pi}} = \frac{2\phi}{e_1 + e_2} \sqrt{\frac{t}{\pi}} \quad (D.11)$$

Certains auteurs écrivent cette relation en développant les propriétés thermiques:

$$\Delta T(0,t) = \frac{2\phi}{\lambda_1\sqrt{\alpha_2} + \lambda_2\sqrt{\alpha_1}} \sqrt{\frac{\alpha_1\alpha_2 t}{\pi}}. \quad (D.12)$$

D'après (D.8), l'expression précédente s'écrit en fonction de la distance x à l'avant du patin comme:

$$\Delta T(0,x) = \frac{2\mu\sigma_n}{e_1 + e_2} \sqrt{\frac{xV}{\pi}}. \quad (D.13)$$

D'après (Ettles, 1986b), la partition de l'énergie entre le patin et le demi-espace peut être négligée quand le nombre de Peclet Pe est élevé ($Pe = \rho C_p V a / (4\lambda)$). Pour que (D.9) reste valide, le nombre de Peclet Pe doit être assez grand: K tend alors vers 1; presque toute l'énergie générée par le frottement est évacuée dans le demi-espace et le patin chauffe très peu.

D.3 Fonte de la glace sous l'action d'un flux de chaleur

Considérons un patin de longueur a en mouvement sur une surface de glace à la vitesse V sous la contrainte normale nominale σ_n . On suppose que toute l'énergie reçue par la glace sert uniquement à la fonte. Le flux d'énergie par unité d'aire et de temps est d'après (D.8) $\phi_m = \mu_h \sigma_n V$ avec μ_h le coefficient de frottement dans la zone humide.

Si le flux de chaleur dans le patin est négligeable, un point de la glace entouré d'une aire dS reçoit pendant la durée du passage du patin a/V la quantité de chaleur $\phi_m dS a / V$. Pour fondre une épaisseur h de glace, il faut l'énergie $\rho_i L h dS$ avec ρ_i la masse volumique de la glace et L son enthalpie massique de fusion. On a alors

$$\phi_m = \rho_i L h V / a, \quad (D.14)$$

soit

$$h = \frac{\mu_h \sigma_n a}{\rho_i L} = \frac{\mu_h F_n}{\rho_i L b}. \quad (D.15)$$

En supposant toujours que toute l'énergie reçue par la glace sert uniquement à la fonte, mais en tenant compte du coefficient de partage K :

$$h = \frac{K \mu_h \sigma_n a}{\rho_i L}. \quad (D.16)$$

D.4 Distance sèche à l'avant d'un patin

Considérons un patin évoluant sur une surface de glace à la température T_0 avec une vitesse V sous une contrainte normale nominale σ_n . Toute l'énergie produite par le frottement est supposée s'évacuer par conduction dans la glace. Le flux de chaleur dans la glace est donné dans la zone sèche par (D.8) : $\phi_s = \mu_s \sigma_n V$, où μ_s est le coefficient de frottement en contact sec. Sous l'effet de ϕ_s supposé constant, l'échauffement d'un point de glace situé à la distance x du bord d'attaque du patin est d'après (D.5)

$$\Delta T(0, x/V) = \frac{2\phi_s}{\lambda_i} \sqrt{\frac{\alpha_i x}{\pi V}}, \quad (\text{D.17})$$

avec λ_i et α_i la conductivité et diffusivité thermiques de la glace.

La surface de la glace atteint le point de fusion à la température T_f quand $\Delta T(0, x/V) = T_f - T_0$, donc après une distance sèche

$$x_s = \frac{\pi V}{\alpha_i} \left(\frac{(T_f - T_0)\lambda_i}{2\phi_s} \right)^2 = \frac{\pi}{\alpha_i V} \left(\frac{(T_f - T_0)\lambda_i}{2\mu_s \sigma_n} \right)^2. \quad (\text{D.18})$$

D.5 Echauffement du sol dû au passage d'un pneu

D.5.1 Modifications des formules

Dans le cas d'un pneumatique, la longueur du patin a est à remplacer par la longueur de l'empreinte. Les formules précédentes ne sont alors valables que si le véhicule est en roue bloquée. En général, le taux de glissement g_V n'est pas égal à 1 et il faut faire intervenir les deux vitesses V (vitesse de glissement) et V_0 (vitesse du véhicule) et les équations du paragraphe précédent sont modifiées.

En effet, dans le cas du pneu, le temps de passage de l'empreinte au dessus d'un point de la surface de glace dépend non plus de la vitesse de glissement mais de celle du véhicule (V_0). En revanche, la puissance dissipée due au frottement s'exprime toujours en fonction de la vitesse de glissement V . En particulier, la relation (D.14) pour le flux nécessaire à la fonte devient :

$$\phi_m = \rho_i L h V_0 / a. \quad (\text{D.19})$$

D.5.2 Aucun flux de chaleur dans le pneu

Dans le cas où le flux de chaleur évacué par conduction dans le pneu est négligeable, l'échauffement de l'empreinte à l'abscisse x est obtenu en remplaçant t par x/V_0 dans (D.17) :

$$\Delta T(0, x/V_0) = \frac{2\phi_s}{\lambda_i} \sqrt{\frac{\alpha_i x}{\pi V_0}}. \quad (\text{D.20})$$

Dans la zone sèche, le flux dans la glace est toujours donné par

$$\phi_s = \mu_s \sigma_n V. \quad (\text{D.21})$$

La distance sèche sous un pneu en négligeant la conduction dans le pneu est

$$x_s = \frac{\pi V_0}{\alpha_i} \left(\frac{(T_f - T_0)\lambda_i}{2\phi_s} \right)^2 = \frac{\pi V_0}{\alpha_i} \left(\frac{(T_f - T_0)\lambda_i}{2\mu_s \sigma_n V} \right)^2. \quad (\text{D.22})$$

D.5.3 Conduction dans le pneu

En tenant compte des propriétés thermiques du pneu (référéncé par l'indice 2) et du sol (référéncé par l'indice 1), l'échauffement d'un point du sol après le passage d'une longueur x de l'aire de contact est d'après (D.11) :

$$\Delta T(0, x/V_0) = \frac{2\mu_s \sigma_n V}{e_1 + e_2} \sqrt{\frac{x}{\pi V_0}}. \quad (\text{D.23})$$

Sur une chaussée glacée, si l'aire de contact sous le pneu est formée d'une zone sèche en avant avec un flux thermique constant $\phi_s = \mu_s \sigma_n V$, la glace s'échauffe de sa température initiale T_0 à la température de fusion T_f après une distance sèche x_s . D'après (D.23), on a

$$x_s = \pi V_0 \left(\frac{(T_f - T_0)(e_1 + e_2)}{2\mu_s \sigma_n V} \right)^2. \quad (\text{D.24})$$

Annexe E

Annexe à l'étude bibliographique du frottement sur la glace

E.1 Origine du frottement sec sur la glace selon Makkonen (1994)

Makkonen (1994) a interprété la force de frottement sur la glace comme le flux d'énergie nécessaire pour former l'interface des aspérités en contact. Rappelons que l'énergie de surface γ , nommée aussi *tension superficielle*, résulte des forces d'attraction moléculaire. Elle représente la quantité d'énergie nécessaire pour créer une unité d'aire de surface libre. Lorsqu'une aspérité frotte sur une surface plane, si l'énergie de surface du plan est supérieure à l'énergie de l'interface, de l'énergie est libérée sous forme de chaleur à l'avant de l'interface et de l'énergie est requise à l'arrière de la zone de contact pour recréer la surface plane. Cette énergie est prise à l'énergie cinétique du corps en mouvement, ce qui génère une force de frottement.

Makkonen (1994) a considéré un patin de glace rugueux frottant à la vitesse V sur une surface plane rigide indéformable. Le patin de glace (référéncé par l'indice i) est formé de N aspérités rectangulaires de longueur a et de largeur b et a une énergie de surface γ_i . Le substrat (référéncé par l'indice 1) a une énergie de surface γ_1 . L'énergie d'interface entre les deux matériaux est $\gamma_{i,1}$. Le modèle suppose que la glace ne change pas de forme et qu'il n'y a pas de fonte.

Le flux d'énergie requis pour que les aspérités passent d'une énergie de surface $\gamma_{i,1}$ à une énergie de surface γ_1 est $NbV|\gamma_1 - \gamma_{i,1}|$. Ce flux d'énergie est égal à la puissance dissipée lors du frottement $F_t V$. F_n est supporté par l'aire de contact réelle Nab . Lors de la déformation plastique de la glace, $\sigma_n = F_n/(Nab)$ est égale à la dureté d'indentation H de la glace et μ est calculé comme

$$\mu = F_t/F_n = \frac{|\gamma_1 - \gamma_{i,1}|}{Ha} \quad (\text{E.1})$$

En supposant en outre que les énergies de surface sont équivalentes pour la glace et l'eau, l'équation de Young-Dupré donne $\gamma_{i,1} + \gamma_i \cos(\theta) = \gamma_1$, où θ est l'angle de contact d'une goutte d'eau déposée sur le matériau 1. La mesure de θ permet alors d'évaluer μ .

D'après cette théorie du frottement sec, μ augmenterait avec une augmentation $|\gamma_1 - \gamma_{i,1}|$, une diminution de la dureté H du matériau le plus mou ou une diminution de la longueur des aspérités a . Si a est constante, μ vérifie les lois d'Amontons et Coulomb (§ 1.1). D'après Makkonen (1994), le processus du frottement sec glace/glace s'effectuerait à l'échelle moléculaire ou à l'échelle du réseau cristallin et serait relié aux dislocations dans le réseau cristallin de la glace: les structures de plus grande échelle (taille des grains, aire de contact nominale) n'influenceraient pas le frottement sec. La décroissance du frottement glace/glace avec une augmentation de température observée expérimentalement s'expliquerait par la dépendance de a et de H avec la

température (quand la température augmente, par apparition de la fonte et assouplissement de la glace, a et H augmentent).

E.2 Etude de l'échauffement sous un pneu de camion par Hayhoe et Shapley (1982)

Hayhoe et Shapley (1982) ont expliqué les différences entre les performances de freinage des voitures de tourisme et des camions. En général, la composition des bandes de roulement utilisées pour des pneus de poids lourds est conçue pour une bonne résistance à l'abrasion. Quand les performances à l'usure augmentent, celles au glissement diminuent, c'est pourquoi les pneus de poids lourds ont souvent une moins bonne performance au freinage que les pneus tourisme. De plus la σ_n trois fois plus grande des pneus poids lourds peut être un facteur supplémentaire de réduction du frottement sur glace. L'application numérique de (2.40) indique que le frottement augmente la température suffisamment pour fondre la glace après une courte distance dans l'empreinte, les autres facteurs (sculpture de la bande de roulement, longueur de l'empreinte, force de frottement dans la zone sèche, contamination des deux surfaces, etc.) compliquant bien sûr ce résultat.

E.3 Différents modes de lubrification

Comme l'a souligné Veith (1996a,b, 1998), les deux modes principaux du frottement lubrifié sont définis par la valeur de deux pressions: P_C pression de contact et P_L pression du fluide. La *lubrification par couche limite* (Fig. 2.27-a) intervient quand un élément de la bande de roulement se retrouve en contact intime avec une aspérité du sol, à faible vitesse et épaisseur d'eau de l'ordre de quelques couches moléculaires. La *lubrification élastohydrodynamique* existe pour de très grandes vitesses relatives et une épaisseur d'eau de l'ordre du dixième de millimètre (Fig. 2.27-b). Un élastomère glissant sur une surface dure à grande vitesse subit alors une élévation hydrodynamique causée par la pression du lubrifiant P_L et une déformation élastique de l'élastomère souple due à la surpression: les deux surfaces sont physiquement séparées et la charge du pneu dans ce mode est limitée par P_L .

Un autre phénomène intervient sous un pneu roulant sur une surface humide: l'*effet d'éponge* (Fig. 2.28-a). Quand un élément de la bande de roulement approche une rugosité de la chaussée, la pression P_L augmente et retarde le contact. Une durée finie de portance, de l'ordre de quelques millisecondes, est nécessaire pour éliminer toute l'eau et atteindre un contact à P_C . Aux faibles vitesses, la durée de transition d'un élément de la bande de roulement à travers l'empreinte est plus long que la durée de portance, c'est la lubrification par couche limite. Quand la vitesse de glissement augmente, P_C reste constante puis décroît rapidement, au contraire P_L augmente avant d'atteindre un plateau élevé (Fig. 2.28-b). Pour des vitesses élevées, les deux durées peuvent être du même ordre de grandeur, c'est la lubrification élastohydrodynamique. Pour des vitesses moyennes, les lubrifications par couche limite et élastohydrodynamique existent simultanément.

E.4 Influence d'impuretés dans la glace

Avec le dispositif expérimental de la figure 2.22, Roberts et Lanes (1983) ont évalué l'effet de différents sels de concentration 0,1 mol/l sur le μ élastomère-glace à 0,1 mm/s (Fig. 2.37). La transition de frottement est toujours observée pour une température proche de l'eutectique du mélange sel-eau. Les auteurs ont observé une décroissance de μ quand la piste de glace

devient plus âgée, ceci pourrait s'expliquer par une concentration plus élevée de contaminants ioniques à la surface. Quand de l'eau contenant des substances ioniques gèle, les impuretés ne sont généralement pas incorporées au cristal de glace, mais sont rejetées et accumulées aux joints de grain; les propriétés électriques et mécaniques de la glace en surface sont modifiées. Sur une glace formée à partir d'eau pure, μ dépend fortement de V (alors qu'il est indépendant de V sur une glace salée) et le gradient de μ en fonction de la température est moins marqué: le changement de la structure de surface est donc plus progressif pour de la glace pure que pour de la glace salée.

Quand la concentration en impuretés est faible, Shimizu *et al.* (1994) ont prouvé avec un volant intérieur que μ diminue avec une augmentation de la conductivité de la glace (évaluée à partir de celle de l'eau recueillie après la fonte de la surface de la glace due au passage du pneu). Par ailleurs, Shimizu *et al.* (1992) ont aussi utilisé le volant intérieur pour étudier l'influence sur le frottement de la microrugosité de la glace (présente sur toute surface de glace non polie) et de sa macrorugosité (créée par exemple par le grattage des pneus cloutés). Ils ont montré que sur glace lisse et froide, l'effet de la forme et de la taille des cristaux est nette (car le phénomène dominant est l'adhésion), mais est réduit par les effets de la macrorugosité.

Dans l'objectif d'optimiser le sablage des chaussées, Blaisdell et Borland (1992) ont évalué le frottement de patins d'élastomères sur de la glace propre, recouverte de sable ou contenant du sable incorporé dans la couche de surface. Les auteurs n'ont pas pu expliquer les évolutions observées: le frottement était meilleur pour la glace nue que pour celle recouverte de sable et il augmentait avec la proportion de sable de diamètre inférieur à 0,2 mm incorporé dans la masse.

E.5 Effet de la sculpture du pneu

Les lamelles sont aujourd'hui utilisées par tous les manufacturiers pour les pneus hiver afin d'améliorer les performances d'adhérence sur chaussée verglacée. Même si Blaisdell et Rogers (1986) n'ont constaté aucune amélioration de μ après lamellisation de pneus, de très nombreux auteurs ont prouvé l'effet bénéfique des lamelles. Un volant intérieur a permis d'étudier l'effet de la densité de lamellisation (Yamaguchi *et al.*, 1998; Yamazaki *et al.*, 2000).

Hiroki et Horiuchi (1994) ont utilisé le volant intérieur pour étudier les forces de frottement et l'effet de raclage des arêtes des pains et lamelles sur la glace (Fig. 1.19). Pour chaque essai, le volant est maintenu à vitesse constante et le pneu est freiné: μ augmente en fonction de la vitesse de glissement V jusqu'à μ_{max} puis décroît jusqu'à $\mu_{bloqué}$. Pour une vitesse inférieure à 10 km/h et une température supérieure à -3°C , les pneus à ribs (caractérisés par une grande aire de contact) ont des μ_{max} élevés car l'adhésion est prédominante. Entre 20 et 40 km/h, les pneus à lamelles ont les μ_{max} les plus élevés. En effet, au voisinage de 0°C , le raclage au sol par les arêtes des lamelles et l'évacuation de l'eau augmentent μ_{max} . Entre μ_{max} et $\mu_{bloqué}$, μ diminue continûment en fonction de la vitesse, sauf en présence de lamelles. Les auteurs ont remarqué que $\mu_{bloqué}$ varie en fonction de V au voisinage de 0°C car il est dû au raclage des arêtes, lui-même dépendant de V : les lamelles augmentent beaucoup $\mu_{bloqué}$, particulièrement vers 0°C . Les pains donnent $\mu_{bloqué}$ plus élevé que les ribs, mais les ribs lamellisés donnent $\mu_{bloqué}$ plus grand que les pains lamellisés grâce à plusieurs causes: la longueur totale d'arête des ribs est importante et la flexion des pains lamellisés au freinage diminue l'aire de contact (alors que les ribs lamellisés gardent un bon contact).

Il existe un nombre optimum de lamelles au dessus duquel μ retombe. Sakamoto et Hirata (1993) ont montré que ce phénomène est relié à la déformation des pains de la bande de roulement. Il existe une interaction entre la souplesse de l'élastomère et la rigidité du pain frottant sur la glace: μ augmente avec la souplesse de l'élastomère, uniquement quand l'élastomère reste

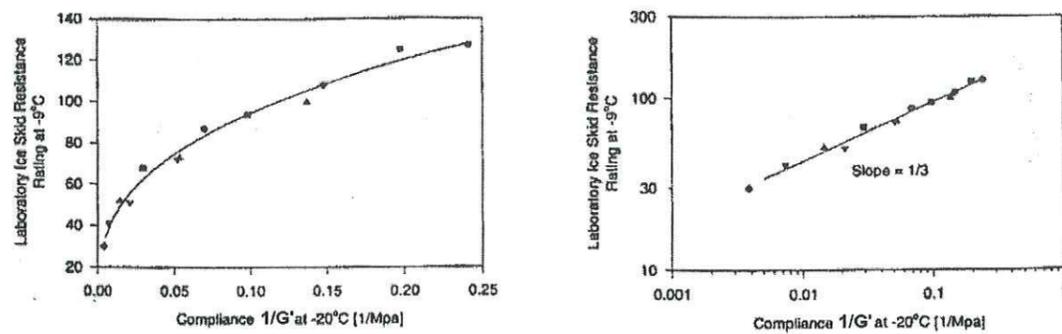


Fig. E.1 – Corrélation entre le frottement de plusieurs élastomères par rapport à un mélange témoin et la souplesse $1/G'$ en échelles normale et logarithmique (Futamura, 1996).

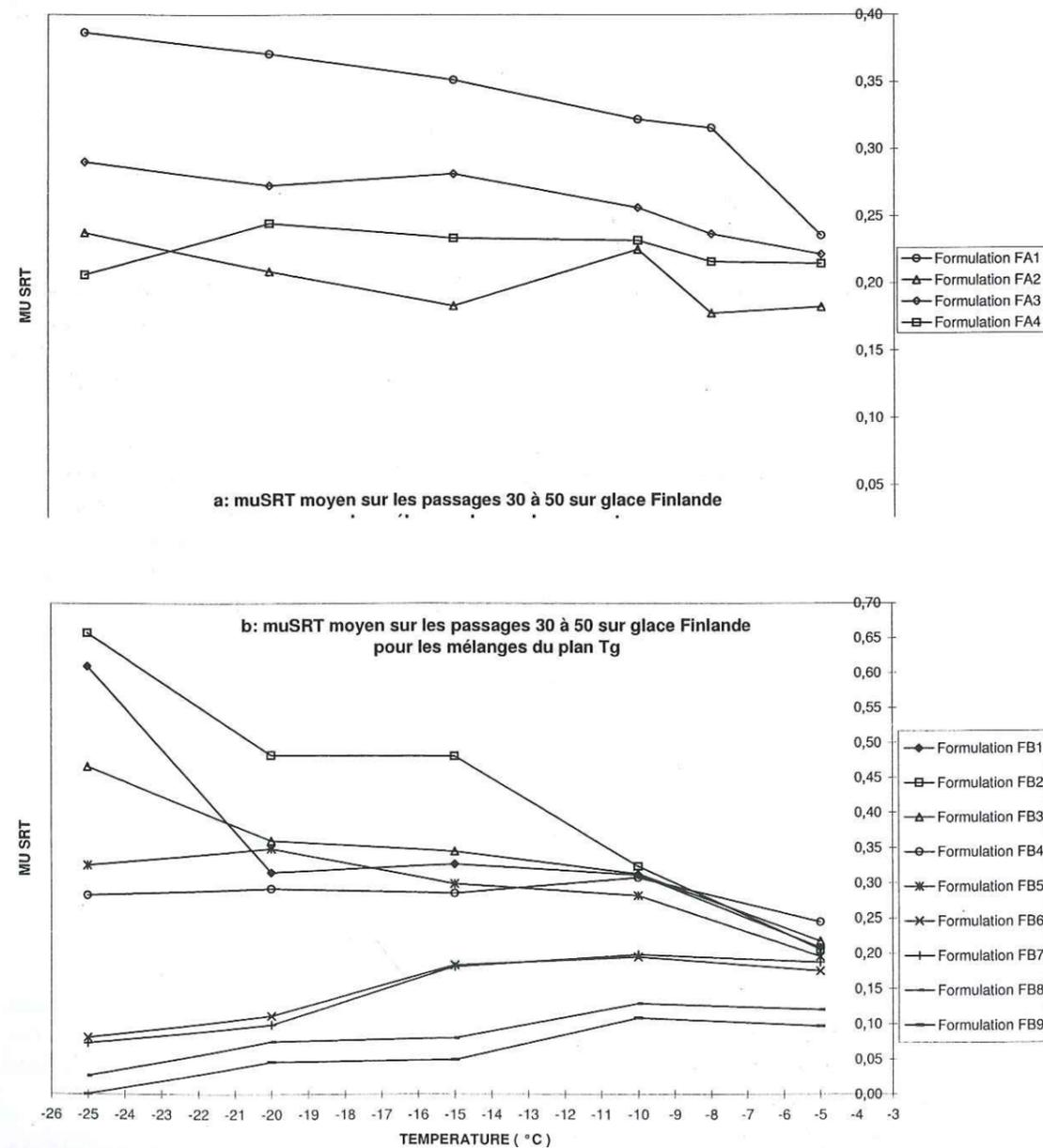


Fig. E.2 – Résultats obtenus avec le SRT pour des mélanges de marche courante et du plan T_g (Lenoël, 1998).

en contact continu avec la glace. Quand le contact avec la glace est assuré par de petits blocs de bande de roulement entre les lamelles, la déformation des blocs modifie l'aire de contact réelle. Pour un patin de longue dimension verticale, Sakamoto et Hirata (1993) ont montré que le frottement s'améliore avec un élastomère souple, mais décroît quand l'élastomère devient trop souple. Pour un bloc de taille donnée, il existe un optimum de la souplesse de l'élastomère, qui augmente avec σ_n . L'ajout de fibres courtes dans les pains de la bande de roulement permet d'empêcher la déformation. Un mélange très souple contenant des fibres bien orientées améliore l'effet de l'adhésion, tout en gardant une bonne aire de contact (Prevorsek *et al.*, 1992). Par ailleurs, la rigidité longitudinale d'un pneu doit rester élevée car la performance de montée en pente en dépend directement (Yamazaki *et al.*, 1998).

E.6 Influence des propriétés de l'élastomère sur le frottement sur la glace

E.6.1 Influence des propriétés viscoélastiques

E.6.1.1 Souplesse $1/G'$

Avec le SRT, Futamura (1996) a étudié les effets des propriétés viscoélastiques sur le frottement sur glace. Il a observé une bonne corrélation entre le frottement des composés (exprimé relativement à un mélange témoin) et $1/G'$ à une température fixée : en échelles logarithmiques, le frottement à -9°C augmente avec une pente $1/3$ en fonction de $1/G'$ à -20°C (Fig E.1). La température de mesure de G' joue un rôle important ; la meilleure corrélation est obtenue en mesurant G' à environ 10°C sous la température de la mesure SRT. Ce phénomène s'explique par l'équivalence temps-température soulignée par la relation de WLF (§ 1.2.1.7). En effet, G' est mesuré à une fréquence de 1 Hz alors que la fréquence de sollicitation correspondant au pendule SRT est d'environ 23 Hz (l'éprouvette de gomme parcourt 127 mm à une vitesse proche de 3 m/s, donc en $4,2 \cdot 10^{-2}$ s) : une diminution de la température de mesure de G' équivaut à une augmentation de la fréquence de sollicitation vis-à-vis du comportement viscoélastique.

Il a montré qu'il n'existe aucune corrélation entre le frottement des composés (exprimé relativement à un mélange témoin) et leurs propriétés d'hystérèse à une température fixée.

