THÈSE

Pour l'obtention du Grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS

(Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées)

(Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016 modifié)

École Doctorale n°651 :

MIMME – Mathématiques – Informatique – Matériaux – Mécanique – Énergétique

Secteur de Recherche : Génie mécanique

Présentée par :

Oumaima NAKIRI

****

Étude du régime de lubrification mixte pour des fluides compressibles

****

Directeur de thèse : Mihai ARGHIR

Co-directeur de thèse : Julian LE ROUZIC

****

Soutenue le 16 décembre 2025

devant la Commission d'Examen

JURY

Juliette CAYER-BARRIOZ	Directrice de recherche, École Centrale de Lyon, LTDS	Rapporteur
Tony DA SILVA BOTELHO	Professeur, ISAE-SUPMECA, Institut supérieur de mécanique de Paris	Rapporteur
Sébastien BERGER	Professeur, INSA Centre Val de Loire	Examinateur
Julian LE ROUZIC	Maître de Conférences, Université de Poitiers, Institut PPRIME	Co-directeur de thèse
Mihai ARGHIR	Professeur, Université de Poitiers, Institut PPRIME	Directeur de thèse

Table des matières

Introduction **1**
1. Étude bibliographique **5**
1.1 Garnitures mécaniques 5
1.2.1 Principe de fonctionnement 5
1.2.2 Matériaux pour les garnitures mécaniques 6
1.2 Lubrification des surfaces des garnitures mécaniques 9
1.2.1 État de surface 9
1.2.2 Caractérisation des surfaces rugueuses 11
1.2.3 La lubrification mixte 14
1.3 Modélisation du contact rugueux 18
2. Banc expérimental **26**
2.1 Présentation du banc expérimental 26
2.2 Étalonnage du banc Mixer 30
2.2.1 Étalonnage du système de charge axiale 30
2.2.2 Étalonnage de la distance à la surface 31
2.3 Méthodologie de calcul 33
2.4 Géométrie et matériaux des disques 37
2.4.2 Géométrie et spécifications 37
2.4.2 Matériaux et propriétés mécaniques 38
3. Préparation et Caractérisation des échantillons **42**
3.1 Préparation des surfaces 42
3.2 Mesure des surfaces 43
3.2.1 Dispositif de mesure de surface 43
3.2.2 Méthodes de mesure de la rugosité et de l'ondulation 45
3.2.2.1 Mesure de la rugosité 45
3.2.2.2 Mesure de l'ondulation 47
3.2.3 Résultats de polissage 47
3.3 Caractérisation du saphir 54
3.4 Dénomination et classement des échantillons 55
3.5 Analyse des résultats de mesure 56
3.5.1 Rugosité 56

3.5.2 Ondulation 61
4. Analyse des résultats expérimentaux 68
4.1 Procédure expérimentale 69
4.2 Résultats expérimentaux 70
4.2.1 Résultats sur les surfaces SiC 70
4.2.1.1 Évolution du débit en fonction de la force appliquée 70
4.2.1.2 Évolution de la distance Zmoyen en fonction de la force appliquée 73
4.2.1.3 Évolution de la distance Zmoyen en fonction de la rugosité 74
4.2.1.4 Évolution de la distance Zmoyen en fonction de débit 76
4.2.1.5 Adimensionnement des courbes 78
4.2.2 Résultats sur les surfaces graphite 79
4.2.2.1 Évolution du débit en fonction de la force appliquée 79
4.2.2.2 Évolution de la distance Zmoyen en fonction de la force appliquée 81
4.2.2.1 Évolution de la distance Zmoyen en fonction de débit 82
4.2.3 Discussion et comparaison des résultats SiC / graphite 84
5. Analyse multi-échelle du contact : portance et débit de fuite 87
5.1 Analyse micro-échelle 88
5.1.1 Le problème de contact 89
5.1.1.1 Le modèle de Greenwood et Williamson discret 89
5.1.1.2 Le modèle de GW amélioré 94
5.2.1 Le problème de l'écoulement 97
5.2.1.1 L'homogénéisation de l'équation de Reynolds 97
5.2.1.2 L'approche basée sur les facteurs d'écoulement 100
5.2 Analyse macro-échelle 102
5.2.1 Interpolation et filtrage des hauteurs sur la macro-échelle 103
5.2.2 Résolution du problème à macro-échelle 104
Conclusions et perspectives 110
Bibliographie 113
Liste des figures 118
Liste des tableaux 121
Annexes 122
Résumé - Abstract 153

Nomenclature

A	Surface de contact (m²)
a	Rayon de contact d'une aspérité (m)
A, B, C	Coefficients de l'équation d'une droite
a, b, c	Coefficients de l'équation du plan de l'échantillon
Aij	Facteurs d'écoulement
A_0	Surface apparente de contact (m²)
$circ$	Stries circonférentielles
dir	Stries directionnelles
E	Module d'élasticité (Pa)
E^* et Eq	Module d'élasticité équivalent (Pa)
F	Force (N)
F_N	Force axiale appliquée sur l'échantillon (N)
h	Distance entre les surfaces (m)
i, j	Indices des nœuds du maillage
Jac	Élément de la matrice jacobienne
K	Facteur de pression de contact maximum
$k_{A_1A_2}$	Valeurs de l'intégrale
L	Longueur (m)
P, p	Pression (Pa)
P_c	Pression mesurée dans la chambre de charge (Pa)
Q	Débit volumique (m^3/s)
R	Rayon (m)
Res	Élément du vecteur résidu
S	Surface annulaire de poussée m²
Sa	Moyenne arithmétique de la rugosité (m)
Sal	Longueur d'autocorrélation spatiale
Sku	Aplatissement de la distribution des hauteurs (kurtosis)
Sq	Moyenne quadratique de la rugosité (m)
Ssk	Asymétrie de la distribution des hauteurs (skewness)
Std	Angle d'orientation de la texture dominante (°)

Str	Rapport d'isotropie de la texture
U, u	Vitesse (m/s)
uz	Enfoncement local (m)
w	Hauteur filtrée des ondulations (waviness) (m)
wt	Amplitude maximale d'ondulation (m)
wc	Interférence critique (m)
x, y, z	Axes du système de coordonnées cartésiennes
Z_{max}	Distance maximale entre les surfaces (m)
Z_{min}	Distance minimale entre les surfaces (m)
Z_{moy}	Distance moyenne entre les surfaces (m)
ΔP	Pression relative d'alimentation du contact (Pa)
ζ	Facteur de grossissement
σ	Écart-type (m)
Λ	Paramètre de compressibilité
$\emptyset$	Diamètre (m)
$\varphi(z)$	Densité de probabilité des hauteurs d'aspérités
Ψ	Indice de plasticité
γ	Fonction du filtre gaussien passe bas
δ	Enfoncement de la rugosité (m)
ε	Petit paramètre d'échelle
θ, ϕ	Angle
μ	Viscosité dynamique (Pa·s)
ν	Coefficient de Poisson
λ_c	Longueur d'onde de coupure du filtre gaussien (m)
ξ, η	Distances x et y (m)

Introduction

Contexte

Les étanchéités dynamiques sont des composants destinés à limiter les fuites d'un fluide d'une zone à une autre lors d'un mouvement relatif. Ces composants évitent la contamination, économisent de l'énergie et, surtout, garantissent la sécurité de la machine. Ils sont amenés à travailler avec des fluides très variés, aussi bien liquides que gazeux, et éventuellement chargés de particules solides. Néanmoins, la réduction des fuites doit être réalisée sans induire un frottement élevé au niveau de l'interface de glissement et sans perturber la dynamique de la ligne d'arbre. Des étanchéités dynamiques conçues pour fonctionner notamment avec du gaz sont utilisées dans de nombreux dispositifs tels que les turbines, les compresseurs ou les pompes. Cependant, en raison des très mauvaises caractéristiques lubrifiantes des gaz et de la double nécessité de limiter le débit de fuite et le frottement, ces étanchéités sont amenées à travailler à des épaisseurs de films très faibles, de taille micrométrique. À une telle échelle**,** les rugosités de surface ne peuvent plus être négligées et commencent à influencer significativement la lubrification. On entre alors dans un régime mixte de lubrification, où les deux surfaces en contact ne sont pas totalement séparées par un film lubrifiant, et où la portance est assurée à la fois par les aspérités en contact et par les zones de film mince.

Dans ce régime complexe, les phénomènes de frottement, d'usure et de portance dépendent non seulement des propriétés du fluide, mais aussi de la topographie des surfaces en contact, des matériaux utilisés, des interactions entre les aspérités et de l'écoulement. Il nécessite une compréhension approfondie des mécanismes tribologiques à l'échelle microscopique, ainsi qu'une conception optimisée des surfaces et un bon choix des matériaux.

À ce jour, ce régime, pourtant essentiel, reste encore mal compris, notamment pour des fluides compressibles. En effet, les études expérimentales portant sur la lubrification mixte à gaz sont encore relativement rares, malgré la complexité des phénomènes en jeu et leur importance dans de nombreuses étanchéités à gaz utilisées en milieu industriel**.** C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail.

Objectif de la thèse

Les travaux de cette thèse sont inscrits dans le cadre du projet ANR « *MIXER* » (**MIXE**d lubrification **R**egime for compressible fluids). L'objectif principal du projet est d'étudier le régime de lubrification mixte à gaz de manière fondamentale, à la fois expérimentalement et théoriquement, afin de fournir une description approfondie et complète de l'interface. Pour cela, l'étude s'appuie sur une géométrie simple et contrôlée, choisie afin de s'affranchir de la complexité géométrique des joints industriels à gaz, dans lesquels l'analyse fine de l'interface reste souvent difficile. Cette simplification permet de mieux comprendre les phénomènes de micro-lubrification ainsi que de bien isoler les effets des différents défauts de surface sur la génération de portance et le débit d'écoulement. Les résultats obtenus permettront par la suite d'alimenter un modèle multi-échelle, capable de prendre en compte ces effets. Ce projet constitue donc un défi scientifique majeur, tout en s'inscrivant dans une volonté d'améliorer la fiabilité et la durée de vie des étanchéités dynamiques à gaz.

Structure de la thèse

Le manuscrit sera divisé en cinq chapitres. Le premier chapitre dresse le contexte général de l'étude en reliant la problématique aux étanchéités dynamiques à gaz, tout en soulignant la rareté des données expérimentales disponibles concernant la lubrification mixte. Il présente ensuite le principe de fonctionnement d'une garniture mécanique, suivi d'une revue bibliographique portant sur les matériaux utilisés en lubrification mixte, sur l'état de surface et son influence sur les mécanismes de lubrification. Ce chapitre se conclut par une discussion sur les limites des modèles hydrodynamiques développés pour l'air en régime mixte, ainsi que sur les approches stochastiques décrivant le contact entre surfaces rugueuses.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du banc expérimental développé dans le cadre du projet *MIXER*. Il décrit sa conception et son principe de fonctionnement, basés sur une géométrie simplifiée de type disque annulaire–disque plein, adaptée à l'étude du régime de lubrification mixte à gaz. Ce chapitre présente également les dispositifs de mesure, les procédures d'étalonnage, ainsi que la méthodologie expérimentale adoptée, incluant la géométrie des disques et les matériaux choisis pour les surfaces d'essai.

