

Fabrication et validation assistées par ordinateur de surfaces 3D avec frottement, basées sur des données

par

Antoine Boucher

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE DECEMBRE 17, 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Antoine Boucher, 2025



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Sheldon Andrew, directeur de mémoire
Professeur agrégé de génie logiciel et informatique

M. Sheldon Andrew, président du jury
Département de génie logiciel et des TI, École de technologie supérieure (ÉTS)

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE DECEMBRE 17, 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Le phénomène de friction est d'une grande complexité, émergeant de la combinaison de déformations élastiques et plastiques, ainsi que d'interactions moléculaires à l'interface de contact. Lorsque deux surfaces entrent en contact, leur rugosité et la force normale appliquée déterminent la zone réelle d'interaction, régissant ainsi les processus de déformation et d'adhésion moléculaire. À l'échelle macroscopique, ce contact se traduit par une multitude de microscopiques points de contact, chacun contribuant aux forces qui génèrent le frottement global.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la simulation de la friction dans des conditions où le contact est non lubrifié et où les déformations élastiques jouent un rôle clé au niveau des aspérités des surfaces. Afin de mieux comprendre et prédire le comportement frictionnel, nous avons collecté un vaste ensemble de données en faisant varier plusieurs paramètres influençant la friction entre deux surfaces. Nous avons ensuite développé un modèle approximatif exploitant les corrélations observées dans ces données, offrant ainsi une alternative à la fois polyvalente et plus précise que les tables de coefficients de friction traditionnellement utilisées dans les systèmes physiques.

Ce modèle, plus efficient en termes de calcul, vise à fournir des prédictions fiables et à élargir notre compréhension du phénomène de friction dans divers contextes d'application industrielle et technologique.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui m'ont soutenu tout au long de mes études. Je remercie particulièrement mon professeur, Sheldon Andrews, pour son encadrement précieux, sa disponibilité et ses conseils éclairés qui ont grandement contribué à la réalisation de ce projet.

Je souhaite également remercier chaleureusement toute l'équipe du laboratoire multimédia pour leur aide et leur collaboration. Leur soutien a été essentiel à l'avancement de ce travail.

Un immense merci à mes parents, qui m'ont soutenu avec patience et encouragements tout au long de ce parcours.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à Quoc-Minh Ton-That, qui m'a aidé au début de mon projet, à Loïc pour ses données, et à Pranav pour son travail sur la modélisation de l'IA.

Fabrication et validation assistées par ordinateur de surfaces 3D avec frottement, basées sur des données

Antoine Boucher

RÉSUMÉ

La conception de surface frictionnel au meso scale comporte des difficultés sur le niveau de coefficients de friction

Mots-clés: simulation, friction, intelligence artificielle, modélisation, surfaces 3D, conception inverse

Titre en anglais

Antoine Boucher

ABSTRACT

Keywords: simulation, friction, physical simulation, fractals, inverse design

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Table des matières	13
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	9
1.1 Catégories de Frottement	9
1.1.1 Applications et Implications	10
1.2 Approches de Modélisation du Frottement	10
1.2.1 Théorie de Contact Hertzien	10
1.2.2 Modèles de Contact Local	10
1.3 Lois de Coulomb	11
1.3.1 Formule de Coulomb	11
1.4 Tribologie	11
1.5 Instruments de Mesure du Frottement	11
1.5.1 Frottement des Élastomères	11
1.5.2 Microscopie à Force Atomique (AFM)	12
1.6 Méthodes de Calcul du Frottement selon l'Échelle	12
1.6.1 Échelle Macroscopique	12
1.6.1.1 Modèles Empiriques	12
1.6.1.2 Simulations Numériques	12
1.6.1.3 Analyse Dimensionnelle	12
1.6.2 Échelle Mésoscopique	13
1.6.2.1 Modèles Basés sur les Asperités	13
1.6.2.2 Méthodes de Monte Carlo	13
1.6.2.3 Approches Continuum-Micro	13
1.6.3 Échelle Microscopique	13
1.6.3.1 Simulation de Dynamiques Moléculaires (MD)	13
1.6.3.2 Modèles Basés sur la Théorie des Joints	13
1.6.3.3 Méthodes Finies	14
1.6.4 Échelle Atomique	14
1.6.4.1 Calculs de la Théorie de la Fonctionnelle de la Densité (DFT) .	14
1.6.4.2 Modèles Atomistiques	14
1.6.4.3 Méthodes Ab Initio	14
1.7 Synthèse des Méthodes de Calcul du Frottement	14
1.7.1 Tableau Comparatif des Méthodes de Calcul du Frottement	15
1.8 Microfacettes et Types de Frottement	15
1.9 Fractalité et Rugosité de Surface	15
1.10 Modèles de Frottement	17
1.10.1 Origine du Frottement	17
1.10.2 Adhésion de Bowden et Tabor	17
1.10.3 Modèle LuGre	18
1.10.4 Modèle Stick-Slip et relation $F - v$	19

1.10.5	Modèle d'Alart-Curnier	19
CHAPITRE 2	IMPLÉMENTATION	21
2.1	Génération de Surfaces	21
2.1.1	Fonctions de Bruit	21
2.2	Tableau des Modèles de Bruit	21
2.3	Scans de surface	23
2.3.1	Matériel du scan	23
2.3.2	Calibrage du scanner	23
2.3.3	Scans des surfaces	24
2.3.4	Génération des cartes altimétriques	25
2.3.5	Prétraitement des cartes altimétriques	25
2.3.6	Importance du prétraitement	26
2.4	ISO 25178-3 Parameters for Surface Roughness	26
2.4.1	Table des Paramètres ISO 25178-3	26
2.5	Discrétisation	29
2.5.1	Tétraèdres et Maillages Tétraédriques	29
2.5.2	Polyfem	30
2.5.3	Processus de Discrétisation	30
2.5.4	Illustration des Fonctions de Maillage	32
2.5.5	Avantages de la Discrétisation Tétraédrique	32
2.6	Matériaux	33
2.7	Modèles de Corps Souples	34
2.7.1	Modèles d'Élasticité dans Polyfem	34
2.7.1.1	Modèle Élastique Linéaire	34
2.7.1.2	Modèle Hyperélastique de Lamé	35
2.7.1.3	Modèle Neo-Hookean	35
2.7.2	Implémentation dans Polyfem	36
2.7.3	Comparaison des Modèles	36
2.7.4	Illustration des Modèles	37
2.8	Cadre de Simulation	37
2.8.1	Contact Potentiel Incrémental (IPC)	38
2.8.1.1	Fonction Potentielle	38
2.8.1.2	Optimisation Incrémentale	38
2.8.1.3	Algorithme	39
2.8.2	Détection de Collision Continue (CCD)	39
2.8.2.1	Modélisation Mathématique	39
2.8.2.2	Algorithme CCD	40
2.8.2.3	Formules de Collision	40
2.8.3	Bibliothèque Polyfem	41
2.8.3.1	Solveurs Linéaires : Pardiso	41
2.8.3.2	Solveurs Non-Linéaires	42
2.8.3.3	Recherche de Ligne (Line Search)	43

2.8.3.4	Synthèse des Méthodes	44
2.8.3.5	Illustration des Méthodes de Résolution	45
2.8.3.6	Avantages de l'Approche Polyfem	45
2.8.4	Paraview	46
2.8.4.1	Structure des Fichiers de Sortie	46
2.8.4.2	Processus de Génération et Intégration	47
2.8.4.3	Exemple de Fonctionnement	47
2.8.4.4	Accès aux Données	48
2.8.4.5	Visualisation Temporelle	48
2.8.4.6	Illustration de la Structure des Fichiers	49
2.8.5	Avantages de l'Utilisation de Paraview	49
2.8.6	Illustration du Cadre de Simulation	50
2.8.7	Avantages du Cadre de Simulation	51
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE	53
3.1	Protocole de Simulation	53
3.2	Protocole de Test Expérimental	53
3.3	Extraction et Analyse des Données	53
3.4	Génération de Scénarios Multi-Échelle	54
3.4.1	Échelle Macroscopique	54
3.4.2	Échelle Microscopique	54
3.4.3	Adaptation des Paramètres de Simulation	55
3.5	Réalisation des Tests Expérimentaux à Différentes Échelles	55
3.5.1	Tests à l'Échelle Macroscopique	55
3.5.2	Tests à l'Échelle Microscopique	56
3.5.3	Uniformisation des Tests	56
3.6	Optimisation et Calibration des Simulations	56
3.6.1	Calibration des Paramètres	57
3.6.2	Validation Multi-Échelle	57
3.7	Réseau de Validation et Analyse des Résultats	57
3.7.1	Comparaison des Coefficients de Frottement	57
3.7.2	Analyse des Contraintes et des Forces de Contact	58
3.7.3	Identification des Tendances et des Anomalies	58
3.8	Réseau de Validation	58
CHAPITRE 4	RÉSULTATS	59
4.1	Résultats du simulateur de friction 3D	59
4.2	Analyse de données réelles	59
4.3	Analyse de surface imprimée en 3D	63
CHAPITRE 5	CONCLUSION	65
5.1	Limitations	65
5.2	Future Work	65

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ETS	École de Technologie Supérieure
AI	Intelligence Artificielle (Artificial Intelligence)
CAD	Conception Assistée par Ordinateur (Computer-Aided Design)
CFD	Dynamique des Fluides Numérique (Computational Fluid Dynamics)
FEM	Méthode des Éléments Finis (Finite Element Method)
FEA	Analyse par Éléments Finis (Finite Element Analysis)
ICP	Contact Potentiel Incrémental (Incremental Potential Contact)
MPM	Méthode des Points Matériels (Material Point Method)
GPU	Unité de Traitement Graphique (Graphics Processing Unit)
CPU	Unité Centrale de Traitement (Central Processing Unit)
RAM	Mémoire Vive (Random Access Memory)
SSD	Disque à État Solide (Solid State Drive)
DoF	Degrés de Liberté (Degrees of Freedom)
CNC	Commande Numérique par Ordinateur (Computer Numerical Control)
CT	Tomographie par Ordinateur (Computed Tomography)
UQ	Quantification des Incertitudes (Uncertainty Quantification)
FVM	Méthode des Volumes Finis (Finite Volume Method)
PDE	Équations aux Dérivées Partielles (Partial Differential Equations)
ODE	Équations Différentielles Ordinaires (Ordinary Differential Equations)
SVM	Machine à Vecteurs de Support (Support Vector Machine)
ML	Apprentissage Automatique (Machine Learning)

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1	Processus de numérisation d'une surface en aluminium brossé poli. 24
Figure 2.2	Exemple de maillage tétraédrique généré à l'aide de Tetgen et Tetwild. Les tétraèdres sont représentés en différentes couleurs pour illustrer la qualité et la régularité du maillage. 33
Figure 2.3	Comparaison des réponses mécaniques des différents modèles d'élasticité : Élastique linéaire, Hyperélastique de Lamé, et Neo-Hookean. 37
Figure 2.4	Schéma illustrant l'intégration des solveurs linéaires et non-linéaires dans Polyfem. Pardiso résout les systèmes linéaires, tandis que la méthode de Newton-Raphson et la recherche de ligne gèrent les non-linéarités et optimisent la convergence des simulations. 45
Figure 2.5	Structure hiérarchique des fichiers utilisés par Paraview pour organiser les données de simulation. Le fichier .pvd référence plusieurs fichiers .vtm, chacun contenant un fichier .vtu avec les données associées à un pas de temps spécifique. 49
Figure 2.6	Schéma illustrant le cadre de simulation intégrant les méthodes IPC, CCD, Polyfem et Paraview. 50
Figure 2.7	Discrétisation d'un corps souple en masses concentrées. La masse du corps est distribuée sur des masses discrètes m_i , reliées par des forces internes f_{ij} 51

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

F	Force (générale)
F_N	Force normale
F_T	Force tangentielle
F_t	Force de traction
f_k	Force de friction cinétique
T	Vecteur de traction
T_{contact}	Traction de contact
τ	Matrice de contraintes de cisaillement (Shear Stress)
τ_{xx}	Contrainte de cisaillement sur l'axe x
τ_{xy}	Contrainte de cisaillement sur les axes x et y
τ_{xz}	Contrainte de cisaillement sur les axes x et z
τ_{yx}	Contrainte de cisaillement sur les axes y et x
τ_{yy}	Contrainte de cisaillement sur l'axe y
τ_{yz}	Contrainte de cisaillement sur les axes y et z
τ_{zx}	Contrainte de cisaillement sur les axes z et x
τ_{zy}	Contrainte de cisaillement sur les axes z et y
τ_{zz}	Contrainte de cisaillement sur l'axe z
σ_n	Matrice de contraintes normales (Normal Stress)
σ_{xx}	Contrainte normale sur l'axe x
σ_{yy}	Contrainte normale sur l'axe y
σ_{zz}	Contrainte normale sur l'axe z
ρ	Masse volumique (Density)
E	Module de Young (Young's modulus)
H	Dureté (Hardness)
C	Tenseur de déformation de Cauchy-Green à droite (Right Cauchy-Green Tensor)

\mathbf{B}	Tenseur de déformation de Cauchy-Green à gauche (Left Cauchy-Green Tensor)
\mathbf{P}	Premier tenseur de Piola-Kirchhoff (First Piola-Kirchhoff Stress Tensor)
\mathbf{S}	Second tenseur de Piola-Kirchhoff (Second Piola-Kirchhoff Stress Tensor)
s	Seconde
ns	Nanoseconde (10^{-9} s)
N/m ²	Pascal (Pression ou contrainte)
g	Accélération due à la gravité (9.81 m/s^2)
h	Hauteur
L	Longueur
m	Masse
P	Pression
t	Temps
V	Volume
v	Vitesse
v_{rel}	Vitesse relative (Relative velocity)
$d_{\text{glissement}}$	Distance de glissement (Sliding distance)
μ	Coefficient de friction
ν	Coefficient de Poisson
ψ	Énergie de déformation par unité de volume (Strain Energy Density)
ϕ	Angle
A	Aire

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Comparaison des méthodes de calcul du frottement selon l'échelle. 15
Tableau 1.2	Résumé des différents types de frottement 16
Tableau 2.2	Cartes de textures et leurs descriptions 30
Tableau 2.4	Comparaison des outils de génération de maillages tétraédriques 31

INTRODUCTION

Frottement (*nom masculin*)

Le **frottement** désigne une force qui s'oppose au mouvement relatif entre deux surfaces en contact. Ce phénomène résulte des interactions microscopiques entre les irrégularités des surfaces et varie selon des facteurs tels que la nature des matériaux, la rugosité des surfaces, et la force normale appliquée (Bowden et Tabor, 1950 ; Persson, 2000).