Beaucoup d'auteurs ont souligné que le frottement sur glace et les propriétés d'hystérèse du composé (i.e. $\tan \delta$, G'') ne sont pas liées (e.g. Roberts *et al.*, 1989; Takino *et al.*, 1991; Ahagon *et al.*, 1988; Futamura, 1996). Le procédé de dissipation d'énergie impliquerait donc la glace et le cisaillement du film de QLL au passage du patin. Futamura (1996) justifie le cisaillement du film visqueux et la relation entre le frottement et $1/G'$ par trois remarques.

- Le cisaillement du film visqueux requiert un bon contact entre le caoutchouc et la glace (i.e. un élastomère souple permettant de mieux suivre les rugosités de la surface de la glace). Le frottement augmente avec $1/G'$, donc avec A_n d'après §1.1.8.
- En petites déformations, d'après le modèle de Hertz (§ 1.1.2), l'aire de contact entre une sphère maintenue sur un plan par un effort normal F_n est proportionnelle à $(F_n/G')^{2/3}$. En grandes déformations, l'aire de contact peut être saturée et reste alors constante. Expérimentalement, Futamura (1996) a obtenu un frottement proportionnel à $G'^{-1/3}$ et a conclu que la sollicitation est entre un état de petites et de grandes déformations.
- L'accord avec ses résultats expérimentaux pourrait être obtenu si la QLL n'est pas un fluide newtonien mais un fluide qui obéit à une loi puissance en $n = 2/3$.

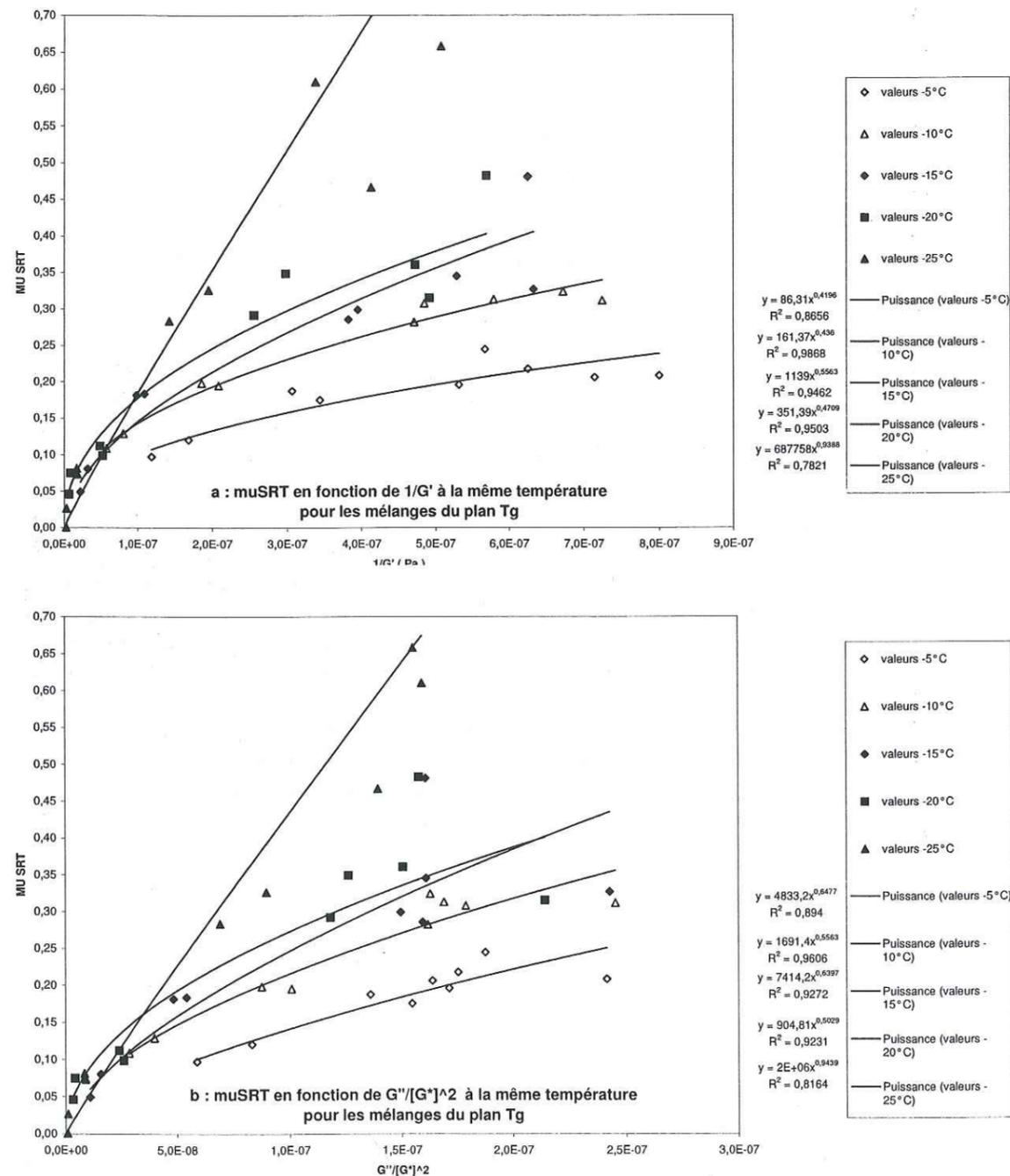


Fig. E.3 - Corrélation entre μ_{SRT} et les propriétés viscoélastiques des mélanges du plan T_g (Lenoël, 1998).

E.6.1.2 Effet de la température de transition vitreuses T_g

Nous avons évalué l'effet des propriétés viscoélastiques du mélange sur μ_{SRT} (Lenoël, 1998). Le premier plan d'expérience, effectué avec des mélanges de marche courante (formulations FA1 à FA4) de caractéristiques viscoélastiques très différentes, a permis de fixer le protocole expérimental suggéré par Dubus (1997). Le deuxième plan d'expérience comportait des formulations d'étude (FB1 à FB9) afin d'évaluer principalement l'effet de T_g : ces mélanges avec T_g entre -60 et -15 °C ne sont en aucun cas des mélanges commerciaux (la valeur -40 °C pour T_g est considérée comme le meilleur compromis entre les différentes propriétés d'un pneu).

Les résultats des mélanges de marche courante sont cohérents avec le classement des pneus réels (Fig. E.2(a)). Le mélange FA1 est le mélange de référence habituellement utilisé pour les bandes de roulement de pneus hiver et présente les meilleures performances de comportement et de freinage sur glace. Le mélange FA2 correspond à un pneu à très bonnes performances sur neige humide. Le mélange FA3 est la référence habituelle pour les pneus neige, FA4 en est une variante légèrement plus rigide. Les mélanges sont peu discernables à -5 °C car le niveau de μ_{SRT} est alors imposé par le comportement de la glace.

Pour une température donnée, les mélanges du deuxième plan d'expérience sont classés en μ_{SRT} croissant à peu près par valeur de T_g décroissante (Fig. E.2(b)): FB8 et FB9 ont une T_g élevée proche de -15 °C et frottent peu; FB6 et FB7 ont une T_g d'environ -22 °C; les 3 compositions de T_g proche de -40 °C donnent un μ_{SRT} moyen; les compositions présentant μ_{SRT} le plus élevé sont FB2 et FB3 qui ont une T_g d'environ -60 °C. Sur glace froide, l'effet T_g est le paramètre le plus important (cf. Ahagon *et al.* (1988)), mais il devient négligeable au dessus de -10 °C: à -5 °C, des mélanges de T_g très différents sont indissociables s'ils restent dans le domaine caoutchoutique. En revanche, près de T_g , la nature de l'élastomère influence la valeur de μ_{SRT} même sur glace chaude: FB8 et FB9 ont une T_g de -15 °C et frottent bien moins à -5 °C que les autres mélanges à cause de la proximité du domaine vitreux.

L'effet T_g se manifeste aussi d'une autre façon, pour les mélanges dont la plage de température de manipulation encadre T_g : μ_{SRT} est faible dans le domaine vitreux et élevé dans le domaine caoutchoutique. Ainsi, le frottement des mélanges FB8 et FB9 de T_g environ -15 °C augmente quand la température augmente au dessus de T_g ; de même, le passage de T_g de FB6 et FB7 à -22 °C augmente le frottement. A haute température, le frottement des mélanges souples à T_g assez faible (i.e. FB1 et FB2) décroît beaucoup, alors que les mélanges à T_g élevé sont moins pénalisés: en fait, les mélanges à T_g élevé (i.e. FB8 et FB9) donnent μ_{SRT} assez faible, mais à peu près indépendant de la température.

Pour des élastomères de même T_g , μ_{SRT} augmente quand G' diminue (e.g. FB3, plus souple que FB4, frotte plus). En règle générale, deux mélanges de mêmes T_g et G' ont des valeurs de μ_{SRT} distinguées par leur hystérèse: celui ayant G'' plus élevé frotte davantage. L'effet T_g est d'autant plus marqué à basse température que le mélange est souple: par exemple, avec T_g proche de -60 °C, FB2 frotte beaucoup plus que FB3 à basse température, alors qu'il est seulement très légèrement plus souple.

Pour les deux programmes d'essais, μ_{SRT} augmente avec $1/G'$ (Fig. E.3(a)), mais nous n'avons pas obtenu de corrélation nette avec son logarithme comme Futamura (1996). Aucune corrélation n'existe entre μ_{SRT} et $\tan \delta$, comme cela avait été souligné par Futamura (1996). Les résultats ont montré que l'index G''/G'^2 utilisé par les formulateurs de bande de roulement est judicieusement choisi (Fig. E.3(b)).

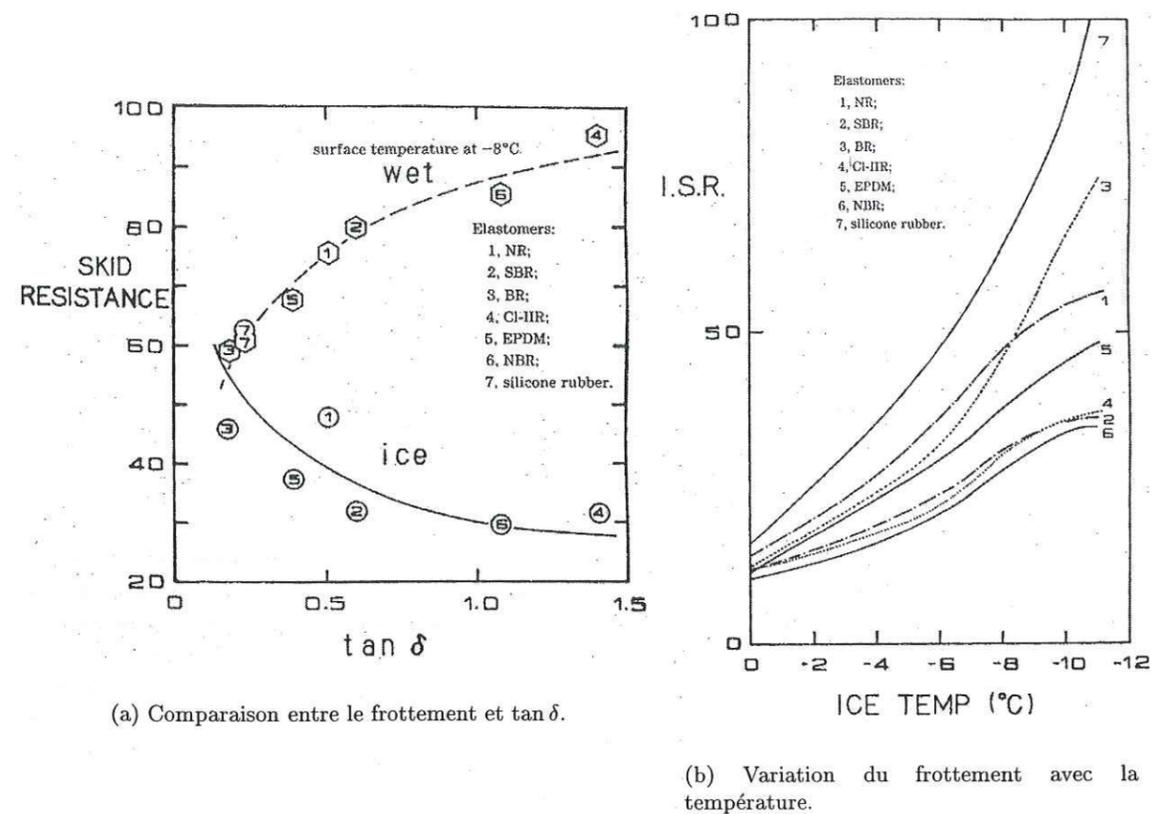


Fig. E.4 - Mesures de frottement sur glace avec le SRT (Ahagon et al., 1988).

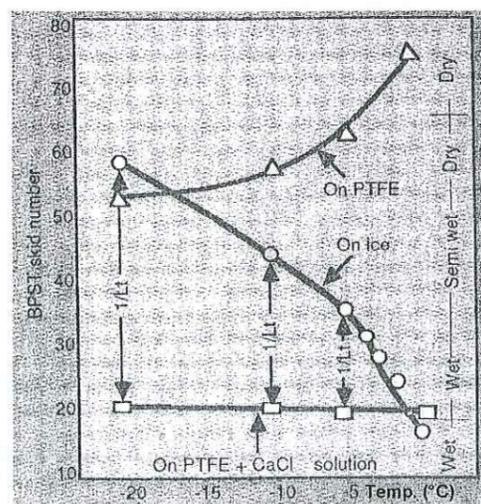


Fig. E.5 - Evolution du frottement avec la température pour du S-SBR sur le PTFE et la glace (Takino et al., 1991).

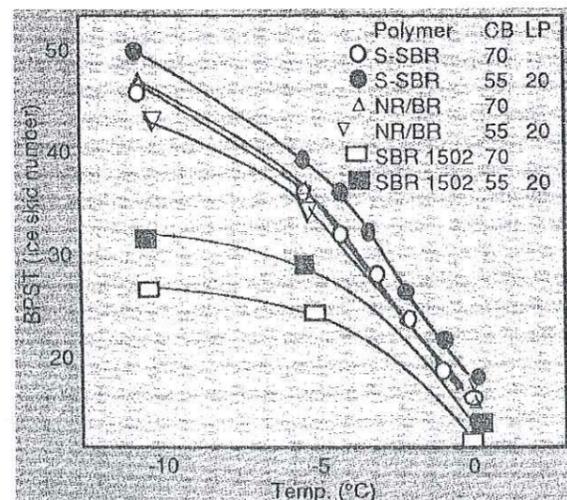


Fig. E.6 - Evolution du frottement avec la température pour plusieurs composés avec des proportions de charge en cuir différentes (Takino et al., 1991).

E.6.2 Intérêt du caoutchouc naturel

Les composés les plus souples (G' faible) avec la plus forte hystérèse (G'' élevé) ont le plus grand frottement sur la glace de -20 à 0 °C (Venkatesh, 1975; Futamura, 1996; Lenoël, 1998). Les meilleures performances de traction sur glace sont obtenues avec les bandes de roulement en élastomères à basse T_g , tels que le caoutchouc naturel et le cis-polybutadiène avec des ramollissants spécifiques (Ahagon et al., 1988).

Newell (1990) et Newell et Wallace (1995) ont étudié les conséquences du remplacement du OESBR par du OENR (cf. § 1.2.1.8) dans les bandes de roulement des pneus de voitures en termes économiques et en performances (usure, résistance au roulement et traction sur glace). En particulier, le caoutchouc naturel a une meilleure traction sur la glace que le SBR. Des études ont même montré un comportement meilleur sur glace avec des pneus non cloutés en OENR que des pneus cloutés en OESBR (Horiuchi, 1991).

E.6.3 Huiles ramollissantes et plastifiants

Ahagon et al. (1988) ont utilisé le pendule SRT pour mesurer le frottement sur la glace. Le frottement de l'élastomère sur une surface sèche ou mouillée augmente d'abord à cause des pertes hystériques de l'élastomère causées par les vibrations quand l'éprouvette glisse sur la surface. Au contraire, le frottement sur glace diminue pour des $\tan \delta$ élevés (Fig. E.4(a)). Sur glace, à -20 °C, μ_{SRT} augmente nettement quand G^* augmente mais n'est pas du tout corrélé avec $\tan \delta$. Des tests de freinage sur pneu ont abouti aux mêmes conclusions. Le facteur principal semblant contrôler le frottement sur glace est donc la souplesse de l'élastomère $1/G'$, et non pas l'hystérèse G'' (même si une hystérèse élevée est toujours préférable).

Puisque le processus de perte d'énergie ne relève pas de l'hystérèse de la gomme, les auteurs ont conclu qu'il intervient dans la glace. Contrairement à de l'eau sur un solide humide, le drainage de la QLL sur la surface de la glace est extrêmement difficile: par rapport à la viscosité de l'eau à 0 °C, celle de la QLL est environ dix fois supérieure à -1 °C et vingt fois supérieure à -2 °C. Si la principale source de frottement est le cisaillement de la couche visqueuse, le frottement est proportionnel à l'aire de contact réelle par (C.3). La nature de l'élastomère influence la valeur de A_r et la figure E.4(b) soutient la théorie du frottement lubrifié: afin de suivre au plus près la topographie de la surface, il est préférable pour l'élastomère d'avoir un angle de phase δ faible.

Les principaux additifs d'une bande de roulement sont les charges et les huiles ramollissantes. Un simple ajout de charges sans augmentation d'huiles ramollissantes durcirait l'élastomère et provoquerait une diminution de la traction sur glace. Lors des mesures de Ahagon et al. (1988), le module $|G^*|$ diminue quand la teneur en huile augmente: quelle que soit la teneur en noir de carbone, le frottement augmente rapidement avec la teneur en huile jusqu'à 17 phr, puis se stabilise. L'explication est simple: sous F_n fixé, A_r augmente avec la teneur en huiles ramollissantes, mais cette augmentation est finie, donc l'amélioration du frottement par augmentation de la teneur en huiles ramollissantes est aussi finie.

Les auteurs ont aussi effectué des mesures de μ_{SRT} pour différents types et teneurs en plastifiants synthétiques. Quand plusieurs plastifiants sont mélangés, le paramètre de solubilité du mélange est calculé d'après les caractéristiques de chaque plastifiant (fraction volumique, masse spécifique, constante d'attraction moléculaire et poids moléculaire). Ce paramètre présente une bonne corrélation avec μ_{SRT} , ainsi qu'avec $|G^*|$ et $\tan \delta$.

E.6.4 Teneur en azote

Roberts et al. (1989); Pitrola et al. (1993) ont souligné l'effet de la teneur en azote dans le

caoutchouc de la bande de roulement sur le frottement sur la glace. La présence de matériaux azotés naturels tels que les protéines (qui sont d'ailleurs responsables en grande partie du contenu en azote du caoutchouc naturel) peut augmenter le frottement sur la glace. Des mesures de μ de plusieurs mélanges avec le pendule SRT et le dispositif expérimental de la figure 2.22 ont montré qu'un haut niveau en azote favorise le frottement. L'augmentation de la résistance au glissement était particulièrement visible à -18°C mais restait visible même à -4°C (sur glace chaude, le frottement dépend beaucoup de la présence d'un fin film d'eau sur la glace et tient faiblement compte des propriétés de l'élastomère). L'utilisation de compositions d'élastomères contenant du caoutchouc naturel avec un niveau de matériaux azotés plus haut que la normale (e.g. l'élastomère de skim) pourrait donc fournir des bandes de roulement de pneus hiver avec des performances améliorées sur neige et glace.

E.6.5 Charges

Soeda et Kurata (1996) ont montré l'effet des charges en noir de carbone sur les propriétés morphologiques et chimiques du mélange, sur le frottement et sur l'usure des pneus. Par exemple, la résistance à l'usure augmente quand la taille moyenne et la largeur de la distribution des particules de noir de carbone diminuent ou quand le degré de dispersion augmente. En revanche, elle décroît quand la proportion de particules de taille supérieure à $1\ \mu\text{m}$ augmente.

L'intérêt de remplacer une partie ou la totalité de la charge en noir de carbone par de la silice pour améliorer μ , sans dégradation des autres performances est aujourd'hui largement prouvé (Roberts *et al.*, 1989; Evans et Waddell, 1995). La raison souvent avancée est que la silice augmente la souplesse de la formulation. Derham *et al.* (1988) ont souligné que l'amélioration apportée par le remplacement du noir de carbone par de la silice ne s'exprime que pour des températures supérieures à -20°C . Après avoir effectué la même constatation, Maksimova et Sizikov (1999) ont remarqué que puisque le frottement d'un pneu sur la glace dépend de l'adhésion de l'élastomère sur la QLL, l'amélioration du frottement avec la silice peut s'expliquer par le caractère plus hydrophile de la silice par rapport au noir de carbone.

E.6.6 Fibres de collagène

Takino *et al.* (1991) ont évalué le frottement de mélanges avec fibres de collagène, en remplaçant une partie du noir de carbone par une poudre de cuir. Avec le pendule SRT, le frottement sur glace et sur PTFE est presque le même à -20°C (Fig. E.5). Le frottement sur glace est très faible près de 0°C mais augmente rapidement par diminution de la température. Au contraire, sur du PTFE, il est très élevé près de 0°C mais décroît avec une diminution de température. Sur du PTFE recouvert avec une couche d'une solution de CaCl qui ne gèle pas encore à -20°C , le frottement est aussi faible qu'avec la surface de glace à 0°C et varie peu avec la température.

Les dépendances en température de G' et G'' du cuir sont très faibles et indépendantes de la fréquence de sollicitation. La mouillabilité du cuir est très élevée grâce à sa haute polarité. Une proportion de 20 phr de poudre de cuir augmente μ_{SRT} de la gomme sur la glace entre -20 et 0°C (Fig. E.6) et permet une augmentation de μ_{SRT} d'environ 7 à 10 % entre -5 et 0°C . En revanche, une proportion de poudre de cuir supérieure à 40 phr améliore μ_{SRT} seulement sur la gamme de température entre -20 et -10°C . Des essais de freinage à -5°C sur voiture équipée de pneus contenant 20 phr de poudre de cuir ont révélé une amélioration de la distance de freinage de 10 % (i.e. du même ordre de grandeur que celle mesurée au SRT).

E.6.7 Choix d'un matériau de bande de roulement hiver

Le développement des pneus hiver, dont l'historique a été tracé par Roberts (1992), a tiré parti des différentes découvertes effectuées sur les mécanismes de frottement élastomère-glace. D'après Ishikawa (1998), l'adhésion est la principale source de frottement entre l'élastomère de la bande de roulement et la surface de la route gelée: la bande de roulement doit suivre aisément les micro-irrégularités de la route afin de permettre un bon contact microscopique. Il est donc essentiel de rendre l'élastomère souple aux basses températures: le frottement sur glace augmente quand G' décroît, résultat classique et bien éprouvé. Comme l'a souligné Sakamoto et Hirata (1993), il faut utiliser des polymères avec de basses T_g grâce aux huiles ramolissantes et le renforcement est obtenu par des plastifiants à basse température (Fig E.7).

Les théories diffèrent quant à savoir si la surface de l'élastomère doit avoir des propriétés hydrophiles ou hydrophobes pour améliorer le comportement du pneu. Takino *et al.* (1991) ont conseillé des propriétés hydrophiles car ils ont observé un meilleur frottement pour un élastomère incorporant de la poudre de cuir. Cependant, de nombreux brevets, déposés en particulier au Japon, concernent des mélanges hydrophobes. En fait, la divergence d'opinions peut refléter simplement les différences entre les conditions de mesure, puisque les mécanismes du frottement sur glace dépendent énormément des conditions de $T_0V\sigma_n$.

L'eau formée à la surface de la glace a une action lubrifiante et il faut donc chercher tous les moyens efficaces pour l'expulser de l'interface. La solution courante est de créer des canaux d'évacuation grâce à la sculpture. Le problème se résume à obtenir un bon contact entre l'élastomère et la glace, maximiser la surface de contact tout en créant des discontinuités à la surface de l'élastomère. Un élastomère souple améliore le frottement par adhésion; mais il est aussi utile pour éliminer la fine couche d'eau entre l'élastomère et la route s'il possède des irrégularités microscopiques en surface. Par exemple, des mesures de μ avec des élastomères abrasés par différentes tailles de papiers abrasifs ont révélé une amélioration du frottement gomme/glace si la gomme est abrasée avec des papiers abrasifs à grains épais (Ishikawa, 1998): les aspérités microscopiques formées en surface de la gomme briseraient le film d'eau, autorisant un contact direct avec la surface de glace. L'utilisation des courbes de Stribeck explique bien la relation entre la lubrification et l'effet de la rugosité de l'élastomère (Uchiyama, 1998) (Fig E.8). De nombreux brevets déposés par des Japonais concernent des formulations de mélanges appropriées pour favoriser les irrégularités de surface. Par exemple, les élastomères cellulaires améliorent le frottement car ils comportent des irrégularités microscopiques en surface (Hamada *et al.*, 1993): les alvéoles fournissent un refuge pour l'eau générée par le frottement, empêchent la formation d'un film de glace microscopique entre les lamelles, ont un effet de grattage microscopique et rendent l'élastomère plus souple à basse température.