Le troisième chapitre porte sur la description des échantillons étudiés et des différents procédés de polissage employés pour la préparation des surfaces. Les techniques de mesure de la rugosité et de l'ondulation sont brièvement présentées, de même que les paramètres statistiques couramment utilisés pour caractériser l'état de surface. Ce chapitre se conclut par une étude métrologique détaillée, visant à comparer et à classer les surfaces des échantillons en fonction de leurs caractéristiques topographiques.

Le quatrième chapitre présente l'analyse des résultats expérimentaux obtenus sur le banc *MIXER*. Il décrit la procédure expérimentale suivie, compare les résultats obtenus pour les deux matériaux étudiés et discute l'influence des caractéristiques de surface, notamment la géométrie et la nature des matériaux, sur le comportement du contact en régime de lubrification mixte.

Le cinquième chapitre est consacré à l'analyse multi-échelle du contact entre surfaces rugueuses. Il présente une modélisation numérique reliant les phénomènes observés à la micro-échelle et à la macro-échelle, afin de mieux comprendre l'influence de la topographie des surfaces sur la portance et le débit de fuite en régime de lubrification mixte.

Enfin, le manuscrit se termine par une synthèse des conclusions principales et une présentation des perspectives ouvertes par cette étude.

CHAPITRE 1

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Étude bibliographique

1.1 Garnitures mécaniques

1.2.1 Principe de fonctionnement

Les composants les plus utilisés pour réaliser une étanchéité dynamique sont les garnitures mécaniques. Ces composants sont généralement constitués de deux éléments : une partie fixe, appelée stator, et une partie mobile, appelée rotor, positionnées face à face. Ces deux anneaux sont en contact au niveau de leurs surfaces annulaires, formant le cœur de la garniture. Ils constituent également la partie la plus sensible, connue sous le nom "étanchéité principale". La figure 1 montre une image d'une garniture mécanique réelle.

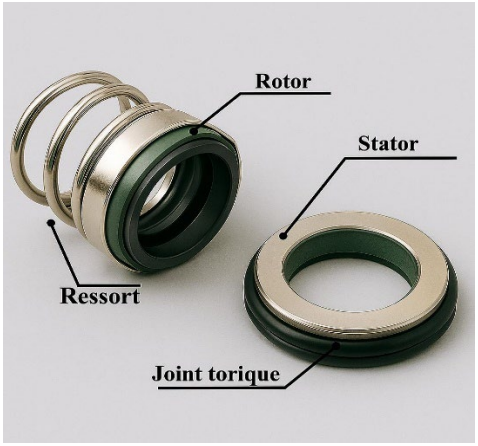


Figure 1: Image d'une garniture mécanique réelle

Les faces en contact des garnitures mécaniques assurent la séparation des deux milieux. Pour lubrifier ces faces de frottement, un fluide sous pression, qu'il soit gazeux ou liquide, s'infiltre dans l'interface de contact. Un ou plusieurs éléments de la garniture mécanique sont reliés à leur support par une liaison élastique, comme des ressorts ou des soufflets, ce qui offre plusieurs degrés de liberté pour assurer un bon alignement des deux faces. Les éléments souples, combinés à la pression du fluide à étancher, maintiennent le contact entre les deux faces de frottement. En outre, les garnitures mécaniques contiennent des joints en élastomère qui assurent l'étanchéité entre les anneaux et les supports, appelée "étanchéité secondaire" figure 2.

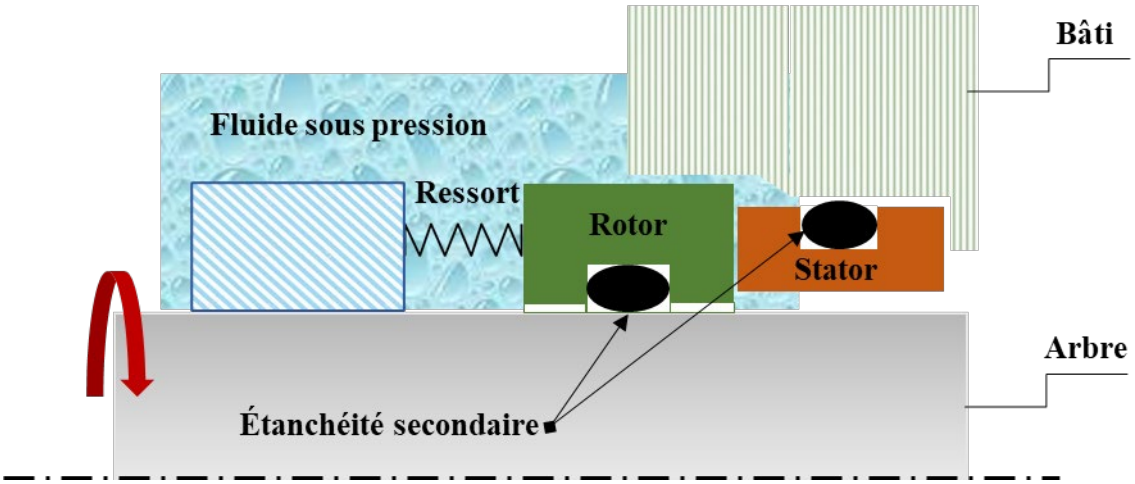


Figure 2: Représentation schématique d'une garniture mécanique

Pour garantir une étanchéité parfaite, les deux faces devraient idéalement être en contact direct, sans aucun espace entre elles. Cependant, pour des raisons pratiques et de durabilité, il est préférable qu'un film très fin, de l'ordre de quelques micromètres, sépare ces deux faces. Ce film joue un rôle essentiel en réduisant le frottement et en limitant l'usure de la garniture mécanique. L'objectif est donc de trouver un équilibre optimal entre une étanchéité efficace et une usure maîtrisée. Cela permet d'assurer non seulement le bon fonctionnement du dispositif, mais aussi sa durabilité à long terme.

1.2.2 Matériaux pour les garnitures mécaniques

L'efficacité d'un système d'étanchéité dépend en grande partie des matériaux utilisés. Du fait que les surfaces des garnitures peuvent entrer partiellement en contact, cela occasionne des frottements, induisant une usure progressive. Une mauvaise combinaison de matériaux peut alors conduire à une défaillance prématurée du joint, engendrant des coûts importants liés au remplacement des composants. Il est donc essentiel de sélectionner avec soin les matériaux et leurs propriétés, afin de garantir la fiabilité et la durabilité des joints mécaniques.

Une garniture mécanique comprend deux faces d'étanchéité positionnées l'une en face de l'autre. Elles sont le plus souvent classées en fonction de la dureté des surfaces : dure contre dure ou dure contre tendre. En revanche, une association tendre contre tendre est systématiquement évitée car elle favorise une usure rapide, un échauffement important et donc une défaillance prématurée de la garniture. La combinaison dure contre tendre est souvent choisie lorsque les conditions de fonctionnement impliquent un contact partiel entre les

surfaces, comme c'est le cas en régime de lubrification limite ou mixte. Dans ces situations, il est essentiel que les matériaux présentent de bonnes propriétés autolubrifiantes et soient capables de supporter un frottement direct sans s'endommager mutuellement. D'après les travaux de Stachowiak et Batchelor [1], dans ce type de configuration, la surface tendre joue un rôle essentiel en absorbant les irrégularités de la surface dure, ce qui réduit les concentrations de contraintes et limite ainsi les mécanismes d'usure. Cette interaction favorise également la formation de couches de transfert ou de films tribochimiques, qui stabilisent le coefficient de frottement et assurent une meilleure résistance à l'usure, même en conditions de lubrification peu favorables.

À l'inverse, lorsque l'environnement permet la formation d'un film fluide continu entre les surfaces (régime hydrodynamique), une configuration dure contre dure devient plus pertinente. Dans ce cas, les faces ne se touchent pratiquement pas, ce qui réduit les contraintes liées au frottement et diminue l'importance des propriétés tribologiques des matériaux utilisés [2].

Ce comportement a notamment été étudié par Lim, Ashby et Brunton [3], qui ont montré que, dans les contacts métal-métal (dur-dur), le coefficient de frottement est, à faible vitesse, principalement gouverné par l'état de surface et les propriétés mécaniques des matériaux. En revanche, à plus grande vitesse, ce sont les paramètres pression, vitesse et température qui deviennent prédominants.

Les propriétés tribologiques à sec des matériaux ne sont pas les seules à considérer. En effet, le choix des matériaux d'une garniture mécanique dépend également de nombreux paramètres opérationnels tels que la pression, la température, la résistance chimique et la viscosité du fluide à étancher. Le premier critère à prendre en compte lors du choix de la combinaison adéquate des matériaux est la phase du fluide (liquide ou gaz) lorsqu'il entre et sort de l'espace d'étanchéité. En effet, cette caractéristique influence directement le régime de lubrification entre les faces. Lorsque le fluide s'échappe sous forme de gaz, le contact se fait souvent en lubrification mixte, ce qui nécessite l'utilisation de matériaux présentant de bonnes propriétés tribologiques. Dans ces cas, une combinaison dure contre tendre est généralement préférée afin de réduire les risques d'usure en l'absence d'un film fluide stable [2].
À l'origine, les matériaux utilisés pour les faces de frottement étaient principalement des métaux tels que les aciers trempés, le cuivre ou le bronze [4]. Les progrès en sciences des matériaux ont depuis offert des alternatives de qualité supérieure. Aujourd'hui, les matériaux modernes souvent utilisés dans les garnitures mécaniques sont des matériaux carbonés (comme le carbone graphite) et des céramiques (comme le carbure de silicium, l'alumine et le carbure de tungstène).

Les pièces en graphite sont en effet réputées pour leur excellente résistance au frottement, grâce à la structure cristalline du graphite et à ses excellentes propriétés lubrifiantes. D'autre part, les céramiques, très résistantes, atteignent des durées de vie élevées. Le carbure de silicium (SiC) se distingue des autres céramiques par sa combinaison avantageuse de propriétés, il présente une dureté et une conductivité thermique élevés, une excellente résistance chimique à la plupart des fluides, un module d'élasticité élevé, ainsi qu'une meilleure résistance aux chocs thermiques que l'alumine. Bien qu'il soit moins tenace que le carbure de tungstène, le SiC offre un bon compromis entre ténacité, résistance et coût. Il possède également de très bonnes propriétés tribologiques, limitant l'usure, le grippage et la corrosion, ce qui le rend adapté aux applications tribologiques dans différentes atmosphères (dans l'air, l'argon ou à vide). Il présente typiquement un coefficient de frottement compris entre 0,2 et 0,7, ainsi qu'un faible taux d'usure, notamment lorsqu'il est lubrifié [5]. Ces propriétés expliquent l'utilisation répandue du SiC dans l'industrie des garnitures mécaniques à gaz en tant que matériau de face dure. Le carbure de silicium est aussi le matériau le plus couramment utilisé dans les garnitures mécaniques fonctionnant avec de l'eau, car il présente un faible frottement quand il est en contact contre le même matériau dans de l'eau. Ce faible frottement est dû à une réaction tribo-chimique, dont le produit de réaction SiO_2 (dioxyde de silicium) se dissout dans l'eau sous forme d'acide silicique, qui est reconnu pour être un bon lubrifiant [5]. En revanche, le carbure de silicium reste un matériau fragile et un bon choix du matériau de l'autre face est essentiel.