Synonymes : friction, résistance au mouvement.

Aperçu

Le frottement est une force omniprésente dans la vie quotidienne. Par exemple, il intervient dans des processus comme la marche, l'écriture ou le freinage des véhicules. Bien que le frottement permette d'accomplir de nombreuses tâches, un contrôle inadéquat peut entraîner des pertes énergétiques significatives et une usure prématurée des matériaux (Bhushan, 2013).

Le frottement constitue une composante essentielle mais partielle d'une discipline plus large appelée **tribologie**. La tribologie est l'étude des interactions entre surfaces en contact et englobe trois domaines principaux :

- **Frottement** : Étude des forces s'opposant au mouvement relatif des surfaces.
- **Usure** : Analyse des mécanismes de détérioration des surfaces causée par le frottement ou des facteurs environnementaux.
- **Lubrification** : Recherche et conception de méthodes ou matériaux pour réduire le frottement et minimiser l'usure.

La tribologie est une science interdisciplinaire qui combine des aspects de la physique, de la chimie, et de l'ingénierie des matériaux pour optimiser les performances mécaniques et prolonger la durée de vie des systèmes (Bhushan, 2013). Le frottement, bien qu'indispensable, est étudié dans ce cadre pour comprendre comment contrôler ou exploiter ses effets de manière efficace.

Dans le cadre de la mécanique classique, le frottement peut être expliqué par les *lois du mouvement* d'Isaac Newton, qui offrent un cadre analytique pour comprendre son influence sur les objets au repos ou en mouvement (Halliday, Resnick et Walker, 2013).

Première loi : L'inertie

La première loi de Newton stipule qu'un objet reste au repos ou en mouvement rectiligne uniforme sauf si une force externe agit sur lui. Dans ce contexte, le frottement agit comme une force externe, ralentissant ou immobilisant les objets en mouvement. Par exemple, sans frottement, il serait impossible de freiner un véhicule ou de marcher sans glisser (Halliday, Resnick et Walker, 2013).

Deuxième loi : Force et accélération

La deuxième loi de Newton, formulée comme $F = m \cdot a$, illustre comment le frottement réduit l'accélération d'un corps en mouvement en s'opposant à la force appliquée. Sur une surface enneigée, par exemple, un véhicule nécessite une force supplémentaire pour accélérer en raison de l'augmentation du frottement (Bhushan, 2013).

Troisième loi : Action et réaction

Selon la troisième loi de Newton, à chaque action correspond une réaction égale et opposée. Lorsqu'une personne marche, son pied exerce une force vers l'arrière sur le sol (action), et le sol exerce une force équivalente vers l'avant, appelée force de friction (réaction). Cette force permet de se propulser en avant (Halliday, Resnick et Walker, 2013).

Mécanique du Frottement

Le frottement peut être divisé en deux grandes catégories :

- **Frottement statique** : Il empêche le démarrage du mouvement. Ce type de frottement est généralement plus élevé que le frottement cinétique et doit être surmonté pour initier un mouvement. Il est défini par l'inégalité suivante :

$$F_{\text{friction_statique}} \leq \mu_s \cdot F_N$$

où :

- $F_{\text{friction_statique}}$: force de frottement statique.
- μ_s : coefficient de frottement statique, un paramètre sans dimension dépendant des matériaux des surfaces en contact.
- F_N : force normale exercée perpendiculairement aux surfaces en contact.

Le mouvement commence uniquement lorsque $F_{\text{appliquée}} > \mu_s \cdot F_N$.

- **Frottement cinétique** : Il agit sur les objets en mouvement, diminuant leur vitesse et dissipant l'énergie mécanique sous forme de chaleur. Une fois le mouvement initié, la force de frottement cinétique est donnée par :

$$F_{\text{friction_cinétique}} = \mu_k \cdot F_N$$

où :

- $F_{\text{friction_cinétique}}$: force de frottement cinétique.
- μ_k : coefficient de frottement cinétique, généralement inférieur à μ_s .
- F_N : force normale.

Ces forces dépendent des propriétés des surfaces en contact et de la force normale exercée entre elles. À l'échelle microscopique, les irrégularités des surfaces s'interfont, générant des forces de frottement (Persson, 2000).

La différence entre μ_s et μ_k explique pourquoi il est plus difficile de démarrer un mouvement que de le maintenir. Cette distinction est essentielle pour modéliser et optimiser les interactions frictionnelles dans des applications pratiques.

Motivation

L'optimisation du frottement est essentielle pour améliorer les performances mécaniques, l'efficacité énergétique, et la durée de vie des matériaux dans divers secteurs industriels. Le contrôle du frottement permet de réduire les pertes énergétiques dues à la dissipation de chaleur et de limiter l'usure des surfaces en contact. Ces améliorations sont particulièrement critiques dans des applications comme :

- **Les freins et les pneus** : Garantir un comportement sûr et efficace tout en augmentant la durabilité.
- **Les composants robotiques** : Optimiser les interactions entre les surfaces pour améliorer la précision et l'efficacité des mouvements.
- **L'industrie biomédicale** : Développer des prothèses articulaires et des dispositifs médicaux avec des propriétés de friction spécifiques pour assurer leur fonctionnalité.
- **Les systèmes de fabrication additive** : Concevoir des surfaces avec des propriétés frictionnelles adaptées à des tâches spécifiques.

La tribologie, en tant que science des surfaces en contact, fournit les outils nécessaires pour analyser, modéliser et concevoir des solutions adaptées aux besoins de ces applications.

Problèmes Actuels

Malgré les progrès significatifs dans le domaine de la tribologie, plusieurs défis persistent :

- **Difficulté à modéliser les déformations plastiques et les interactions élastiques** : Les modèles traditionnels ne parviennent pas toujours à reproduire fidèlement les comportements complexes des matériaux sous contraintes, en particulier lorsque les matériaux présentent des réponses non linéaires à l'échelle microscopique (Bhushan, 2013).
- **Approximation des coefficients de frottement statique et cinétique** : La distinction entre ces deux types de frottement reste imprécise, réduisant l'exactitude des simulations. Une

compréhension plus détaillée des mécanismes physiques sous-jacents est nécessaire pour mieux calibrer les modèles numériques (Persson, 2000).

- **Absence d'intégration des effets de l'anisotropie des surfaces** : Les modèles traditionnels ne tiennent pas compte des variations directionnelles des propriétés de frottement, bien que ces caractéristiques soient cruciales pour des surfaces microstructurées conçues pour des applications spécifiques (Bhushan, 2013).

Ces limitations entravent la capacité des simulations à prédire fidèlement les comportements des matériaux dans des configurations complexes. En conséquence, les résultats numériques divergent souvent des données expérimentales, réduisant leur utilité pour le développement de solutions pratiques.

—

Description du Projet

Ce projet explore un sous-domaine innovant de la tribologie : la conception de surfaces intégrant le frottement comme élément fonctionnel. Il vise à développer une méthodologie complète pour la fabrication et la validation de micro-surfaces avec des propriétés frictionnelles spécifiques.

Objectifs principaux

- **Modèles basés sur les données** : Développer des modèles de frottement capables de prédire le comportement frictionnel à partir de la microgéométrie des surfaces.
- **Pipeline de conception** : Élaborer un processus de conception computationnelle pour générer des micro-surfaces adaptées à des propriétés spécifiques.
- **Fabrication additive** : Produire des prototypes à l'aide d'une imprimante 3D FormLabs.
- **Validation expérimentale** : Utiliser des technologies de capture de mouvement pour valider les performances des surfaces fabriquées par rapport aux spécifications fonctionnelles et cinématiques.

Méthodologie et Résultats Attendus

L'étudiant collaborera étroitement avec une équipe de chercheurs et de doctorants pour :

- Mettre en œuvre des outils de simulation pour analyser les interactions entre surfaces à l'échelle microscopique.
- Fabriquer des prototypes basés sur des données réelles pour évaluer les modèles prédictifs.
- S'assurer que les surfaces fabriquées respectent les spécifications initiales, en termes de frottement et de cinématique.

Applications et Impact

Les résultats attendus de ce projet incluent des avancées dans :

- La conception de surfaces fonctionnelles pour des domaines tels que l'aérospatiale, l'automobile et la médecine.
- L'optimisation des modèles numériques pour les rendre plus prédictifs et adaptés aux configurations expérimentales.
- La réduction des pertes énergétiques et l'augmentation de la durabilité des systèmes mécaniques.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Catégories de Frottement

Le frottement, force s'opposant au mouvement relatif entre deux surfaces en contact, se divise en plusieurs catégories selon les conditions et les mécanismes d'interaction :

- **Frottement sec (*Dry Friction*)** : Se produit entre deux surfaces solides sans lubrification et se subdivise en :
 - *Frottement statique* : Résiste au début du mouvement relatif. La force maximale avant le mouvement est $F_t = \mu_s F_N$, où μ_s est le coefficient de frottement statique.
 - *Frottement cinétique* : Agit pendant le mouvement relatif, décrit par $F_t = \mu_k F_N$, avec $\mu_k < \mu_s$.
- **Frottement lubrifié (*Lubricated Friction*)** : Implique un fluide (huile, eau, gaz) entre les surfaces, réduisant le frottement et l'usure. Trois régimes principaux :
 - *Lubrification hydrodynamique* : Les surfaces sont totalement séparées par une couche de fluide.
 - *Lubrification mixte* : Le contact se fait partiellement à travers le fluide et partiellement via les aspérités.
 - *Lubrification limite* : Un film de fluide très fin est présent, les aspérités dominent l'interaction.
- **Frottement roulant (*Rolling Friction*)** : Se produit lorsqu'un objet roule sur une surface, comme une roue ou une sphère. La résistance est généralement moindre que celle du frottement sec et dépend de :
 - La déformation des surfaces de contact.
 - Les propriétés des matériaux (module d'élasticité, rugosité).
 - La force normale appliquée.
- **Frottement fluide (*Fluid Friction*)** : Résistance au mouvement relatif d'un corps solide dans un fluide (liquide ou gaz), souvent modélisée en mécanique des fluides :

- *Écoulement laminaire* : Frottement proportionnel à la vitesse relative.
- *Écoulement turbulent* : Frottement proportionnel au carré de la vitesse relative.

Les lois de Stokes et de Navier-Stokes sont couramment utilisées pour quantifier ce type de frottement.

1.1.1 Applications et Implications

L'utilisation des modèles fractals pour décrire les surfaces et les propriétés tribologiques présente plusieurs avantages :

- **Précision accrue** : Représentation fidèle des structures multi-échelles des surfaces.
- **Prédiction améliorée** : Meilleure compréhension des relations entre rugosité, adhérence et frottement.
- **Optimisation des surfaces** : Conception de surfaces adaptées à des applications industrielles spécifiques, telles que les interfaces à faible frottement ou à haute adhérence.

L'intégration de ces modèles dans des simulations tribologiques permet d'optimiser des composants critiques dans des secteurs comme l'aérospatial, l'automobile et les dispositifs médicaux.

1.2 Approches de Modélisation du Frottement

1.2.1 Théorie de Contact Hertzien

Utilisée pour modéliser les contacts à petite échelle entre surfaces courbées, telles que des sphères.

1.2.2 Modèles de Contact Local

Considèrent les forces locales au sein des zones de contact, permettant une analyse détaillée des interactions à petite échelle.

1.3 Lois de Coulomb

Les lois de Coulomb définissent le frottement comme proportionnel à la force normale appliquée, distinguant le frottement statique et cinétique.

1.3.1 Formule de Coulomb

$$F_t = \mu F_N \quad (1.1)$$

où μ est le coefficient de frottement, dépendant des propriétés des matériaux et de la géométrie de l'interface. Bien que cette loi ne distingue pas explicitement entre frottement statique et cinétique, il est empiriquement établi que $\mu_s \geq \mu_k$, où μ_s est le coefficient de frottement statique et μ_k celui cinétique.

1.4 Tribologie

La tribologie étudie les interactions entre surfaces en mouvement, incluant le frottement, l'usure et la lubrification. Elle est essentielle dans la conception de matériaux et de dispositifs mécaniques performants et durables.

1.5 Instruments de Mesure du Frottement

Pour quantifier le frottement, divers instruments sont utilisés :

- **Tribomètre** : Mesure directe des coefficients de frottement.
- **Microscope à Force Atomique (AFM)** : Réalise des mesures à l'échelle atomique.
- **Tests de Glissement** : Évaluent le frottement statique et cinétique sur différentes surfaces.

1.5.1 Frottement des Élastomères

Utile pour modéliser les matériaux souples tels que le caoutchouc, en évaluant leurs propriétés de frottement spécifiques.

1.5.2 Microscopie à Force Atomique (AFM)

Permet de mesurer les forces à l'échelle atomique, offrant une compréhension détaillée de la nature moléculaire du frottement.

1.6 Méthodes de Calcul du Frottement selon l'Échelle

Le calcul du frottement varie considérablement selon l'échelle d'étude, chaque échelle nécessitant des approches spécifiques adaptées aux phénomènes dominants.