Par l'interaction de tous ces facteurs, la formulation du mélange de l'élastomère a un effet important sur le frottement sur glace. Outre la sculpture et les clous, une combinaison optimale des propriétés de l'élastomère aboutit à un haut niveau de performance. Le principal problème pour le développement est que le frottement dépend très fortement des conditions expérimentales. Les améliorations futures devront donc tenir compte de deux paramètres: maintenir un bon niveau de frottement sous toutes les conditions de $T_0V\sigma_n$ envisageables et rechercher un équilibre avec les autres performances du pneu (par exemple l'usure).

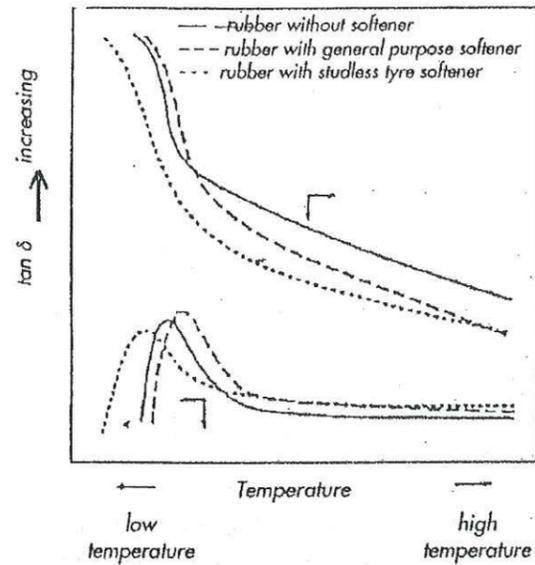


Fig. E.7 - Effet des huiles ramollissantes sur les propriétés viscoélastiques de l'élastomère (Sakamoto et Hirata, 1993).

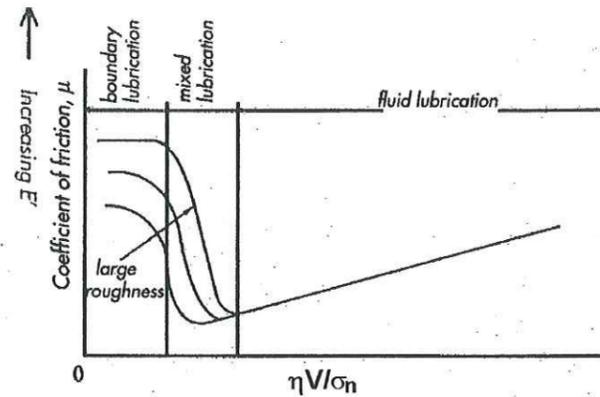


Fig. E.8 - Courbes de Stribeck: relation entre μ et la viscosité η , la vitesse V et la contrainte normale nominale σ_n (Ishikawa, 1998).

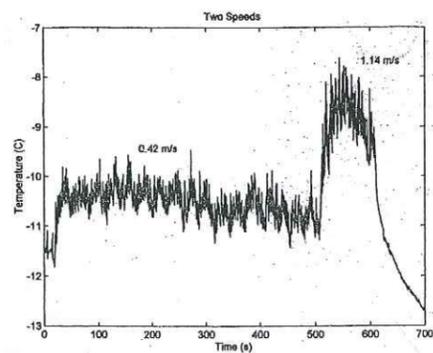


Fig. E.9 - Evolution de la température mesurée dans les patins à glace en chambre froide (Colbeck et al., 1997).

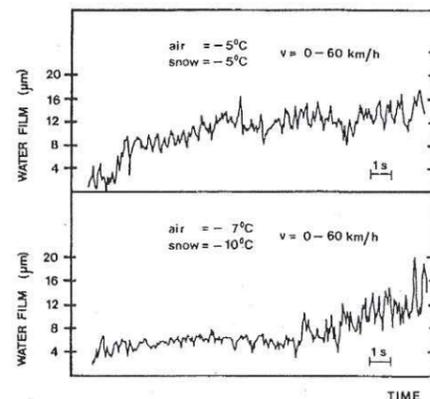


Fig. E.10 - Epaisseur du film d'eau mesurée sous un ski (Ambach et Mayr, 1981).

E.7 Observations du frottement de différents matériaux sur glace ou neige

E.7.1 Frottement à vitesses très faibles ou très élevées

E.7.1.1 Frottement glace-structure

Pour le frottement glace-granite, Barnes *et al.* (1971) ont distingué trois zones de vitesses selon le mécanisme de frottement qui gouverne : fluage de la glace pour V inférieur au $\mu\text{m/s}$, déformation plastique de la glace et rupture quand la vitesse est comprise entre le $\mu\text{m/s}$ et le mm/s , fonte par frottement pour des vitesses supérieures au mm/s . La vitesse à laquelle la fonte par frottement apparaît dépend de la température initiale de la glace, de la contrainte normale, de la rugosité de la glace et du matériau en contact.

Fiorio (2000) a effectué des mesures de frottement cyclique glace-béton à -10°C , sous σ_n entre 25 et 800 kPa, à V entre 0,1 et 10 mm/min (Fiorio *et al.*, 2001). μ diminue avec la vitesse aux vitesses élevées. μ augmente au cours du temps, signe de la maturation du contact gouvernée par la déformation viscoplastique de la glace (Tabor et Walker, 1970). Les observations optiques ont mis en évidence les mécanismes physiques à l'interface : déformation viscoplastique, adhérence, recristallisation, micro et macrofissuration. Lors des essais sous charge normale variable par paliers, le coefficient de frottement final augmente avec la vitesse.

E.7.1.2 Frottement sur un plan cristallin

Tusima (1977) a montré que lors du frottement d'une bille d'acier sur un monocristal de glace à une vitesse inférieure au mm/s , μ croît avec une augmentation de F_n , une diminution de V , ou lorsque T_0 se rapproche de 0°C . Les résultats ne peuvent pas s'expliquer par les théories de fusion par pression ou échauffement par frottement, mais ils se justifient par la théorie de l'adhésion développée par Bowden et Tabor (1950).

Tusima (1978) a observé l'anisotropie du frottement selon le plan cristallographique considéré. Pour des températures inférieures ou égales à -19°C , μ est minimum lorsque le glissement est normal au plan basal (0001) et il est maximum dans les plans parallèles à (0001). Ce résultat s'inverse pour des températures supérieures à -10°C .

E.7.1.3 Frottement à très grande vitesse

Kozlov et Shugai (1991) ont rappelé qu'il existe trois mécanismes différents selon la vitesse lors d'un frottement entre deux solides. Pour V faible, le frottement est sec et la température dans la zone de contact reste partout inférieure à la température de fusion des deux solides. Le cas de la lubrification par couche limite se présente quand la température maximale au contact atteint la température de fusion d'un des deux solides, mais que l'épaisseur de la couche fondue est inférieure aux dimensions caractéristiques des rugosités. Pour V très élevé, quand la température est partout supérieure à la température de fusion, il existe une couche liquide établie : l'épaisseur du film d'eau est alors supérieure au μm . Le dispositif expérimental de Kozlov et Shugai (1991) comprenait un anneau de métal plat en rotation sur une couronne de glace. Le modèle et les mesures s'accordent bien pour V entre 15 et 50 m/s.

Avec le même type de dispositif expérimental, Casassa *et al.* (1991) ont étudié le comportement de la neige et de la glace pour des températures T_0 entre 0 et -25°C , sous σ_n de 200 à 1300 Pa et à V de 1 à 25 m/s. Le μ glace-glace mesuré avec la cellule de cisaillement vaut

typiquement moins de 0,04. Les auteurs expliquent la décroissance exponentielle de μ avec V observée à -35°C par des effets de rugosité, alors que μ augmente linéairement avec V pour des T_0 entre -1 et -20°C . Ils utilisent le même argument pour justifier l'augmentation inattendue de μ avec une augmentation de T_0 pour V supérieur à 4 m/s , alors que μ diminue toujours avec une augmentation de T_0 pour V inférieur à 4 m/s .

E.7.2 Influence des vibrations sur μ entre plastiques et glace

Lehtovaara (1987) a observé l'influence des vibrations sur les mesures de μ obtenues avec un système pion-disque. Les sollicitations de fréquence entre $0,005$ à 1 kHz étaient transmises au patin en plastique par un vibreur. A 5 m/s et -13°C , F_t augmentait fortement avec l'augmentation de F_n entre 100 et 250 N . Les vibrations à basse fréquence réduisaient considérablement μ pour des températures inférieures à -1°C , même pour des accélérations bien plus faibles que celle de la pesanteur. Selon Lehtovaara (1987), quand le frottement sec est dominant (i.e. pour des températures basses), les vibrations réduisent la force d'adhésion ou l'effort de grattage.

Au contraire, pour des températures ambiantes positives, quand le cisaillement visqueux du film d'eau domine, les vibrations n'ont pas d'effet ou augmentent légèrement le frottement : cela suggère que les vibrations perturbent légèrement la couche d'eau et génèrent un frottement sec partiel. La réduction du frottement aux basses températures ne s'explique ni par la dépendance du frottement par rapport à l'effort normal, ni par une perte de contact généralisée (puisque l'accélération verticale reste très faible). Les vibrations influencent donc le frottement au niveau microscopique, même quand l'amplitude des vibrations reste extrêmement faible. Les paramètres mis en jeu peuvent être un changement dans les forces d'adhésion et de résistance au cisaillement, ou un changement de l'aire de contact réelle à l'échelle des rugosités de surface.

E.7.3 Effet des rugosités

Tusima et Tabata (1979) ont mesuré le μ d'un cylindre de glace appliqué sur un plan en mouvement relatif, constitué de différents matériaux avec des rugosités variables, à V de l'ordre de 10^{-7} à 10^{-2} m/s . Les résultats donnent de faibles μ , entre $0,01$ et $0,04$, pour des surfaces lisses. Au contraire, μ varie de $0,04$ à $0,24$ pour des surfaces rugueuses. μ dépend peu de σ_n , mais augmente quand V ou T_0 diminuent.

Forland et Tatinclaux (1984, 1985), Tatinclaux *et al.* (1986) et Tatinclaux et Martinson (1990) ont étudié l'effet des rugosités de surface des revêtements métalliques des ouvrages d'art et de brise-glace sur la valeur de μ sur la glace. Leur appareillage expérimental comportait un échantillon de glace mis en mouvement sur une feuille de métal de rugosité contrôlée. Les rôles pouvaient aussi être inversés (échantillon de métal en mouvement sur une surface de glace). Pour les essais à $-1,5^\circ\text{C}$, la configuration du banc de test influence les résultats : quand la vitesse de l'élément mobile augmente de 5 à 25 cm/s , μ augmente si la glace frotte sur une piste de métal lisse, mais il n'y a aucune influence de V si le métal frotte sur la piste de glace. Les valeurs de μ obtenues dans les deux configurations sont similaires à 5 cm/s . μ diminue quand les auteurs font glisser un acier rugueux ($1,5\text{ }\mu\text{m RA}$) ou qu'ils augmentent V de 5 à 25 cm/s .

Itagaki *et al.* (1987, 1989) ont étudié l'effet de la rugosité sur la décélération d'un traîneau soutenu par deux patins à glace et lancé sur une piste de glace. Les patins lisses donnent un μ plus faible à -1°C qu'à -10°C , mais le frottement de patins rugueux dépend peu de la température. Pour les patins ultra-polis, ceux de plus basse conductivité thermique glissent mieux que les autres, aussi bien à -30°C qu'à -10°C ; ce qui concorde avec la théorie de la fonte par frottement : les matériaux avec une faible conductivité thermique retiennent plus la chaleur générée par le frottement, donc la couche lubrifiante générée plus épaisse diminue μ .

Itagaki *et al.* (1987, 1989) ont identifié les phénomènes intervenant dans la perte d'énergie totale lors du frottement patin/glace. Les interactions moléculaires regroupent trois types : les interactions solide-solide, quand la glace a un contact direct avec le patin, impliquant adhésion et glissement ; les interaction solide-liquide générant une lubrification par couche à l'interface ; l'étirement visqueux, dominant dans le liquide. La déformation mécanique regroupe quatre types : les déformations élastiques de la glace éventuellement transmises au sol et à l'air via des sons et des vibrations ; le fluage plastique de la glace, important pour accommoder le patin sur la surface de glace et processus majeur de fabrication du sillon à la surface de glace ; le découpage et le broyage de la glace ; la formation de fissures. La dissipation d'énergie thermique s'effectue de deux façons : la fonte fournit une couche fluide lubrifiante ; la conduction de chaleur est un mécanisme important pour contrôler l'épaisseur du film d'eau. Les processus hydrodynamiques regroupent deux phénomènes : l'étirement visqueux et turbulent à travers la couche fluide ; l'évacuation du fluide sous pression, qui réduit l'épaisseur de la couche lubrifiante.

E.7.4 Mesure de la température d'un patin à glace

Colbeck *et al.* (1997) ont mesuré la température de patins à glace, en plaçant des thermocouples dans le patin, très près de la surface de glace (Fig. E.9). Le comportement est typique du réchauffement par frottement : il y a d'abord augmentation initiale de la température avec le début du mouvement ; puis augmentation de température avec une augmentation de la vitesse ; enfin décroissance de type exponentielle après l'arrêt du patin. L'observation de la surface de glace par caméra infra-rouge montrait le déclin des zones chaudes après le passage du patin. Des points de la piste, plus aisément réchauffés, se refroidissaient plus lentement, prouvant que la charge n'est pas répartie uniformément. Toute la largeur de la trace était au moins partiellement réchauffée. Les contraintes normales locales étaient donc plus élevées aux points chauds, mais le contact ne se limitait pas à ces zones. D'après les auteurs, les débris chauds projetés à côté de la piste pouvaient être soit des gouttelettes de liquide, soit des copeaux de glace réchauffée.

E.7.5 Mesure de l'épaisseur du film d'eau

Ambach et Mayr (1981) ont mesuré la constante diélectrique dans la zone de contact entre un ski et la neige, grâce à une capacité en forme de peigne d'une surface de 1 cm^2 fixée sous le ski. En utilisant le fait que la constante diélectrique de l'eau est bien plus élevée que celle de la glace à la fréquence de mesure adaptée, ils ont ainsi pu évaluer des épaisseurs de quelques microns. Lors d'une augmentation de V entre 0 et 60 km/h , avec une température ambiante élevée, la formation du film d'eau s'effectuait rapidement puis atteignait un palier ; avec une température plus basse, le film d'eau se formait lentement puis augmentait rapidement pour V élevé (Fig. E.10). Pour une température de la neige de -5 ou -10°C , l'épaisseur en fin de course était toujours égale à $13\text{ }\mu\text{m}$ à 60 km/h . Quand la vitesse du skieur était de 20 km/h , l'épaisseur du film d'eau diminuait de 13 à $5\text{ }\mu\text{m}$ quand la température passait de 0 à -4°C .

Jones *et al.* (1994) ont mesuré la quantité d'eau formée lors du frottement d'un patin de glace sur un plan en mouvement avec une température ambiante de $+2^\circ\text{C}$ en essuyant la glace avec un tissu absorbant qu'il pesaient avant et après la manipulation. La production d'eau était plus importante avec un plan bon conducteur thermique qu'avec un isolant et augmentait énormément entre 10 et 100 mm/s (la masse d'eau produite par seconde variait de 50 à 300 mg avec l'aluminium, de 3 à 30 mg pour du Formica). En échelle log-log, la production d'eau augmentait linéairement avec la vitesse avec une pente $1/2$, ce que les auteurs expliquaient par une augmentation de A_r entre la glace et le plan, due à l'évacuation de l'eau avec une augmentation de V .

Strausky *et al.* (1996, 1998) ont utilisé une méthode de spectroscopie par fluorescence pour

étudier l'épaisseur d'une couche d'eau de fonte. Le dispositif expérimental ne permettait pas de détecter d'épaisseurs supérieures à 50 nm, mais ceci suffisait pour l'application pratique étudiée : le frottement d'un plastique hydrophobe sur la glace ne peut faire fondre d'épaisseur plus importante dans le cas d'un ski.

Afin de diminuer le nombre d'accidents de la route en hiver, Holzwarth et Eichhorn (1993) ont proposé d'équiper les véhicules par un capteur de détection à distance de conditions dangereuses. Selon eux, l'absorption de rayons infrarouges permettrait d'évaluer l'épaisseur de l'eau sur la chaussée ou de détecter la présence de glace.

E.7.6 Frottement sur la neige

Colbeck (1988) s'est intéressé au frottement lubrifié sur neige. Il a donné une expression pour le frottement au point de fusion. Sous le point de fusion, il a considéré séparément plusieurs cas, selon les propriétés thermiques des corps et les hypothèses sur les flux de chaleur. La conduction de chaleur est supposée transitoire dans la glace et en état stationnaire dans le patin. Colbeck (1988) a tracé l'évolution de chacune des trois composantes du frottement avec l'épaisseur du film d'eau : frottement sec pour une épaisseur faible, frottement lubrifié pour une épaisseur moyenne et succion capillaire pour une épaisseur élevée.

Ces calculs ne sont sans doute valables que pour des surfaces hydrophiles car pour des surfaces hydrophobes, deux des mécanismes décrits (élimination de l'eau de l'aire de contact par cisaillement et production de chaleur par cisaillement) sont différents. Les équations expliquent de manière quantitative certaines observations : quand la taille des surfaces porteuses de charge augmente (i.e. quand la neige se transforme en glace) la composante lubrifiée du frottement décroît et le frottement diminue; μ décroît quand la température augmente. Colbeck (1988) a retrouvé les résultats de Bowden et Tabor (1950) : un ski conducteur donne μ plus élevé qu'un ski isolant, et la différence entre les deux augmente quand la température décroît.

Colbeck (1994) a étudié les différents mécanismes de frottement entre un ski et la neige. Il a souligné que les résultats expérimentaux ne sont pas applicables au ski réel car en laboratoire, les skis sont trop courts et les vitesses trop faibles : les proportions de glissement lubrifié et sec sont très différentes entre les modèles de laboratoire et les skis réels. Outre la compaction de la neige, Colbeck a étudié deux mécanismes qui interviennent aussi sur la glace.

Frottement sec : le frottement provient des déformations plastiques ou élastiques de la glace et/ou de la fracture des aspérités sur les surfaces. Les propriétés de la glace évoluent : la fluidité de la glace augmente à température élevée ; la glace est plus fragile pour des vitesses de chargement élevées ; la dureté de la glace augmente très rapidement quand la température décroît. Pour le cas du frottement pneu-glace, le caoutchouc présente aussi des variations de propriétés avec la température : il devient plus dur et hystérétique à basse température.

Réchauffement par frottement : Colbeck a repris le calcul classique d'échauffement d'un point voyant passer un flux de chaleur constant durant un temps donné. Un point du ski est en contact intermittent avec des particules de glace sphériques, alors qu'un point de la glace est en contact avec le ski sur toute sa longueur : le grain de glace se réchauffe donc beaucoup plus qu'un point du ski. Un point du ski se réchauffe et se refroidit en cycles rapides lors des mouvements du skieur de fond : il est réchauffé par paliers successifs avec une tendance croissante. En effet, tant que le mouvement continue, le cycle de refroidissement n'est jamais assez long pour que le point du ski retrouve la température ambiante.

E.8 Synthèse bibliographique

| Publication | Etude | Température (T) | Vitesse (V) | Contrainte normale nominale σ_n (Pa) | Type et surface de contact | Coefficient de frottement (μ) | Variations du μ avec T, V et σ_n | Remarques |
|-------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ahagon et al. (1988) | expérimentale | -8°C | ≈ 3 m/s | ≈ 3 bar | Gomme / glace avec le pendule SRT | Par rapport à un témoin | <ul style="list-style-type: none"> ✓ μ ↑ quand G ↓ ✓ μ varie avec la teneur en huiles ramollissantes | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Influence des propriétés viscoélastiques de la gomme |
| Akkok et al. (1987) | expérimentale et théorique | -30, -20, -10°C | 0,05 et 5 m/s | < 30 kPa | Glace / (acier, verre, Nylon), et inversement ; Plan / plan | 0,01 à 0,4 | <ul style="list-style-type: none"> ✓ μ ↑ quand T ↓ (dans le régime de contrôle thermique) ✓ μ ↑ quand σ_n ↓ | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Calcul de l'échauffement de la glace par la théorie de Block (concept de contrôle thermique) |
| Barnes et al. (1971) | expérimentale et théorique | -18,5 à 0°C | 10^2 à 10^1 m/s | | Glace / (laiton, verre, granit, acier) ; Cône de glace écrasé contre plaque | 0,05 à 0,9 | <ul style="list-style-type: none"> ✓ μ ↑ quand T ↓ ✓ Courbe en cloche de μ/V : fluage à faible V, écoulement plastique et fracture à V moyenne, film liquide dû à l'échauffement à V élevée | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Le fluage secondaire n'explique pas seul la résistance au frottement ✓ Recristallisation observée sur monocristal |
| Bowden (1953) | expérimentale | -10 et -4°C | 3cm/s et 5m/s | 1,3 à 13kPa | Patin (aluminium, PTFE, Nylon, Térylène) / glace ; 75,4 cm ² | 0,06 à 0,4 | <ul style="list-style-type: none"> ✓ μ ↑ quand T ↓ ✓ μ indépendant de σ_n, loi d'Amontons vérifiée | <ul style="list-style-type: none"> ✓ μ ↑ avec la conductivité thermique du matériau |
| Bowden et Hugues (1939) | expérimentale | -80 à 0°C | 4 m/s | < 0,2 bar | Glace / glace; 0,02 à 3,1cm ² | 0,03 à 0,06 | <ul style="list-style-type: none"> ✓ μ ↑ quand T ↓ dans les deux cas ✓ μ ↑ quand σ_n ↓ pour le frottement glace / glace | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Théorie de fonte par échauffement dû au frottement pour le frottement glace / glace |
| Dorémieux (1990) | théorique | -5°C | 0 à 50 km/h | 1,4 bar | Pneu / glace | 0 à 0,7 | <ul style="list-style-type: none"> ✓ μ ↑ quand V ↓ ✓ μ ↑ quand T ↓ | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Conditions aux limites de deux types : flux ou température constants |
| Douce (1993) | expérimentale et théorique | -1 à -5°C | Rotation du volant : 10 à 40 km/h | 1 à 3 bar | Pneu dans un volant interne | Effort tangentiel ente0 et 100 daN | <ul style="list-style-type: none"> ✓ μ ↑ quand σ_n ↑ ✓ μ ↑ quand V ↓ | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Modélisation de la zone sèche par un flux rétroactif ✓ Comparaison entre les modèles statistique, à flux constant et à flux rétroactif |
| Evans et al. (1976) | expérimentale et théorique | -15 à -1°C | 0,2 à 10 m/s | ≈ 10 MPa | Patin (acier, cuivre, Perpex) / glace ; Cylindre / cylindre (axes perpendiculaires, aire de contact = 1mm ²) | < 0,06 | <ul style="list-style-type: none"> ✓ μ ↑ quand T ↓ ✓ μ proportionnel à $V^{-1/2}$ pour le Perpex ✓ μ ↑ quand σ_n ↓ | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Séparation de μ en trois composantes ✓ μ ↑ avec la conductivité thermique du matériau |
| Fowler et beajn (1993) | théorique | | | | Frottement patin / fonte de la glace | Dépend des matériaux et des conditions expérimentales | <ul style="list-style-type: none"> ✓ μ ↑ quand σ_n ↓ | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Calcul de l'épaisseur du film d'eau formée sous le patin par la dissipation visqueuse |
| Futamura (1996) | expérimentale | -20 à 0°C | ≈ 3 m/s | ≈ 3 bar | Gomme / glace avec le pendule SRT | Par rapport à un témoin | <ul style="list-style-type: none"> ✓ μ ↑ linéairement avec la souplesse 1/G' | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Influence des propriétés viscoélastiques de la gomme |