Pour l'autre face, la face tendre du joint, le carbone graphite est couramment utilisé, selon la littérature, en raison de ses excellentes propriétés tribologiques. Sa structure lamellaire permet une autolubrification naturelle, réduisant ainsi le frottement entre les surfaces. Il possède également une capacité d'autorodage et peut former un troisième corps sous forme de film solide, agissant comme un lubrifiant entre les surfaces en contact. Il est souvent imprégné de métal ou de résine afin d'améliorer ses propriétés mécaniques.

Le couple de matériaux le plus connu pour les garnitures mécaniques à gaz est le carbone (tendre)- carbure de silicium (dur), car il garantit un faible frottement et une faible usure en cas de contact. Une étude tribologique a montré que, même à sec, à 120 °C et à une vitesse de glissement de 2 m/s, un troisième corps riche en carbone circule activement dans la zone de contact entre le SiC et le graphite [6]. Ce troisième corps forme un tribofilm amorphe protecteur, qui joue un rôle essentiel pour limiter l'usure et stabiliser le frottement. Plus récemment, une étude sur l'optimisation du design des joints à gaz a montré que, en modifiant la géométrie des faces (en ajoutant des rainures) et en associant le carbure de silicium au graphite, on peut

prolonger considérablement la durée de vie du joint à gaz tout en réduisant davantage l'usure [7]. Le choix des matériaux joue donc un rôle essentiel dans le bon fonctionnement des garnitures, en influençant directement le frottement, l'usure et la durée de vie du système d'étanchéité. Une fois les matériaux sélectionnés, l'état de surface des faces en contact devient un autre paramètre clé, influençant à son tour les performances tribologiques de la garniture.

1.2 Lubrification des surfaces des garnitures mécaniques

1.2.1 État de surface

La lubrification des faces de frottement des garnitures mécaniques constitue un phénomène complexe, fortement influencé par la géométrie et l'état de surface des éléments en contact. Ces caractéristiques déterminent la formation du film lubrifiant, la répartition du champ de pression au sein de ce film, ainsi que le débit de fuite à travers l'interface [8] [9] [10] [11]. Ces effets sont particulièrement critiques dans le régime de lubrification mixte où les aspérités des deux surfaces de frottement entrent en contact et supportent ainsi partiellement la charge appliquée à l'interface. En effet, la caractérisation de la topographie des surfaces de frottement est indispensable pour étudier le régime de lubrification mixte.

Les surfaces des garnitures mécaniques subissent généralement des opérations de rectification, de rodage et de polissage après l'usinage, afin d'obtenir une planéité quasi parfaite, indispensable à une bonne étanchéité. Malgré ces procédés de finition, des défauts géométriques peuvent apparaître, notamment sous l'effet des contraintes mécaniques ou thermiques subies pendant le fonctionnement. Ces défauts peuvent être du même ordre de grandeur que l'épaisseur du film lubrifiant, et leur impact peut alors devenir significatif sur la répartition du champ de pression, la lubrification, ainsi que la stabilité du film [8]. Ils peuvent être classés, selon leur échelle, en trois grandes catégories [12]. À l'échelle macro (~ mm), on trouve les défauts de forme tels que la conicité, les mésalignements et les encoches. À l'échelle méso (~$10^2 \mu m$), apparaissent des ondulations superposées à la géométrie principale de la surface. L'échelle micro (~ µm) concerne la rugosité, présente dès la fabrication, car les surfaces ne sont jamais parfaitement lisses, même avant leur mise en fonctionnement. Enfin, il y a les défauts localisés, comme les rayures, les piqûres ou les inclusions ponctuelles [13]. Cette classification multi-échelle permet une description complète de la topographie des surfaces.

Les figures 3 et 4 montrent respectivement l'état de surface d'un anneau en carbone poli et un profil extrait selon un plan de coupe. La courbe bleue sur la figure 4 représente le profil brut de la surface, la courbe rouge son ondulation, et la courbe verte la rugosité isolée par un filtrage gaussien avec une longueur de coupure de 80 µm[1]. Cette image sert d'illustration, car il est préférable d'extraire les profils selon une direction orthogonale à la texture de surface.

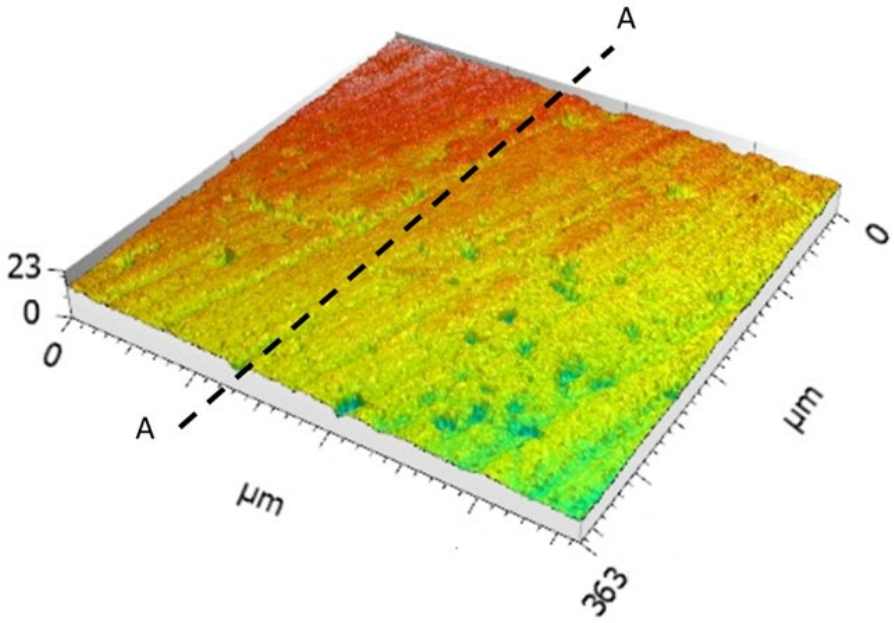
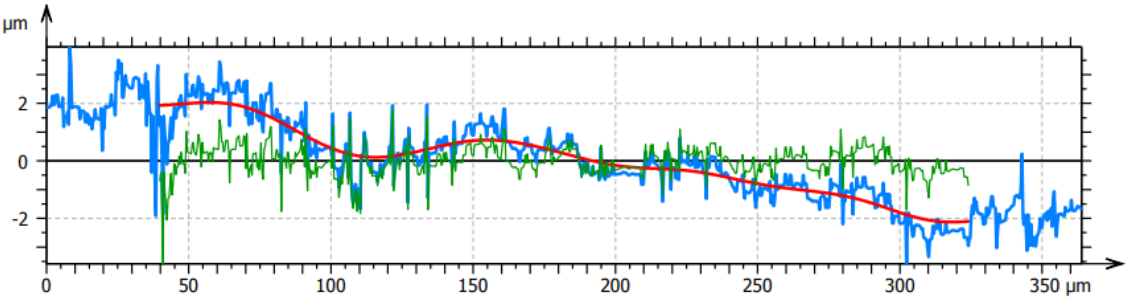


Figure 3: Etat de surface d'une face en graphite poli



Information	
Profile	Roughness profile & Waviness profile
Filter settings	Gaussian filter, cut-off 80.000 µm

Figure 4: Profil extrait du plan de coupe (A-A) de la figure 3

[1] La longueur de coupure de 80 µm a été définie selon la norme ISO 16610-21: 2012, qui encadre le filtrage gaussien des profils pour séparer l'ondulation (basses fréquences) de la rugosité (hautes fréquences). [79]

1.2.2 Caractérisation des surfaces rugueuses

Afin d'étudier le régime de lubrification mixte, il est essentiel de caractériser la micro-géométrie des surfaces en contact. Les paramètres statistiques usuels permettent de décrire quantitativement cette micro-géométrie. La hauteur d'une surface rugueuse, notée *Z*, est considérée comme une variable aléatoire bidimensionnelle dépendant des coordonnées x et y. Pour une représentation discrète sur une grille de dimensions *N x M*, on utilise la notation indicielle Zij , où i et j désignent respectivement les indices des points dans les directions x et y. La hauteur Zij est mesurée par rapport au plan moyen de la surface. On considère que cette surface est centrée, ce qui implique que la moyenne des hauteurs est nulle :

$$< Z_{ij} >= \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} Z_{ij} = 0 \qquad (1)$$

Pour caractériser la rugosité d'une surface, on utilise en premier lieu deux paramètres fondamentaux : la moyenne arithmétique Sa (2) et l'écart-type, également appelé moyenne quadratique, Sq (3). Le paramètre Sa est souvent rencontré dans le cadre des tolérances techniques, tandis que Sq , plus couramment utilisé en statistique, se distingue par son interprétation physique plus précise, permettant de mieux décrire une série de données. Les relations présentées ci-dessous constituent des formes discrètes approchées des définitions normatives continues de ces paramètres de rugosité.

$$Sa = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} |Z_{ij}| \qquad (2)$$

$$\mathrm{Sq} = \sigma = \left(\frac{1}{\mathrm{NM}} \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N}} \sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{M}} \mathrm{Z_{ij}}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (3)$$

Outre les paramètres classiques Sa et Sq , deux autres indicateurs statistiques sont couramment utilisés pour décrire la distribution des hauteurs d'une surface : l'asymétrie (ou skewness), notée Ssk (4), et l'aplatissement (ou kurtosis), noté SKu (5). Le paramètre d'asymétrie, comme son nom l'indique, quantifie l'asymétrie de la surface par rapport à sa moyenne (généralement

centrée sur zéro). Une valeur de Ssk= 0 indique une surface statistiquement symétrique, comme c'est le cas des surfaces dites « gaussiennes », dont les hauteurs suivent une loi normale. Lorsque le coefficient d'asymétrie s'écarte de zéro, nous avons soit une surface avec de hauts pics pointus et de larges creux peu profonds (Ssk positif), soit une surface dominée par des plateaux de faible hauteur interrompus par des creux profonds (Ssk négatif). Un coefficient d'asymétrie négatif est caractéristique des surfaces usées, dont un côté a été relativement lissé par frottement, ce qui justifie l'intérêt de prendre en compte ce coefficient dans l'analyse des états de surface frottés [14].

La valeur du coefficient SKu informe sur l'aplatissement de la courbe de distribution des hauteurs de surface. Une valeur de SKu inférieure à 3 indique que les motifs de rugosité (vallées et pics) sont larges et leurs extrémités peu éloignées du plan moyen. A l'inverse, si une valeur de SKu est supérieure à 3 alors les pics sont pointus, les vallées sont étroites et leurs extrémités sont plus éloignées du plan moyen. Une distribution Gaussienne présente une valeur de SKu égale à 3.

$$Ssk = \frac{1}{NM\ Sq^3} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} {Z_{ij}}^3 \tag{4}$$

$$SKu = \frac{1}{NM\ Sq^4} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} {Z_{ij}}^4 \tag{5}$$

Pour caractériser une surface de manière complète, il est nécessaire de connaître à la fois la distribution des hauteurs et leur agencement spatial. L'analyse des propriétés spectrales d'une surface rugueuse est un bon complément des paramètres statistiques précédemment définis. Une donnée très intéressante, lorsqu'il s'agit d'analyser non pas un seul contact ponctuel, mais la rugosité d'ensemble d'une surface, est apportée par la fonction d'autocorrélation (FAC) de celle-ci. La FAC caractérise le degré de ressemblance entre une surface et elle-même lorsqu'elle est translatée dans une direction. Elle permet donc d'évaluer les dépendances internes comme les motifs de rugosité ou leur périodicité. Son calcul pour une surface bidimensionnelle est donné par la formule suivante. Avec Δx et Δy : le pas du maillage suivant les deux directions.

$$R(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{l_x l_y} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} Z(x,y)\, Z(x+\Delta x, y+\Delta y) dx dy \tag{6}$$

La longueur d'autocorrélation, notée Sal dans une direction donnée est la distance calculée entre une abscisse où la fonction a diminué d'une certaine quantité et l'abscisse du maximum de la fonction d'autocorrélation. En général ce paramètre est mesuré à une décroissance du pic de 80% [15]. Si la surface présente des motifs de rugosité de grande étendue spatiale alors la longueur d'autocorrélation sera élevée. A l'inverse, elle sera proche de 0 pour des surfaces avec des motifs de rugosité de courte étendue spatiale.