1.6.1 Échelle Macroscopique

1.6.1.1 Modèles Empiriques

Définis principalement par les lois de Coulomb, utilisant des coefficients de frottement statique (μ_s) et cinétique (μ_k) déterminés expérimentalement. Simples à implémenter, ils sont couramment utilisés dans les logiciels de simulation mécanique pour prédire les forces de frottement dans des systèmes complexes.

1.6.1.2 Simulations Numériques

Intègrent les lois de Coulomb dans des environnements de simulation tels que MATLAB, ANSYS ou COMSOL, permettant de prédire les forces de frottement en fonction des conditions de charge et des mouvements relatifs des objets.

1.6.1.3 Analyse Dimensionnelle

Estime les forces de frottement en fonction des dimensions et des matériaux des objets en contact, basée sur des règles de similarité, sans nécessiter de modèles complexes.

1.6.2 Échelle Mésoscopique

1.6.2.1 Modèles Basés sur les Asperités

Simulent les interactions entre asperités individuelles, prenant en compte leur distribution, forme et densité pour estimer les forces de frottement globales.

1.6.2.2 Méthodes de Monte Carlo

Évaluent les contributions statistiques des asperités irrégulières à la force de frottement, en simulant de multiples interactions pour obtenir une estimation prédictive du frottement moyen.

1.6.2.3 Approches Continuum-Micro

Combinaison de modèles continus pour les grandes échelles et de modèles microscopiques pour les asperités locales, offrant une prédiction précise des forces de frottement dans des systèmes complexes.

1.6.3 Échelle Microscopique

1.6.3.1 Simulation de Dynamiques Moléculaires (MD)

Modélisent les interactions entre atomes et molécules pour comprendre les mécanismes de frottement au niveau microscopique, observant déformations, rotations et glissements des asperités sous différentes conditions de charge.

1.6.3.2 Modèles Basés sur la Théorie des Joints

Considèrent les contacts ponctuels entre surfaces et les forces résultantes à ces joints, permettant de déterminer les forces de frottement en fonction des contraintes locales et des déformations des joints de contact.

1.6.3.3 Méthodes Finies

Utilisent des éléments finis pour simuler les déformations locales des surfaces en contact, prédisant comment ces déformations influencent les forces de frottement.

1.6.4 Échelle Atomique

1.6.4.1 Calculs de la Théorie de la Fonctionnelle de la Densité (DFT)

Calculent les interactions électroniques entre atomes et molécules en contact, offrant une compréhension détaillée des forces de frottement en tenant compte des effets quantiques.

1.6.4.2 Modèles Atomistiques

Simulent les positions et les mouvements des atomes pour étudier les mécanismes fondamentaux du frottement, visualisant les interactions atomiques et les processus de glissement au niveau atomique.

1.6.4.3 Méthodes Ab Initio

Basées sur des principes physiques fondamentaux sans paramétrage empirique, elles fournissent une compréhension détaillée des forces de frottement au niveau atomique, bien qu'elles soient limitées par des exigences computationnelles élevées.

1.7 Synthèse des Méthodes de Calcul du Frottement

Chaque méthode de calcul du frottement présente des avantages et des limitations selon l'échelle d'étude. À l'échelle macroscopique, les modèles empiriques sont simples mais peuvent manquer de précision pour des configurations complexes. Les approches mésoscopiques offrent une meilleure compréhension des interactions locales, nécessitant toutefois des calculs plus intensifs. À l'échelle microscopique et atomique, les simulations de dynamiques moléculaires et les calculs

DFT fournissent des détails précis, mais sont limitées par leurs exigences computationnelles et les approximations nécessaires pour traiter de grands systèmes.

L'intégration de ces méthodes à différentes échelles permet d'obtenir une vision complète des phénomènes de frottement, facilitant le développement de modèles multiscales capables de prédire avec précision les forces de frottement dans une variété d'applications industrielles et scientifiques.

1.7.1 Tableau Comparatif des Méthodes de Calcul du Frottement

Pour mieux comprendre les différences et complémentarités entre les méthodes de calcul du frottement à diverses échelles, le tableau comparatif suivant est présenté.

Échelle	Méthodes	Avantages
Macroscopique	Modèles empiriques, Simulations numériques	Simple à impl
Mésoscopique	Modèles basés sur les aspérités, Monte Carlo, Continuum-Micro	Compréhension
Microscopique	Dynamiques moléculaires (MD), Théorie des joints, Méthodes finies	Détails précis c
Atomique	Calculs DFT, Modèles atomistiques, Méthodes ab initio	Compréhension

Tableau 1.1 Comparaison des méthodes de calcul du frottement selon l'échelle.

1.8 Microfacettes et Types de Frottement

Les microfacettes jouent un rôle crucial dans la détermination des propriétés de frottement des surfaces. Elles permettent de modéliser de manière détaillée les interactions locales entre les aspérités des surfaces en contact. Cette section détaille différents types de frottement basés sur l'orientation et la distribution des microfacettes.

1.9 Fractalité et Rugosité de Surface

La théorie fractale, introduite par Benoît Mandelbrot, établit un lien entre la rugosité de surface et la dimension fractale, permettant de contrôler les propriétés des matériaux et la formation de

Type de Frottement	Définition	Caractéristiques Clés	
Frottement Isotrope - Modèle simple	Même frottement dans toutes les directions. Un bloc de bois glissant sur une table lisse.	- Résistance uniforme	
Frottement Anisotrope - Plus réaliste pour certains matériaux	Frottement qui varie selon la direction du glissement. Un morceau de tissu glissé sur une surface : plus facile le long du tissage, plus difficile contre le tissage.	- Importance de la direction	
Frottement Orthotrope - Différences symétriques	Forme spécifique d'anisotropie avec deux directions principales. Un tissu tissé : plus facile dans la longueur, plus difficile dans la largeur.	- Deux directions clés	
Frottement Entièrement Anisotrope - Contrôle détaillé	Frottement qui peut varier dans toutes les directions. Un tapis à motifs où le glissement en diagonale diffère du glissement droit.	- Toutes les directions sont uniques	
Frottement Hétérogène - Causé par des changements de texture ou d'usure	Frottement qui change selon l'endroit sur la surface. Une route avec des plaques de glace et du revêtement sec.	- Varie à travers la surface	
Frottement Asymétrique - Causé par des caractéristiques de surface	Frottement différent selon la direction du glissement. Une manche en fourrure : plus facile à glisser dans un sens que dans l'autre.	- Différences directionnelles	

Tableau 1.2 Résumé des différents types de frottement

copeaux lors de l'usinage. Toutefois, les fractales ne peuvent représenter une surface usinée à toutes les échelles, car elles négligent la géométrie de la lame de coupe ??.

Les descripteurs fractals des surfaces sont cruciaux pour corrélérer les propriétés physiques des surfaces avec leur structure. Dans divers domaines, il est souvent difficile de relier le comportement physique, électrique et mécanique aux descripteurs conventionnels de rugosité ou de forme de surface. En combinant des mesures de fractalité avec celles de rugosité ou de forme, certains phénomènes interfaciaux, tels que la rigidité du contact et la résistance au frottement électrique, peuvent être mieux interprétés en relation avec la structure de surface ??.

1.10 Modèles de Frottement

1.10.1 Origine du Frottement

La tribologie, science des contacts de surfaces en mouvement, englobe le frottement, la lubrification, l'usure et l'adhésion. Une composante clé est la dissipation d'énergie par la rupture de liaisons moléculaires, la déformation plastique et l'usure. Le frottement, force opposée au mouvement tangentiel entre deux surfaces, est central dans ce domaine.

À l'échelle atomique, le frottement dépend de la vitesse de contact v_c et de la surface réelle de contact A_c , exprimé par :

$$F_t = \eta v_c A_c \quad (1.2)$$

où $\eta = \frac{\rho}{\tau}$, ρ étant la densité massique surfacique et τ un temps caractéristique de glissement. À cette échelle, la force de frottement dépend de l'aire de contact réelle et est indépendante de la force normale appliquée.

1.10.2 Adhésion de Bowden et Tabor

Le modèle classique de Bowden et Tabor explique le frottement en termes d'adhésion et de déformation plastique des asperités. Ils postulent que la vraie aire de contact A_c est proportionnelle à la force normale F_N , et que la force de frottement totale F_t est liée à la résistance au cisaillement

des matériaux au niveau des aspérités :

$$\mu_k = \frac{\sigma}{E^*} \quad (1.3)$$

où σ est la résistance au cisaillement du matériau plus mou et E^* le module de Young effectif. Ce modèle prédit avec précision les coefficients de frottement dans les contacts métal-métal et est largement utilisé en industrie.

1.10.3 Modèle LuGre

Le modèle de LuGre est un modèle avancé pour la simulation du frottement dans les systèmes dynamiques, intégrant les phénomènes de frottement statique et dynamique via la déformation élastique des microstructures à l'interface des surfaces. Il s'exprime par :

$$\dot{z} = v - |v|g(v)z \quad (1.4)$$

où z est la variable d'état décrivant l'évolution des aspérités, v la vitesse relative des surfaces, et $g(v)$ une fonction dépendant de la vitesse ajustant l'amplitude du frottement selon le régime (adhérence ou glissement).

La force de frottement F_t est donnée par :

$$F_t = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 v \quad (1.5)$$

avec σ_0 , σ_1 , et σ_2 des paramètres ajustables dépendant des propriétés du matériau. Ce modèle permet une transition fluide entre les régimes statique et dynamique, et est largement utilisé dans la simulation des systèmes mécaniques avec frottement.

1.10.4 Modèle Stick-Slip et relation $F - v$

Le modèle Stick-Slip (adhérence-glissement) est essentiel pour comprendre le comportement des surfaces en contact lorsque la vitesse relative varie. Il simule les oscillations de frottement observées dans de nombreux systèmes mécaniques, tels que les freins ou les moteurs.

Une loi empirique décrivant la relation force-vitesse ($F - v$) est souvent utilisée :

$$F_t = \mu_s(1 - e^{-\beta v}) \quad (1.6)$$

où μ_s est le coefficient de frottement statique et β caractérise la transition entre adhérence et glissement.

1.10.5 Modèle d'Alart-Curnier

Ce modèle utilise une approche variationnelle pour résoudre les problèmes de contact avec frottement de manière non linéaire, basé sur un principe de complémentarité similaire à celui utilisé en optimisation.

Les conditions de contact sont exprimées via des multiplicateurs de Lagrange, et la friction est modélisée par une inégalité de complémentarité non lisse. L'algorithme d'Alart-Curnier résout itérativement les forces normales et tangentielles en tenant compte de la loi de Coulomb, étant particulièrement adapté aux simulations mécaniques complexes avec des comportements anisotropes ou non linéaires.

CHAPITRE 2

IMPLÉMENTATION

2.1 Génération de Surfaces

Les surfaces de contact sont générées en combinant deux approches principales :

- **Fonctions de Bruit** : Utilisation de fonctions stochastiques pour créer des rugosités aléatoires et auto-similaires.
- **Scans Réels** : Acquisition de surfaces réelles grâce à des scanners 3D pour des tests expérimentaux.

2.1.1 Fonctions de Bruit

Les fonctions de bruit permettent de simuler des surfaces rugueuses en générant des variations aléatoires et auto-similaires. Plusieurs types de bruit sont utilisés en fonction des caractéristiques souhaitées pour la surface.

2.2 Tableau des Modèles de Bruit

Type de Bruit	Description	Formule ou Algorithme
Perlin	Génère un bruit pseudo-aléatoire basé sur la méthode de Perlin, utile pour des textures naturelles.	$pnoise2(x, y)$
White	Bruit blanc pur avec une distribution uniforme.	$B(x, y) = rand(x, y)$
Blue	Bruit blanc filtré avec un filtre gaussien pour réduire les hautes fréquences.	$B_{blue} = B_{white} - lowpass(B_{white})$
FBM (Fractal Brownian Motion)	Superpose plusieurs couches de bruit avec des amplitudes et fréquences décroissantes.	$\sum_{n=0}^N A_n \cdot pnoise2(k_n x, k_n y)$

Type de Bruit	Description	Formule ou Algorithme
Sine	Génère une grille de sinus en 2D pour produire des oscillations régulières.	$f(x, y) = \sin(x) + \sin(y)$
Square	Ondes carrées générées par une fonction périodique carrée.	$f(x) = \text{square}(\sin(x))$
Sawtooth	Ondes triangulaires générées par des oscillations périodiques.	$f(x) = \text{sawtooth}(x)$
Wood	Génère des anneaux concentriques similaires aux cernes d'un arbre.	$f(x, y) = \sin(10 \cdot r)$ avec $r = \sqrt{x^2 + y^2}$
Brushed Aluminium	Simule des surfaces métalliques texturées à l'aide d'un lissage directionnel.	Filtrage gaussien appliqué sur un bruit blanc.
PVC	Simule une texture aléatoire avec des lignes artificielles imitant le plastique PVC.	Filtrage gaussien avec soustraction locale.
Cement	Simule des surfaces rugueuses typiques du béton ou du ciment.	$B_{\text{cement}} = \text{lowpass}(B_{\text{white}})$
Honeycomb	Génère une grille hexagonale en combinant sinus et cosinus.	$f(x, y) = (\sin(x) \cdot \cos(y))^2$
Grid	Génère un réseau de lignes verticales et horizontales.	$f(x, y) = (\text{mod}(x, l) < w) \cup (\text{mod}(y, l) < w)$
Triangles	Produit une texture triangulaire à partir de sinus combinés.	$f(x, y) = \sin(x) - \sin(y) $
Gyroid	Génère une structure 3D avec des oscillations périodiques.	$f(x, y) = \sin(x) \cdot \cos(y) + \sin(y)$
Octet	Simule une structure basée sur des cellules cubiques régulières.	$f(x, y) = \sin(x) + \sin(y) $
Concentric	Crée des anneaux concentriques à partir de distances radiales.	$f(x, y) = \sin(r)$ avec $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

Ce tableau récapitule les modèles de bruit disponibles, leurs descriptions, ainsi que les formules ou algorithmes associés.