| Publication | Etude | Température (T) | Vitesse (V) | Contrainte normale nominale σ_n (Pa) | Type et surface de contact | Coefficient de frottement (μ) | Variations du μ avec T, V et σ_n | Remarques |
|----------------------------------|----------------------------|------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hayhoe et Shapley (1989) | théorique | -5°C | 0 à 30 m/s | < 4 bar | Elastomère / glace ; traction ou freinage en roue bloquée | 0 à 1 | ✓ $\mu \uparrow$ quand σ_n ou V ↓ | ✓ Séparation de l'aire de contact en deux parties, sèche et humide |
| Itagaki et Huber (1987, 1989) | expérimentale et théorique | -15, -10 et -5°C | 1,5 et 5,5 m/s | ≈ 32 MPa | Acier / glace ; Cylindre / cylindre (axes perpendiculaires, aire de contact ≈ 1 mm ²) | 0,02 à 0,11 | ✓ $\mu \uparrow$ quand T ↑ aux fortes rugosités ✓ $\mu \uparrow$ quand V ↑, surtout aux fortes rugosités | ✓ Résultats différents expliqués par des différences de conditions de contact, de chargement, de recirculation des particules d'usure ✓ $\mu \uparrow$ quand la rugosité ↑ de 0,21 à 1,08 μm ✓ Pas d'échauffement détecté à la surface du patin ✓ Influence des propriétés viscoélastiques de la gomme |
| Lenoël (1998) | expérimentale | -25 à 0°C | ≈ 3 m/s | ≈ 3 bar | Gomme / glace avec le pendule SRT ; glace rugueuse ou lisse | 0 à 0,7 | ✓ $\mu \uparrow$ avec 1/G' ✓ $\mu \uparrow$ avec G''/G' ² ✓ $\mu \uparrow$ quand T ↓ | |
| Oksanen et Keinonen (1982, 1983) | expérimentale et théorique | -15, -5 et -1°C | 0,5, 1, 2 et 3 m/s | 0,82, 2,46 et 3,69 kPa | Glace / glace ; Plan / plan, 122 cm ² | 0,009 à 0,038 | ✓ μ minimum pour T de -3 à -1°C ; $\mu \uparrow$ quand T ↓ pour T < -3°C ✓ $\mu \uparrow$ quand T ↓ aux faibles V, $\mu \uparrow$ quand T ↑ aux V élevées | ✓ Frottement lubrifié par un film d'eau liquide ✓ Compétition entre la conduction et le cisaillement visqueux pour générer le frottement selon la vitesse : μ proportionnel à 1/V à -15°C ; μ proportionnel à V à -1°C |
| Peng et al. (1999) | théorique | | | | Elastomère / glace, plan / plan, formation d'un film d'eau | Dépend des matériaux et des conditions expérimentales | ✓ $\mu \uparrow$ quand $\sigma_n \downarrow$ ✓ $\mu \uparrow$ quand V ↓ | ✓ Energie de dissipation visqueuse dans le fluide évacuée par fonte et conduction dans les solides |
| Roberts (1987, 1993) | expérimentale et théorique | -30 à -5°C | 0,01 à 1 m/s | 0,25 à 2,5 bar | Elastomère / glace ; Sphère / plan, ≈ 4 cm ² | 0,04 à 2,2 | ✓ $\mu \uparrow$ quand V ↓ ✓ $\mu \uparrow$ quand $\sigma_n \downarrow$ | ✓ Mesure de l'échauffement de température de surface de la glace |
| Roberts (1983) | expérimentale | -60 à 0°C | 10 ³ à 10 ⁴ mm/s | 0,1 à 1 MPa | Elastomère / glace avec du sel ; Sphère / plan | 0,1 à 2 | ✓ μ indépendant de la concentration en sel sous -20°C | ✓ Chute de μ au passage de la température de l'eutectique |
| Southern et Walker (1972, 1974) | expérimentale | -40 à -1°C | 3.10 ³ à 1 cm/s | 0,3 à 3 bar | Elastomère / glace ; plan / plan ; 2,5 cm ² | 0 à 4 | ✓ $\mu \uparrow$ quand V ↓ ✓ $\mu \uparrow$ quand $\sigma_n \downarrow$ | ✓ Courbe maîtresse obtenue par le facteur de translatin de WLF |
| Takino et al. (1991) | expérimentale | -20 à 0°C | ≈ 3 m/s | ≈ 3 bar | Gomme / glace avec le pendule SRT | Nest entre 20 et 80 | ✓ $\mu \uparrow$ quand T ↓ ✓ $\mu \uparrow$ quand on remplace la charge de noir de carbone par de la poudre de cuir | ✓ Influence des propriétés viscoélastiques de la gomme |
| Vidal (1997) | théorique | -5°C | 17 km/h | 2,6 bar | Gomme / glace ; Plan / plan, aire de contact de longueur 150 mm | 0,1 à 0,2 | ✓ L'échauffement théorique sous la gomme ↓ quand $\sigma_n \downarrow$ ou la longueur de l'aire de contact ↓ | ✓ Effet de la sculpture d'un pain de gomme sur l'échauffement de la glace |

Annexe F

Annexe à l'étude expérimentale avec la machine tournante

F.1 Caractéristiques de la machine tournante

F.1.1 Cahier des charges initial

Le cahier des charges demandait au bureau d'études de concevoir une machine destinée à étudier le frottement d'un patin de gomme sur une piste de glace en rotation. Les dimensions de la piste annulaire étaient 300 mm de rayon intérieur, 400 mm de rayon extérieur et 50 mm de hauteur. L'éprouvette (nommée aussi *patin*) de gomme, de longueur 100 mm et de largeur 20 mm, devait être aisément amovible et libre en rotation d'axe radial (mouvement de *tangage* autorisé). Deux positions possibles pour l'éprouvette permettaient d'obtenir deux traces sur une même piste de glace, afin de pouvoir faire deux essais sur une piste usinée une seule fois. Les rayons moyens des pistes intérieure et extérieure étaient respectivement 325 et 365 mm. V et F_n balayaient les gammes de 0,5 à 10 m/s et de 20 à 80 daN respectivement.

Le cahier des charges spécifiait deux modes d'acquisition du frottement :

Mode 1 : application de F_n et débrayage du moteur simultanément. μ est calculé à partir du nombre de tours parcourus avant arrêt de la piste (l'inertie de la piste est calculée en effectuant la même manipulation sans contact du patin).

Mode 2 : la piste de glace tournant à V fixé, μ est calculé à partir de l'écart de puissance du moteur nécessaire pour maintenir V constante avec ou sans frottement du patin.

F.1.2 Problèmes expérimentaux avec la solution proposée par le bureau d'étude

La solution proposée par le bureau d'étude comprenait un bac annulaire de glace en acier inoxydable, fixé sur un plateau entraîné par un arbre de rotation relié au moteur (Fig. 5.1(a)). F_n était appliqué sur le patin par un fléau chargé par des contrepoids. L'usinage de la piste de glace devait être effectué par une lame de rabot à bois de 100 mm de large, mobile verticalement (Fig. 5.8(a)).

Pour pouvoir utiliser la machine dans les deux modes, il fallait un couple de frottement très faible au niveau de l'arbre moteur et les frottements internes de l'ensemble ne devaient pas entraîner un couple supérieur à 0,5 Nm afin de représenter moins de 10 % de l'effet du frottement additionnel du patin. Ceci n'a malheureusement pas été techniquement possible dans les délais et les coûts impartis.

Après réception du dispositif au LGGE, il est très vite apparu que de nombreuses modifi-

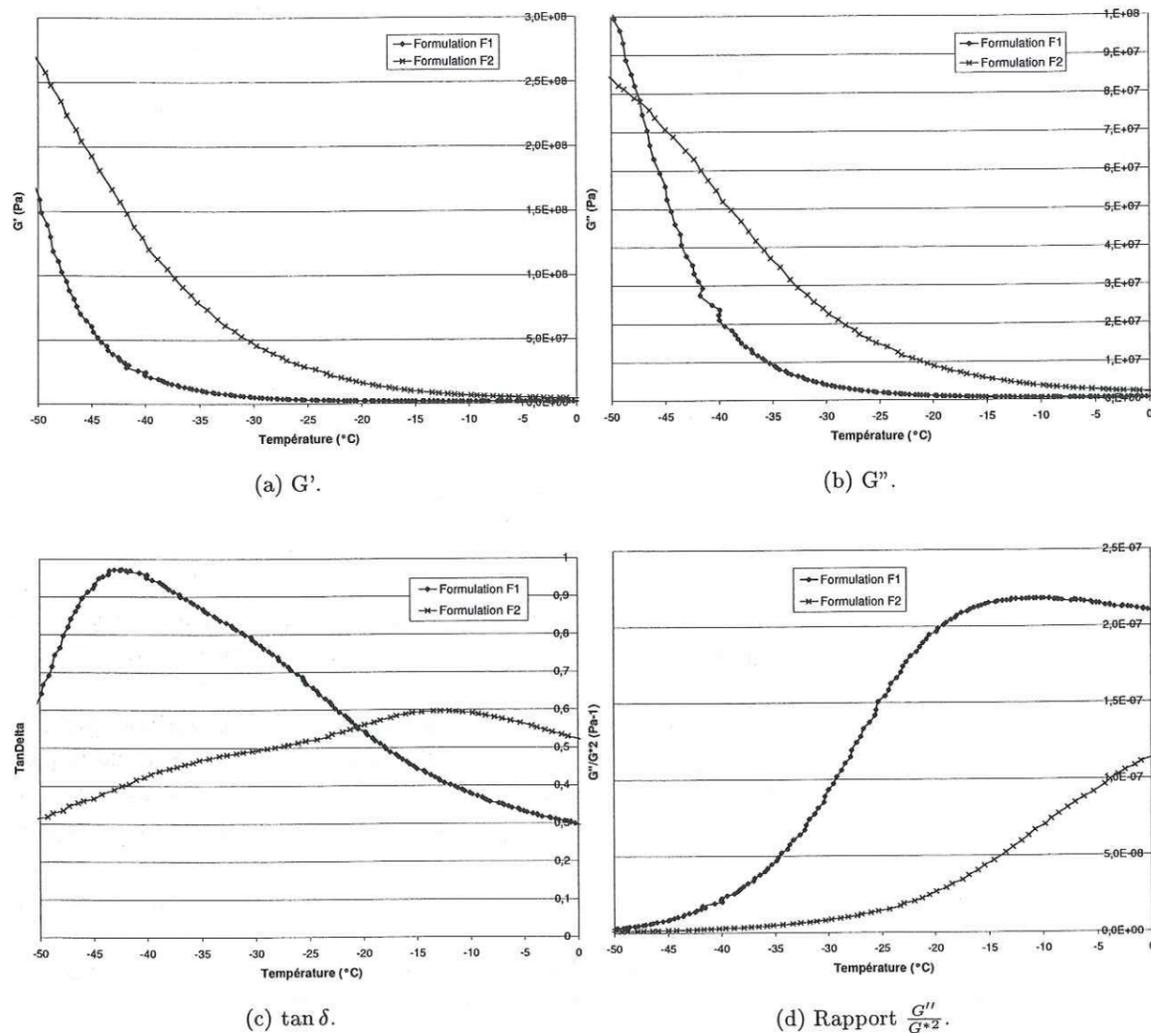


Fig. F.1 – Propriétés viscoélastiques des mélanges F1 et F2 obtenues à une fréquence de sollicitation de 10 Hz sous contrainte constante de 2 bar.

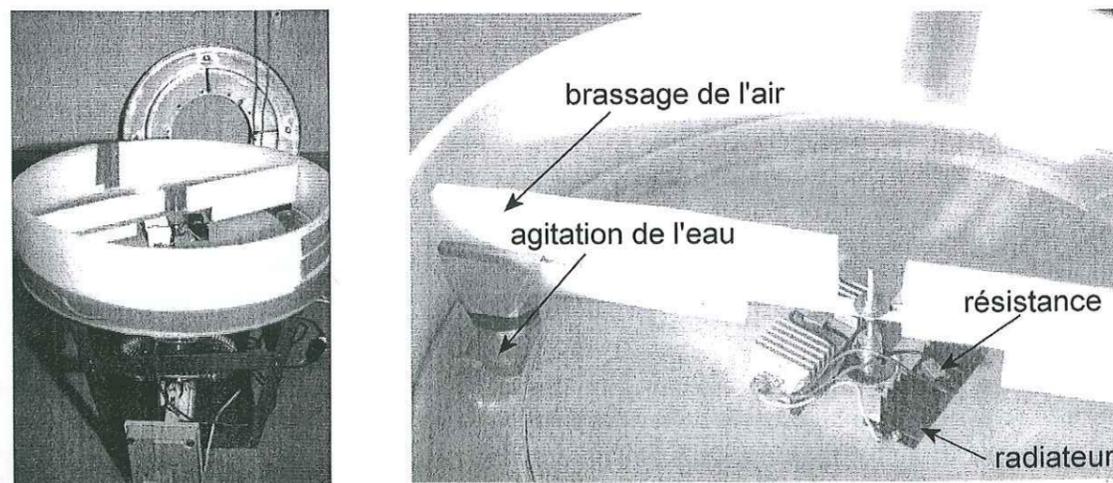


Fig. F.2 – Dispositif de fabrication de la glace columnnaire.

cations devaient lui être apportées pour mesurer μ entre un élastomère et la glace. D'une part, en mode 1, le couple de freinage à vide était beaucoup trop élevé et le bac annulaire s'arrêtait en quelques tours, que le patin de gomme frotte ou non. D'autre part, en mode 2, la puissance moteur présentait des fluctuations très importantes à vide et ne montrait aucune augmentation sensible après l'application du patin.

Enfin, le dimensionnement du plateau était mal calculé. D'une part, le plateau se voilait fortement au cours de l'usinage de la piste, malgré le faible effort vertical. D'autre part, le plateau présentait un fléchissement supérieur à 1 cm lors de l'application en statique de 80 daN sur le patin et des vibrations du patin de grande amplitude s'amplifiaient lors de la rotation de la piste sous F_n élevé.

F.1.3 Modifications apportées au dispositif initial

Les améliorations ont porté sur plusieurs points (Fig.5.1(b)) :

1. La piste de glace est maintenant fabriquée dans un bac annulaire en alliage d'aluminium qui n'a plus de rôle mécanique. Le bac est fixé sur un plateau en Fortal, rectifié sur ses deux faces et muni de fenêtres : ceci permet un gain de moment d'inertie et une souplesse accrue du plateau sous application de la charge (possibilité de compenser le moment qui pourrait apparaître sur l'arbre du moteur par une déformation du plateau).
2. Le plateau est supporté par six roulettes de roller placées au droit du patin et par huit roulettes placées à 120° (ceci permet de limiter considérablement la déflexion de la piste sous F_n élevé). Pour éviter de voiler le plateau lors de sa fixation sur l'arbre moteur et assurer le support par les roulettes, les huit vis de fixation sur l'arbre ne servent que pour l'entraînement.
3. μ est évalué directement à partir des deux efforts F_t et F_n mesurés par un capteur d'effort bidirectionnel placé entre le système d'application de la charge et le patin (Fig.5.9(b)). Ainsi, le frottement important généré par les roulettes n'intervient pas sur le calcul de μ .
4. Afin de limiter l'effort tangentiel sur la piste lors de l'usinage, le dispositif initial d'usinage de la glace a été remplacé par un outil de tour monté sur une platine à déplacement horizontal (Fig. 5.8(b)).

F.2 Formulations des mélanges de gomme

Les propriétés viscoélastiques des formulations F1 et F2 sont données en figure. F.1. A -10°C , G' vaut 1,52 MPa et G'' 0,58 MPa pour le mélange F1. G' vaut 6,56 MPa et G'' 3,9 MPa pour le mélange F2.

F.3 Mouvements de roulis et de tangage du patin

Le mouvement de roulis du patin (défini par un axe de rotation longitudinal) provoquait une torsion du capteur. Il a été annulé par le remplacement des entretoises placées verticalement entre le porte-échantillon et le dispositif d'application de la charge par deux cales verticales en acier, de grandes dimensions, percées pour laisser passer l'axe du porte-échantillon.

Le mouvement de tangage du patin (défini par un axe de rotation formant un rayon de la machine) devait être réduit à cause du couplage interne du capteur, afin de mesurer les deux efforts dans des plans horizontaux et verticaux. Deux bandes d'élastomères horizontales jouent le rôle d'amortisseurs élastiques et rattrapent le jeu entre la chape inférieure et le support en laiton

du patin. En effet, nous ne pouvons assurer un parfait parallélisme entre la chape inférieure et la surface de la piste de glace : cet insert élastique permet à la face inférieure du patin de rester horizontale.

F.4 Méthode de fabrication de la glace

F.4.1 Problématique

La glace pourrait être fabriquée par strates successives dans le bac annulaire préalablement fixé sur la machine. Ce protocole engendrerait essentiellement trois problèmes. Tout d'abord, il serait très long de fabriquer de la glace à -5°C et très difficile de fabriquer de la glace sans bulles à -20°C . D'autre part, les structures de la glace obtenue à températures différentes ne serait pas les mêmes et cela ajouterait un paramètre pour l'interprétation des résultats. Enfin, les quelques essais effectués ont montré que la réalisation pratique d'une telle piste de glace était impossible : la glace se fracturait dès l'application du patin.

Afin de toujours fabriquer la même structure de glace indépendamment de la température lors des essais, la piste pourrait être fabriquée par strates successives dans le bac annulaire placé dans une chambre froide à température constante. Le bac serait ensuite transporté et placé sur le plateau tournant de la machine. Les premiers essais ont montré qu'il était difficile de fixer le bac sur le plateau sans créer de fractures dans la glace lors du serrage des vis de fixation. Or, une simple fracture empêche toute mesure de frottement car la glace fragilisée se fracture en plusieurs endroits dès l'application du patin, même sous un effort normal faible.

F.4.2 Tentatives d'élaboration de glace colonnaire

Nous avons essayé de fabriquer de la glace colonnaire (§ 1.2.2.1) dans le bac annulaire en chambre froide restant en permanence à -10°C . La glace colonnaire était formée par arrivée du froid par le fond du bac et chauffage de la surface de l'eau. Le bac annulaire était surélevé et un ventilateur placé en dessous assurait une arrivée permanente et assez homogène du froid sous le bac (Fig. F.2). Un couvercle en mousse permettait une isolation thermique des deux faces interne et externe du bac. Deux résistances chauffantes de 24 W placées sur deux radiateurs diffuseurs de chaleur chauffaient l'intérieur de la boîte. Un agitateur circulaire entraîné par un moteur à vitesse variable était muni d'ailerons de grandes dimensions afin d'agiter l'eau et de brasser l'air à l'intérieur de la boîte.

Lors des premiers essais, l'eau du robinet donnait de la glace pleine de bulles d'air, mais avec de l'eau distillée, la glace contenait peu de bulles. Les bords verticaux du bac annulaire étaient conducteurs thermiques et la glace poussait horizontalement à partir des deux cotés de l'anneau (1 cm de glace se formait de chaque côté de la couronne pour seulement 2 cm au fond). Il était ensuite très difficile d'usiner la piste en forme de U car les bords non contraints étaient fragiles.

Toutes les idées susceptibles de remédier à ce problème ont été successivement écartées. D'abord, faire pousser la glace sur la table réfrigérante utilisée au LGGE pour fabriquer de la glace colonnaire, était impossible à cause des dimensions du bac. Ensuite, placer des résistances chauffantes sur les bords verticaux du bac aurait empêché le froid d'arriver à cause de la conduction du fond horizontal. Placer le bac sur un cryostat aurait posé plusieurs problèmes : l'uniformité de l'arrivée du froid sur une telle surface n'était pas assurée, le dispositif aurait été très long à mettre en oeuvre et l'utilisation des cryostats en chambre froide est délicate.

La solution finalement retenue a été de refaire les bords du bac annulaire en polyéthylène, afin de limiter l'apport de froid par les parois verticales. Nous avons alors collé des vis au fond du bac

annulaire afin d'empêcher l'anneau de glace de tourner par rapport au bac : la glace n'adhérait plus sur les bords verticaux et pouvait s'en détacher sous l'application de la charge. Ce dispositif de fabrication de glace colonnaire a été très long à mettre en oeuvre mais ne convenait toujours pas : la glace croissait toujours en forme de U et, trop fragile, elle se fracturait sur une section transversale dès l'application d'un effort normal élevé.

Nous avons donc mis au point une autre technique de préparation de la piste, avec fabrication indépendante de la masse de la piste en glace composite solide et de sa surface, le bac étant fixé sur la machine (cf. § 5.1.2.1).

F.5 Usinage de la surface de la glace

F.5.1 Problématique

Avant une mesure du frottement, un usinage de la surface de la piste est indispensable pour obtenir un bon contact entre la glace et le patin. Ceci permet d'aplanir la surface formée en suivant le protocole précédent, d'éliminer les défauts de surface apparus lors d'un gel trop rapide, et d'obtenir un bon contact microscopique entre la glace et l'élastomère. Entre chaque mesure de μ , l'usinage d'une faible épaisseur de glace est indispensable pour faire disparaître la trace d'usure laissée par le patin. Après un certain nombre d'essais, il faut refaire une couche de surface car le niveau de la piste a trop baissé.

F.5.2 Dispositif d'usinage initial

Le support de l'outil de coupe utilisé pour façonner la piste est monté sur une vis sans fin permettant son déplacement vertical. Le cahier des charges prévoyait d'usiner toute la largeur de la piste avec une lame de rabot à bois très aiguisée (Fig. 5.8(a)). Une première lame de largeur 100 mm avec un angle de coupe par rapport à l'horizontale de 15° devait permettre une ébauche de la piste, avant qu'une deuxième lame de 95 mm de large avec un angle de coupe de 5° effectue le surfacage. L'effort exercé sur le rabot s'est avéré trop important et son support vibrait lors de l'usinage, formant des ondulations sur la piste et empêchant d'usiner une glace à surface horizontale. Une rigidification de l'équerre portant le système porte-outil n'a pas suffi à limiter les vibrations.

Une simple lame d'acier à bord d'attaque rectangulaire a donné de meilleurs résultats que les lames de rabot à bois. Grâce à l'angle de coupe négatif, les efforts tangentiel et normal sur la glace étaient diminués et de longs copeaux de glace s'enroulaient au lieu d'écailler la surface de glace et de fracturer la piste. Un usinage restreint à deux largeurs de patin (pistes intérieure et extérieure) limitait les vibrations du support vertical, mais dès que l'effort de coupe était trop important, l'échantillon de glace se fracturait sur toute sa hauteur, même à la vitesse minimale de rotation du plateau.

F.5.3 Problème de la création de fractures dans la piste lors de l'usinage

Dès qu'une fissure se forme dans la glace et atteint le voisinage de la surface, l'usinage, même peu agressif, provoque de très légères vibrations suffisantes pour que la fracture se propage jusqu'en surface, puis un écaillage très rapide des bords de la fissure. Une solution aurait pu être de réchauffer localement la glace en soufflant de l'air chaud ou d'injecter de l'eau tiède dans la fracture avec une seringue, mais ces opérations délicates n'auraient pas permis d'éliminer entièrement la fracture et la glace aurait toujours été fragilisée. Dès qu'une fracture (courte ou

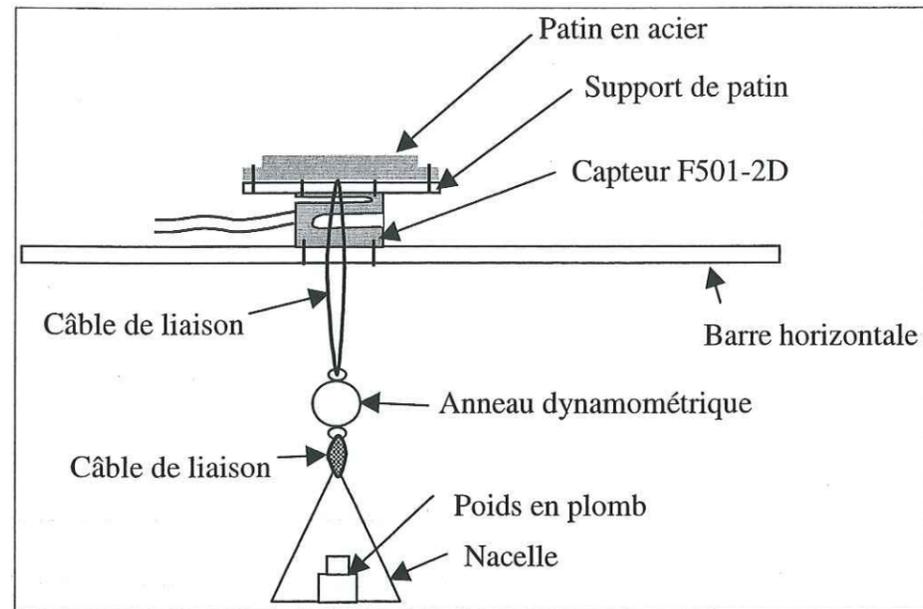


Fig. F.3 - Dispositif d'étalonnage du capteur en effort normal.