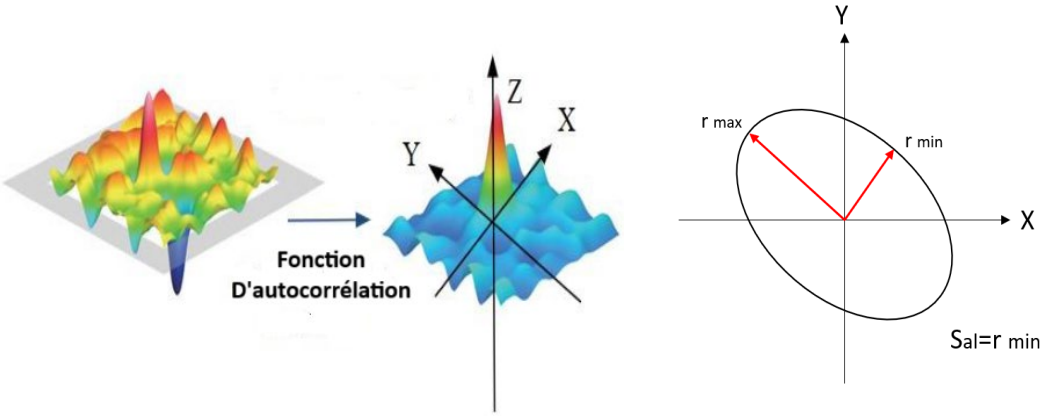


Figure 5: Surface rugueuse, FAC, et longueurs d'autocorrélation

Le Str (le rapport d'aspect de la texture) est un autre paramètre spatial définissant l'isotropie de la surface. Il est calculé à partir des longueurs d'autocorrélations minimale et maximale (Fig. 5), respectivement notées r min et r max.

$$Str = \frac{r\ min}{r\ max} \tag{7}$$

Si la surface a un caractère isotrope, alors les longueurs d'autocorrélation minimale et maximale sont équivalentes et leur rapport, le paramètre d'isotropie vaut 1. En revanche, si la surface est anisotrope, ce paramètre va décroitre avec pour minimum 0 (surface totalement anisotrope) et renseigne alors sur une direction privilégiée de la surface (Str > 0,5 indique une forte isotropie tandis que Str < 0,3 est fortement anisotrope) [16].

Un autre paramètre spatial important est le Std qui représente l'angle d'orientation de la texture dominante de la surface. Il renseigne sur la direction principale des structures, telles que des rainures parallèles ou des striations orientées, souvent associées à des procédés de fabrication ou d'usure directionnels.

1.2.3 La lubrification mixte

Situé entre les régimes de lubrification limite et hydrodynamique, le régime de lubrification mixte correspond à la zone intermédiaire de la courbe de Stribeck (Fig. 6), où le coefficient de frottement diminue rapidement. Dans cette phase, le film fluide commence à se former, mais son épaisseur reste insuffisante pour séparer complètement les surfaces en contact. Des zones de lubrification hydrodynamique apparaissent, mais elles ne génèrent pas une pression suffisante pour créer un film dont l'épaisseur dépasse la hauteur des rugosités. En conséquence, les surfaces restent en contact sur une partie des aspérités qui supportent ainsi une partie de la charge appliquée sur l'interface.

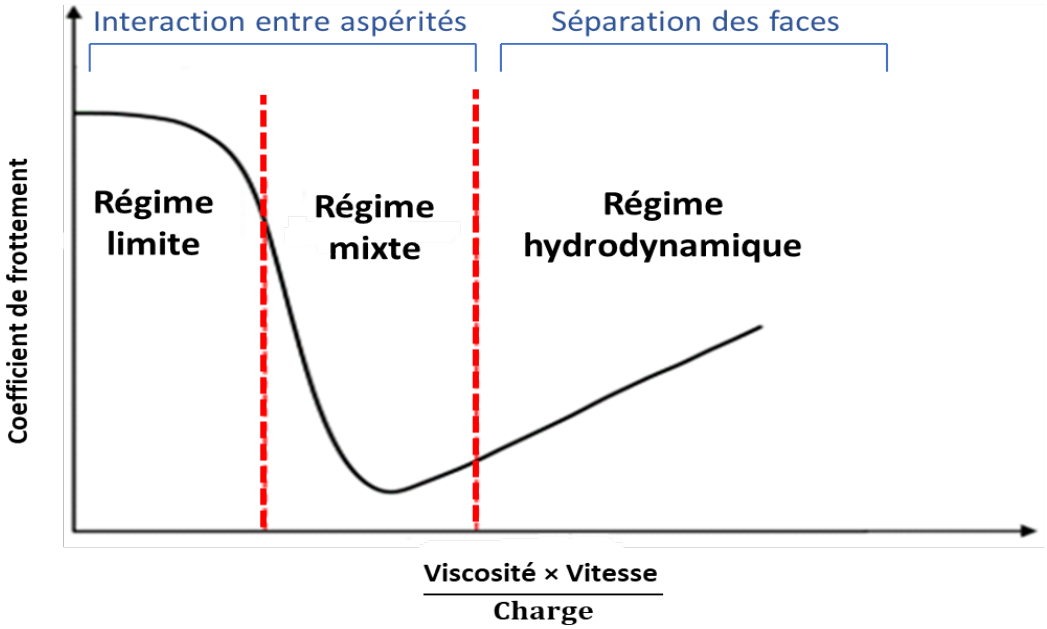


Figure 6: Exemple de courbe de Stribeck

Le concept de lubrification mixte a été évoqué pour la première fois en 1886 par O. Reynolds [17], à travers ses travaux fondateurs sur la théorie de la lubrification. Dans ses expériences sur les films d'huile dans les paliers, il a constaté que, dans certaines conditions de charge et de vitesse, le film lubrifiant ne permettait pas une séparation totale des surfaces. Il parle alors de « lubrification partielle », suggérant déjà l'existence d'un régime intermédiaire entre lubrification hydrodynamique et contact sec. Cependant, à l'époque, les outils expérimentaux ne permettaient pas d'observer ni de quantifier précisément ces phénomènes. Ce n'est que dans les années 60 que les chercheurs ont commencé à développer des méthodes de mesure permettant de caractériser expérimentalement ce régime. La première méthode expérimentale développée fut

la mesure de la résistance électrique de contact**.** En distinguant les zones isolées par le lubrifiant de celles en contact direct, Tallian et al. [18] ont pu quantifier le contact métal-métal dans des contacts roulants rugueux. Cette méthode s'est avérée pratique pour identifier l'apparition du régime mixte. Par la suite, Houpert et Leenders [19] ont approfondi l'analyse du régime mixte en s'appuyant sur l'évolution du coefficient de frottement dans des roulements à billes. En enregistrant les courbes de Stribeck**,** représentant le frottement en fonction du rapport vitesse/charge, ils ont mis en évidence la transition progressive au régime mixte. En 1979, Wedeven et Cusano [20] ont marqué une avancée majeure dans l'étude du régime de lubrification mixte en utilisant l'interférométrie pour visualiser directement le film lubrifiant. En exploitant la réflexion de la lumière à travers une fine couche d'huile, ils ont mesuré l'épaisseur locale du film dans des contacts EHD présentant des défauts de surface. Cette approche a permis de révéler les zones de rupture du film, confirmant le régime mixte par la coexistence de zones lubrifiées et de contacts solides. D'autres travaux qui arrivent après ont exploité les avancées de l'interférométrie pour mesurer l'épaisseur du film dans des contacts de type pion-disque, lubrifiés à l'huile. Ils ont montré que l'utilisation de billes texturées permettait de favoriser la rétention du lubrifiant et de retarder le contact direct, contribuant ainsi à améliorer la stabilité du film [21] [22] [23] [24].

Au-delà des études expérimentales, de nombreux travaux numériques ont été menés pour modéliser le régime de lubrification mixte. Cette modélisation nécessite d'estimer à la fois la manière dont les aspérités de contact se partagent la charge entre les deux surfaces et comment le fluide s'écoule entre les aspérités. Ces études abordent la modélisation par deux approches : l'approche stochastique et l'approche déterministe.

L'approche stochastique consiste à représenter les surfaces rugueuses par des paramètres statistiques moyens et à introduire des facteurs de correction dans l'équation de Reynolds. Cette méthode a été utilisée pour la première fois par Patir et Cheng [25], avec l'introduction du modèle de débit moyen (average flow model). Ce dernier permet de corriger l'équation classique de Reynolds en y intégrant des facteurs de débit (flow factors), qui tiennent compte statistiquement de l'effet de la topographie sur l'écoulement. Leur modèle constitue encore aujourd'hui une référence pour l'étude des régimes transitoires. Par la suite, cette approche a connu de nombreuses améliorations. Zhu et Hu [26] ont proposé une modélisation complète du régime mixte dans les contacts ponctuels, en combinant les modèles statistiques de contact avec l'équation de Reynolds modifiée. Leur travail a permis de prendre en compte non seulement l'écoulement fluide dans les microcavités, mais aussi la répartition de la charge entre les zones

de contact solide et celles lubrifiées. D'autres études ont ensuite affiné les facteurs de débit en tenant compte de surfaces réelles. Sahlin et al. [27] ont ainsi introduit une méthode numérique permettant de calculer ces facteurs à partir de topographies mesurées. Dans le prolongement de cette approche, Morales-Espejel et al. [28] ont proposé un modèle stochastique avancé intégrant d'autres phénomènes tribologiques complexes tels que la fatigue, l'usure, l'élasticité locale des aspérités et la dynamique de lubrification, renforçant ainsi la précision des prédictions en conditions réalistes.