2.3 Scans de surface

En suivant ce processus de collecte de données de scan de surface à l'aide du scanner **GelSight**, nous sommes en mesure de capturer des cartes altimétriques 3D détaillées des surfaces étudiées, fournissant des informations précieuses sur leur topographie et leur texture.

2.3.1 Matériel du scan

Pour obtenir des informations détaillées sur les surfaces, nous utilisons un **scanner GelSight Benchtop**, qui est un équipement de mesure optique conçu pour capturer la géométrie de diverses surfaces. Ce scanner utilise un gel exclusif permettant de capturer des structures de surface au niveau du micron, indépendamment des conditions d'éclairage ou de la réflectivité du matériau.

Les données capturées sont ensuite traitées par le logiciel **GelSight** pour générer des images 3D et des cartes altimétriques. Notre système comprend un appareil photo **Canon T3i** associé à un objectif macro **MP-E 65mm 1X - 5X**, réglé sur un grossissement de **3X** pour tous nos scans de surface.

Pour améliorer les propriétés de réflexion et la fidélité de la surface scannée, nous utilisons une couche de gel pressée sur le matériau à l'aide d'une vitre transparente. Cette technique permet au gel de se conformer à la surface et de refléter sa texture avec précision.

2.3.2 Calibrage du scanner

Avant chaque séance de capture, une étape essentielle consiste à nettoyer minutieusement toutes les surfaces à analyser. Nous utilisons de l'**alcool isopropylique** et des **lingettes jetables non pelucheuses** pour garantir une surface propre et éviter toute contamination qui pourrait interférer avec la capture.

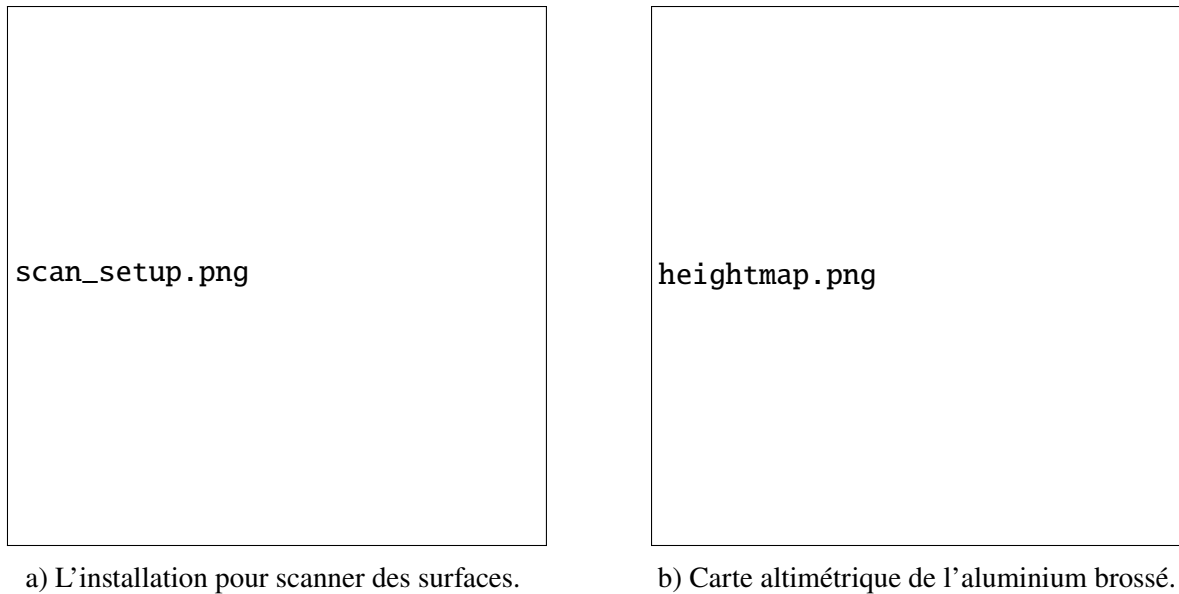


Figure 2.1 Processus de numérisation d'une surface en aluminium brossé poli.

Ensuite, nous procédons à un calibrage en utilisant une surface de référence comportant des sections circulaires de diamètres connus. Ce calibrage permet au logiciel du scanner de réaliser une mise à l'échelle précise et d'assurer une cohérence entre les différentes captures.

2.3.3 Scans des surfaces

Chaque surface est scannée sous **six conditions d'éclairage différentes**, avec six lumières disposées autour de la zone de capture. La combinaison de ces images permet de générer une carte 3D en exploitant les variations de lumière et d'ombre.

Pour chaque matériau, **quatre scans** sont réalisés afin de mieux représenter la texture moyenne de la surface. Les données acquises sont ensuite traitées pour générer une **carte altimétrique 3D**.

2.3.4 Génération des cartes altimétriques

Les cartes altimétriques sont générées grâce à une technique appelée **stéréophotométrie**, qui extrait les informations tridimensionnelles à partir d'images prises sous divers angles d'éclairage. Ce processus comprend plusieurs étapes :

1. **Capture d'images** : Six images de la surface sont prises sous différents angles d'éclairage pour capturer les ombres et reflets.
2. **Estimation de la réflectance** : Analyse des propriétés optiques de la surface pour séparer les effets d'éclairage de la géométrie réelle.
3. **Calcul des vecteurs normaux** : À l'aide des images et de la réflectance estimée, les normales de surface sont calculées pour chaque pixel.
4. **Intégration et lissage** : Les informations des six images sont fusionnées et filtrées pour générer une carte altimétrique précise.
5. **Projection en carte de hauteur 2D** : Pour optimiser le stockage et le traitement, la carte altimétrique 3D est souvent convertie en une version 2D en niveaux de gris.

2.3.5 Prétraitement des cartes altimétriques

Avant l'analyse finale, un **prétraitement** est appliqué pour corriger les biais dus aux variations globales de hauteur :

- **Déstationnarisation** : Suppression des tendances globales telles que l'inclinaison de la surface.
- **Filtrage sigma** : Réduction du bruit à l'aide d'un filtre Gaussien avec un paramètre de **sigma = 50**.

Les valeurs des paramètres de prétraitement sont maintenues constantes pour garantir la comparabilité des scans. L'objectif est d'éliminer les macro-tendances tout en préservant les micro-détails importants pour l'étude de la friction.

2.3.6 Importance du prétraitement

Ces étapes garantissent que les données altimétriques restent exploitables sans introduire d'erreurs pouvant fausser l'analyse. Elles permettent :

- **Une élimination des macro-tendances** telles que l'inclinaison ou les grandes variations de hauteur non pertinentes.
- **Une préservation des micro-tendances**, essentielles pour comprendre les interactions tribologiques.
- **Une cohérence entre les scans**, évitant toute variabilité artificielle due au prétraitement.

En assurant une qualité et une précision optimales, ce processus renforce la fiabilité des données obtenues pour les simulations et analyses tribologiques.

2.4 ISO 25178-3 Parameters for Surface Roughness

Les paramètres de rugosité de surface selon la norme ISO 25178-3 fournissent des descripteurs normalisés permettant d'analyser et de caractériser les surfaces en termes de propriétés tribologiques et fonctionnelles.

2.4.1 Table des Paramètres ISO 25178-3

Paramètre	Symbole	Formule	Description
Paramètres de Hauteur (Height Parameters)			
Rugosité moyenne arithmétique	S_a	$S_a = \frac{1}{A} \int_A z(x, y) dA$	Moyenne des écarts absolus par rapport au plan moyen.
Rugosité quadratique moyenne	S_q	$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \int_A z(x, y)^2 dA}$	Évalue l'importance des écarts grâce à une mesure quadratique.

Paramètre	Symbole	Formule	Description
Hauteur maximale	S_z	$S_z = S_p + S_v$	Somme de la hauteur du pic maximal et de la profondeur de la vallée maximale.
Skewness	S_{sk}	$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3 A} \int_A z(x, y)^3 dA$	Asymétrie de la distribution des hauteurs.
Kurtosis	S_{ku}	$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4 A} \int_A z(x, y)^4 dA$	Concentration des hauteurs au-dessus du plan moyen.
Hauteur du pic maximal	S_p	$S_p = \max(z(x, y))$	Hauteur maximale mesurée depuis le plan moyen.
Profondeur de la vallée maximale	S_v	$S_v = \min(z(x, y)) $	Profondeur maximale mesurée depuis le plan moyen.
Paramètres Spatiaux (Spatial Parameters)			
Longueur d'autocorrélation	S_{al}	$S_{al} = \min(\tau)$, avec τ le décalage où l'autocorrélation chute sous 0.2.	Distance au-delà de laquelle les valeurs de hauteur deviennent non corrélées.
Rapport d'aspect de texture	S_{tr}	$S_{tr} = \frac{\text{corrélation minimale}}{\text{corrélation maximale}}$	Mesure de l'isotropie de la texture de surface.
Direction de texture dominante	S_{td}	Basée sur la transformée de Fourier.	Orientation dominante de la texture de surface.
Paramètres Hybrides (Hybrid Parameters)			
Gradient quadratique moyen	S_{dq}	$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \int_A \left(\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \right) dA}$	Évalue les pentes de la surface.

Paramètre	Symbole	Formule	Description
Rapport de surface développée	S_{dr}	$S_{dr} = \frac{A_{réelle} - A_{projetée}}{A_{projetée}} \times 100$	Pourcentage d'augmentation de la surface réelle par rapport à la surface projetée.
Paramètres Fonctionnels (Functional Parameters)			
Rapport matériel aréolaire	$S_{mr(c)}$	Dépend de la courbe de portion matérielle.	Proportion de matériau au-dessus d'un plan de référence.
Inverse du rapport matériel	$S_{mc(mr)}$	Dépend de la courbe inverse.	Hauteur à un ratio matériel donné.
Hauteur du cœur	S_k	$S_k = S_z - S_{pk} - S_{vk}$	Profondeur de la région centrale de la surface.
Hauteur réduite des pics	S_{pk}	$S_{pk} = S_p -$ hauteur moyenne du cœur	Hauteur des pics au-dessus de la région centrale.
Hauteur réduite des vallées	S_{vk}	$S_{vk} =$ hauteur moyenne du cœur – S_v	Profondeur des vallées sous la région centrale.
Paramètres de Volume Fonctionnel (Functional Volume Parameters)			
Volume des vides dans les vallées	V_{vv}	$V_{vv} = \int_{S_v}^{S_{vk}} z(x, y) dA$	Volume des vides sous la région centrale.
Volume des matériaux des pics	V_{mp}	$V_{mp} = \int_{S_p}^{S_k} z(x, y) dA$	Volume des matériaux dans la région des pics.

Paramètre	Symbole	Formule	Description
Volume des matériaux du cœur	V_{mc}	$V_{mc} = \int_{S_k}^{S_v} z(x, y) dA$	Volume des matériaux dans la région centrale.

Les paramètres présentés suivent la norme **ISO 25178-3** pour la caractérisation des surfaces.

2.5 Discrétisation

La discrétisation est une étape cruciale dans la simulation des phénomènes de frottement et de déformation des surfaces. Elle consiste à diviser les volumes continus en éléments discrets plus petits, permettant ainsi de résoudre numériquement les équations différentielles qui régissent le comportement des matériaux en contact. Dans ce travail, nous utilisons des maillages tétraédriques générés à l'aide de la bibliothèque **Polyfem**. Cette approche facilite la résolution des équations différentielles liées au contact et à la déformation des surfaces avec une grande précision.

2.5.1 Tétraèdres et Maillages Tétraédriques

Un **tétraèdre** est une figure géométrique à quatre faces planes triangulaires, formant une structure de base en trois dimensions. Dans le contexte de la discrétisation, les tétraèdres sont utilisés comme éléments finis pour représenter des volumes complexes de manière simplifiée et flexible. Les maillages tétraédriques offrent plusieurs avantages :

- **Flexibilité Géométrique** : Ils peuvent facilement s'adapter à des géométries complexes et irrégulières.
- **Précision** : Permettent une approximation précise des courbes et des surfaces grâce à une granularité fine.
- **Efficacité Computationnelle** : Facilite le calcul parallèle et la résolution efficace des systèmes d'équations résultants.

Type de Carte	Description	Nom du Fichier (Formats)
Occlusion Ambiante	Simule les ombres dans les creux et les coins pour améliorer la profondeur et le réalisme.	(.jpg, .png, .tiff, .exr)
Couleur de Base	Définit la couleur principale d'une surface sans aucun effet d'éclairage ou d'ombrage.	(.jpg, .png, .tiff, .exr)
Déplacement	Définit les informations de hauteur de surface en niveaux de gris. Gris moyen = plat, blanc = sommet, noir = creux.	(.tiff, .exr)
Métallique	Définit la nature métallique d'un matériau, distinguant les surfaces métalliques des surfaces non métalliques.	(.jpg, .png, .tiff, .exr)
Normale	Simule les informations de relief en modifiant les normales de la surface pour créer l'illusion de bosses.	(.jpg, .png, .tiff, .exr)
ORM	Contient les informations d'Occlusion Ambiante, de Rugosité et de Métal dans les canaux R, G et B. Principalement utilisé pour le rendu en temps réel.	(.jpg, .png, .tiff, .exr)
Rugosité	Détermine la netteté des réflexions, avec des valeurs plus sombres produisant des reflets plus nets et plus clairs.	(.jpg, .png, .tiff, .exr)

Tableau 2.2 Cartes de textures et leurs descriptions

2.5.2 Polyfem

La bibliothèque **Polyfem** est utilisée pour la génération de maillages tétraédriques dans ce travail. Polyfem intègre des outils tels que Tetgen et Tetwild pour créer des maillages adaptés aux simulations numériques. Grâce à ses capacités avancées de génération de maillage, Polyfem permet de produire des maillages de haute qualité qui capturent fidèlement les géométries complexes des surfaces de contact étudiées.