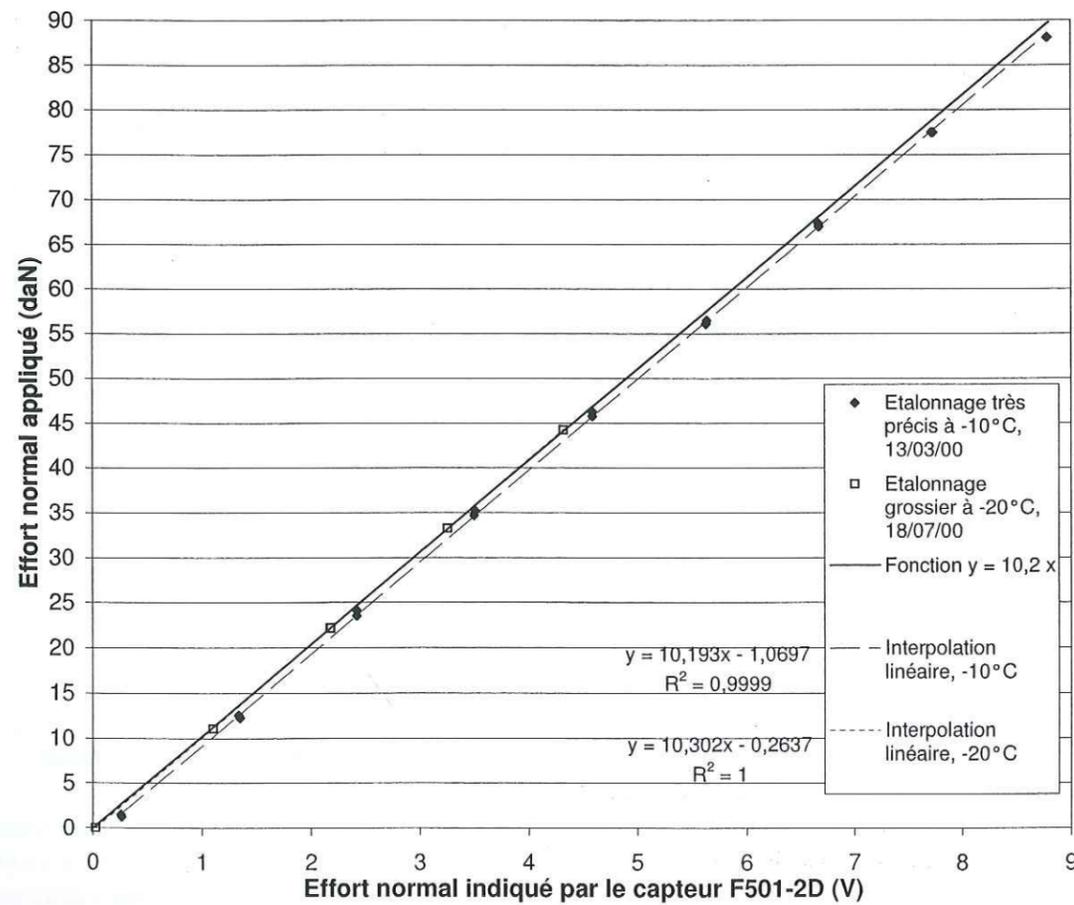


Fig. F.4 - Courbe d'étalonnage de l'effort normal indiqué par le capteur.

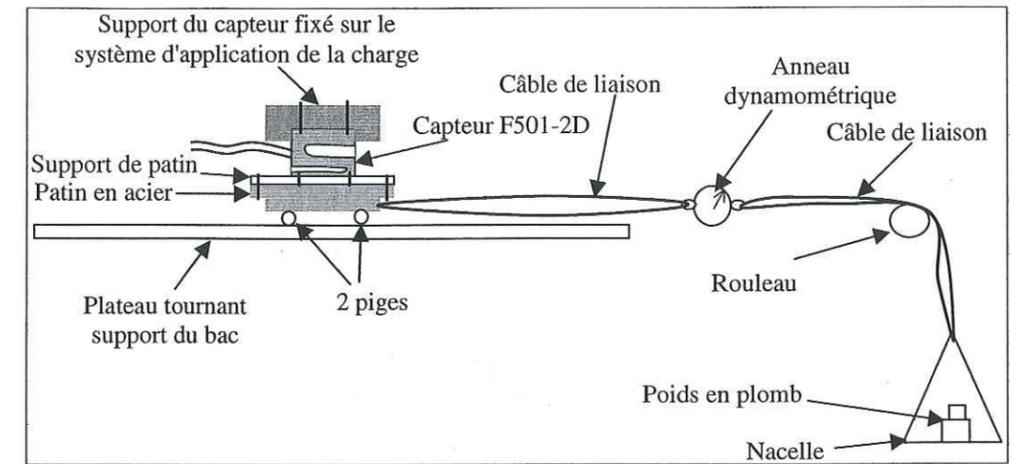


Fig. F.5 - Dispositif d'étalonnage de l'effort tangentiel du capteur en place sur la machine.

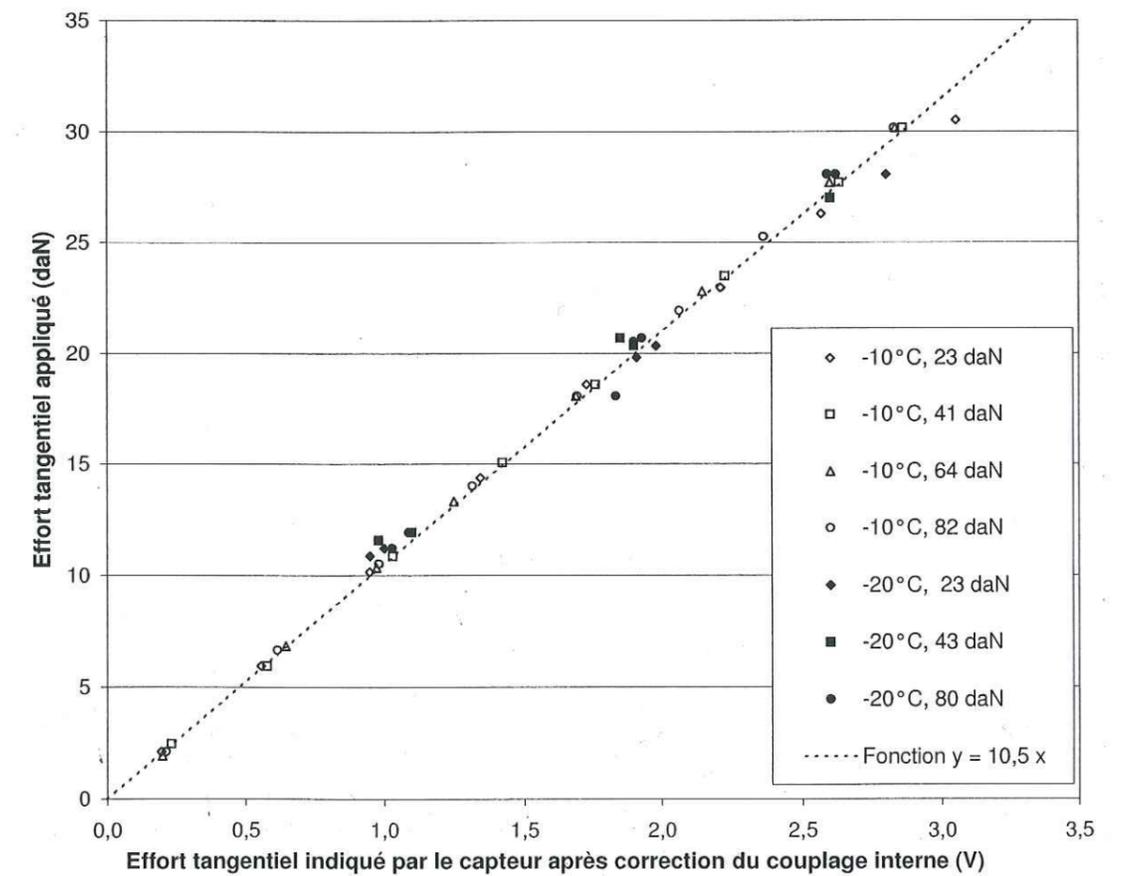


Fig. F.6 - Courbe d'étalonnage de l'effort tangentiel indiqué par le capteur à -10 et -20 °C.

longue, dans le volume de glace ou en surface) se forme dans la piste, il est donc indispensable de reformer les 3 cm supérieurs de la piste de glace.

F.6 Utilisation du capteur d'efforts bidirectionnel

F.6.1 Etalonnage du capteur en effort normal

Le banc de test utilisé pour étalonner le capteur de force en effort normal est présenté en figure F.3). Le capteur était fixé par deux vis sur une barre dont l'horizontalité était vérifiée en permanence avec un niveau à bulle. Un câble relié à une nacelle chargée par des masses en plomb appliquait l'effort normal sur la face supérieure du capteur. Un anneau dynamométrique en traction placé entre le capteur et la charge permettait de connaître l'effort normal appliqué. Nous avons préalablement vérifié l'étalonnage de cet anneau Testwell T100.2 G953 en chambre froide à -10°C , en plaçant des charges connues en traction sur ce capteur, en charge et décharge. L'anneau était bien étalonné dans sa limite de résolution (affichage valable à 1 daN près de 0 à 100 daN) et ses indications pouvaient être utilisées sans corrections.

La figure F.4 donne l'effort normal indiqué par le capteur F510-2D par rapport à l'effort normal appliqué mesuré par l'anneau dynamométrique. Les indications données à la charge et à la décharge étant les mêmes, le capteur bidirectionnel ne présente pas d'hystérésis en effort normal. L'étalonnage à -10°C a été effectué en utilisant le dispositif de la figure F.3 mais l'étalonnage à -20°C a été effectué rapidement en posant des poids sur le capteur.

F.6.2 Etalonnage du capteur en effort tangentiel

Pour l'étalonnage en effort tangentiel, le capteur était monté sur la machine avec un patin en acier posé sur deux rouleaux lubrifiés et l'effort normal était appliqué par le système de levier de la machine (Fig. F.5). Les deux cylindres roulaient librement entre le plateau et le patin en acier avec un frottement minimum: nous imposions ainsi aux deux faces (inférieure et supérieure) du capteur de rester dans deux plans horizontaux parallèles. La déformation du capteur en cisaillement était créée par la tension d'un câble horizontal fixé dans un trou débouchant du patin en acier. Ce câble tirait sur le patin avec un système de poids et de poulie de renvoi, la force horizontale appliquée étant mesurée par l'anneau dynamométrique Testwell placé entre la poulie de renvoi et le patin. D'après les fournisseurs, le capteur est symétrique en cisaillement, mais compte tenu des phénomènes de couplage que nous avons observés, nous avons pris la précaution de bien étalonner le capteur dans le sens où il est utilisé. Le signal donné par le capteur dépend de l'écart entre la face inférieure du capteur et le point de fixation du câble. Cette distance a donc été choisie égale à l'épaisseur du patin (gomme + laiton).

La figure F.6 présente l'effort tangentiel appliqué mesuré par l'anneau dynamométrique en fonction de l'effort tangentiel mesuré par le capteur après correction du couplage interne. Les valeurs obtenues pour différents efforts normaux entre 23 et 82 daN sont cohérentes entre elles. L'étalonnage est effectué sur une plage d'effort tangentiel entre 2 et 30 daN mais nous l'avons aussi considéré valable pour de plus faibles efforts tangentiels.

F.6.3 Offsets du capteur

Les offsets du capteur (réglés par les fournisseurs avec le capteur sans sollicitation particulière, couché en position horizontale) varient énormément avec le serrage des quatre vis qui permettent de le fixer sur la machine et le support de l'éprouvette.

Le capteur étant placé sur la machine, les deux efforts mesurés présentent un léger offset. L'effort normal présente un offset dû à la masse du patin et de son support. Cet offset, proche de 0,1 V, représente environ 100 g et est entièrement négligeable devant les efforts normaux que nous appliquons.

L'effort tangentiel présente un offset assez important, qui peut aller jusqu'à 0,3 V. Les efforts tangentiels maximums que nous mesurons sont de l'ordre de 0,5 V mais l'offset n'est pas préjudiciable puisque nous obtenons l'effort tangentiel réel comme (5.2), par différence de deux efforts mesurés.

F.7 Résultats avec le premier protocole expérimental

F.7.1 Exemples d'acquisition avec le premier protocole expérimental

Les figures F.7 et F.8 présentent deux exemples d'acquisition et de calcul de μ avec l'éprouvette D-F1 à -5°C à deux vitesses différentes.

F.7.2 Résultats obtenus avec le premier protocole expérimental

F.7.2.1 Evaluation de la reproductibilité à -5°C

Les origines de la dispersion des mesures de frottement sont nombreuses et indépendantes du dispositif expérimental utilisé pour mesurer μ d'un élastomère sur la glace (Fig. F.9). Nous avons bien sûr essayé de limiter l'effet de chacun des paramètres: conditions de mesure $T_0 V \sigma_n$, échantillon, surface de la glace, instruments de mesure.

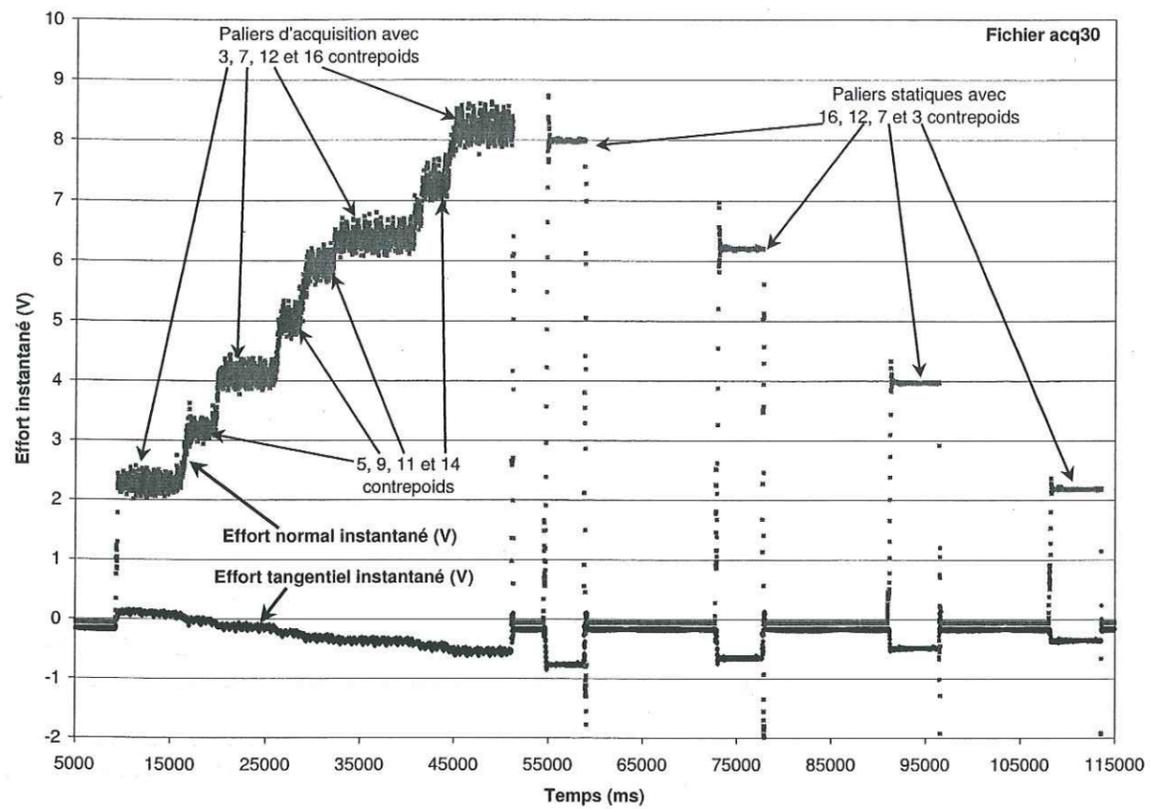
Sans démontage du patin, la précision est excellente pour une même mesure effectuée plusieurs fois à quelques heures d'intervalle. La reproductibilité est moins bonne si le patin est démonté entre chaque manipulation et les essais effectués à plusieurs jours d'intervalle. La figure F.10 présente les résultats de mesures de μ pour le patin D-F1 à -5°C , effectuées des jours différents à 50 et 300 tours/min. Pour μ plus élevé que 0,05, l'incertitude sur la mesure reste très inférieure à 10%. En revanche, pour μ très faible, inférieur à 0,05, l'incertitude relative est bien plus importante.

F.7.2.2 Effet de la procédure d'acquisition sur le frottement

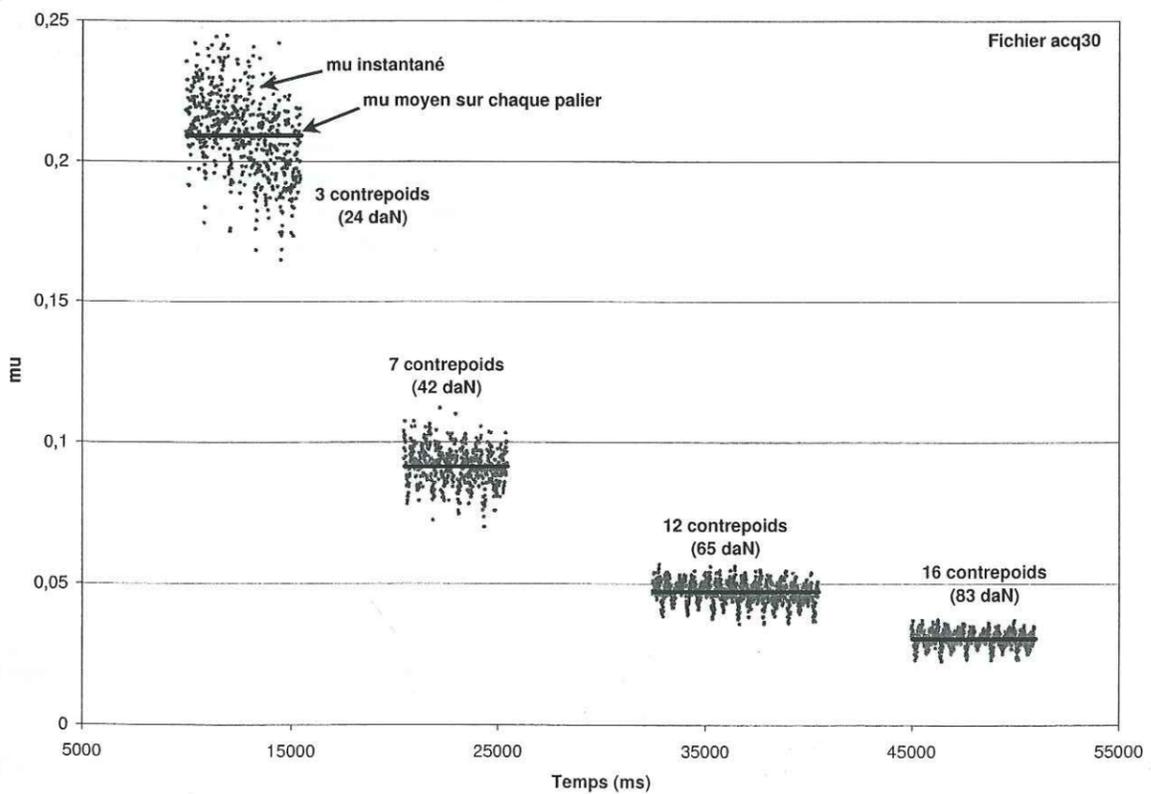
La figure F.14 montre l'effet d'un chargement ou déchargement sur μ , à 50 et 300 tours/min. Quand F_n augmente (3, 7, 12, puis 16 contrepoids sur le fléau), μ décroît. Au contraire, quand F_n diminue (16, 12, 7, puis 3 contrepoids), μ part d'une valeur assez élevée sous 83 daN, puis semble diminuer pour le palier à 65 daN avant de remonter pour les F_n plus faibles. Il faut donc se demander si la diminution de μ avec un accroissement de F_n n'est pas un artefact de mesure: avec ce protocole d'acquisition, le réchauffement du patin et la fonte de la piste en début de manipulation lors des tours effectués sous faible F_n peut expliquer en partie le faible μ sous F_n élevé en fin de manipulation. Le protocole expérimental doit être amélioré (cf. § 5.2.2).

F.7.2.3 Effet de la durée des paliers d'acquisition sur le frottement

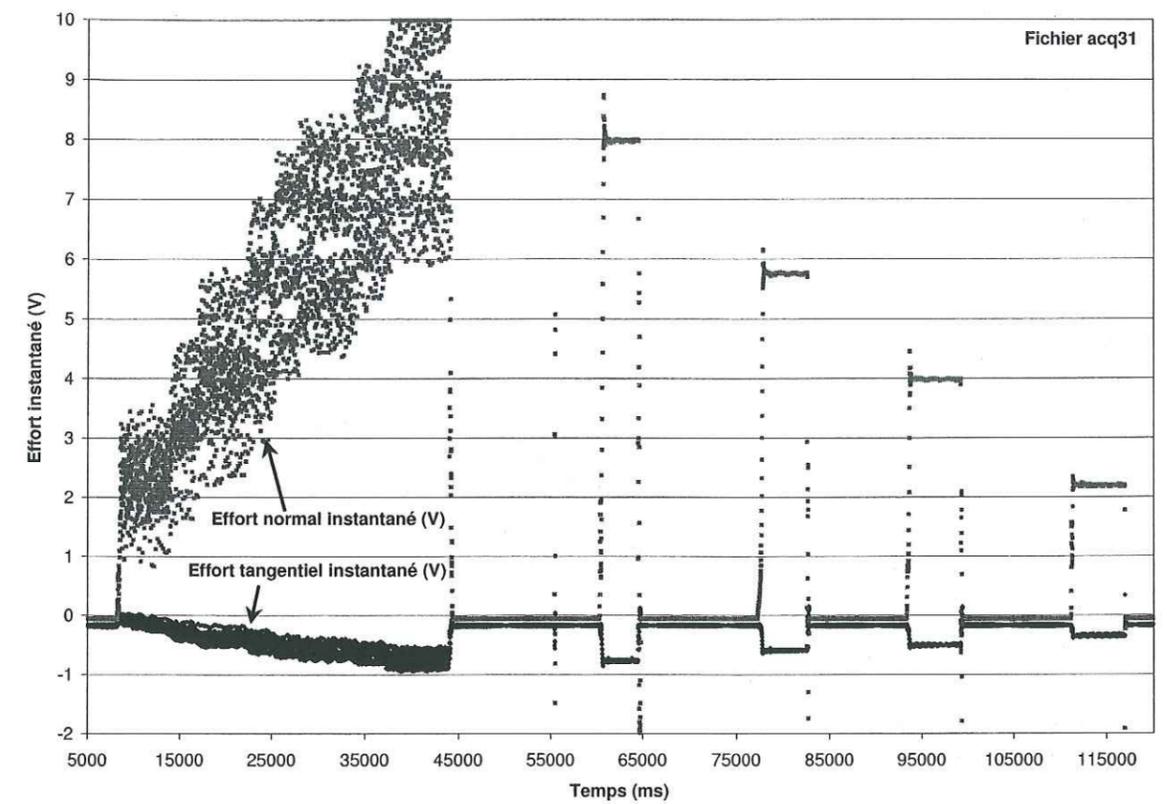
Les paliers d'effort normal durent en général entre 5 et 10 secondes, mais nous avons mesuré μ avec des paliers plus longs, de l'ordre de 60 s (Fig. F.15: à 50 tours/min et -20 ou -5°C). Les



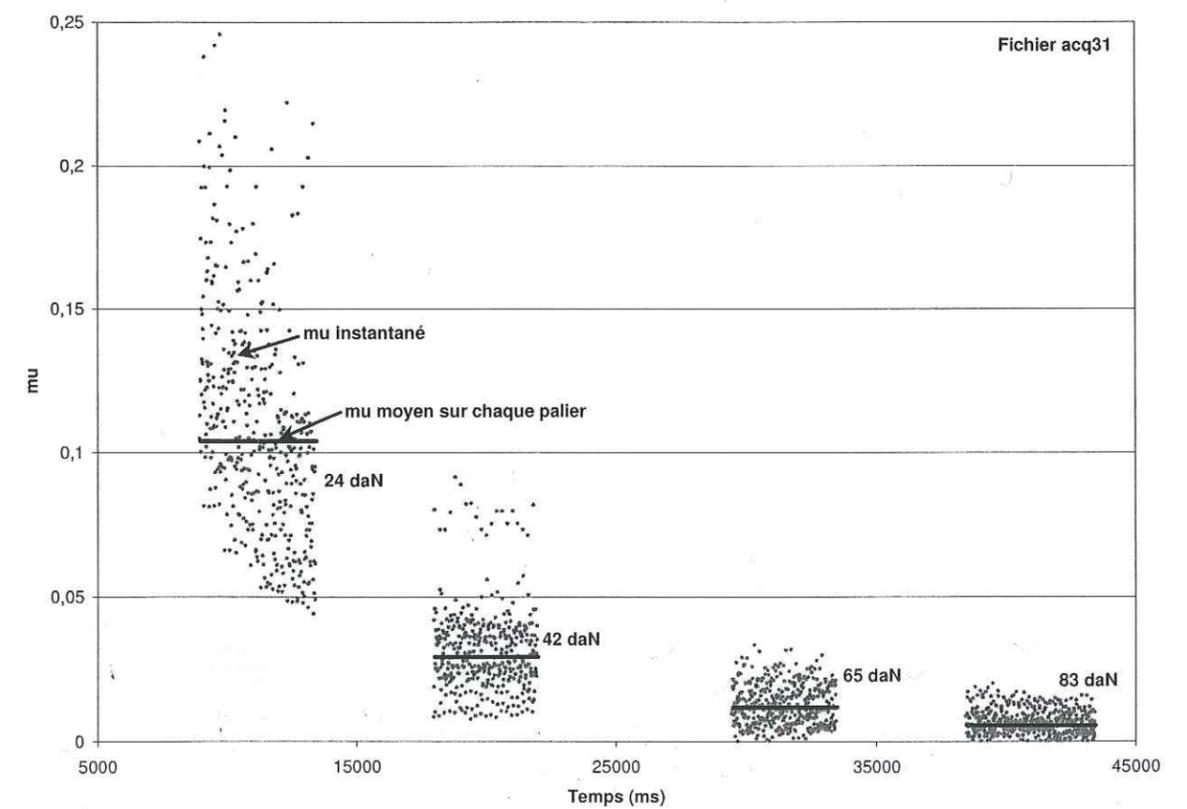
(a) Signaux des efforts instantanés en fonction du temps.