L'approche déterministe repose sur une reconstruction précise de la topographie réelle des surfaces, couplée à une résolution locale de l'équation de Reynolds. Evans et Snidle [29] comptent parmi les premiers à avoir adopté ce type d'approche, en analysant les effets micro-élastohydrodynamiques (micro-EHD) dans des contacts réels. Leur étude a mis en évidence que, même à l'échelle des aspérités, l'interaction entre la déformation élastique locale et la pression du film lubrifiant avait une influence sur la portance et le frottement. Jiang et al. [30] ont développé par la suite un modèle mixte combinant un calcul EHD classique avec une prise en compte des contacts solides entre aspérités, ce qui leur a permis de prédire plus précisément les transitions entre les régimes lubrifiés, partiellement lubrifiés et secs. Le régime mixte a également été étudié pour les applications d'étanchéité. Jacod et al. [31] ont appliqué l'approche déterministe à des joints mécaniques. Leur modèle intègre la géométrie réelle des surfaces et résout l'équation de Reynolds couplée à un contact élastique linéaire. Brunetière et al. [32] [33] ont prolongé l'approche déterministe en développant des modèles appliqués à des systèmes industriels, tels que les garnitures mécaniques et les paliers hydrodynamiques, en intégrant la topographie réelle, les effets thermiques, et les conditions transitoires. Leur approche permet une analyse détaillée des pressions locales, de l'épaisseur du film et des zones de contact. Dans le même esprit, Minet et al. [34] ont proposé un modèle finement maillé pour suivre l'évolution du film lubrifiant dans les garnitures et détecter les zones de régime mixte. Enfin, l'ouvrage de Bonneau et al. [35] propose une synthèse complète des approches déterministes appliquées aux paliers hydrodynamiques, alliant théorie, simulation et validation expérimentale. Plusieurs travaux ont comparé les deux approches stochastique et déterministe afin d'évaluer leur pertinence. Parmi eux, Dobrica et al. [36] ont étudié un palier lisse partiellement lubrifié en régime mixte, en confrontant les deux modèles sur la prédiction de la portance, la distribution de pression et le coût de calcul. Leur étude montre que l'approche déterministe offre une description locale plus précise, notamment des zones de contact, mais au prix d'un temps de calcul élevé. À l'inverse, l'approche stochastique fournit des résultats globaux fiables avec une

complexité réduite, ce qui la rend adaptée aux études paramétriques ou l'optimisation de conception.

Malgré les avancées dans l'étude du régime de lubrification mixte, toutes les études citées portent sur des fluides incompressibles. À ce jour, les travaux consacrés à la lubrification mixte en présence de fluides compressibles restent limités, ce qui en fait un domaine encore largement ouvert à la recherche. L'étude de la lubrification mixte avec des gaz constitue un défi scientifique majeur, en particulier dans le domaine des turbomachines, où de nombreux joints gazeux sont amenés à fonctionner en régime mixte.

Des modèles hydrodynamiques ont été développés pour ces applications. Dans ces travaux sur les joints radiaux segmentés à portance (JRSP), Dahite [37] développe un modèle hydrodynamique avancé basé sur l'équation de Reynolds compressible. Le modèle a permis de mieux comprendre l'effet des rainures sur la portance dans les joints radiaux segmentés. Toutefois, ces modèles ont rapidement montré leurs limites en régime mixte, en particulier lors du raffinement du maillage, où le comportement non linéaire du gaz engendre des divergences, notamment dans les zones de discontinuités du film fluide. De même, Mariot [38] a étudié les joints segmentés et à bague flottante avec des modèles dynamiques, mais ceux-ci restent limités par les hypothèses de film mince continu et écoulement stationnaire, inadaptées au régime mixte.

Dans notre étude, l'ensemble des essais expérimentaux a été réalisé sans mouvement relatif entre les surfaces, et donc en l'absence de frottement, afin de se concentrer sur le comportement statique du contact. Cette approche permet d'isoler les phénomènes liés à la portance et à la distribution de pression dans le film fluide, indépendamment des effets dynamiques associés au glissement. Le comportement de ce film fluide dépend cependant fortement des propriétés du lubrifiant utilisé. Dans le cas d'un lubrifiant gazeux tel que l'air, le fluide présente un comportement compressible, ce qui implique que ses propriétés physiques varient avec la pression. En particulier, la masse volumique de l'air dépend directement de la pression, tandis que la viscosité dynamique peut également varier en fonction de la pression et de la température. Ces variations doivent être prises en compte dans la modélisation du film lubrifiant. L'équation de Reynolds, utilisée pour décrire l'écoulement du fluide compressible dans le film lubrifiant, sera présentée et détaillée dans le chapitre 5.

1.3 Modélisation du contact rugueux

Dans le régime de lubrification mixte, le contact rugueux joue un rôle majeur dans le comportement de l'interface. La modélisation du contact entre deux surfaces rugueuses est alors indispensable pour comprendre ce régime, dans lequel les charges générées ne sont pas uniquement d'origine hydrodynamique, mais proviennent également des contacts entre aspérités. Modéliser un contact signifie développer un modèle qui se rapproche de la réalité et qui décrit au mieux la topographie des deux surfaces opposées. De nombreux chercheurs ont tenté de modéliser le contact entre aspérités avec des méthodes que l'on peut classer aussi selon deux types d'approche : stochastique et déterministe.

Les approches déterministes visent une modélisation précise et localisée de la géométrie réelle des surfaces et des conditions de contact, au prix d'un temps de calcul élevé.

À l'inverse, les approches stochastiques proposent une représentation statistique du contact, plus rapide à mettre en œuvre et bien adaptée à l'analyse globale des surfaces rugueuses. Dans ce qui suit, nous nous intéressons à quelques méthodes stochastiques classiques utilisées pour modéliser le contact entre aspérités.

Le contact entre deux surfaces rugueuses est généralement modélisé par la surface somme, qui consiste à regrouper les paramètres de deux surfaces rugueuses en une seule, de manière à ramener le problème à celui du contact entre une surface rugueuse équivalente ayant toute la rugosité du contact et une surface parfaitement lisse [39] (Fig.7).

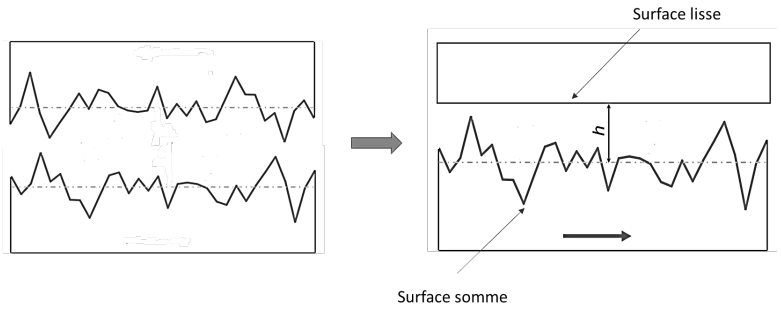


Figure 7: Modélisation de la surface somme

Les paramètres de la surface somme sont calculés à partir de ceux des deux surfaces initiales. La dureté et la limite d'élasticité de la surface somme correspondent à celles du matériau le plus tendre.

Le module d'élasticité équivalent est défini par :

$$\frac{1}{E_q} = \frac{1 - {\nu_1}^2}{E_1} + \frac{1 - {\nu_2}^2}{E_2} \tag{8}$$

où :

- E_1 et E_2 sont les modules d'élasticité des deux surfaces
- ν_1 et ν_2 sont leurs coefficients de Poisson

Cependant, le modèle de surface somme présente certaines limites, car il repose sur l'hypothèse que les aspérités n'interagissent pas entre elles. Il fonctionne correctement dans le cas d'un chargement normal, mais devient plus limité en présence d'un mouvement tangentiel, car les aspérités n'agissent plus de manière indépendante et les efforts de cisaillement modifient leur déformation.

Le modèle stochastique le plus utilisé pour l'étude des garnitures est celui proposé par Greenwood et Williamson en 1966 [40]. Il repose sur les hypothèses suivantes : le contact se fait entre une surface lisse et une surface rugueuse, les sommets des aspérités sont sphériques, ont le même rayon de courbure et ils sont répartis de manière aléatoire de part et d'autre d'un plan moyen , suivant une distribution normale. De plus, les aspérités se déforment élastiquement sous l'effet de la charge appliquée et indépendamment les unes des autres.

Ce modèle classique est basé sur la solution de Hertz. Pour une seule aspérité sphérique et élastique, l'aire de contact *A* et la charge *P* sont déterminées en fonction de la séparation des surfaces moyennes (Fig.8) :

$$A = \pi R\omega = \pi R(z - d) \tag{9}$$

$$P = \frac{4}{3} E_q R^{1/2} (z - d)^{3/2} \tag{10}$$

La hauteur des aspérités est supposée aléatoire et suit une distribution définie par une certaine densité de probabilité *φ(z).* Ainsi, lorsque l'on rapproche les deux plans de référence des deux surfaces à une distance *d*, la probabilité d'avoir une aspérité d'altitude initiale supérieure à d et qui vient en contact est donnée par :

$$\mathcal{P}(z > d) = \int_d^{+\infty} \varphi(z) dz \tag{11}$$

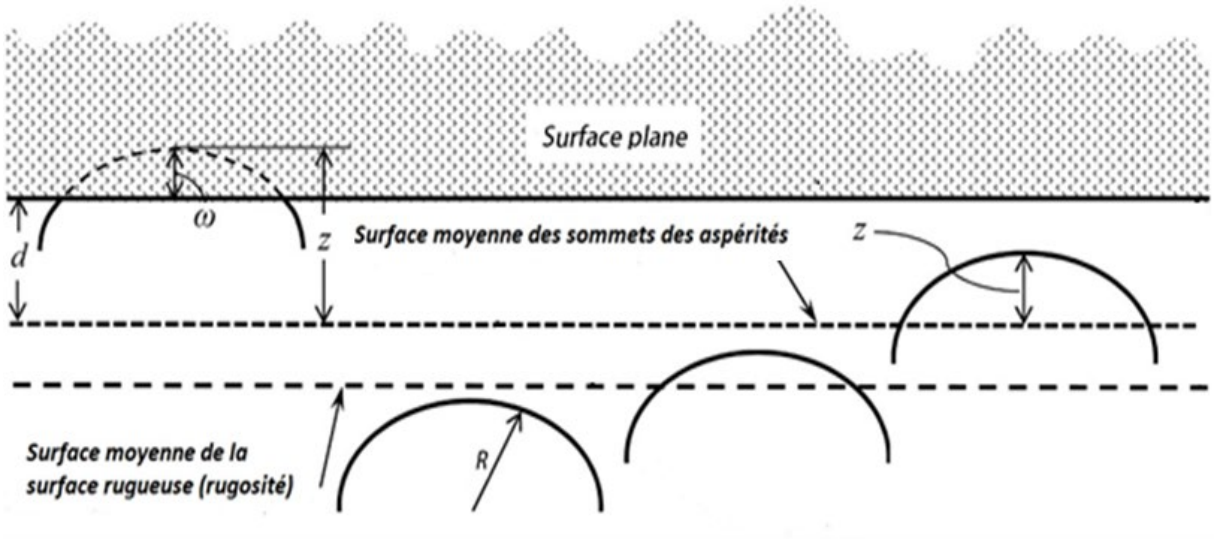


Figure 8: Modèle de contact des aspérités GW

Pour une surface rugueuse à N aspérités, le nombre des aspérités qui rentrent en contact est donné par :

$$n = N\,F_0(d) = N\int_d^{+\infty} \varphi(z)dz \tag{12}$$

Pour un contact rugueux ayant une densité η de rugosités par unité de surface : $N = \eta\, A_0$

avec A_0 la surface apparente de contact.