2.5.3 Processus de Discrétisation

Le processus de discrétisation implique plusieurs étapes clés :

Outil	Description	Caractéristiques principales
TetGen	Génération de maillages tétraédriques à partir de maillages de surface.	<ul style="list-style-type: none"> - Production de maillages conformes et de qualité. - Adapté aux simulations FEM. - Développé par Hang Si.
TetWild	Génération et optimisation de maillages tétraédriques adaptatifs.	<ul style="list-style-type: none"> - Gère des géométries complexes et irrégulières. - Optimisation automatique pour minimiser la distorsion. - Adapté aux simulations haute performance.
Gmsh	Générateur de maillages génériques pour diverses simulations numériques.	<ul style="list-style-type: none"> - Supporte les maillages tétraédriques, hexaédriques et hybrides. - Interface graphique et API pour intégration. - Outil très polyvalent, utilisé dans l'industrie et la recherche.
MMG	Outil spécialisé dans l'adaptation et l'optimisation des maillages.	<ul style="list-style-type: none"> - Raffinement et coarsening adaptatif de maillages existants. - Amélioration de la qualité des maillages pour simulations FEM. - Compatible avec Gmsh et autres outils.
fTetWild	Variante améliorée de TetWild pour des simulations plus robustes.	<ul style="list-style-type: none"> - Maillages optimisés pour la robustesse et la stabilité. - Spécialement conçu pour des simulations physiques avancées. - Gestion efficace des grandes géométries.

Tableau 2.4 Comparaison des outils de génération de maillages tétraédriques

1. **Définition de la Géométrie** : Modélisation précise des surfaces de contact à l'aide de logiciels de CAO ou de scans 3D.
2. **Génération du Maillage de Surface** : Création d'un maillage de surface précis qui servira de base pour la génération du maillage tétraédrique interne.
3. **Tétraédralisation** : Utilisation de Tetgen ou Tetwild via Polyfem pour générer le maillage tétraédrique interne, assurant la conformité et la qualité requises.
4. **Optimisation du Maillage** : Ajustement des paramètres de maillage pour équilibrer la précision et l'efficacité computationnelle, en fonction des besoins spécifiques de la simulation.
5. **Validation du Maillage** : Vérification de la qualité du maillage généré, en s'assurant qu'il répond aux critères de simulation et qu'il ne contient pas d'éléments défectueux.

2.5.4 Illustration des Fonctions de Maillage

2.5.5 Avantages de la Discrétisation Tétraédrique

L'utilisation de maillages tétraédriques présente plusieurs avantages pour les simulations de frottement et de déformation :

- **Précision** : Permet une représentation détaillée des géométries complexes et des variations fines des surfaces.
- **Flexibilité** : Adaptable à diverses formes géométriques et capable de gérer des transitions de matériaux ou des interfaces complexes.
- **Efficacité** : Optimisé pour les calculs parallèles et les simulations à grande échelle, réduisant le temps de calcul nécessaire.
- **Compatibilité** : Compatible avec une large gamme de logiciels de simulation et de méthodes numériques, facilitant l'intégration dans des workflows de recherche et développement.

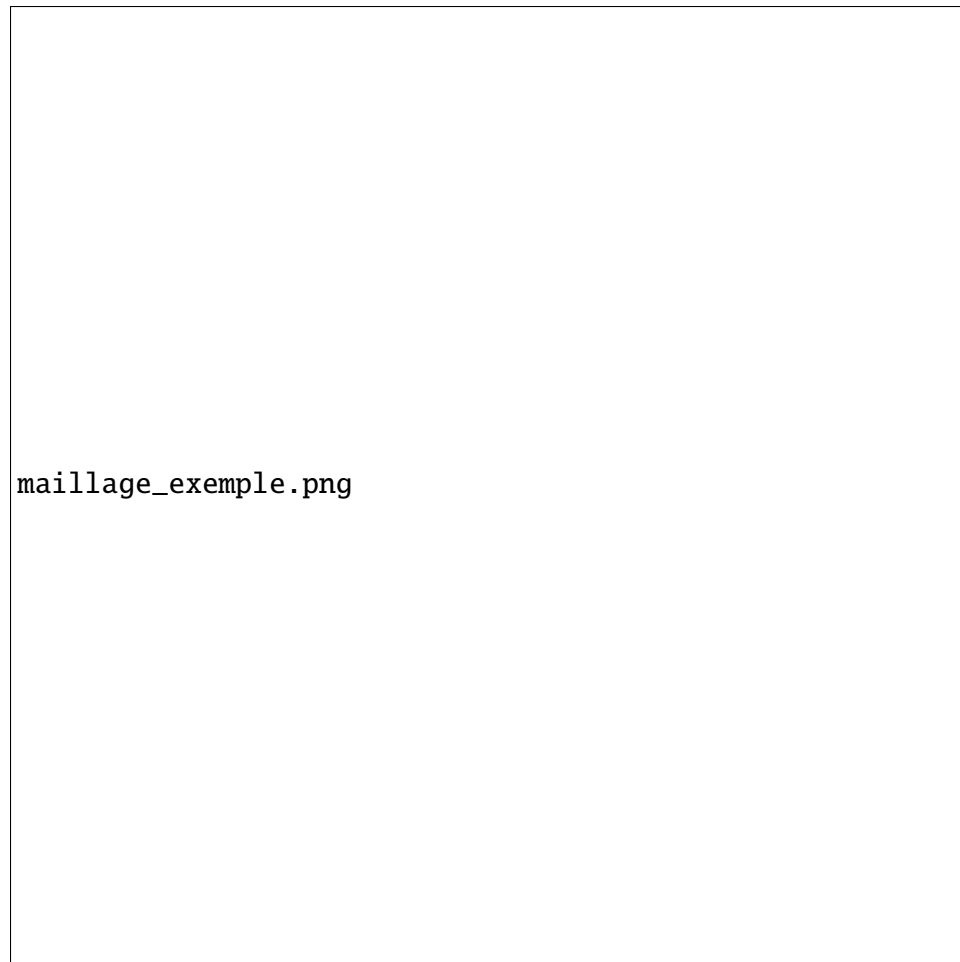


Figure 2.2 Exemple de maillage tétraédrique généré à l’aide de Tetgen et Tetwild. Les tétraèdres sont représentés en différentes couleurs pour illustrer la qualité et la régularité du maillage.

2.6 Matériaux

Pour cette recherche, nous utilisons des matériaux variés pour valider les simulations et les tests physiques. Les surfaces sont générées à partir de scans de surfaces réelles ainsi que des modèles créés à l’aide de fonctions de bruit stochastiques.

2.7 Modèles de Corps Souples

Comme montré en Figure 2.7, une approche simple pour modéliser les systèmes de corps souples consiste à utiliser des masses discrètes reliées entre elles par des forces internes qui maintiennent la cohésion du système. Ces forces internes peuvent être modélisées par un système masse-ressort ou par des modèles élastiques aux éléments finis. L'équation du mouvement pour un système de corps souples est donnée par :

$$M\ddot{x} + (\alpha M + \beta K(x))\dot{x} + f_{int}(x) = f_{ext}. \quad (2.1)$$

Dans cette équation, $x \in \mathbb{R}^{3n}$ représente la position des particules du système, M est la matrice de masse diagonale, et $K(x)$ est la matrice de raideur, qui dépend généralement de la configuration des particules. Les paramètres α et β sont les coefficients d'amortissement de Rayleigh, et f_{int} est le vecteur des forces internes. La force externe f_{ext} inclut des forces telles que la gravité ou les forces de collision.

2.7.1 Modèles d'Élasticité dans Polyfem

Polyfem supporte plusieurs modèles d'élasticité pour simuler le comportement des corps souples. Les principaux modèles utilisés sont :

2.7.1.1 Modèle Élastique Linéaire

Le modèle élastique linéaire est le plus simple des modèles d'élasticité, basé sur les lois de Hooke généralisées en trois dimensions. Ce modèle est approprié pour les matériaux qui se comportent de manière linéaire sous de petites déformations. La relation entre les contraintes σ et les déformations ϵ est donnée par :

$$\sigma = \lambda \operatorname{tr}(\epsilon)I + 2\mu\epsilon$$

où λ et μ sont les coefficients de Lamé, $\text{tr}(\epsilon)$ est la trace du tenseur de déformation, et I est le tenseur identité. Ce modèle suppose que les matériaux retrouvent leur forme initiale après l'élimination des charges appliquées.

2.7.1.2 Modèle Hyperélastique de Lamé

Le modèle hyperélastique de Lamé étend le modèle élastique linéaire en permettant des comportements non linéaires des matériaux sous grandes déformations. Il est basé sur une fonction de potentiel Ψ qui dépend des invariants du tenseur de déformation ϵ . La fonction de potentiel pour ce modèle peut être exprimée comme :

$$\Psi = \frac{\lambda}{2} (\text{tr}(C) - 3) + \mu (\text{tr}(C) - 3)$$

où $C = F^T F$ est le tenseur de déformation droite, et F est le tenseur de déformation. Ce modèle permet de capturer les effets de non-linéarité dans la réponse du matériau à des déformations importantes, offrant une meilleure représentation des matériaux réalistes comme les polymères ou les tissus biologiques.

2.7.1.3 Modèle Neo-Hookean

Le modèle Neo-Hookean est un type spécifique de modèle hyperélastique qui est particulièrement adapté pour les matériaux en caoutchouc et les tissus biologiques. La fonction de potentiel pour le modèle Neo-Hookean est définie par :

$$\Psi = \frac{\mu}{2} (\text{tr}(C) - 3) - \mu \ln J + \frac{\lambda}{2} (\ln J)^2$$

où $J = \det(F)$. Ce modèle inclut des termes non linéaires qui permettent de simuler des matériaux qui subissent de grandes déformations tout en maintenant une réponse élastique

réaliste. Le terme $-\mu \ln J$ introduit une dépendance logarithmique à la dilatation, tandis que le terme $\frac{\lambda}{2}(\ln J)^2$ contrôle la compressibilité du matériau.

2.7.2 Implémentation dans Polyfem

Polyfem permet d'utiliser ces modèles d'élasticité en définissant les paramètres matériels appropriés dans les fichiers de configuration de simulation. Par exemple :

- **Élastique Linéaire** : Spécifier les coefficients de Lamé λ et μ dans les paramètres du matériau.
- **Hyperélastique de Lamé** : Utiliser une fonction de potentiel adaptée et fournir les paramètres λ et μ pour gérer les grandes déformations.
- **Neo-Hookean** : Définir les paramètres μ et λ ainsi que les termes de déformation non linéaires dans la fonction de potentiel.

Ces modèles sont résolus à l'aide des solveurs intégrés de Polyfem, qui utilisent des méthodes d'éléments finis pour approximer les équations différentielles résultantes de chaque modèle d'élasticité. La flexibilité de Polyfem dans la gestion de différents modèles d'élasticité permet de simuler une large gamme de matériaux et de comportements mécaniques, facilitant ainsi l'étude des phénomènes de frottement et de déformation dans des systèmes de corps souples.

2.7.3 Comparaison des Modèles

- **Élastique Linéaire** : Simple et efficace pour les petites déformations, mais limité pour les grandes déformations et les matériaux non linéaires.
- **Hyperélastique de Lamé** : Offre une meilleure précision pour les grandes déformations et les matériaux non linéaires, mais nécessite une calibration plus complexe des paramètres.
- **Neo-Hookean** : Approprié pour les matériaux qui subissent de grandes déformations élastiques, avec une formulation mathématique plus complexe mais offrant une meilleure correspondance avec les comportements réels des matériaux en caoutchouc et biologiques.

2.7.4 Illustration des Modèles

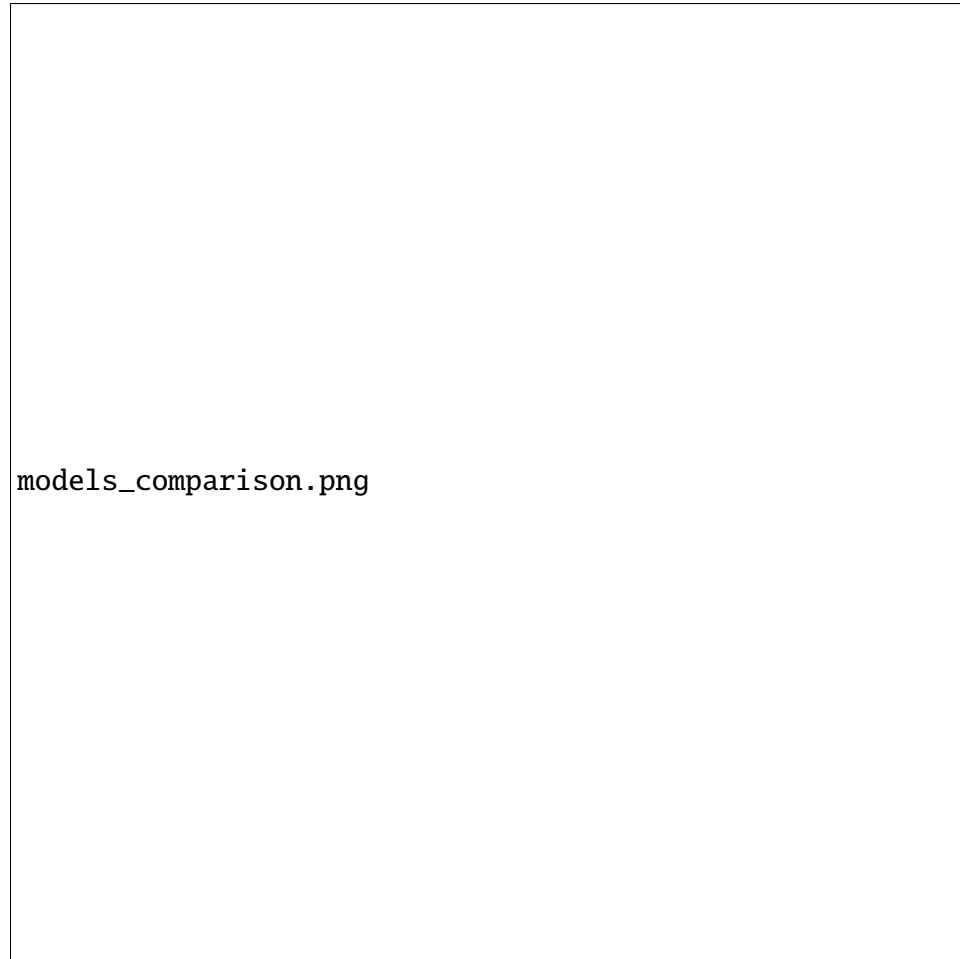


Figure 2.3 Comparaison des réponses mécaniques des différents modèles d'élasticité : Élastique linéaire, Hyperélastique de Lamé, et Neo-Hookean.