(b) Coefficients de frottement instantanés et moyens sur chaque palier en fonction du temps.

Fig. F.7 - Acquisition à 50 tours/min et paliers statiques avec l'éprouvette D-F1 à -5°C .

(a) Signaux des efforts instantanés en fonction du temps.



(b) Coefficients de frottement instantanés et moyens sur chaque palier en fonction du temps.

Fig. F.8 - Acquisition à 300 tours/min et paliers statiques avec l'éprouvette D-F1 à -5°C .

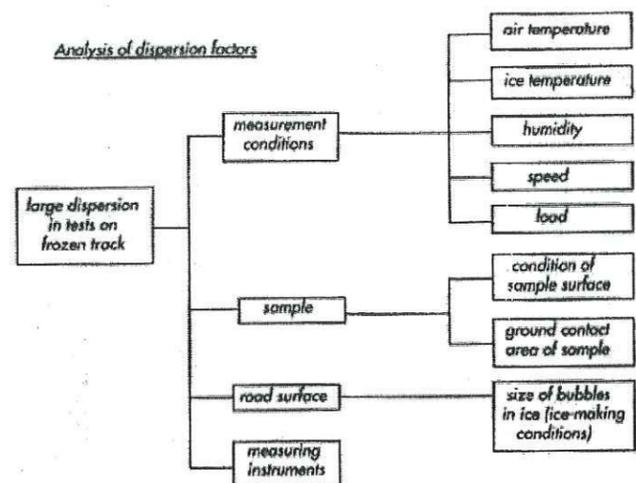


Fig. F.9 – Origines de la dispersion pour les mesures de μ sur glace en laboratoire (Kawano et Ueyama, 1999).

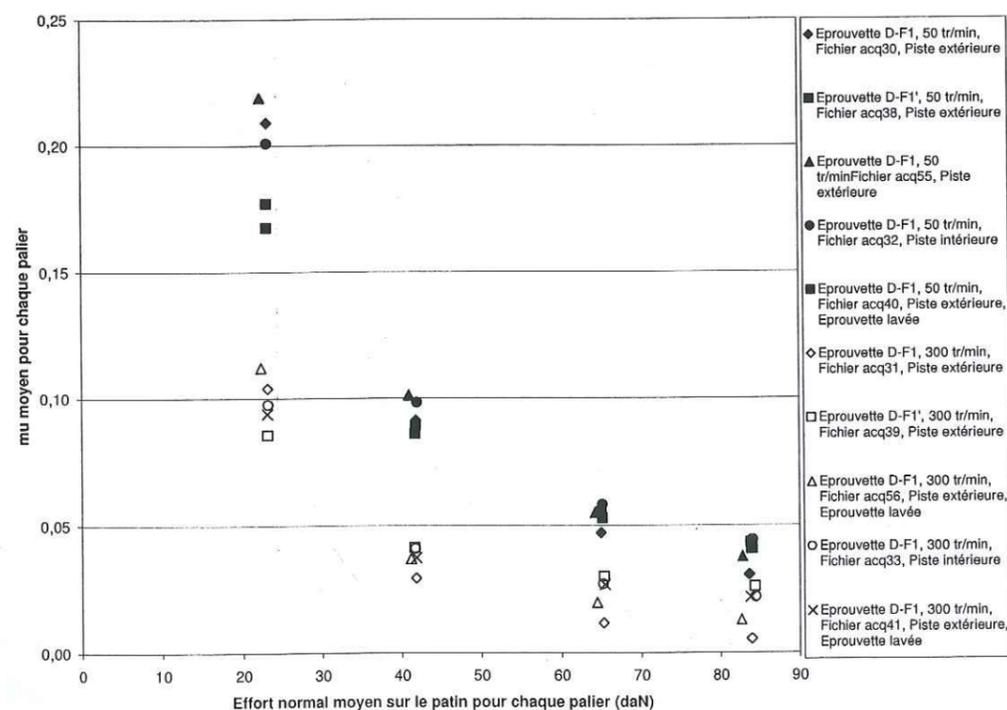


Fig. F.10 – Reproductibilité à -5°C à 50 ou 300 tours/min.

mesures avec des paliers longs produisent toujours des μ plus faibles, qui peuvent s'expliquer par une meilleure lubrification de la glace.

La question de la longueur des paliers semble très importante dans ces conditions expérimentales. De même que précédemment, il faut s'interroger sur la signification physique des μ obtenus en suivant ce protocole expérimental. Même si l'incertitude sur la mesure reste faible, les μ obtenus sur piste neuve pour les paliers à 24 daN et les μ obtenus à 83 daN sur piste usée ne sont sans doute pas comparables. Le protocole expérimental doit être amélioré (cf. § 5.2.2).

F.7.2.4 Coefficients de frottement de deux mélanges proches

Il est impossible de distinguer deux mélanges très proches avec ce type de mesure: les mesures à -5°C et 50 ou 300 tours/min ne distinguent pas les formulations F1 et F1' (Fig. F.16). Cependant, la nature précise du mélange pourrait se manifester plus nettement à température plus basse (e.g. Roberts (1980) et Lenoël (1998), cf. § E.6).

F.7.2.5 Choix de la piste intérieure ou extérieure

Le choix de la piste, intérieure ou extérieure, n'est pas important: les valeurs de μ calculées pour chacune restent largement dans l'incertitude de mesure, aussi bien à -5°C qu'à -10°C (Fig. F.17). Dans cette étude, la piste extérieure a toujours été utilisée, afin de limiter l'effet de la courbure de la piste par rapport à la géométrie rectiligne du patin et d'éviter les démontages.

F.7.2.6 Effet du sens de l'éprouvette sur le frottement

À -5°C , à 50 ou 300 tours/min, une éprouvette retournée frotte moins qu'une éprouvette avec un angle d'attaque arrondi (Fig. F.11). Lors de l'essai avec l'éprouvette retournée à 300 tours/min, beaucoup d'eau giclait sur les bords de la piste, raclée par l'angle droit puis entraînée par la force centrifuge; la trace du patin dans la glace était particulièrement profonde. Cette évacuation du lubrifiant aurait dû augmenter μ . En fait, une répartition non uniforme de la contrainte normale due à la géométrie décentrée du patin pourrait expliquer le faible μ avec un patin retourné (cf. § 7.2).

F.7.2.7 Influence du nettoyage de l'éprouvette sur le frottement

Le nettoyage de l'éprouvette n'a aucune influence sur μ à -5°C , quel que soit V (Fig. F.12). Il faudrait peut-être effectuer des mesures à -20°C à faible et grande vitesses pour apporter une conclusion. D'une part, à basses vitesses et température, le film d'eau formé est assez mince et le mécanisme prépondérant est alors l'adhésion de la gomme sur la glace sèche: des graisses déposées sur l'élastomère peuvent lubrifier le contact et modifier μ par rapport à une gomme lavée préalablement. D'autre part, à vitesse et température élevées, le film d'eau se forme assez vite et la propreté de la surface de la gomme influence les propriétés de mouillabilité: le caractère hydrophile ou hydrophobe de l'élastomère évolue avec les modifications de sa tension de surface.

F.7.2.8 Evolution du coefficient de frottement avec les conditions expérimentales

La figure F.13 résume l'influence des paramètres T_0 , V et F_n étudiée au cours de ces premiers essais. Dans les gammes balayées, aucun des trois paramètres ne semble avoir une importance

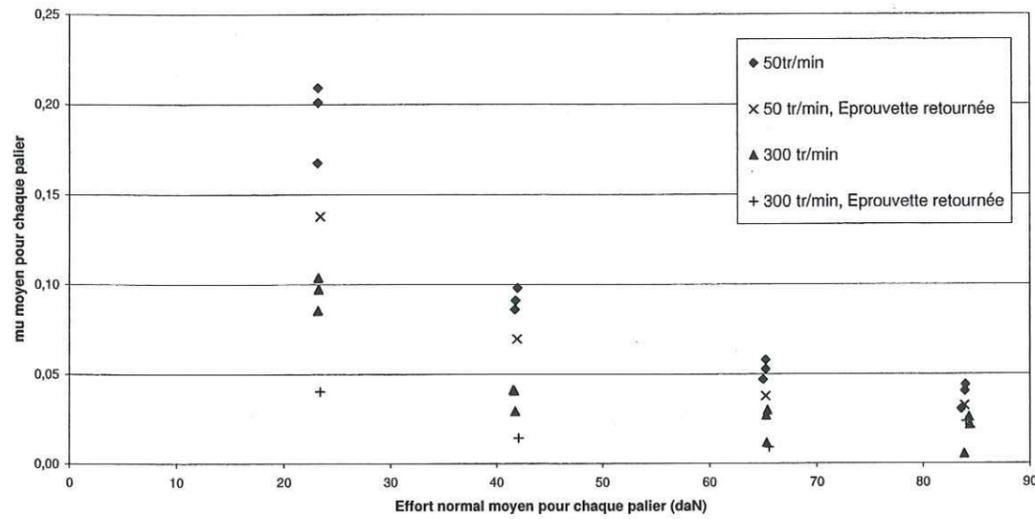


Fig. F.11 - Effet d'un retournement de l'éprouvette D-F1 à -5 ° C.

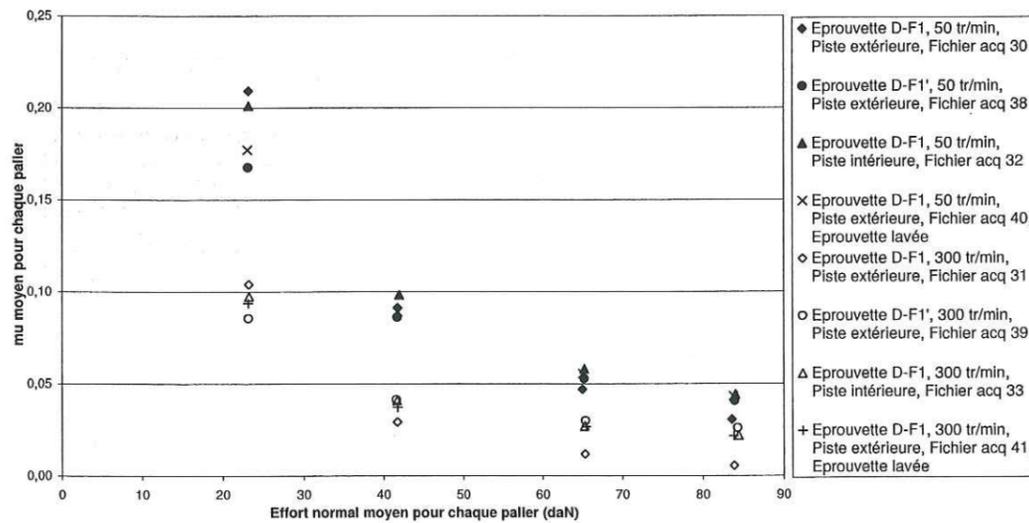


Fig. F.12 - Effet du nettoyage de l'éprouvette à -5 ° C.

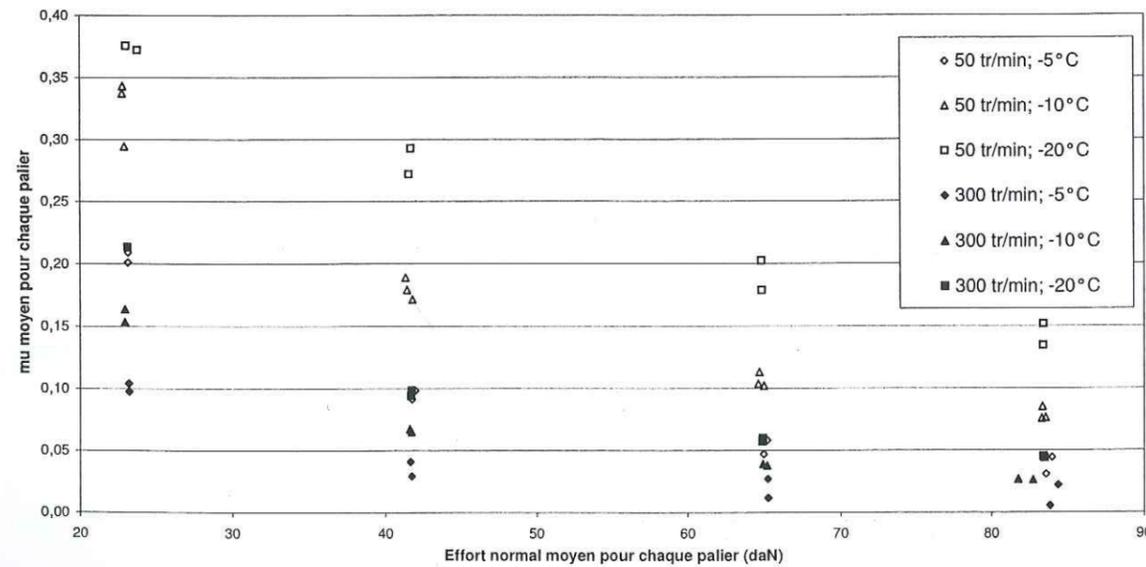


Fig. F.13 - Effets des trois paramètres T_0 , V et σ_n sur μ pour l'éprouvette D-F1.

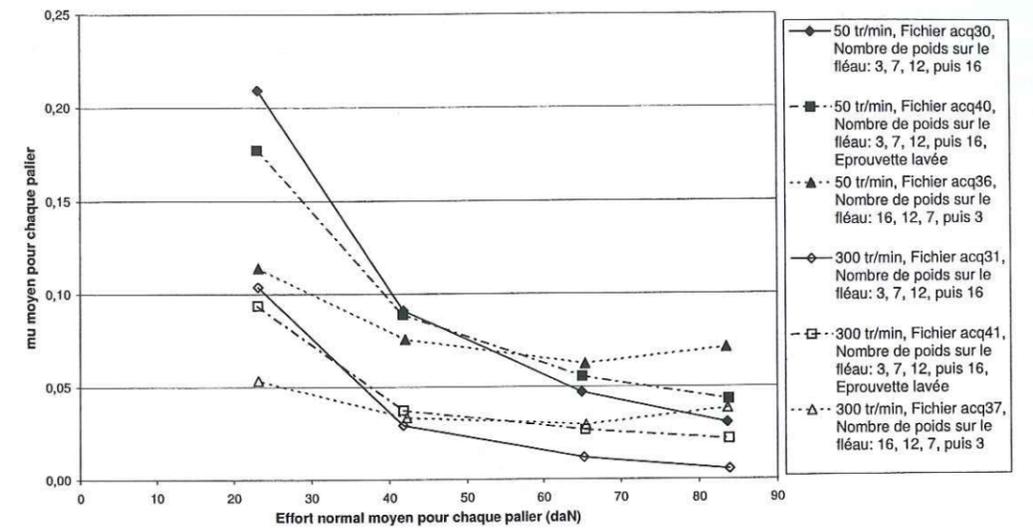


Fig. F.14 - Effet d'un chargement ou déchargement sur l'éprouvette D-F1 à -5 ° C avec la piste extérieure.

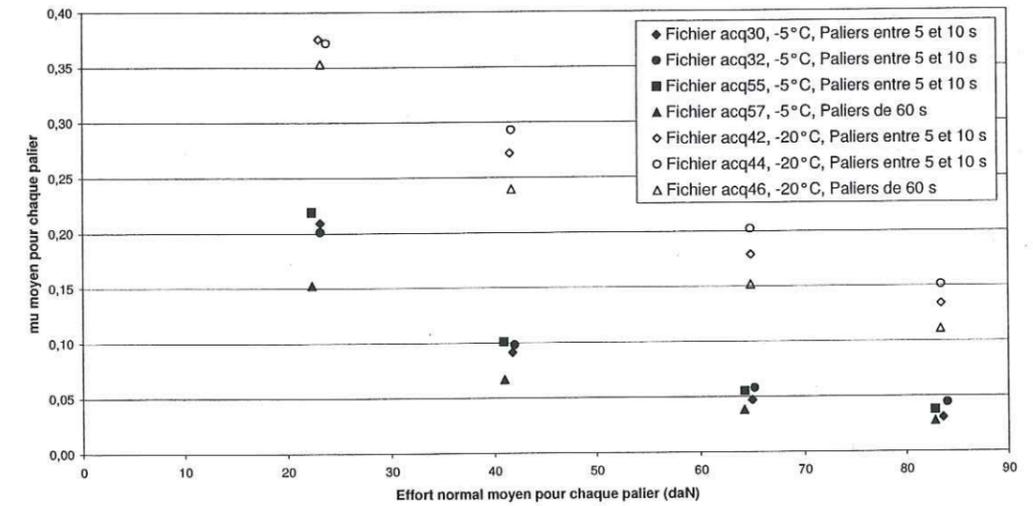


Fig. F.15 - Effet de la durée du palier avec l'éprouvette D-F1 à 50 tours/min à -20 et -5 ° C pour la piste extérieure.

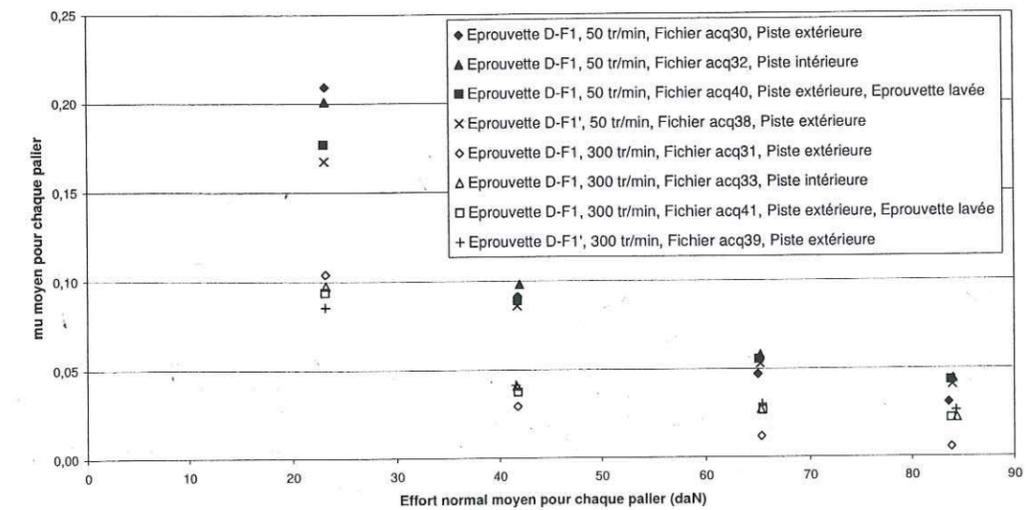
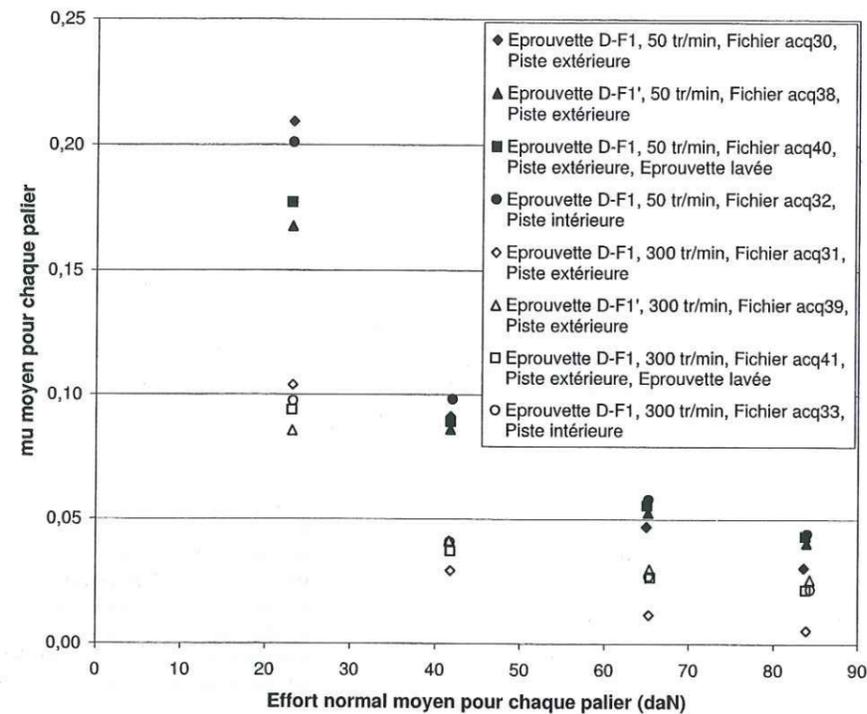
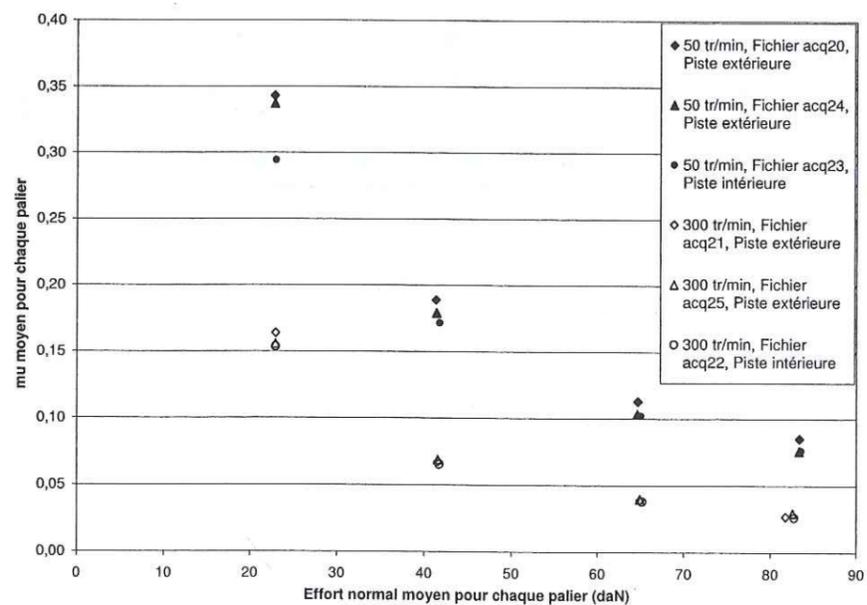


Fig. F.16 - Mélanges très légèrement différents à -5 ° C.

(a) Avec l'éprouvette D-F1 ou D-F2 -5°C .(b) Avec l'éprouvette D-F1 à -10°C .Fig. F.17 – Effet du choix de la piste sur μ .

plus marquée que les deux autres. A T_0 égal, μ est plus faible à V élevé : quel que soit T_0 , un passage de 50 à 300 tours/min semble décaler la courbe de variation de μ avec F_n de 0,2 vers le bas. A T_0 donné, μ décroît légèrement quand F_n augmente. A F_n fixé, μ augmente avec une diminution de T_0 , quel que soit V : μ augmente environ de 0,05 pour une diminution de T_0 de 5°C entre -5 et -20°C . A F_n égal, μ augmente avec une diminution de V . A V égal, μ diminue légèrement avec un accroissement de F_n et fortement avec une augmentation de T_0 .

F.8 Résultats avec le protocole expérimental définitif

F.8.1 Evaluation de la reproductibilité des mesures et de la précision

Les six séries de la figure F.18 ont été obtenues des jours différents mais sous les mêmes conditions : patin D-F1 à -10°C et 100 tours/min. Une barre d'erreur de 10 % est représentée dans un seul cas, afin de ne pas alourdir le graphique. La valeur de μ est précise à mieux que 10 % près sous 24 et 42 daN et légèrement plus que 10 % près sous 65 et 83 daN. Une erreur relative présente peu de signification sur une gamme de mesure de μ allant de 0,01 à 0,4. Dans ce cas, l'erreur absolue est plus significative.

F.8.2 Programmes d'essais effectués avec la machine tournante

Les tableaux F.8.2 et F.8.2 rappellent les conditions expérimentales de T_0 , V et F_n pour tous les essais effectués avec le protocole expérimental d'acquisition définitif.

F.8.3 Variation de μ en fonction des conditions expérimentales

La figure F.19 indique l'évolution de μ du patin D-F1 avec F_n pour T_0 donné et différents V . Les F_n indiqués représentent la moyenne des efforts réels mesurés pour chaque palier et ne correspondent pas toujours aux valeurs du tableau 5.1 qui n'étaient qu'indicatives.