L'aire réelle totale de contact A et la charge totale de contact P pour une surface rugueuse sont :

$$A = \pi\eta\, A_0 R\sigma F_1(d) = \pi\eta\, A_0 R\sigma\int_d^{+\infty} (z-d)\varphi(z)dz \tag{13}$$

$$P = \frac{4}{3}\eta A_0\, E_q R^{\,1/2}\sigma^{\frac{3}{2}}F_{\frac{3}{2}}(d) = \frac{4}{3}\eta A_0\, E_q R^{\,1/2}\sigma^{\frac{3}{2}}\int_d^{+\infty} (z-d)^{\,3/2}\,\varphi(z)dz \tag{14}$$

Dans les trois relations précédentes la fonction $F_n(u)$ est définie par :

$$F_n(d) = \int_d^{\infty} (z-d)^n\,\varphi(z)dz \tag{15}$$

Toutefois, le comportement plastique des matériaux a été négligé dans le calcul. Greenwood et Williamson ont seulement identifié l'apparition de déformation plastique, en introduisant un nouveau paramètre, l'indice de plasticité du contact, qui permet d'évaluer l'étendue relative de la zone plastifiée. Cet indice combine les propriétés du matériau et de la topographie des solides en contact.

$$\psi = \frac{E_q}{\mathcal{H}} \sqrt{\frac{\sigma}{R}} \tag{16}$$

$\mathcal{H}$, E_q, R et σ sont respectivement la dureté, le module de Young équivalent, le rayon d'aspérité et l'écart-type des hauteurs des sommets. Lorsque $\psi < 0{,}6$, le contact est considéré comme élastique. Au contraire, si $\psi > 1$, le contact est considéré comme purement plastique.
Ce modèle a par la suite été modifié par Greenwood et Tripp pour prendre en compte les surfaces courbes [41] en 1967. Les auteurs ont développé un modèle de contact élastique avec les mêmes hypothèses que le premier modèle, excepté qu'ils considèrent un contact rugueux entre une sphère et un plan (Fig.9). Dans ce cas, les contacts entre les rugosités sont suffisamment proches pour que la pression d'un point modifie la déformée de ses voisins.



Figure 9: Contact entre une sphère et un plan rugueux [41]

Le modèle de Greenwood a été amélioré par la suite en introduisant le mésalignement des aspérités. Il a ensuite été modifié à plusieurs reprises afin de prendre en compte différentes formes d'aspérités, telles que des formes coniques [42], elliptiques paraboliques [43], ainsi que des aspérités à courbure variable [42], permettant ainsi une modélisation plus réaliste du contact entre surfaces rugueuses.

Tous les modèles précédents supposent un contact purement élastique entre les rugosités, ce qui limite leur validité lorsque la pression de contact dépasse la limite élastique des matériaux. Pour dépasser cette limitation, Chang, Etsion et Bogy ont proposé en 1987 un modèle de contact élastoplastique, connu sous le nom de modèle CEB [44]. Ce modèle s'appuie à la fois sur les résultats du modèle élastique de Greenwood-Williamson et sur le modèle plastique développé

par Pullen et Williamson en 1972 [45]. Il conserve plusieurs hypothèses simplificatrices : surfaces isotropes, aspérités sphériques et indépendantes, rayon de courbure constant. Afin de prendre en compte le comportement plastique, les auteurs introduisent la conservation du volume lors de la déformation pour calculer l'aire réelle de contact. Par rapport au modèle de Greenwood-Williamson, la pression maximale de contact sur une aspérité est définie comme une fonction qui dépend également de la dureté du matériau le plus mou et qui caractérise le début de la déformation plastique.

$$P_m = \frac{2E_q}{\pi}\left(\frac{w}{R}\right)^{1/2} = K\mathcal{H} \tag{17}$$

Où K le facteur de pression de contact maximum, reliant la pression moyenne de contact P_m à la dureté du matériau $\mathcal{H}$ et w l'interférence réel.

Selon Chang, Etsion et Bogy [44], la valeur de ce facteur varie généralement entre 0,6 et 3, en fonction des caractéristiques des matériaux et du régime de déformation (élastique, élasto-plastique ou plastique).

L'interférence critique à partir de laquelle apparaît la déformation plastique est définie par :

$$wc = \left(\frac{\pi KH}{2E_q}\right)^2 \beta \tag{18}$$

Quand *w* est inférieur à *wc*, le contact est élastique. En revanche, lorsque *w* atteint ou dépasse *wc*, le contact devient partiellement plastique, et la charge et la surface de contact sont calculées à partir d'un modèle basé sur la conservation du volume d'une région plastiquement déformée de l'aspérité. Les auteurs ont supposé que la déformation de l'aspérité soit principalement localisée à proximité du contact. Arrivé à une certaine profondeur ℓ sous le contact, l'aspérité cesse de se déformer. La modélisation de l'aspérité déformée est représentée par un segment sphérique tronqué de hauteur ℓ (Fig.10).

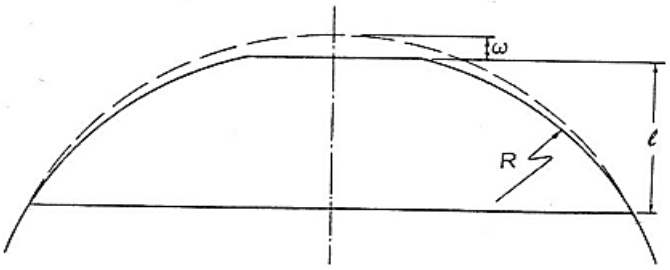


Figure 10: Déformation plastique d'une aspérité [44]

Des comparaisons ont montré que le modèle CEB est proche de celui de Greenwood-Williamson à faible charge, et du modèle plastique de Pullen à forte charge. Toutefois, il présente une discontinuité lors de la transition entre les régimes élastique et élastoplastique, car il ne modélise pas la phase de transition entre ces deux comportements.

D'autres modèles de microcontact élastoplastique ont été proposés dans la littérature. En 2000, Zhao, Maletta et Chang ont présenté le modèle ZMC [46], basé sur les hypothèses de Greenwood-Williamson et CEB, mais introduisant une transition continue entre les régimes élastique, élastoplastique et plastique, absente dans le modèle CEB. En 2001, Robbe-Valloire [47] a développé un modèle élastoplastique plus complet, fondé sur une description microgéométrique, où une surface est purement élastique et l'autre suit un comportement élastoplastique. Il propose une relation logarithmique entre pression et aire de contact dans la zone élastoplastique, plus adaptée que les relations précédentes, tout en conservant le volume des aspérités et en tenant compte de la distribution des hauteurs et des rayons de courbure des aspérités.

Toutefois, dans plusieurs modèles de contact, la rugosité est souvent simplifiée par des aspérités sphériques de rayon constant, ce qui ne reflète pas la complexité multi-échelle des surfaces réelles ni les interactions à longue distance entre aspérités. Pour surmonter ces limites, Persson [48] a proposé un modèle intégrant la nature multi-échelle des surfaces rugueuses et les effets d'interaction à différentes échelles. Sa théorie repose sur un facteur de grossissement ζ, représentant l'échelle d'observation. À faible grossissement (ζ=1), le contact semble complet, mais à mesure que ζ augmente (l'échelle de l'observation devient plus fine), la rugosité devient apparente et le contact apparaît partiel, révélant progressivement les détails fins de la surface.

Les modèles précédents supposent que les aspérités agissent de manière indépendante, négligeant les interactions entre elles, ce qui conduit à une surestimation de la pression de contact. Le modèle de Greenwood-Williamson a par la suite été modifié pour intégrer ces interactions. Ciavarella et al. [49] ont proposé une approche globale pour prendre en compte l'interaction entre les aspérités. Ils introduisent un déplacement vertical des aspérités en fonction de la charge appliquée, en supposant une pression de contact uniformément répartie sur la zone de contact apparente et une déformation uniforme. Dans la continuité de ces travaux, Afferante et al. [50] ont développé un modèle multi-aspérité qui prend en compte la coalescence entre deux aspérités en contact voisines. Ils ont proposé un algorithme de moindres carrés

permettant d'évaluer les rayons de contact équivalents des aspérités en interaction et de calculer la surface réelle de contact. Cette approche offre une description plus réaliste du comportement des surfaces rugueuses sous charges, en tenant compte à la fois de la transition élasto-plastique et des interactions géométriques entre aspérités.

Ce chapitre a été consacré à l'étude bibliographique. Il a commencé par la présentation du contexte général des travaux, en décrivant le principe de fonctionnement d'une garniture mécanique, les matériaux utilisés, ainsi que les mécanismes de lubrification mis en jeu. Une attention particulière a été portée à la caractérisation des surfaces rugueuses et au rôle de la topographie des surfaces dans le régime de lubrification mixte, où le contact s'établit simultanément à travers le film fluide et les aspérités solides. La dernière partie du chapitre a été consacrée à la modélisation du contact rugueux, retraçant l'évolution des principaux modèles, depuis les approches élastiques de type Greenwood–Williamson jusqu'aux modèles plus récents intégrant la plasticité, la coalescence et les interactions entre aspérités, formant ainsi la base des travaux développés dans le chapitre 5.

CHAPITRE 2

BANC EXPÉRIMENTAL

2. Banc expérimental

2.1 Présentation du banc expérimental

Un des objectifs principaux du projet « MIXER » est le développement d'un tribomètre original dédié à l'étude du régime de lubrification mixte pour les fluides compressibles. Ce tribomètre a été spécialement conçu afin de confronter la complexité des géométries rencontrées dans les étanchéités dynamiques industrielles à une géométrie modèle, plus simple et mieux contrôlable. Une géométrie permet d'instituer un régime de lubrification mixte à gaz, en injectant de l'air au centre d'un disque annulaire stationnaire en contact coaxial et parallèle avec un disque plein rotatif (Fig.11). Ce dernier étant en saphir, il laisse la possibilité de développer ultérieurement des techniques optiques pour observer la zone de contact. Toute la rugosité a été reportée sur l'échantillon annulaire stationnaire, ce qui permettra de surveiller en continu la même zone de contact rugueuse à travers le disque transparent en rotation.

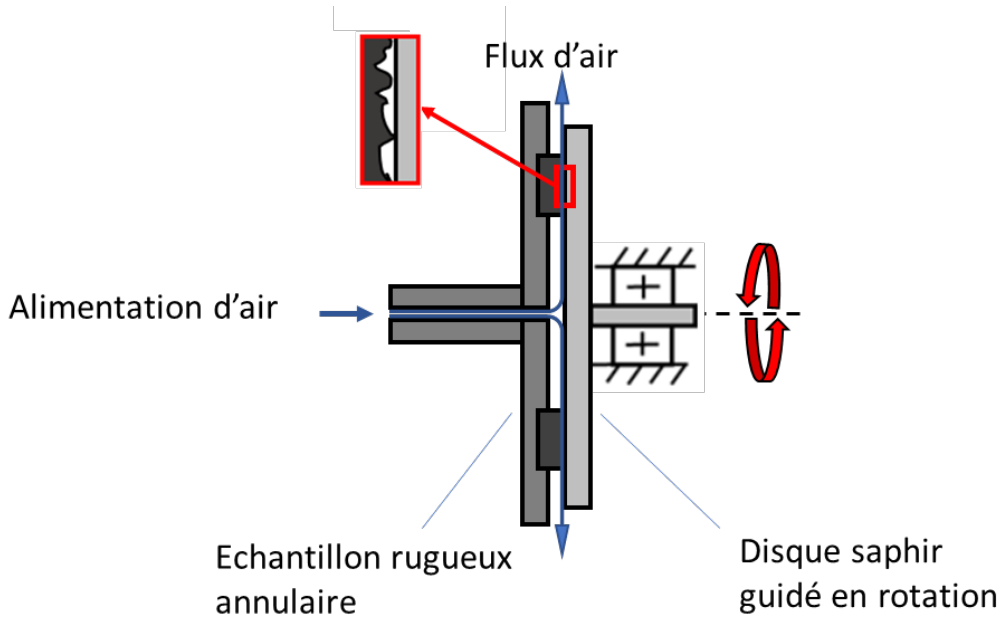


Figure 11: Géométrie du tribomètre MIXER

La figure 12 présente le schéma du tribomètre MIXER. L'air sous pression viendra du centre de l'arbre fixé au disque annulaire et s'écoulera radialement à l'interface. L'arbre est conçu pour rester complètement flottant, soutenu par des paliers aérostatiques poreux alimentés en air comprimé. Ces paliers ont l'avantage de fonctionner avec un film très fin d'une épaisseur de 5µm, ce qui permet un déplacement axial et angulaire tout en maintenant un faible jeu radial.