2.8 Cadre de Simulation

Le cadre de simulation repose sur les méthodes suivantes :

- **Contact Potentiel Incrémental (IPC)** : Une méthode non-linéaire qui utilise une optimisation incrémentale pour gérer les interactions multiples entre objets déformables.
- **Détection de Collision Continue (CCD)** : Une approche garantissant la résolution des collisions en temps réel pour des corps en mouvement rapide.

- **Bibliothèque Polyfem** : Utilisée pour résoudre les problèmes non-linéaires et linéaires liés à la simulation des corps souples.
- **Paraview** : Extraction et visualisation des données simulées pour l'analyse des résultats.

2.8.1 Contact Potentiel Incrémental (IPC)

Le **Contact Potentiel Incrémental (IPC)** est une méthode avancée de détection et de résolution des contacts entre objets déformables. Cette approche non-linéaire permet de gérer de multiples interactions simultanées en minimisant une fonction potentielle qui pénalise l'interpénétration des objets.

2.8.1.1 Fonction Potentielle

La méthode IPC définit une fonction potentielle Φ qui quantifie l'interaction entre les surfaces des objets en contact. Cette fonction est conçue de manière à augmenter rapidement lorsque les objets s'interpénètrent, empêchant ainsi leur chevauchement.

$$\Phi(\mathbf{x}) = \sum_{i,j} \phi_{ij}(\mathbf{x})$$

où :

- \mathbf{x} représente les variables de déformation des objets.
- ϕ_{ij} est le potentiel de contact entre les objets i et j .

2.8.1.2 Optimisation Incrémentale

À chaque pas de temps Δt , l'IPC résout le problème d'optimisation suivant pour déterminer les déformations \mathbf{x} minimisant la fonction potentielle tout en respectant les contraintes mécaniques :

$$\min_{\mathbf{x}} \Phi(\mathbf{x}) + \mathcal{R}(\mathbf{x})$$

où $\mathcal{R}(\mathbf{x})$ représente les termes de régularisation ou les contraintes supplémentaires liées aux propriétés matérielles et aux conditions aux limites.

2.8.1.3 Algorithme

L'algorithme IPC suit généralement ces étapes :

1. **Initialisation** : Définir les positions initiales des objets et les paramètres de la simulation.
2. **Détection de Contact** : Identifier les paires d'objets susceptibles d'entrer en contact.
3. **Construction de la Fonction Potentielle** : Calculer $\Phi(\mathbf{x})$ pour les interactions détectées.
4. **Résolution de l'Optimisation** : Utiliser des méthodes d'optimisation incrémentale pour minimiser $\Phi(\mathbf{x})$ sous les contraintes.
5. **Mise à Jour des Positions** : Appliquer les déformations \mathbf{x} calculées aux objets.
6. **Itération** : Répéter les étapes précédentes pour chaque pas de temps Δt .

2.8.2 Détection de Collision Continue (CCD)

La **Détection de Collision Continue (CCD)** est une technique essentielle pour prévenir le phénomène de *tunneling*, où des objets en mouvement rapide traversent d'autres objets sans collision détectée entre deux pas de simulation. La CCD assure que toutes les collisions sont détectées et résolues même à haute vitesse.

2.8.2.1 Modélisation Mathématique

Pour deux objets en mouvement, la CCD cherche à déterminer le premier instant $t^* \in [0, \Delta t]$ où une collision se produit. Supposons que les trajectoires des objets soient définies par leurs positions au temps t :

$$\mathbf{P}_A(t) = \mathbf{P}_{A0} + \mathbf{V}_A t$$

$$\mathbf{P}_B(t) = \mathbf{P}_{B0} + \mathbf{V}_B t$$

où :

- $\mathbf{P}_A(t)$ et $\mathbf{P}_B(t)$ sont les positions des objets A et B à l'instant t .
- \mathbf{V}_A et \mathbf{V}_B sont les vitesses des objets A et B .

La condition de collision est donnée par :

$$\mathbf{P}_A(t^*) \cap \mathbf{P}_B(t^*) \neq \emptyset$$

2.8.2.2 Algorithme CCD

L'algorithme CCD suit généralement ces étapes :

1. **Définition des Trajectoires :** Modéliser les trajectoires des objets sur l'intervalle de temps $[0, \Delta t]$.
2. **Détection de Collision :** Résoudre l'équation $\mathbf{P}_A(t) \cap \mathbf{P}_B(t) \neq \emptyset$ pour trouver t^* .
3. **Résolution de la Collision :** Ajuster les positions et les vitesses des objets à l'instant t^* pour résoudre la collision.
4. **Mise à Jour des Trajectoires :** Appliquer les ajustements et continuer la simulation pour le reste de l'intervalle de temps.

2.8.2.3 Formules de Collision

Pour des objets simples, comme des sphères, la détection de collision peut être formulée analytiquement. Supposons deux sphères de rayons R_A et R_B avec des centres $\mathbf{C}_A(t)$ et $\mathbf{C}_B(t)$. La condition de collision est :

$$\|\mathbf{C}_A(t^*) - \mathbf{C}_B(t^*)\| \leq R_A + R_B$$

En substituant les trajectoires :

$$\|\mathbf{P}_{A0} + \mathbf{V}_A t^* - (\mathbf{P}_{B0} + \mathbf{V}_B t^*)\| \leq R_A + R_B$$

Cela mène à résoudre une équation quadratique en t^* .

2.8.3 Bibliothèque Polyfem

La bibliothèque **Polyfem** est utilisée pour résoudre les problèmes non-linéaires et linéaires liés à la simulation des corps souples. Polyfem intègre des solveurs avancés capables de gérer la déformation, le contact et les interactions entre multiples corps. Elle supporte la génération de maillages tétraédriques de haute qualité et offre des outils pour l'analyse et la visualisation des résultats.

2.8.3.1 Solveurs Linéaires : Pardiso

Pardiso est un solveur linéaire direct hautement performant intégré dans Polyfem pour résoudre les systèmes d'équations linéaires issus des méthodes des éléments finis. Pardiso est particulièrement efficace pour les matrices creuses symétriques définies positives, couramment rencontrées dans les problèmes d'élasticité linéaire.

2.8.3.1.1 Fonctionnement de Pardiso

Pardiso utilise une décomposition LU optimisée pour les matrices creuses, exploitant la structure de sparsité pour minimiser les opérations de calcul et la mémoire requise. Cette approche permet de résoudre rapidement de grands systèmes d'équations, même pour des maillages tétraédriques complexes.

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$$

où :

- **A** est la matrice de raideur résultant de la discrétisation des équations de l'élément fini.
- **x** est le vecteur des déplacements nodaux.
- **b** est le vecteur des forces appliquées.

2.8.3.1.2 Avantages de Pardiso dans Polyfem

- **Performance** : Capacité à résoudre rapidement de grands systèmes grâce à des algorithmes optimisés.
- **Stabilité Numérique** : Décomposition LU robuste qui assure la précision des solutions même pour des matrices mal conditionnées.
- **Scalabilité** : Efficace pour les simulations parallèles, permettant d'exploiter pleinement les architectures multi-cœurs et distribuées.

2.8.3.2 Solveurs Non-Linéaires

Pour les problèmes non-linéaires, Polyfem utilise des méthodes itératives avancées qui permettent de capturer les comportements complexes des matériaux sous de grandes déformations ou lors de contacts multiples.

2.8.3.2.1 Méthode de Newton-Raphson

La méthode de Newton-Raphson est la technique principale utilisée pour résoudre les systèmes d'équations non-linéaires dans Polyfem. Cette méthode itère sur une approximation initiale pour converger vers la solution exacte en minimisant la fonction résiduelle.

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = 0$$

où :

- **F(x)** représente le vecteur des forces internes et externes.
- **x** est le vecteur des variables de déformation.

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} \right)^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)})$$

2.8.3.2.2 Avantages de la Méthode de Newton-Raphson

- **Rapidité de Convergence** : Convergence quadratique sous des conditions adéquates, ce qui permet d'atteindre rapidement une solution précise.
- **Flexibilité** : Applicable à une large gamme de problèmes non-linéaires, y compris ceux impliquant des matériaux hyperélastiques.

2.8.3.2.3 Limitations

- **Sensibilité à l'Initialisation** : Nécessite une approximation initiale proche de la solution pour assurer la convergence.
- **Coût Computationnel** : Chaque itération implique la résolution d'un système linéaire, ce qui peut être coûteux pour de très grands systèmes.

2.8.3.3 Recherche de Ligne (Line Search)

La recherche de ligne est une technique utilisée en conjonction avec la méthode de Newton-Raphson pour améliorer la robustesse et la convergence des solveurs non-linéaires. Elle consiste à déterminer un facteur d'étape optimal α qui minimise la fonction résiduelle le long de la direction de mise à jour.

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \alpha \Delta \mathbf{x}^{(k)}$$

où $\Delta \mathbf{x}^{(k)}$ est la direction de mise à jour calculée par Newton-Raphson.

2.8.3.3.1 Fonctionnement de la Recherche de Ligne

1. **Définition de la Direction :** Calculer la direction de mise à jour $\Delta \mathbf{x}^{(k)}$ à partir de la méthode de Newton-Raphson.
2. **Optimisation de l'Étape :** Trouver le facteur α qui minimise la norme de $\mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)} + \alpha \Delta \mathbf{x}^{(k)})$.
3. **Mise à Jour :** Appliquer la mise à jour avec le facteur α optimal.

2.8.3.3.2 Avantages de la Recherche de Ligne

- **Amélioration de la Convergence :** Aide à éviter les oscillations et à garantir la convergence même lorsque l'approximation initiale n'est pas proche de la solution.
- **Stabilité :** Réduit le risque de divergence en adaptant dynamiquement la taille de l'étape.

2.8.3.3.3 Implémentation dans Polyfem

Polyfem implémente la recherche de ligne en intégrant des algorithmes d'optimisation tels que la méthode de Wolfe ou la règle d'Armijo. Ces algorithmes déterminent efficacement le facteur α tout en maintenant un équilibre entre rapidité de convergence et stabilité numérique.

2.8.3.4 Synthèse des Méthodes

Polyfem combine ces techniques de résolution linéaire et non-linéaire pour offrir une solution robuste et efficace aux problèmes de simulation des corps souples :

- **Pardiso** est utilisé pour résoudre rapidement les systèmes linéaires résultant des itérations de Newton-Raphson.
- La **Méthode de Newton-Raphson** permet de traiter les non-linéarités inhérentes aux matériaux hyperélastiques et aux contacts multiples.
- La **Recherche de Ligne** améliore la robustesse de la méthode de Newton-Raphson, assurant une convergence stable même dans des configurations complexes.

Grâce à cette combinaison, Polyfem est capable de gérer des simulations complexes de corps souples avec une grande précision et une efficacité computationnelle élevée, répondant aux exigences des applications industrielles et scientifiques modernes.

2.8.3.5 Illustration des Méthodes de Résolution

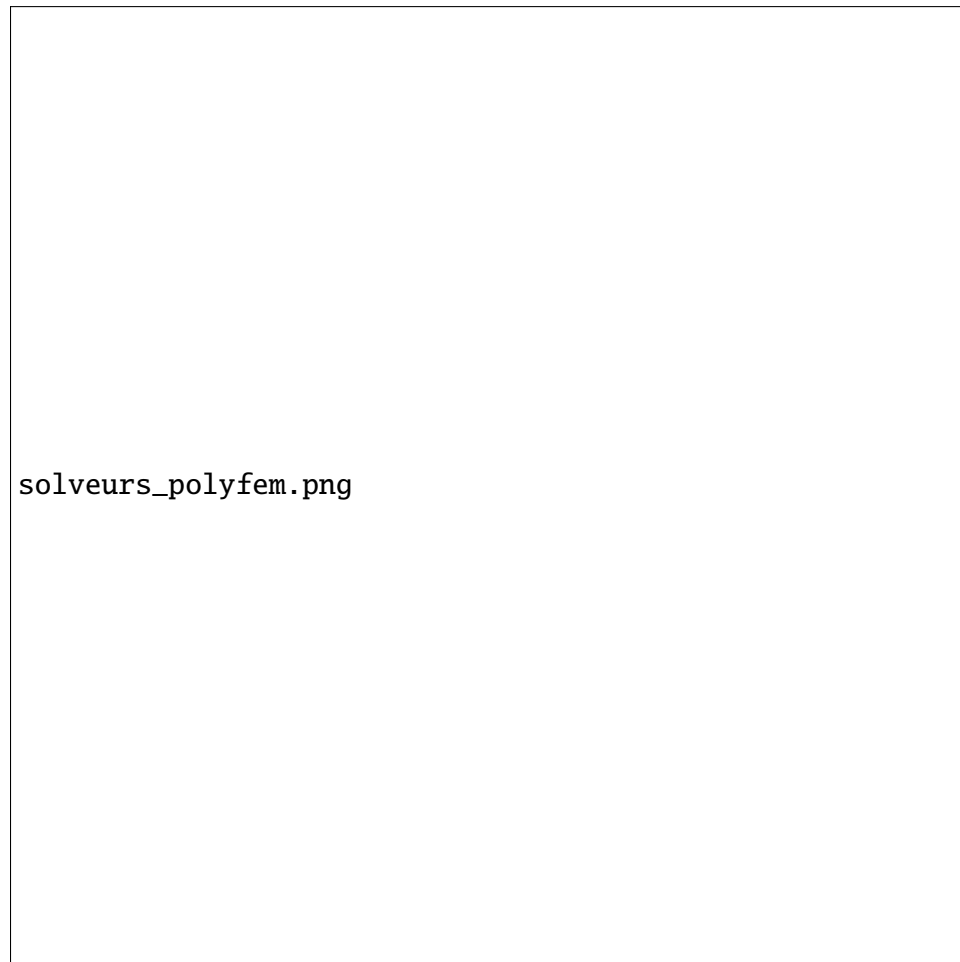


Figure 2.4 Schéma illustrant l'intégration des solveurs linéaires et non-linéaires dans Polyfem. Pardiso résout les systèmes linéaires, tandis que la méthode de Newton-Raphson et la recherche de ligne gèrent les non-linéarités et optimisent la convergence des simulations.