Quels que soient T_0 et V , μ décroît rapidement quand F_n augmente, surtout entre 25 et 42 daN. Pour les F_n les plus élevés, μ continue de décroître, mais de manière moins rapide.

En général, μ décroît quand V augmente. μ diminue fortement entre 50 et 100 tours/min ; sa décroissance est moins importante entre 100 et 150 tours/min, puis les résultats semblent stables à V supérieure à 150 tours/min. Pour F_n supérieur à 65 daN, les variations de μ en fonction de V sont souvent tellement faibles qu'elles restent dans l'incertitude de mesure.

De manière générale, pour V et F_n donnés, μ augmente quand T_0 décroît.

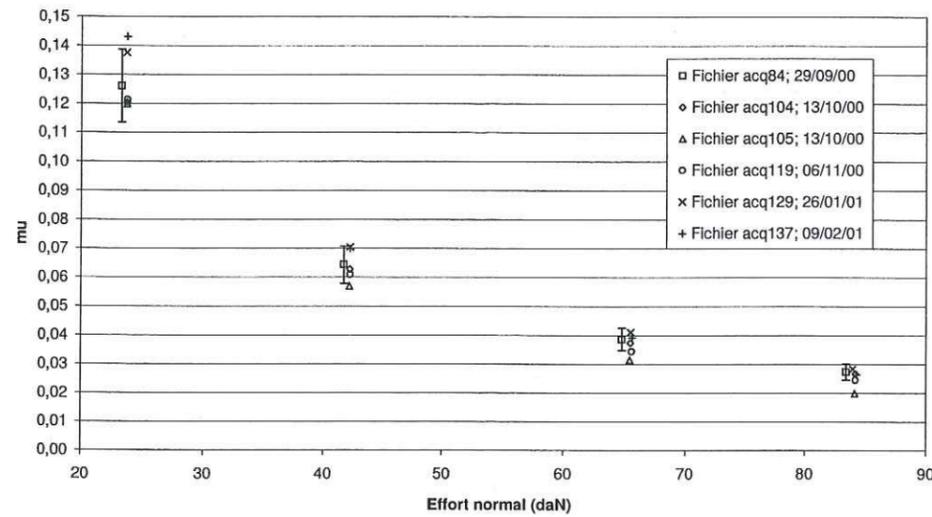


Fig. F.18 – Tests de reproductibilité avec l'éprouvette D-F1 à 100 tours/min et -10 ° C.

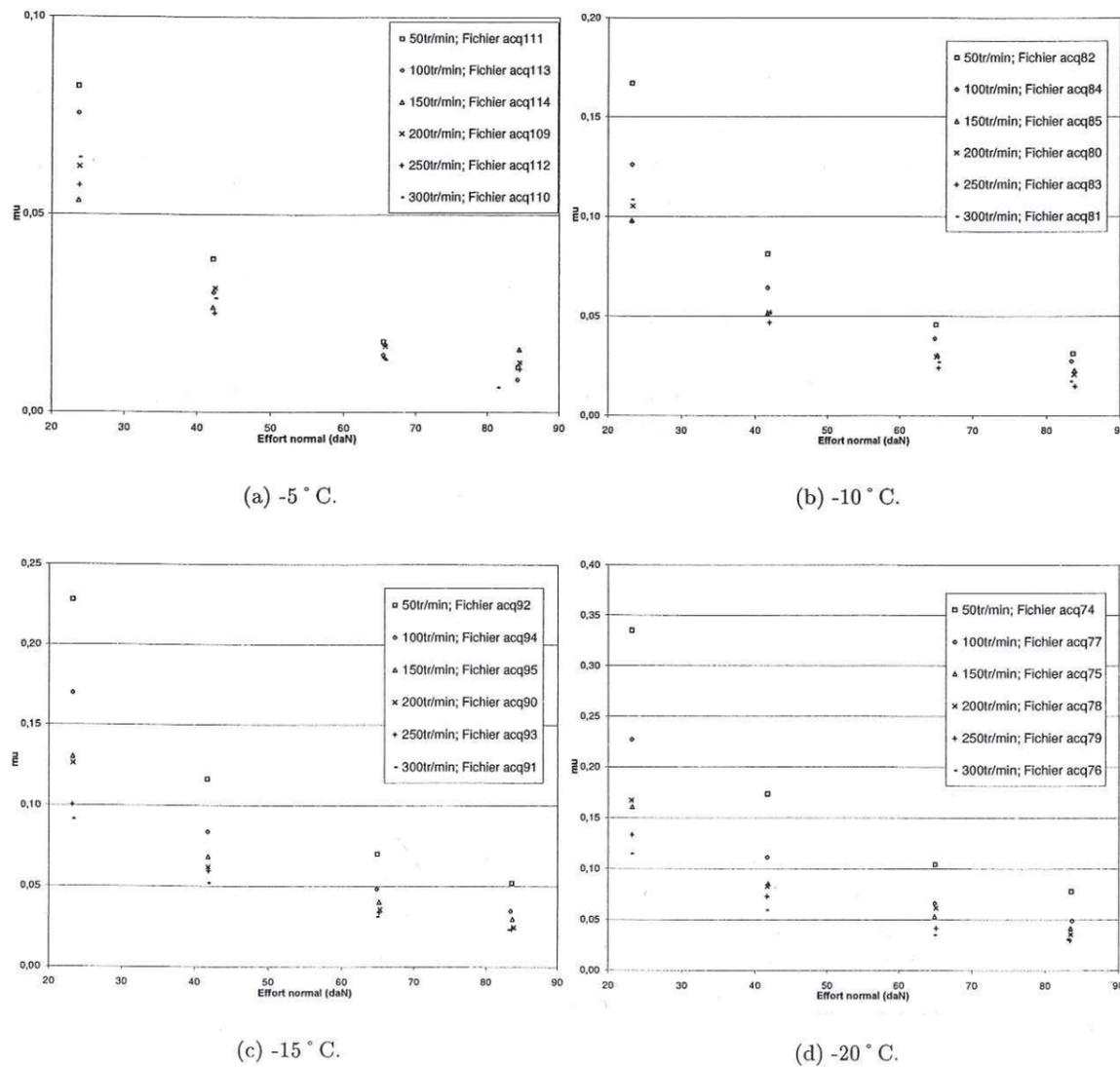


Fig. F.19 – μ avec le patin D-F1 à différentes T_0 , V et F_n .

| Date | Vitesse (tr/min) | Eprouvette | Fichier d'acquisition | Température | Remarques |
|----------|------------------|------------|-----------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------|
| 20/09/00 | 50 | D-F1' | 70 | -20 °C | |
| 20/09/00 | 300 | D-F1' | 71 | -20 °C | |
| 20/09/00 | 50 | D-F1 | 72 | -20 °C | ; éprouvette retournée |
| 20/09/00 | 300 | D-F1 | 73 | -20 °C | ; éprouvette retournée |
| 22/09/00 | 50 | D-F1 | 74 | -20 °C | |
| 22/09/00 | 150 | D-F1 | 75 | -20 °C | |
| 22/09/00 | 300 | D-F1 | 76 | -20 °C | |
| 26/09/00 | 100 | D-F1 | 77 | -20 °C | |
| 26/09/00 | 200 | D-F1 | 78 | -20 °C | |
| 26/09/00 | 250 | D-F1 | 79 | -20 °C | |
| 28/09/00 | 200 | D-F1 | 80 | -10 °C | |
| 28/09/00 | 300 | D-F1 | 81 | -10 °C | |
| 28/09/00 | 50 | D-F1 | 82 | -10 °C | |
| 29/09/00 | 250 | D-F1 | 83 | -10 °C | |
| 29/09/00 | 100 | D-F1 | 84 | -10 °C | |
| 29/09/00 | 150 | D-F1 | 85 | -10 °C | |
| 02/10/00 | 50 | D-F2 | 86 | -20 °C | |
| 02/10/00 | 300 | D-F2 | 87 | -20 °C | |
| 02/10/00 | 50 | D-F2 | 88 | -20 °C | ; éprouvette retournée |
| 02/10/00 | 300 | D-F2 | 89 | -20 °C | ; éprouvette retournée |
| 06/10/00 | 200 | D-F1 | 90 | -15 °C | |
| 06/10/00 | 300 | D-F1 | 91 | -15 °C | |
| 06/10/00 | 50 | D-F1 | 92 | -15 °C | |
| 06/10/00 | 250 | D-F1 | 93 | -15 °C | |
| 06/10/00 | 100 | D-F1 | 94 | -15 °C | |
| 06/10/00 | 150 | D-F1 | 95 | -15 °C | |
| 12/10/00 | 150 | A-1-1 | 96 | -10 °C | |
| 12/10/00 | 150 | A-2-1 | 97 | -10 °C | ; éprouvette retournée |
| 12/10/00 | 150 | A-1-9 | 98 | -10 °C | |
| 12/10/00 | 150 | A-2-9 | 99 | -10 °C | ; éprouvette retournée |
| 12/10/00 | 150 | A-1-5 | 100 | -10 °C | |
| 12/10/00 | 150 | A-2-5 | 101 | -10 °C | ; éprouvette retournée |
| 13/10/00 | 150 | A-0-0 | 102 | -10 °C | |
| 13/10/00 | 150 | A-1-1 | 103 | -10 °C | |
| 13/10/00 | 100 | D-F1 | 104 | -10 °C | |
| 13/10/00 | 100 | D-F1 | 105 | -10 °C | |
| 16/10/00 | 150 | A-0-0 | 106 | -10 °C | ; étalonnage en cisaillement; 3 et 16 poids |
| 16/10/00 | 150 | A-0-0 | 107 | -10 °C | ; éprouvette retournée; étalonnage en cisaillement; 3 et 16 poids |
| 16/10/00 | 0 | A-0-0 | 108 | -10 °C | ; éprouvette retournée ou non; étalonnage en cisaillement en statique |
| 18/10/00 | 200 | D-F1 | 109 | -5 °C | |
| 18/10/00 | 300 | D-F1 | 110 | -5 °C | |
| 18/10/00 | 50 | D-F1 | 111 | -5 °C | |
| 18/10/00 | 250 | D-F1 | 112 | -5 °C | |
| 18/10/00 | 100 | D-F1 | 113 | -5 °C | |
| 18/10/00 | 150 | D-F1 | 114 | -5 °C | |
| 06/11/00 | 150 | B-4 | 115 | -10 °C | ; nombre de poids sur le fléau 1, 2, 4 puis 6 |
| 06/11/00 | 150 | B-10 | 116 | -10 °C | ; nombre de poids sur le fléau 3, 7, 12 puis 16 |
| 06/11/00 | 150 | B-6 | 117 | -10 °C | ; nombre de poids sur le fléau 1, 2, 4 puis 6 |
| 06/11/00 | 150 | B-8 | 118 | -10 °C | ; nombre de poids sur le fléau 2, 5, 9 puis 13 |
| 06/11/00 | 100 | D-F1 | 119 | -10 °C | |
| 06/11/00 | 100 | D-F1 | 120 | -10 °C | ; nombre de poids 16, 12, 7, puis 3 |
| 07/11/00 | 50 | B-4 | 121 | -10 °C | ; nombre de poids sur le fléau 1, 2, 4 et 6 |
| 07/11/00 | 50 | B-10 | 122 | -10 °C | ; nombre de poids sur le fléau 3, 7, 12 et 16 |
| 07/11/00 | 50 | B-6 | 123 | -10 °C | ; nombre de poids sur le fléau 1, 3, 6 et 9 |
| 07/11/00 | 50 | B-8 | 124 | -10 °C | ; nombre de poids sur le fléau 2, 5, 9 et 13 |
| 07/11/00 | 100 | B-10 | 125 | -10 °C | ; éprouvette retournée |
| 07/11/00 | 100 | D-F1 | 126 | -10 °C | ; éprouvette retournée |
| 07/11/00 | 100 | B-10 | 127 | -10 °C | |
| 08/11/00 | 100 | D-F1 | 128 | -10 °C | ; poids sur le fléau 16, 12, 7, puis 3; 30 min entre deux acquisitions |
| 26/01/01 | 100 | D-F1 | 129 | -10 °C | |

Tab. F.1 – Essais effectués avec la machine tournante.

| Date | Vitesse (tr/min) | Eprouvette | Fichier d'acquisition | Température | Remarques |
|----------|------------------|--------------------------|-----------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 05/02/01 | 150 | cuivre | 130 | -10°C | |
| 05/02/01 | 150 | bois | 131 | -10°C | |
| 05/02/01 | 150 | B-10 | 132 | -10°C | ; 200 à 225 tours; nombre de poids sur le fléau: 3, 7, 12, 16, 5, 9, 1, puis 14 |
| 06/02/01 | 150 | B-10 | 133 | -10°C | ; 3 poids sur le fléau; 0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, puis 1400 tours |
| 07/02/01 | 150 | B-10 | 134 | -10°C | ; 16 poids sur le fléau; 0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, puis 1400 tours |
| 08/02/01 | 150 | cuivre + 1 mm de F1 | 135 | -10°C | |
| 08/02/01 | 150 | bois + 1 mm de F1 | 136 | -10°C | |
| 09/02/01 | 100 | D-F1 | 137 | -10°C | |
| 09/02/01 | 150 | D-F1 | 138 | -10°C | ; 3 poids sur le fléau; 0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, puis 1400 tours |
| 09/02/01 | 150 | Cuivre + 2mm de F1 | 139 | -10°C | ; 3 poids sur le fléau; 0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, puis 1400 tours |
| 09/02/01 | 150 | Cuivre + 2mm de F1 | 140 | -10°C | |
| 09/02/01 | 150 | bois + 2 mm de F1 | 141 | -10°C | |
| 20/02/01 | 150 | B-10 | 142 | -10°C | ; 3 poids sur le fléau; 0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, puis 1400 tours |
| 27/02/01 | 150 | cuivre + 7 mm de glace | 143 | -10°C | |
| 28/02/01 | 50 | cuivre + 1,5 mm de glace | 144 | -10°C | |
| 28/02/01 | 100 | B-10 | 145 | -10°C | ; nombre de poids sur le fléau: 3, 7, 12, 16, 5, 9, 1, puis 14 |
| 22/03/01 | 50 | B-10 | 146 | -10°C | ; 3 poids sur le fléau, refroidit derrière ou chauffe devant l'éprouvette |
| 23/03/01 | 150 | B-10 | 147 | -10°C | ; 3 poids sur le fléau, refroidit derrière ou chauffe devant l'éprouvette |
| 23/03/01 | 50 | B-10 | 148 | -10°C | ; 16 poids sur le fléau; refroidissement derrière ou chauffage devant l'éprouvette |
| 06/04/01 | 150 | B-10 | 149 | -10°C | ; 12 poids sur le fléau; refroidissement derrière ou chauffage devant l'éprouvette |
| 20/04/01 | 50 | B-10 | 150 | -10°C | ; 3 poids sur le fléau, pyromètres devant et derrière le patin |
| 20/04/01 | 150 | B-10 | 151 | -10°C | ; 3 poids sur le fléau, pyromètres devant et derrière le patin |
| 20/04/01 | 50 | B-10 | 152 | -10°C | ; 12 poids sur le fléau, pyromètres devant et derrière le patin |
| 20/04/01 | 150 | B-10 | 153 | -10°C | ; 12 poids sur le fléau, pyromètres devant et derrière le patin |
| 20/04/01 | 150 | B-10 | 154 | -10°C | ; 12 poids sur le fléau; refroidissement derrière ou chauffage devant l'éprouvette |
| 20/04/01 | 50 | B-10 | 155 | -10°C | ; 12 poids sur le fléau; refroidissement derrière ou chauffage devant l'éprouvette |
| 23/04/01 | 150 | B-10 | 156 | -10°C | ; 7 poids sur le fléau, pyromètres devant et derrière le patin |
| 23/04/01 | 50 | B-10 | 157 | -10°C | ; 7 poids sur le fléau, pyromètres devant et derrière le patin |
| 02/05/01 | 50 ou 150 | B-10 | 158 | -10°C | ; 3 ou 12 poids, test avec un papier absorbant derrière le patin, arrête le moteur après 200 tours |
| 02/05/01 | 50 ou 150 | B-10 | 159 | -10°C | ; 3, 7, 12 et 16 poids, arrête le moteur après 30 s |

Tab. F.2 - Essais effectués avec la machine tournante.

Bibliographie

- Ahagon, A., Kobayashi, T., and Misawa, M. (1988). Friction on ice. *Rubber Chemistry and Technology*, **61**(1), 14-35.
- Aho, K. (1989). Tribology of the crosscountry ski. *5. Int. Congr. 1989 Tribology (EUROTRIB '89), Espoo, Helsinki, Finland, 12 Jun 1989 - 15 Jun 1989*, **2**, 62-67.
- Akkok, M., Ettles, C. M. M. C., and Calabrese, S. J. (1987). Parameters affecting the kinetic friction of ice. *Journal of Tribology, Transactions of the ASME*, **109**, 552-559.
- Ambach, W. and Mayr, B. (1981). Ski gliding and water film. *Cold Regions Science and Technology*, **5**, 59-65.
- Anttila, J. (1980). Traduction partielle du rapport sur les pneus cloutés, finlande, espoo. *Document interne Michelin*, pages 1-28.
- Archard, J. F. (1959). The temperature of rubbing surfaces. *Wear*, **2**, 438-455.
- Ashby, M. F., Abulawi, J., and Kong, H. S. (1991). Temperature maps for frictional heating in dry sliding. *Tribology Transactions*, **34**(4), 577-587.
- Barnes, P. and Tabor, D. (1966). Plastic flow and pressure melting in the deformation of ice. *Nature*, **210**, 878-882.
- Barnes, P., Tabor, D., and Walker, J. C. F. (1971). The friction and creep of polycrystalline ice. *Proc. Roy. Soc. London A*, **324**, 127-155.
- Bejan, A. (1989). The fundamentals of sliding contact melting and friction. *Journal of Heat Transfer, Transactions of the ASME*, **111**, 13-20.
- Bejan, A. (1994). Contact melting heat transfer and lubrication. *Advances in Heat transfer*, **24**, 1-38.
- Bejan, A. and Tyvand, P. A. (1992). The pressure melting of ice under a body with flat base. *Journal of Heat Transfer, Transactions of the ASME*, **114**, 529-531.
- Berthier, Y. (1990). Experimental evidence for friction and wear modelling. *Wear*, **139**, 77-92.
- Bicego, V., Figari, A., and Poletti, G. (1981). Lubrication of a melting slider under nonisothermal conditions. *Journal of Lubrication Technology*, **103**, 436-442.
- Blaisdell, G. L. (1983). Driving traction on ice with all-season and mud-and-snow radial tires. *CRREL Report 83-27*, pages 1-22.
- Blaisdell, G. L. and Borland, S. L. (1992). Preliminary study of the effect of fines on sanded-ice friction. *Cold regions Science and Technology*, **21**, 79-90.
- Blaisdell, G. L. and Rogers, T. L. (1986). Comparative tractive performance of microspined and conventional radial design tires. *CRREL Special Report 86-39*, pages 1-11.
- Bluhm, H., Inoue, T., and Salmeron, M. (2000). Friction of ice measured using lateral force microscopy. *Physical Review B*, **61**(11), 7760-7765.
- Bohm, F. (1996). Dynamic rolling process of tires as layered structures. *Mechanics of composite materials*, **32**(6), 568-576.
- Bourret, M. (1990). Le frottement sur glace: bibliographie. *Document interne Michelin*, pages 1-24.
- Boussinesq, M. J. (1885). Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. *Paris: Gauthier-Villars*.

- Bowden, F. P. (1953). Friction on snow and ice. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Physical Science*, **217**, 462-478.
- Bowden, F. P. and Hugues, T. P. (1939). The mechanism of sliding on ice and snow. *Proceedings of the Royal Society of London, Math. Phys. Sci. Series A*, **172**, 280-298.
- Bowden, F. P. and Tabor, D. (1950). *The friction and lubrication of solids*. POxford, U.K., Clarendon Press.
- Bueche, F. (1962). Physical properties of polymers. *Wiley Interscience, New York*, 19.
- Canizares, P. (1988). Etude du comportement d'un pain de gomme clouté. *Document interne Michelin*, pages 1-25.
- Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C. (1958). Conduction of heat in solids. *Oxford, Clarendon Press*.
- Casassa, G., Narita, H., and Maeno, N. (1991). Shear cell experiments of snow and ice friction. *Journal of Applied Physics*, **69**(6), 3745-3756.
- Colbeck, S. C. (1988). The kinetic friction of snow. *Journal of Glaciology*, **34**(116), 78-86.
- Colbeck, S. C. (1993). Bibliography on snow and ice friction. *CRREL Special report*, **6**, 1-17.
- Colbeck, S. C. (1994). A review of the friction of snow skis. *Journals of Sports Sciences*, **12**, 285-295.
- Colbeck, S. C. (1995). Pressure melting and ice skating. *American Journal of Physics*, **63**(10), 888-890.
- Colbeck, S. C., Najarian, L., and Smith, H. B. (1997). Sliding temperature of ice skates. *American Journal of Physics*, **65**(6), 488-492.
- Déloye, V. (2000a). Etude bibliographique: modélisation et mesures du frottement sur la glace. *Rapport interne Michelin*, 20/12/00, pages 1-90.
- Déloye, V. (2000b). Etude expérimentale de l'indentation de la glace. *Rapport interne Michelin*, 12/05/00, pages 1-84.
- Déloye, V. (2001). Résultats expérimentaux obtenus avec la machine tournante. rapport 1: 10/10/00; rapport 2: 31/10/00; rapport 3: 04/12/00; rapport 4: 23/03/01; rapport 5: 07/05/01; synthèse: 11/05/01. *Rapports internes Michelin*, pages 1-84.
- Derham, C. J., Newell, R., and Swift, P. M. (1988). The use of silica for improving tread grip in winter tyres. *NR Technology*, **19**(1), 1-9.
- Dorémieux, F. (1990). Etude analytique et numérique du mécanisme de la friction contrôlée thermiquement appliquée au freinage d'un pneu sur glace. *Rapport interne Michelin*, pages 1-27.
- Douce, E. (1993). Comprehension of the evolution of the ice's surface state when relative sliding between tire and ice occurs. *Partie d'un rapport interne Michelin*.
- Dubus, A. (1997). Freinage du pneu et friction gomme/glace. *Mémoire de Travail de fin d'études, Ecole Centrale de Lyon*, pages 1-36.
- Eastman, T. and Zhu, D.-M. (1995). Influence of an AFM tip on interfacial melting on ice. *Journal of Colloid and Interface Science*, **172**, 297-301.
- Ettles, C. M. M. (1986a). A quantitative theory for the computation of tire friction under severe conditions of sliding. *Tire Science and Technology*, **14**(1), 44-72.
- Ettles, C. M. M. C. (1985). Heat generation and friction in rotating bands. *ASLE Transactions*, **29**(3), 312-320.
- Ettles, C. M. M. C. (1986b). Polymer and elastomer friction in the thermal control regime. *ASLE Transactions*, **30**(2), 149-159.
- Evans, D. C., Nye, J. F., and Cheeseman, K. J. (1976). The kinetic friction of ice. *Proceedings of the Royal Society of London, Mathematical and Physical Sciences*, **347**(1651), 493-512.
- Evans, L. R. C. and Waddell, W. H. (1995). Ultra-high reinforcing precipitated silica for tire and rubber applications. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, **48**(10), 718-723.
- Fiorio, B. (2000). Etude expérimentale du frottement glace - structure à l'échelle centimétrique. *Thèse de troisième cycle de l'Université Joseph Fourier - Grenoble I*, pages 1-191.