Le disque annulaire reste fixe pendant l'essai, tandis que le disque en saphir constitue la partie en rotation. Ce dernier est guidé par des roulements à billes à contact oblique et entraîné par un système de poulie-courroie.

L'air pressurisé est introduit dans l'installation par deux circuits séparés, l'un alimentant l'interface de contact tandis que l'autre alimente les paliers aérostatiques.

La charge est appliquée de manière pneumatique par l'air pressurisé entre les deux paliers. Étant donné que les paliers présentent des diamètres différents (13 mm et 40 mm), une partie de l'air s'écoule de chaque côté du palier, créant ainsi une chambre de pression statique entre les deux paliers (colorée en bleu sur le schéma Fig.12).

Pour réguler cette pression, un canal d'évacuation vers l'extérieur a été conçu, commandé par une électrovanne de précision pilotée en pression. En ajustant la vanne, nous modifions la pression dans la chambre notée P_c, ce qui permet d'appliquer la charge axiale sur une surface annulaire du rotor. La distance entre les deux surfaces est finement contrôlée par la pression d'entrée d'air d'alimentation de l'interface et la charge appliquée.

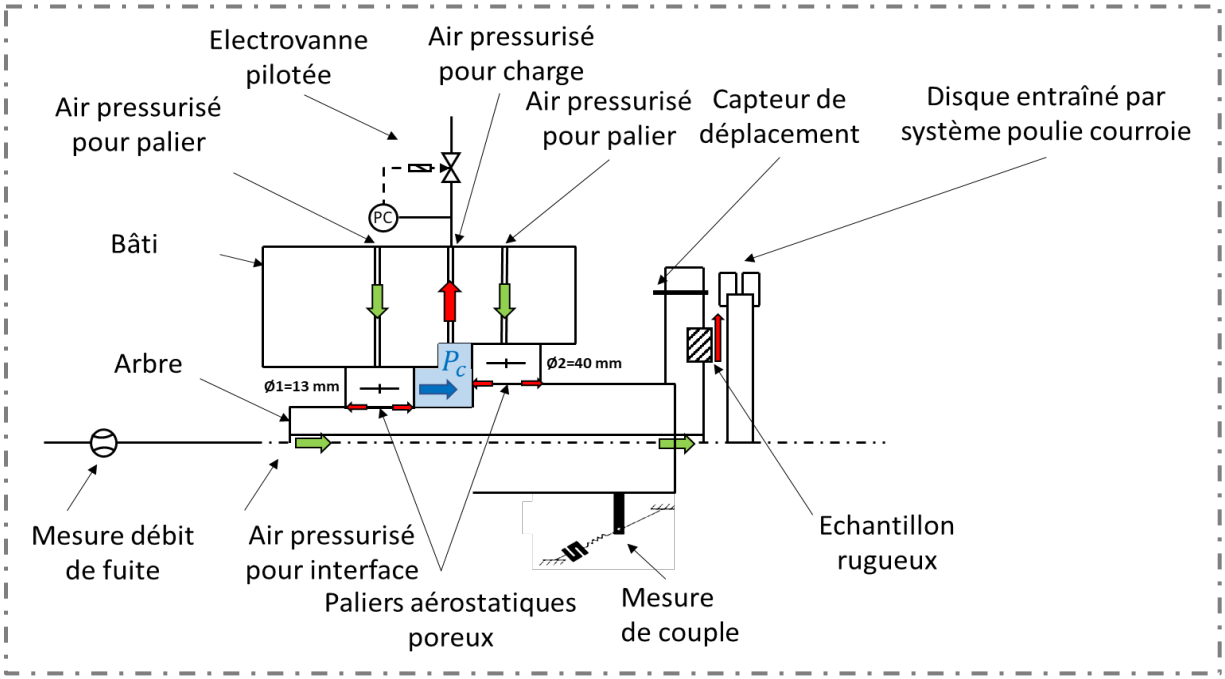


Figure 12: Schéma du tribomètre MIXER (les flèches indiquent la direction de l'écoulement d'air : flèche verte = air entrant ; flèche rouge = air sortant)

Le banc d'essai est instrumenté avec :

- Trois débitmètres, montés en parallèle en amont de la conduite d'alimentation en air de l'interface, permettent de mesurer les débits de fuite d'air sur l'ensemble de la plage des valeurs attendues (6×10^{-4} - 3×10^{-7} kg/s) ;
- Trois capteurs de déplacement inductifs pour mesurer la distance entre les deux disques,
- Un capteur de force pour la mesure du couple sur l'arbre ;
- Un capteur de pression pour mesurer la pression d'air d'alimentation à l'entrée du contact ;
- Une électrovanne équipée d'un régulateur de pression pour mesurer et ajuster la pression d'air dans la chambre de charge.

Équipement	Type de mesure	Plage de mesure	Précision
Débitmètres	Débit de fuite	2×10^{-3} à 4×10^{-8} kg/s	±(0,5% mesure + 0,1% pleine échelle)
Capteurs inductifs	Déplacement	0-500 µm	± 0,1 µm
Capteur de force	Force	0-10 N	± 0,01 N
Capteur de pression	Pression	0-4 bar	± 0,02 bar
Régulateur de pression	Pression	0,5-4 bar	± 0,02 bar

Tableau 1: Plage de mesure des équipements banc MIXER

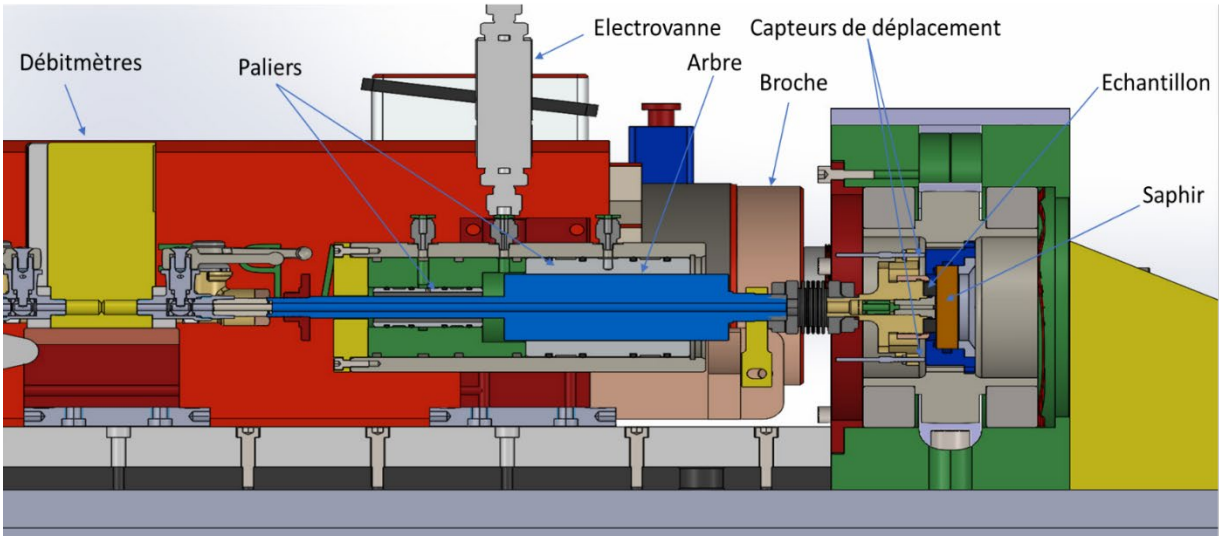


Figure 13: Vue en coupe du banc Mixer

Afin de garantir la coaxialité, paramètre critique entre l'échantillon et le disque en saphir, l'arbre est monté sur un rail coulissant intégré dans un bâti rigide, ce qui lui permet de se déplacer axialement grâce à un système de guidage manuel. Ce dispositif permet un positionnement progressif et contrôlé de l'ensemble jusqu'au contact. Pour compenser d'éventuels problèmes d'alignement, un accouplement élastique est installé entre l'arbre et l'échantillon (Fig. 14). Ainsi, lors de l'application progressive de la charge, l'échantillon rugueux peut adapter son alignement et corriger un éventuel défaut de parallélisme avec la surface du disque en saphir.

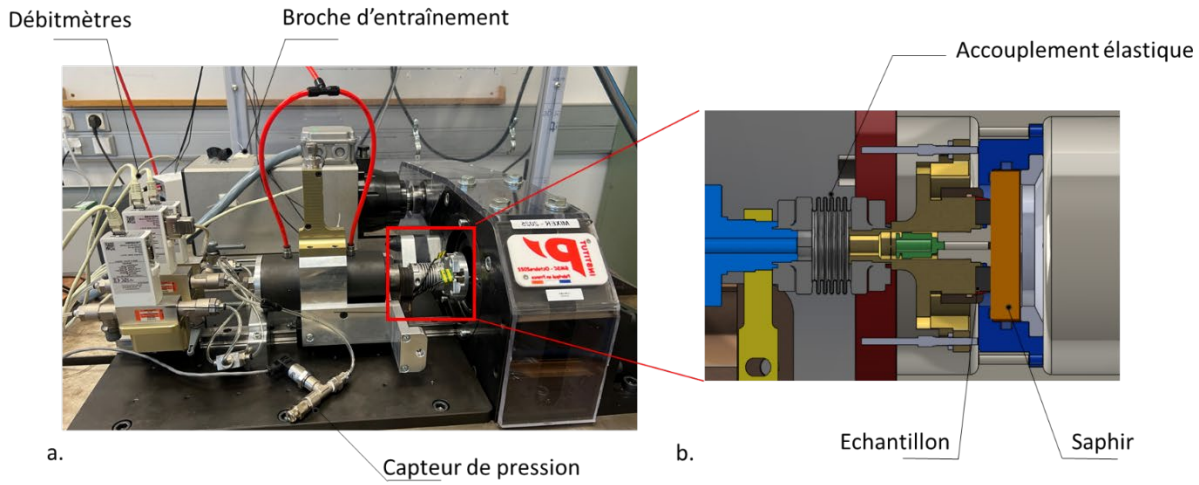


Figure 14: (a) Image banc MIXER, (b) Vue en coupe zone de contact

Le disque en saphir est mis en rotation par un système poulie–courroie, entraîné par une broche couplée à un moteur de 11 kW, capable d'atteindre une vitesse de 18 000 tr/min.