2.8.3.6 Avantages de l'Approche Polyfem

- **Efficacité :** Résolution rapide des systèmes linéaires et non-linéaires grâce à l'utilisation de solveurs optimisés comme Pardiso.

- **Robustesse** : Techniques avancées comme la recherche de ligne assurent la stabilité et la convergence des simulations même dans des scénarios complexes.
- **Flexibilité** : Supporte une variété de modèles d'élasticité et peut être adapté à différents types de matériaux et conditions de charge.
- **Intégration** : Fonctionne de manière transparente avec les outils de visualisation comme Paraview pour une analyse complète des résultats.

2.8.4 Paraview

Paraview est un outil de visualisation open-source utilisé pour l'extraction et l'analyse des données simulées. Il permet de représenter graphiquement les déformations, les forces de contact, et autres variables pertinentes issues des simulations. Grâce à ses capacités de traitement en temps réel et de rendu haute performance, Paraview facilite l'interprétation des résultats et l'identification des zones critiques nécessitant une optimisation.

2.8.4.1 Structure des Fichiers de Sortie

Paraview organise les données de simulation en utilisant une structure hiérarchique de fichiers, permettant une gestion efficace des données temporelles et spatiales. Les principaux types de fichiers utilisés sont les suivants :

- **Fichier .pvd** : Le fichier .pvd (Paraview Data) sert de conteneur principal qui référence plusieurs fichiers de maillage et de données temporelles. Il agit comme un index permettant à Paraview de gérer les données réparties sur différents pas de temps.
- **Fichiers .vtm** : Chaque fichier .vtm (VTK MultiBlock) correspond à un pas de temps spécifique dans la simulation. Il contient la géométrie et la topologie des éléments de maillage pour ce pas de temps particulier, ainsi que des références aux fichiers .vtu contenant les données scalaires et vectorielles.
- **Fichiers .vtu** : Les fichiers .vtu (VTK Unstructured Grid) stockent les données non structurées associées aux maillages. Ils contiennent des informations détaillées telles que les

forces de contact, les contraintes, les déplacements, et d'autres variables pertinentes pour chaque point du maillage.

2.8.4.2 Processus de Génération et Intégration

Lors d'une simulation, pour chaque pas de temps t_i , un fichier `.vtm` et un fichier `.vtu` sont générés :

1. **Génération du Maillage** : À chaque pas de temps, le maillage tétraédrique est mis à jour et stocké dans un fichier `.vtm`. Ce fichier contient la structure géométrique de la simulation à ce moment précis.
2. **Enregistrement des Données** : Les données physiques telles que les forces de contact et les contraintes sont enregistrées dans un fichier `.vtu` associé. Chaque `.vtu` contient les valeurs scalaires et vectorielles nécessaires pour analyser le comportement des corps souples.
3. **Indexation dans le Fichier `.pvd`** : Le fichier `.pvd` référence tous les fichiers `.vtm` et `.vtu` générés au cours de la simulation. Cela permet à Paraview de charger et de naviguer facilement à travers les différents pas de temps.

2.8.4.3 Exemple de Fonctionnement

Supposons une simulation comportant N pas de temps. La structure des fichiers serait organisée comme suit :

- `simulation.pvd`
 - `time_step_1.vtm`
 - `time_step_1.vtu` (Données scalaires et vectorielles)
 - `time_step_2.vtm`
 - `time_step_2.vtu` (Données scalaires et vectorielles)
 - ...

- time_step_N.vtm
 - time_step_N.vtu (Données scalaires et vectorielles)

Lorsque `simulation.pvd` est chargé dans Paraview, celui-ci peut automatiquement identifier et charger les maillages et données associées à chaque pas de temps, permettant ainsi une visualisation fluide de l'évolution de la simulation.

2.8.4.4 Accès aux Données

Paraview permet d'accéder facilement aux différentes variables enregistrées dans les fichiers `.vtu`. Par exemple :

- **Forces de Contact** : Les forces de contact peuvent être visualisées sous forme de vecteurs ou de scalaires appliqués aux points de contact, facilitant l'analyse des interactions entre les corps souples.
- **Contraintes** : Les contraintes internes, telles que les contraintes de Von Mises, peuvent être représentées en couleurs sur le maillage, permettant d'identifier les zones de forte déformation ou de concentration de contraintes.
- **Déplacements** : Les déplacements des points du maillage peuvent être visualisés pour observer les déformations globales et locales des corps souples.

2.8.4.5 Visualisation Temporelle

Grâce au fichier `.pvd`, Paraview peut interpoler et animer les données sur les différents pas de temps, offrant une vue dynamique de la simulation. Cette fonctionnalité est essentielle pour comprendre les processus transitoires et l'évolution des interactions tribologiques au fil du temps.

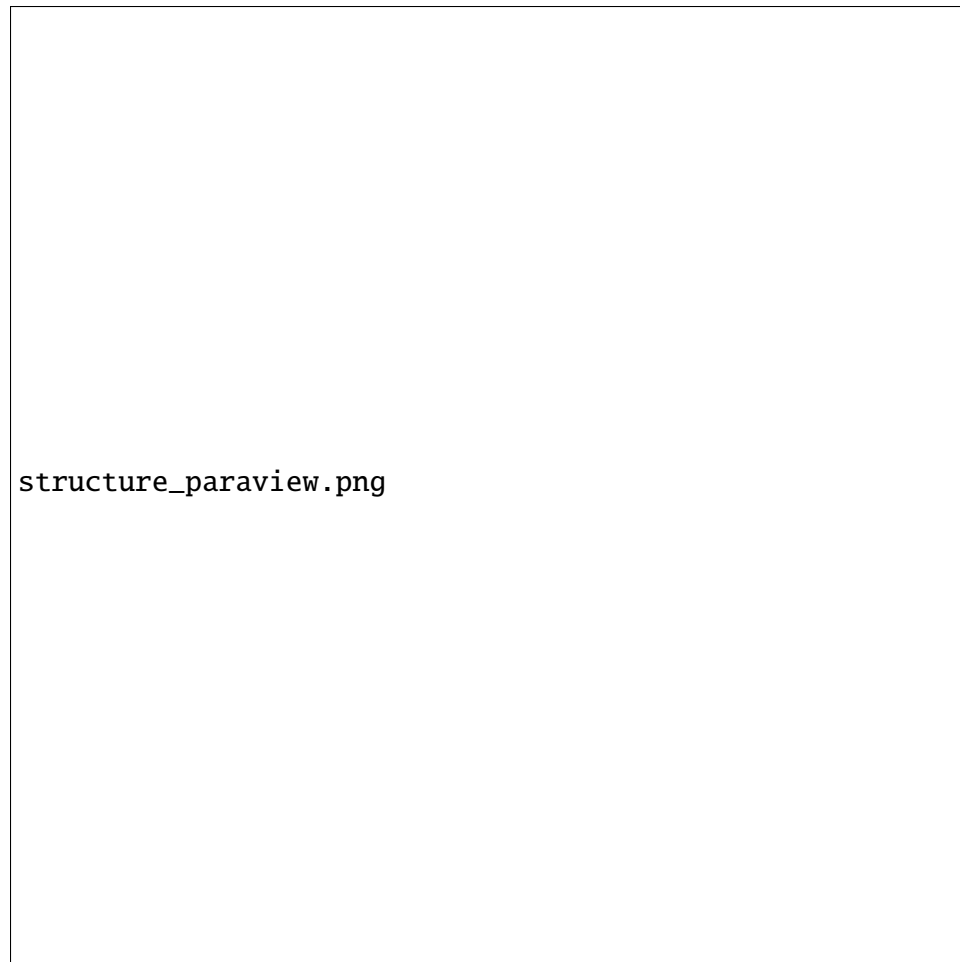


Figure 2.5 Structure hiérarchique des fichiers utilisés par Paraview pour organiser les données de simulation. Le fichier `.pvd` référence plusieurs fichiers `.vtm`, chacun contenant un fichier `.vtu` avec les données associées à un pas de temps spécifique.

2.8.4.6 Illustration de la Structure des Fichiers

2.8.5 Avantages de l'Utilisation de Paraview

- **Flexibilité** : Paraview supporte une large gamme de formats de données et permet de personnaliser les visualisations selon les besoins spécifiques de l'utilisateur.
- **Performance** : Optimisé pour gérer de grandes quantités de données, Paraview maintient une performance élevée même avec des simulations complexes et volumineuses.

- **Interactivité** : Permet une exploration interactive des résultats, avec des outils de filtrage, de sélection et de transformation des données en temps réel.
- **Extensibilité** : Grâce à son architecture modulaire et ses plugins, Paraview peut être étendu pour intégrer de nouvelles fonctionnalités ou formats de données.

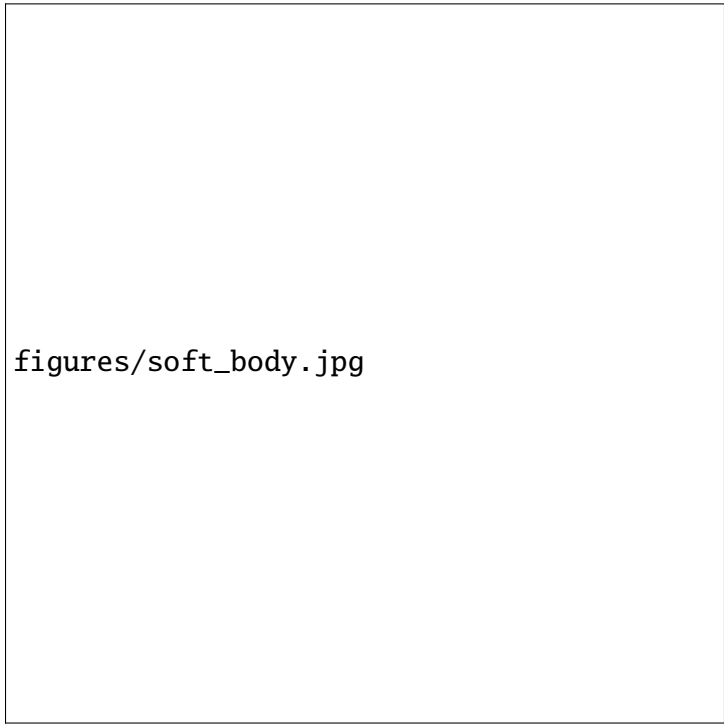
2.8.6 Illustration du Cadre de Simulation



Figure 2.6 Schéma illustrant le cadre de simulation intégrant les méthodes IPC, CCD, Polyfem et Paraview.

2.8.7 Avantages du Cadre de Simulation

- **Précision** : Les méthodes IPC et CCD assurent une détection et une résolution précises des contacts et des collisions, même dans des scénarios complexes.
- **Efficacité** : L'utilisation de Polyfem optimise la résolution des équations différentielles, réduisant le temps de calcul nécessaire.
- **Flexibilité** : Le cadre permet de simuler une grande variété de configurations géométriques et de conditions de contact grâce à la génération de maillages tétraédriques adaptatifs.
- **Visualisation** : Paraview offre une interface intuitive pour l'analyse visuelle des résultats, facilitant la validation et l'optimisation des simulations.



figures/soft_body.jpg

Figure 2.7 Discrétisation d'un corps souple en masses concentrées. La masse du corps est distribuée sur des masses discrètes m_i , reliées par des forces internes f_{ij} .

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 Protocole de Simulation

Nous avons développé un protocole de simulation des interactions multi-matériaux en utilisant la bibliothèque **Polyfem**. Cette approche tire parti des capacités de notre PC, exploitant à la fois le CPU et le GPU pour optimiser les calculs. Les résultats des simulations sont exportés sous les formats **.pvd**, **.vtm** et **.vtu**, contenant des informations essentielles telles que les forces de contact, les contraintes de Cauchy, les tenseurs de Piola (premier et second ordre) et les contraintes de Von Mises.

3.2 Protocole de Test Expérimental

Pour valider nos simulations, nous avons réalisé des tests expérimentaux en laboratoire. L'objectif est de comparer les coefficients de frottement obtenus par simulation avec ceux mesurés expérimentalement. Les surfaces testées ont été générées via plusieurs méthodes :

- **Scans 3D** : Utilisation de scanners 3D de haute précision pour capturer les détails des surfaces.
- **Impression 3D** : Création de surfaces à l'aide d'imprimantes 3D, telles que les modèles Formlabs et Elegoo.
- **Plan de Test** : Conception de divers scénarios pour évaluer les interactions frictionnelles sur ces surfaces fabriquées.

3.3 Extraction et Analyse des Données

- Les données simulées sont analysées avec **Paraview**, un outil de visualisation performant permettant d'examiner les fichiers **.pvd**, **.vtm** et **.vtu**.
- À l'aide de scripts Python, nous extrayons les données suivantes :
 - Forces de contact.
 - Contraintes de Cauchy.

- Tenseurs de Piola (ordre 1 et 2).
- Contraintes de Von Mises.
- Ces informations sont utilisées pour calculer le coefficient de frottement en relation avec les forces de contact et les contraintes. Python facilite une manipulation rapide et précise des données, assurant ainsi des résultats fiables.