- Fiorio, B., Meyssonier, J., and Boulon, M. (2001). Etude expérimentale du frottement glace - béton: cas des interactions glace - structure. *Revue Française de Génie Civil*, **5**(1), 39-62.
- Fletcher, N. H. (1968). Surface structure of water and ice. *Philosophical Magazine*, **7**, 255-269.
- Forland, K. A. and Tatinclaux, J.-C. (1984). Laboratory investigation of the kinetic friction of ice. *7eme IAHR Ice Symposium 1984. Hamburg*, **1**, 19-28.
- Forland, K. A. and Tatinclaux, J.-C. P. (1985). Kinetic friction coefficient of ice. *CRREL Report*, **6**, 1-45.
- Fowler, A. and Bejan, A. (1993). Contact melting during sliding on ice. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **36**(5), 1171-1179.
- Fukuta, N. (1987). An origin of the equilibrium liquid-like layer on ice. *Journal de Physique, Colloque C1, Supplément au n3*, **48**, 503-509.
- Furukawa, Y., Yamamoto, M., and Kuroda, T. (1987). Ellipsometric study of the ice surface structure just below the melting point. *Journal de Physique-C*, **48**(1), 495-501.
- Futamura, S. (1990). Effect of material properties on tire performance characteristics - part ii, tread material. *Tire Science and Technology*, **18**(1), 2-12.
- Futamura, S. (1996). Analysis of ice and snow traction of tread materials. *Rubber Chemistry and Technology*, **69**(4), 648-653.
- Galazyuk, V. A., Evtushenko, A. A., and Turchin, I. N. (1996). Unsteady frictional heating of projections of microirregularities of a sliding contact. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, **69**(5), 585-589.
- Glen, J. W. (1958). The flaw law of ice. *IASH Publication*, **47**, 171-183.
- Glenne, B., Rocco, A. D., and der Grift, J. V. (1997). The modern alpine ski. *Cold Regions Science and Technology*, **26**, 35-38.
- Gnorich, W. and Grosch, K. A. (1972). The friction of polymers on ice. *Journal of the Institution of the Rubber Industry*, **6**(5), 192-196.
- Godet, M. (1984). The third-body approach: a mechanical view of wear. *Wear*, **100**, 437-452.
- Godet, M. (1990). Third-body in tribology. *Wear*, **136**, 29-45.
- Gray, D. E. (1957). American institute of physics handbook. *McGraw-Hill Book Company, Inc.*
- Greenwood, F. A. and Tabor, D. (1958). *Proc. Phys. Soc. London*, **71**(989), 663-670.
- Greiner, H. (1990). Etude de crampons, coefficient d'adhérence sur glace. *Document interne Michelin*, pages 1-19.
- Greiner, H. (1991). Pneu clouté m+s 250; performances associées au choix des crampons. *Document interne Michelin*, pages 1-20.
- Gronqvist, R. and Hirvonen, M. (1995). Slipperiness of footwear and mechanisms of walking friction on icy surfaces. *International Journal of Industrial Ergonomics*, **16**, 191-200.
- Grosch, K. A. (1996). The rolling resistance, wear and traction properties of tread compounds. *Rubber Chemistry and Technology*, **69**(3), 495-568.
- Hamada, T., Kawaguchi, Y., and Hirata, Y. (1993). The development of a new material for studless snow tires. *143rd Technical Meeting, Rubber Division, American Chemical Society, Denver, Colorado, 18th-21st May 1993*, pages 1-14.
- Hasebe, M. (1984). Experimental study of the noise generated by a passenger automobile equipped with studded and regular snow tyres. *Acoustics*, **17**, 247-254.
- Hayhoe, G. F. (1981). Film thickness under a tire sliding on ice. *Automotive Research Program, Tech. Memo. 165, The Penna. State Univ., Dec, 1981*.
- Hayhoe, G. F. and Shapley, C. G. (1982). Factors affecting the skidding performance of trucks. *Highway Truck Collision analysis, Winter Annual Meeting, Phoenix AZ*, pages 19-30.
- Hayhoe, G. F. and Shapley, C. G. (1989). Tire force generation on ice. *SECC, Mobility Engineering and Operating Challenges in Subzero Conditions, Rovaniemi, Finland, 9-11 January 1989*, pages 199-207.
- Hertz, H. (1896). Miscellaneous papers. *Macmillan, London*.

- Hiroki, E. and Horiuchi, K. (1994). Les forces de frottement et l'effet de raclage des arêtes des pains et lamelles sur la glace. *Document Michelin, Traduction d'un article japonais*.
- Hiroki, Y. (93). Evaluation of the performance of studless tyres; part 1; performance characteristics on ice as assessed on a laboratory test device for winter tyres. *International Polymer Science and Technology*, **20**(8), 79-86.
- Hobbs, P. V. (1974). Ice physics. *Oxford University Press, London*.
- Holzwarth, F. and Eichhorn, U. (1993). Non-contact sensors for road conditions. *Sensors and Actuators A*, **37**, 121-127.
- Horiuchi, K. (1991). Studless tires and their performance to secure safe driving in winter. *International Pacific Conference on Automotive Engineering, 6th, Seoul, Korea, Oct. 28-Nov. 1, 1991, Proceedings.*, **2**, 1081-1087.
- Huber, N. P., Itagaki, K., and Kennedy, F. E. (1985). Dynamic friction of bobsled runners on ice. *?*, pages 1-26.
- Ishikawa, Y. (1998). Tyre friction-friction on ice and material properties. *Progress in Rubber and Plastics Technology*, **14**(4), 189-207.
- Itagaki, K., Lemieux, G. E., and Huber, N. P. (1987). Preliminary study of friction between ice and sled runners. *Journal de Physique-C*, **48**(1), 297-301.
- Itagaki, K., Huber, N. P., and Lemieux, G. E. (1989). Dynamic friction of a metal runner on ice. i. model sled test. *CRREL Report*, **14**, 1-23.
- Jellinek, H. H. G. (1959). Adhesive properties of ice. *Journal of Colloid Science*, **14**, 268-280.
- Jellinek, H. H. G. (1962). Ice adhesion. *Canadian Journal of Physics*, **40**, 1294-1309.
- Jones, D. E., Kennedy, F. E., and Schulson, E. M. (1991). The kinetic friction of saline ice against itself at low sliding velocities. *Annals of Glaciology*, **15**, 242-246.
- Jones, S. J., Kitagawa, H., Izumiyama, K., and Shimoda, H. (1994). Friction of melting ice. *Annals of Glaciology*, **19**, 7-12.
- Kawakami, S., Misawa, M., and Hirakawa, M. (1990). The relation between temperature dependence of viscoelasticity and friction to hysteresis. *Yokohama Rubber Co.*
- Kawano, T. and Ueyama, H. (1999). Tyre friction characteristics on snow and ice and studless tyre technology. *International Polymer Science and Technology*, **26**(10), 12-18.
- Keinonen, J. (1978). An experimental device for measuring friction between ski and snow. *Acta Polytechnica Scandinavica, Applied Physics Series*, **123**, 2-11.
- Kennedy, F. E., Schulson, E. M., and Jones, D. E. (2000). The friction of ice on ice at low sliding velocities. *Philosophical Magazine A (Physics of Condensed Matter: Structure, Defects and Mechanical Properties)*, **80**(5), 1093-1110.
- Khusnatdinov, N. N. and Petrenko, V. F. (1997). Experimental study of ice electrolysis under UV radiation. *J. Phys. Chem. B*, **101**(32), 6208-6211.
- Khusnatdinov, N. N., Petrenko, V. P., and Levey, C. G. (1997). Electrical properties of the ice/solid interface. *J. Phys. Chem. B*, **101**(32), 6212-6214.
- Kobayashi, T., Nohguchi, Y., Kawashima, K., Ikarashi, T., Nakamura, T., Horiguchi, K., and Mizuno, Y. (1997). Slip test between the surfaces of snow/ice and some kinds of shoes. *International Conference on Snow Engineering, 3rd, Sendai, Japan, May 26-31, 1996 Proceedings. Snow engineering: recent advances. Edited by M. Izumi, T. Nakamura, and R.L. Sack, Rotterdam, A.A. Balkema, 1997, pages 77-80.*
- Koning, J. J. D., Groot, G. D., and Schenau, G. J. V. I. (1992). Ice friction during speed skating. *Journal of Biomechanics*, **25**(6), 565-571.
- Kozlov, I. I. and Shugai, A. A. (1991). Experimental study of high-speed friction on ice. *Fluids Dynamics*, **26**(1), 145-147.
- Kuroiwa, D. (1977). The kinetic friction on snow and ice. *Journal of Glaciology*, **19**(81), 141-152.
- Lake, G. J. and Thomas, A. G. (1967). *Proc. Royal Society, London, Series A*, **300**, **300**, 108.

- Laulusa, A. (1998). Synthèse sur les performances des pneus cloutés. *Document interne Michelin*, pages 1-85.
- Lefebvre, P. (1991). Efforts dans l'aire de contact générés par un clou sur un pneumatique en roulage. *Document interne Michelin*, pages 1-19.
- Lehtovaara, A. (1987). Influence of vibration on the kinetic friction between plastics and ice. *Wear*, **115**(1), 131-138.
- Lenoël, V. (1998). Caractérisation expérimentale du frottement élastomère - glace. *Mémoire de DEA de Matériaux Polymères et Composites, Ecole Centrale de Lyon*, pages 1-76.
- Lenoël, V. (1999a). Interaction clou - glace: bibliographie succincte. *Rapport interne Michelin*, **20/01/99**, pages 1-17.
- Lenoël, V. (1999b). Phénomènes électromagnétiques dans la glace. *Rapport interne Michelin*, **28/07/99**, pages 1-22.
- Levystskyi, V. P. and Onyshkevych, V. M. (1996). Plane contact problem with heat generation account of friction. *International Journal of Engineering Science*, **34**(1), 101-112.
- Liukkonen, S. (1989). About physical modelling of kinetic friction between ice and ship. *POAC 1989, Proceedings of the 10th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Lulea, Sweden, 12-16 June 1989*, **2**, 736-749.
- Lliboutry, L. (1965). *Traité de glaciologie: glace, neige, hydrologie hivernale. Masson & Cie, Paris*, page 379.
- Maeno, N. and Nishimura, H. (1978). The electrical properties of ice surfaces. *Journal of Glaciology*, **21**(85), 193-205.
- Makkonen, L. (1994). Application of a new friction theory to ice and snow. *Annals of Glaciology*, **19**, 155-157.
- Makkonen, L. (1997). Surface melting of ice. *J. Phys. Chem. B*, **101**(32), 6196-6200.
- Maksimova, N. S. and Sizikov, N. N. (1999). Effect of fine colloidal silica on the slip resistance of tread rubbers. *International Polymer Science and Technology*, **26**(11), 47-50.
- Martin, D. P. and Schaefer, G. F. (1996). Tire-road friction in winter conditions for accident reconstruction. *SAE International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, Feb. 96*, pages 732-750.
- Mitsuhashi, K., Hiroki, E., Midorikawa, S., and Shinoda, S. (1997). Study of the friction properties of studless tyres on icy roads: comparison of friction properties of studless tyres and laboratory-prepared samples. *International Polymer Science and Technology*, **24**(9), 16-21.
- Mizuno, Y. and Hanafusa, H. (1987). Studies of surface properties of ice using nuclear magnetic resonance. *Journal de Physique-C*, **48**(1), 511-517.
- Mooney, M. J. (1940). *Appl. Phys.*, **11**, 582.
- Moore, D. F. (1972). *The friction and Lubrication of Elastomers*. Pergamon Press, Oxford.
- Moore, D. F. (1975). *The friction of pneumatic tyres*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Nahmias, M. and Serra, A. (1997). Correlation of wet traction with viscoelastic properties of passenger tread compounds. *Rubber World*, **216**(6), 38-42.
- Nakazawa, N., Terashima, T., Saeki, H., and Ono, T. (1993). Factors influencing the coefficient of friction between ice and various materials. *POAC 1993, Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*.
- Newell, R. (1990). Natural rubber in tyre applications. *TyreTech Nov. 90; Seminar Proceedings Rubber Developments; paper 7*.
- Newell, R. and Wallace, I. R. (1995). Oil-extended natural rubber in passenger tyre treads. *Rubber Developments*, **48**(1), 21-25.
- Nishi, T. (1997). Non-metallic anti-skid devices for tyres. *International Polymer Science and Technology*, **24**(6), 40-45.
- Ochiai, T. and Hiroki, E. (1994). Development of indoor tire traction test on compact snow surface. *Technical Notes / JSAE Review*, **15**, 341-365.

- Ohhara, R. (1996). Theory of rubber friction. *International Polymer Science and Technology*, **23**(6), 25-31.
- Oksanen, P. (1980). Coefficient of friction between ice and some construction materials, plastics and coatings. *Technical Research Centre of Finland, Laboratory of Structural Engineering, Report 7, Espoo, Avril 1980*, pages 1-73.
- Oksanen, P. (1983). Friction and adhesion of ice. *Technical Research Centre of Finland, Laboratory of Structural Engineering, Publications 10, Espoo, March 1983*, pages 1-36.
- Oksanen, P. and Keinonen, J. (1982). The mechanism of friction of ice. *Wear*, **78**, 315-324.
- Pashechko, M. I., Koval'chyk, Y. I., and Pryshlyak, R. E. (1997). Simulation of heat sources and heat transfer for the analysis of temperatures in the process of friction. *Materials Science*, **33**(1), 21-28.
- Peng, X. D., Xie, Y. B., and Guo, K. H. (1999). Tire traction modeling for use in ice mobile. *SAE International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, USA, March 99*, pages 97-104.
- Petrenko, V. F. (1994). The effects of static electric fields on ice friction. *Journal of Applied Physics*, **76**(2), 1216-1219.
- Petrenko, V. F. (1998a). Systems and methods for modifying ice adhesion strength. *Patent WO 98/57851*.
- Petrenko, V. F. and Colbeck, S. C. (1995). Generation of electric fields by ice and snow friction. *Journal of Applied Physics*, **77**(9), 4518-4521.
- Petrenko, V. F. and Ryzhkin, I. A. (1997). Surface states of charges carriers and electrical properties of the surface layer of ice. *J. Phys. Chem. B*, **101**(32), 6285-6289.
- Petrenko, V. P. (1996). Electromechanical phenomena in ice. *CRREL Reports*, **96**(2), 1-30.
- Petrenko, V. P. (1998b). Systems and methods for modifying ice adhesion strength. *Brevet Patent Cooperation Treaty n WO 98/5785*, pages 1-62.
- Petrenko, V. P. and Whitworth, R. W. (1999). *Physics of ice*. Oxford University Press.
- Pitrola, R., Roberts, A. D., and Barnes, P. (1993). Influence of proteinaceous material on the sliding friction of rubber against ice. *Journal of Natural Rubber Research*, **8**(1), 21-30.
- Prevorsek, D. C., Kwon, Y. D., Beringer, C. W., and Nelson, J. J. (1992). Prospects for short fiber reinforcements in tire and rubber technology. *Rubbercon 92 - A Vision for Europe, Conference Proceedings, June 1992*, pages 295-303.
- Reynolds, O. (1901). Papers on mechanical and physical subjects 1881-1900. *Collected Work, Volume II, Cambridge University Press*.
- Rivlin, R. S. (1948). *Philos. Trans. Royal Soc., London, A241*, page 379.
- Roberts, A. D. (1980). Adhesion and friction of rubber on ice. *Adhesion and Adhesives: Science, Technology and Applications, International Conference, sept 1980, Durham*, **24**, 24,1-24,6.
- Roberts, A. D. (1981). Rubber-ice friction and vehicle handling. *Tribology International, February*, pages 14-16.
- Roberts, A. D. (1987). Temperature rise when rubber slides. *Journal of Natural Rubber Research*, **2**(4), 255-269.
- Roberts, A. D. (1992). A guide to estimating the friction of rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, **65**(3), 673-686.
- Roberts, A. D. (1993). Temperature rise produced on an ice surface by a rubber slider. *Journal of Natural Rubber Research*, **8**(3), 163-175.
- Roberts, A. D. and Lanes, J. P. (1983). Friction of rubber on ice in the presence of salt. *J. Phys. D: Applied Phys.*, **16**, 275-285.
- Roberts, A. D. and Richardson, J. C. (1981). Interface study of rubber-ice friction. *Wear*, **67**(1), 55-69.
- Roberts, A. D., Pitrola, R., and Barnes, P. (1989). Influence of skim rubber on ice friction. *Natural Rubber Technology*, **20**(1), 1-7.

- Rougier, P. (1969). Efficacité des crampons suivant leur position et leur nombre dans la sculpture. *Document interne Michelin*, pages 1-11.
- Ryzhkin, I. A. and Petrenko, V. F. (1997). Physical mechanisms responsible for ice adhesion. *J. Phys. Chem. B*, **101**(32), 6267-6270.
- Saeki, H., Ono, T., Nakazawa, N., Sakai, M., and Tanaka, S. (1986). The coefficient of friction between sea ice and various materials used in offshore structures. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, **108**, 65-71.
- Sakamoto, T. and Hirata, Y. (1993). Development of studless tyres (for passenger cars). *International Polymer Science and Technology*, **20**(7), 43-50.
- Schallamach, A. (1963). A theory of dynamic rubber friction. *Wear*, **63**, 375-382.
- Schallamach, A. (1971). How does rubber slide? *Wear*, **17**, 301-312.
- Schweizer, J. and Iken, A. (1992). The role of bed separation and friction in sliding over an undeformable bed. *Journal of Glaciology*, **38**(128), 77-92.
- Shegelski, M. R. A., Niebergall, R., and Walton, M. A. (1996). The motion of a curling rock. *Can. J. Phys.*, **74**, 663-670.
- Shimizu, K.-I. and Nihei, M. (1996). Emergency braking test of the ice and snow tires on iced drum tester. *SAE Paper 910167*, pages 1-7.
- Shimizu, K.-I., Nihei, M., and Dorémieux, F. (1992). Effect of texture of iced road surface on characteristics of ice and snow tires. *Subzero Engineering Conditions Conference. Helsinki, Finl., Feb. 92*, pages 173-181.
- Shimizu, K.-I., Nihei, M., and Douce, E. (1994). Effect of the concentration of electrolyte impurities in ice on the characteristics of studless tyres. *Proc Internat Symposium on Advanced Vehicle Control, Oct. 1994*, pages 503-508.
- Shugai, A. A. (1994). Friction of solids with the formation of a melt layer. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, **67**(3), 991-995.
- Soeda, M. and Kurata, Y. (1996). Friction and tread wear properties of carbon black filled rubber compounds. *International Polymer Science and Technology*, **23**(9), 28-35.
- Southern, E. and Walker, R. (1974). A laboratory study of the friction of rubber on ice. *Am. Chem. Soc., Div. Org. Coat. Plast. Chem.*, **34**(1), 282-289.
- Southern, E. and Walker, R. W. (1972). Friction of rubber on ice. *Nature (Physical Science)*, **237**(78), 142-144.
- Stiffler, A. K. (1984). Friction and wear with a fully melting surface. *Journal of Tribology, Transactions of the ASME*, **106**, 416-419.
- Strausky, H., Krenn, J. R., Leitner, A., and Aussenegg, F. R. (1996). Thickness determination of a water film on dye-doped ice by fluorescence spectroscopy. *Applied Optics*, **35**(1), 198-200.
- Strausky, H., Krenn, J. R., Leitner, A., and Aussenegg, F. R. (1998). Sliding plastics on ice: fluorescence spectroscopic on interfacial water layers in the micrometer thickness regime. *Applied Physics B*, **66**(5), 599-602.
- Tabor, D. and Walker, J. C. F. (1970). Creep and friction of ice. *Nature*, **228**, 137-139.
- Takino, I., Kamamizu, K., Komai, M., Hiramatsu, K., and Okazaki, T. (1991). Rubber and collagen-fiber blends for studless winter tire applications. *Rubber World*, **204**(2), 38-45.
- Tatinclaux, J. C. and Martinson, C. (1990). Model surface treatment for testing in ice. *IAHR Ice Symposium 1990. Espoo*, **2**, 766-775.
- Tatinclaux, J.-C., Forland, K. A., and Murdey, D. (1986). Laboratory and field studies of ice friction coefficient. *8eme IAHR Ice Symposium 1986. Iowa City, Iowa*, **1**, 389-400.
- Treloar, L. R. G. (1958). The physics of rubber elasticity. *Oxford U.*
- Tret'yakov, O. B., Dik, A. B., Zarshchikov, A. M., Gudilin, N. D., and Chuenko, A. A. (1993). Influence of tread hardness on the properties of oligomer tyres during movement on ice. *International Polymer Science and Technology*, **20**(10), 36-38.

- Truffer, M. and Iken, A. (1998). The sliding velocity over a sinusoidal bed at high water pressure. *Journal of Glaciology*, **44**(147), 379-382.
- Tusima, K. (1977). Friction of a steel ball on a single crystal of ice. *Journal of Glaciology*, **19**(81), 225-235.
- Tusima, K. (1978). Anisotropy of the kinetic friction on a single crystal of ice. *Journal of Glaciology*, **21**(85), 661-668.
- Tusima, K. and Tabata, T. (1979). Friction measurements of sea ice on flat plates of metals, plastics and coatings. *POAC 1979, Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Artic Conditions*, pages 741-754.
- Uchiyama, Y. (1998). Fundamentals of rubber friction - slip and non slip properties. *International Polymer Science and Technology*, **25**(2), 48-51.
- Veith, A. G. (1996a). Tire traction vs tread compound properties - how pavement texture and test conditions influence the relationship. *Rubber Chemistry and Technology*, **69**(4), 654-673.
- Veith, A. G. (1996b). Tire wet traction - explaining performance variation using the 'criticality' concept. *Rubber Chemistry and Technology*, **69**(5), 858-873.
- Veith, A. G. (1998). Rubber vs coutersurface frictional behaviour: how this influences the traction of pneumatic tyres. *Progress in Rubber and Plastics Technology*, **14**(1), 1-49.
- Venkatesh, S. (1975). Laboratory studies of the friction of rubber on ice. *Tribology International*, **5**(2), 51-55.
- Vidal, A. (1997). Adhérence sur glace: échauffement de la glace pendant le freinage. *Rapport interne Michelin*.
- Wada, N. (1998). Rubber friction test methods. *International Polymer Science and Technology*, **25**(2), 52-59.
- Williams, M. L., Landel, R. F., and Ferry, J. D. (1955). Temperature dependence of relocation mechanisms in amorphous polymers. *J. Am. Chem. Soc.*, **77**(3701).
- Yamaguchi, M., Hiroki, E., and Yamazaki, S. (1998). Effects of the number of siping edge in a tire tread block on friction property and contact with an icy road. *SAE Spring Convention Proceedings*, pages 63-66.
- Yamazaki, S. (1993). Mechanism of tyre contact on icy roads. *International Polymer Science and Technology*, **20**(8), 71-78.
- Yamazaki, S., Chen, J., Ho, T., Wenkuo, S., Yamaguchi, M., and Suzuki, T. (1998). Relationship between longitudinal stiffness and slope climbing performance of studless tyres. *International Polymer Science and Technology*, **25**(10), 39-48.
- Yamazaki, S., Yamaguchi, M., Hiroki, E., and Suzuki, T. (2000). Effects of the number of siping edges in a tire tread block on friction property and contact with an icy road. *Tire Science and Technology*, **28**(1), 58-69.

Etude du frottement pneumatique - glace : grattage de la glace et frottement élastomère - glace

L'objectif de ce travail est d'identifier et de comprendre l'importance des différents phénomènes physiques intervenant dans l'interaction pneumatique - glace.

D'une part, les législations interdisent de plus en plus l'usage des pneumatiques cloutés et l'objectif est aujourd'hui d'obtenir un frottement élevé sur la glace par d'autres moyens. Afin de comprendre les mécanismes physiques mis en jeu lors du grattage de la glace, nous avons conçu un dispositif expérimental permettant de mesurer trois types de coefficients de frottement entre différents indenteurs et la glace. Un patin supporté par quatre frotteurs est frappé par un pendule et lancé sur une piste horizontale de glace de longueur 2m30. Un traitement d'images ou un accéléromètre embarqué permettent d'accéder aux coefficients de frottement.

D'autre part, un prototype expérimental de mesure de frottement élastomère - glace a été développé pour simuler le comportement lors d'un freinage en roue bloquée. Un patin d'élastomère d'aire apparente inférieure à 20 cm² est appliqué sur un disque de glace en rotation. Les efforts normal et tangentiel sont mesurés par l'intermédiaire d'un capteur fixé directement sur le patin. Des observations du faciès de la surface de glace à la loupe binoculaire fournissent une caractérisation qualitative du frottement. Les conditions expérimentales sont : contrainte normale nominale de 1 à 4 bars, vitesse de glissement de 2 à 11 m/s, température ambiante de -20 à -5C. Le coefficient de frottement mesuré augmente avec une diminution de l'un de ces trois paramètres. Les résultats exposés montrent aussi les effets de l'usure de la piste, de l'échauffement du patin, de l'aire de contact et de la répartition de la contrainte normale.

Mots clefs : frottement, pneumatique, glace, élastomère

Experimental study of the friction of tyre on ice : scraping of ice and friction of rubber on ice

The objective of this work is to identify and understand the importance of the various physical phenomena involved in the interaction between tyre and ice.

On one hand, many legislations tend to prohibit the use of studded tires and the actual aim is to obtain high friction on ice by other means. In order to understand the physical mechanisms which act during the scraping of ice, an experimental device was designed. It allows to measure three types of friction coefficients between various indenteurs and ice. A sledge supported by four friction blocks is launched by a pendulum on a 2m30 long horizontal ice track. Coefficients of friction are evaluated by means of digital image analysis or embarked accelerometer.

On the other hand, an experimental prototype for measurement of friction between rubber and ice was developed to simulate the behavior during braking with locked wheel. An elastomer specimen of area lower than 20 cm² is applied on a rotating disc of ice. Normal and tangential forces are measured by a sensor directly fixed on the sample. Observations of the facies of ice surface with a binocular provide qualitative characterization of friction. Experimental conditions are : nominal normal stress from 1 to 4 bars, sliding speed from 2 to 11 m/s, ambient temperature between -20 and -5C. A decrease of one of these three parameters increases measured friction coefficient. Exposed results show also the effect of track wear, sample heating, contact area and distribution of normal stress.

Key words : friction, tyre, ice, rubber