3.4 Génération de Scénarios Multi-Échelle

Pour étudier les comportements de frottement à différentes échelles, nous avons créé des scénarios adaptés aux échelles macroscopique et microscopique.

3.4.1 Échelle Macroscopique

À l'échelle macroscopique, les scénarios simulent des interactions visibles à l'œil nu, comme le frottement entre de grandes surfaces métalliques ou des semelles de chaussures.

- **Paramètres de Simulation :**
 - **Dimensions :** Objets de grandes tailles (ex. : 10 cm x 10 cm).
 - **Force Normale :** Forces appliquées entre 10 N et 100 N.
 - **Rugosité :** Paramètre Ra variant de 0,5 à 5 μm .
 - **Matériaux :** Métaux tels que l'acier et l'aluminium.
- **Scénarios Simulés :**
 - Frottement entre deux plaques métalliques avec différentes rugosités.
 - Glissement linéaire et rotationnel.

3.4.2 Échelle Microscopique

À l'échelle microscopique, les scénarios ciblent les interactions au niveau des aspérités, dominées par les forces moléculaires.

- **Paramètres de Simulation :**
 - **Dimensions :** Objets de petites tailles (ex. : 1 mm x 1 mm).

- **Force Normale** : Forces appliquées entre 1 N et 10 N.
- **Rugosité** : Paramètre Ra variant de 0,05 à 0,5 μm .
- **Matériaux** : Matériaux souples comme le caoutchouc et les polymères.
- **Scénarios Simulés** :
 - Frottement entre surfaces polies avec des rugosités fines.
 - Glissement alternant entre adhérence et glissement (Stick-Slip).

3.4.3 Adaptation des Paramètres de Simulation

Pour chaque échelle, les paramètres sont ajustés pour refléter les conditions réelles :

- **Dimensionnalité** : Utilisation d'unités appropriées (cm pour macroscopique, mm pour microscopique) et ajustement des échelles de temps.
- **Propriétés des Matériaux** : Modules de Young, coefficients de Poisson et coefficients de frottement adaptés à chaque matériau et échelle.
- **Conditions de Contact** : Paramétrage des contraintes initiales et des conditions limites spécifiques à chaque échelle.

3.5 Réalisation des Tests Expérimentaux à Différentes Échelles

Pour valider les simulations, nous avons réalisé des tests réels correspondant aux scénarios simulés.

3.5.1 Tests à l'Échelle Macroscopique

- **Matériel** : Plaques métalliques d'acier et d'aluminium avec des rugosités Ra contrôlées.
- **Appareillage** : Tribomètre pour mesurer les forces de frottement statique et cinétique.
- **Procédure** :
 1. Préparation des surfaces métalliques avec les rugosités souhaitées.
 2. Fixation des plaques sur le tribomètre.
 3. Application progressive de la force normale.
 4. Mesure des forces de frottement lors du glissement.

- **Échelle de Mesure :** Forces entre 10 N et 100 N.

3.5.2 Tests à l'Échelle Microscopique

- **Matériel :** Échantillons de caoutchouc et de polymères imprimés en 3D avec des rugosités fines.
- **Appareillage :** Microscope à Force Atomique (AFM) pour mesurer les forces de frottement au niveau des asperités.
- **Procédure :**
 1. Création des échantillons via impression 3D avec des rugosités contrôlées.
 2. Utilisation de l'AFM pour mesurer le frottement en fonction de la vitesse de glissement.
 3. Enregistrement des forces de contact et des transitions Stick-Slip.
- **Échelle de Mesure :** Forces entre 1 N et 10 N.

3.5.3 Uniformisation des Tests

Pour assurer la comparabilité entre simulations et tests réels, les conditions expérimentales ont été calibrées :

- **Rugosité :** Mesure précise des rugosités des échantillons réels et ajustement dans les simulations.
- **Forces Appliquées :** Ajustement des forces normales et des vitesses de glissement dans les simulations pour correspondre aux tests.
- **Matériaux :** Alignement des propriétés mécaniques des matériaux simulés avec ceux des échantillons réels.

3.6 Optimisation et Calibration des Simulations

Pour que les simulations reflètent fidèlement les phénomènes réels de frottement, nous avons procédé à plusieurs étapes d'optimisation et de calibration.

3.6.1 Calibration des Paramètres

Les paramètres de simulation, tels que les coefficients de frottement et les modules de Young, ont été ajustés en fonction des données expérimentales.

- **Méthode d'Optimisation** : Utilisation de techniques d'optimisation non linéaire pour minimiser l'écart entre les résultats simulés et expérimentaux.
- **Validation Croisée** : Division des données expérimentales en ensembles d'entraînement et de validation pour éviter le surajustement des paramètres.

3.6.2 Validation Multi-Échelle

La validation a été réalisée à la fois à l'échelle macroscopique et microscopique pour garantir la robustesse et la fiabilité des modèles.

- **Macroscopique** : Comparaison des coefficients de frottement simulés avec ceux mesurés via le tribomètre.
- **Microscopique** : Analyse des forces de contact et des transitions Stick-Slip avec les données de l'AFM.

3.7 Réseau de Validation et Analyse des Résultats

Après les simulations et les tests expérimentaux, les résultats ont été analysés pour évaluer la précision et la fiabilité des modèles.

3.7.1 Comparaison des Coefficients de Frottement

Les coefficients de frottement issus des simulations ont été comparés à ceux mesurés expérimentalement.

- **Écart Absolu et Relatif** : Calcul de l'écart absolu ($|\mu_{\text{sim}} - \mu_{\text{exp}}|$) et relatif ($\frac{|\mu_{\text{sim}} - \mu_{\text{exp}}|}{\mu_{\text{exp}}}$) pour chaque scénario.
- **Analyse Statistique** : Utilisation de métriques telles que la moyenne, la variance et le coefficient de corrélation pour évaluer la performance globale des simulations.

3.7.2 Analyse des Contraintes et des Forces de Contact

Les contraintes de Cauchy, les tenseurs de Piola et les contraintes de Von Mises ont été examinés pour comprendre les distributions de contraintes sur les surfaces de contact.

- **Visualisation** : Utilisation de Paraview pour visualiser les distributions de contraintes et identifier les zones de forte concentration.
- **Corrélation avec le Frottement** : Analyse de la relation entre les contraintes locales et les forces de frottement mesurées.

3.7.3 Identification des Tendances et des Anomalies

Des tendances générales ont été observées en fonction des paramètres simulés, et les anomalies ont été étudiées pour comprendre les écarts entre simulations et réalité.

- **Tendances Générales** : Observation des comportements de frottement en fonction de la rugosité, des matériaux et des conditions de charge.
- **Anomalies** : Analyse des écarts significatifs et identification des causes possibles, telles que des erreurs de modélisation ou des imprécisions dans les mesures expérimentales.

3.8 Réseau de Validation

Pour renforcer la validité des résultats, un réseau de validation croisée a été mis en place, incluant différentes échelles et types de matériaux.

- **Validation Inter-Échelle** : Vérification de la cohérence des modèles à la fois à l'échelle macroscopique et microscopique.
- **Validation Multi-Matériaux** : Assurance que les modèles restent précis pour différents types de matériaux et de rugosités.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4.1 Résultats du simulateur de friction 3D

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

4.2 Analyse de données réelles

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Calcul de la normale à partir de 6 images – Application sur le banc GelSight

Dans notre système GelSight, un capteur tactile optique de haute précision, nous utilisons une méthode simple pour reconstruire la carte des normales d'une surface. Le banc GelSight capture 6 images de la même surface, chacune éclairée par une source de lumière positionnée différemment. Pour chaque pixel de l'image, la valeur d'intensité représente la quantité de lumière réfléchiée. Ces 6 intensités, notées I_1, I_2, \dots, I_6 , nous aident à déduire la direction de la normale de la surface à cet endroit.

Étape 1 : Définition des directions lumineuses

Chaque image est prise sous un angle θ_i connu. Pour simplifier, on représente la direction de la lumière sous forme d'un vecteur :

$$\mathbf{L}_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \\ 1 \end{pmatrix}$$

pour $i = 1, \dots, 6$.

Étape 2 : Modélisation du problème

La lumière réfléchiée par la surface à chaque pixel dépend du produit scalaire entre la normale de la surface

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix}$$

et la direction de la lumière \mathbf{L}_i . Ainsi, on a pour chaque image :

$$I_i = \mathbf{N} \cdot \mathbf{L}_i \quad \text{pour } i = 1, \dots, 6.$$

En regroupant ces 6 équations, on peut écrire :

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 1 \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \theta_6 & \sin \theta_6 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix}.$$

On note cela succinctement :

$$I = L N.$$

Étape 3 : Calcul de la normale

Pour déterminer la normale \mathbf{N} , on résout le système par la méthode de la pseudo-inverse. On calcule l'inverse généralisée de L :

$$L^+ = (L^\top L)^{-1} L^\top,$$

ce qui nous permet d'obtenir :

$$\mathbf{N} = L^+ I.$$

Ensuite, on normalise la normale pour obtenir un vecteur unitaire :

$$\mathbf{N}_{\text{normalisée}} = \frac{\mathbf{N}}{\|\mathbf{N}\|}.$$

Exemple de code en Python

```
import numpy as np

# Les 6 angles (en degrés) des sources de lumière
angles_deg = [330, 30, 90, 120, 180, 270]
```

```

# Conversion en radians
angles = np.radians(angles_deg)

# Construction de la matrice des directions lumineuses
L = np.array([[np.cos(a), np.sin(a), 1.0] for a in angles])

# Pour un pixel, supposons que nous avons les intensités mesurées suivantes
I = np.array([I1, I2, I3, I4, I5, I6]) # Remplacez I1, I2, ..., I6 par les valeurs

# Calcul de la pseudo-inverse de L
L_pinv = np.linalg.pinv(L)

# Calcul de la normale
N = L_pinv @ I

# Normalisation de la normale
N_normalized = N / np.linalg.norm(N)

print("La normale (unitaire) au pixel est :", N_normalized)

```

Résumé pour le banc GelSight :

1. **Acquisition des images :** Le banc GelSight prend 6 images d'une surface avec des éclairages différents.
2. **Mesure de l'intensité :** Chaque image fournit la luminosité I_i à chaque pixel.
3. **Modélisation :** On considère que I_i est proportionnel au produit scalaire entre la normale \mathbf{N} et la direction de lumière \mathbf{L}_i .
4. **Résolution :** En regroupant les 6 équations, on obtient $I = L \mathbf{N}$. On résout ce système avec la pseudo-inverse pour obtenir \mathbf{N} .
5. **Normalisation :** Enfin, on normalise \mathbf{N} pour obtenir une normale unitaire.

Cette méthode simple nous permet de reconstruire la *normal map* de la surface mesurée par le système GelSight.

4.3 Analyse de surface imprimée en 3D

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

5.1 Limitations

Malgré les succès obtenus dans cette recherche, plusieurs limitations doivent être signalées :

- **Précision des Surfaces Imprimées en 3D :** Les impressions 3D ont présenté des variations inattendues dans les surfaces générées, ce qui a rendu difficile le calcul des valeurs de frottement exactes. Ces défauts peuvent être dus à la qualité des imprimantes ou des matériaux utilisés.
- **Scans 3D :** Les scanners 3D n'ont pas toujours réussi à capturer les détails microscopiques critiques, limitant la précision des modèles de simulation.
- **Données de Référence :** Les valeurs de frottement trouvées dans la littérature et en ligne manquent souvent de précision ou de cohérence. Ces imprécisions compliquent la validation des simulations.
- **Matériaux Plus Élastiques :** Les simulations et tests réels ont principalement porté sur des matériaux rigides, laissant un manque notable dans l'étude des matériaux plus élastiques tels que le caoutchouc ou les polymères.
- **Calculs en Temps Réel :** L'absence d'une capacité de calcul en temps réel des coefficients de frottement et des paramètres liés, comme la chaleur, la propreté, l'abrasion et l'humidité, constitue une limite importante dans le cadre de cette recherche.
- **Modélisation Générale :** Le modèle utilisé est général et ne prend pas en compte les variations des coefficients de frottement selon le contexte spécifique. La tribologie est une science complexe, et les coefficients peuvent varier de manière significative en fonction des conditions environnementales et matérielles.

5.2 Future Work

Pour surmonter les limitations identifiées et approfondir la recherche, plusieurs pistes d'amélioration sont envisagées :

- **Amélioration des Surfaces 3D :** Utiliser des imprimantes 3D de qualité supérieure et des matériaux plus homogènes pour réduire les variations dans les surfaces imprimées.
- **Techniques de Scannage Avancées :** Intégrer des scanners 3D de précision plus élevée ou des méthodes de scannage alternatives pour capturer des détails microscopiques plus fiables.
- **Base de Données de Référence :** Créer une base de données consolidée avec des valeurs de frottement valides et reproductibles pour une gamme variée de matériaux.
- **Étude des Matériaux Élastiques :** Étendre la méthodologie pour inclure des tests sur des matériaux élastiques, en particulier ceux couramment utilisés dans les applications industrielles comme le caoutchouc et les polymères.
- **Calculs en Temps Réel :** Développer une capacité de simulation en temps réel pour calculer des paramètres dynamiques comme la chaleur, l'abrasion et l'humidité, qui influencent significativement le frottement.
- **Contextualisation des Modèles :** Adapter les modèles à des scénarios spécifiques pour mieux représenter les variations des coefficients de frottement en fonction des conditions environnementales et matérielles.
- **Exploration de Nouveaux Paramètres :** Intégrer des paramètres supplémentaires comme la résistance chimique et la durée de vie des matériaux sous des contraintes tribologiques.

En intégrant ces améliorations, nous pourrions non seulement réduire les erreurs existantes mais également ouvrir la voie à des applications plus variées et précises dans les domaines industriels et scientifiques.