L'acquisition des données est réalisée à l'aide d'un ordinateur équipé d'un système DAQ (Data Acquisition) fonctionnant à une fréquence d'échantillonnage de 2 kHz.

2.2 Étalonnage du banc Mixer

2.2.1 Étalonnage du système de charge axiale

Une fois le dispositif installé, un étalonnage du système de charge axiale a été réalisé. Pour cela, un capteur d'effort de 1 kN a été positionné au niveau de l'interface de contact entre l'échantillon rugueux et le disque en saphir (Fig.15). L'objectif de cette étape était d'établir la relation entre la pression mesurée dans la chambre de charge et la force axiale réellement appliquée.

La chambre de charge, située entre les deux paliers, est alimentée par l'air provenant des côtés de chaque palier et la pression P_c est contrôlée par l'électrovanne pilotée. Lorsque celle-ci se ferme progressivement, la pression dans la chambre augmente, ce qui engendre une force normale F_N appliquée sur l'échantillon. Cette charge est transmise par l'intermédiaire de la surface annulaire de poussée S.

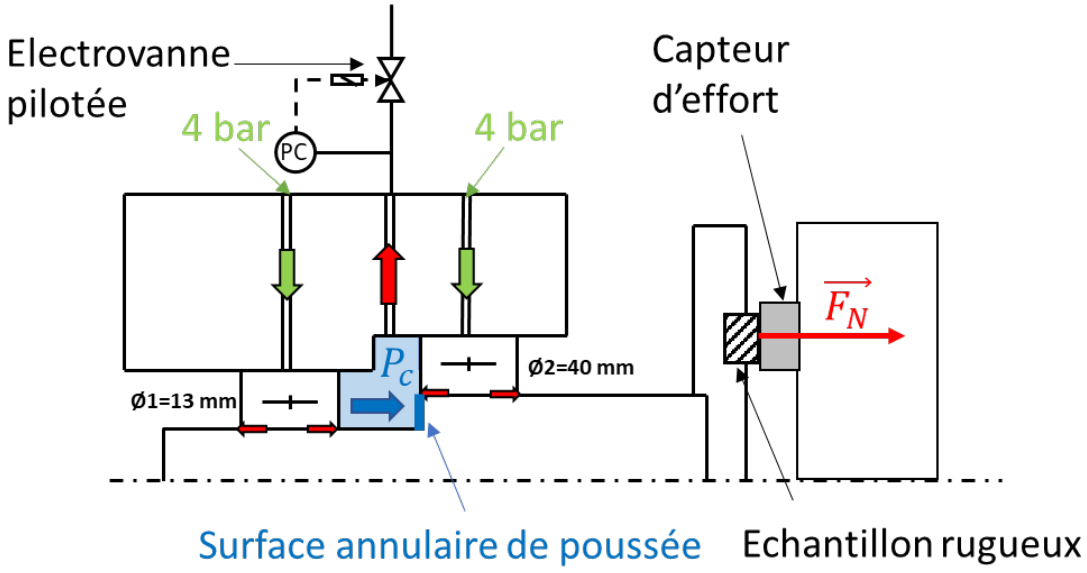


Figure 15: Schéma d'étalonnage du système de charge

Les résultats de l'étalonnage (Fig.16) montrent une excellente corrélation entre la force mesurée par le capteur et la force calculée à partir de la relation :

$$F_N = P_c \, S \tag{19}$$

où P_c est la pression mesurée dans la chambre et S la surface annulaire de poussée.

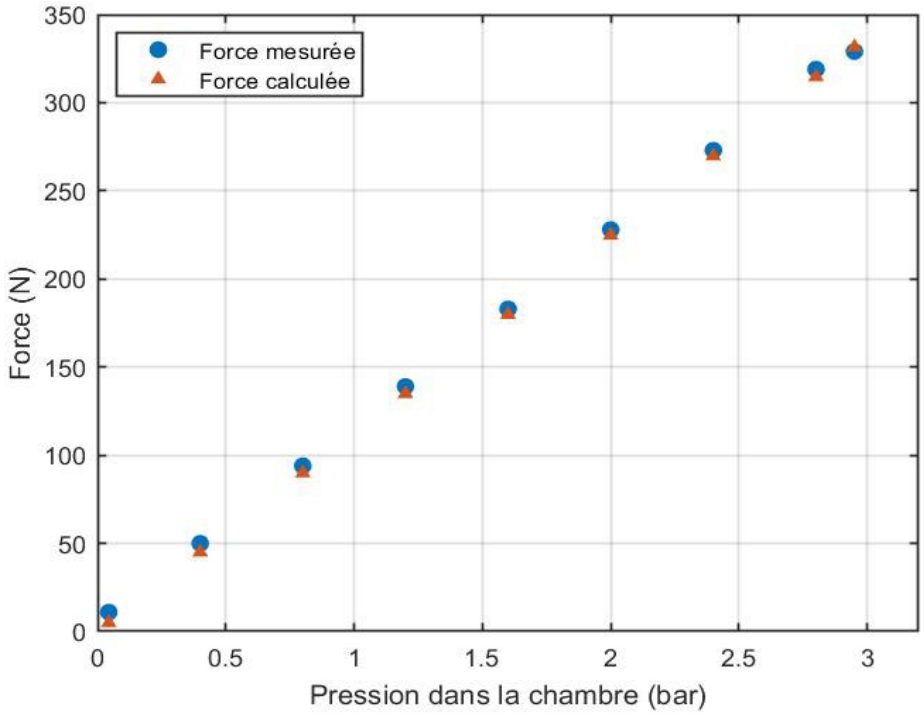


Figure 16: Courbe d'étalonnage de la charge

La gamme de pressions explorée dans la chambre s'étend de 0,045 à 2,87 bar, ce qui correspond à des charges axiales comprises entre 5 et 320 N. Ce résultat démontre que la simple mesure de la pression dans la chambre suffit à déterminer la charge appliquée sur l'échantillon. Si une charge plus élevée est nécessaire, il est possible d'augmenter la pression d'alimentation des paliers aérostatiques poreux (au-delà des 4 bars utilisés dans ces essais).

2.2.2 Étalonnage de la distance à la surface

Les capteurs de déplacement utilisés pour mesurer la distance entre les disques sont des capteurs inductifs à courants de Foucault. Ils permettent une mesure de position sans contact grâce à la variation d'impédance de leur bobine en présence d'une cible métallique. Afin de garantir la précision des mesures, ces capteurs ont été étalonnés dans un premier temps à l'aide de capteurs de déplacement à contact de type Keyence. Ces derniers ont été fixés sur le porte-échantillon, autour de l'échantillon rugueux, comme l'illustre la figure 17.

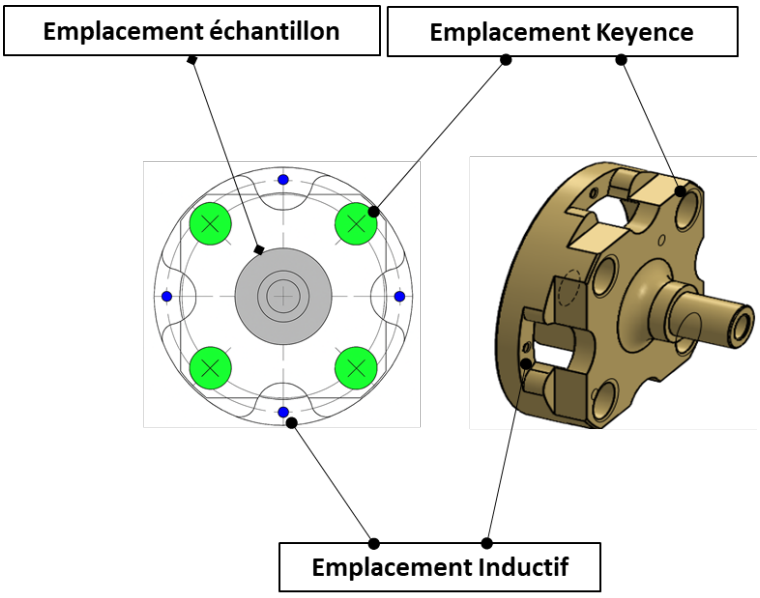


Figure 17: Porte-échantillon : disposition des capteurs pour l'étalonnage (Keyence en vert, Inductif en bleu)

La figure 18 représente un exemple de courbe d'étalonnage obtenue pour l'un des capteurs inductifs. Les équations d'étalonnage ainsi déterminées pour les 4 capteurs inductifs seront utilisées par la suite pour convertir les mesures de tension affichées par les capteurs en valeurs de déplacement réelles.

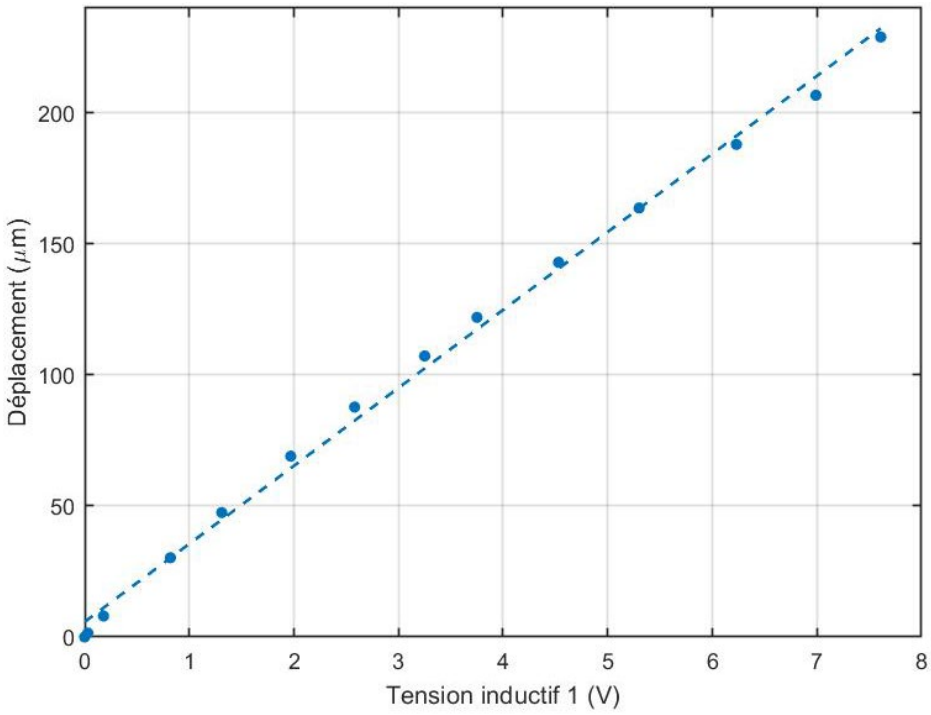


Figure 18: Courbe d'étalonnage du capteur inductif 1

2.3 Méthodologie de calcul

Le deuxième paramètre important, après la charge, est le défaut d'alignement entre l'échantillon et le saphir. L'accouplement élastique vient compenser progressivement ce défaut lorsque la charge axiale augmente. Comme les capteurs inductifs ne permettent pas de mesurer la distance absolue échantillon–saphir mais uniquement des variations relatives par rapport à la cible (Fig.19), une méthodologie de recalage géométrique a donc été utilisée afin de reconstruire la position réelle de l'échantillon et de déterminer la distance effective qui le sépare de la surface du saphir, notées Z_{max} et Z_{min}.

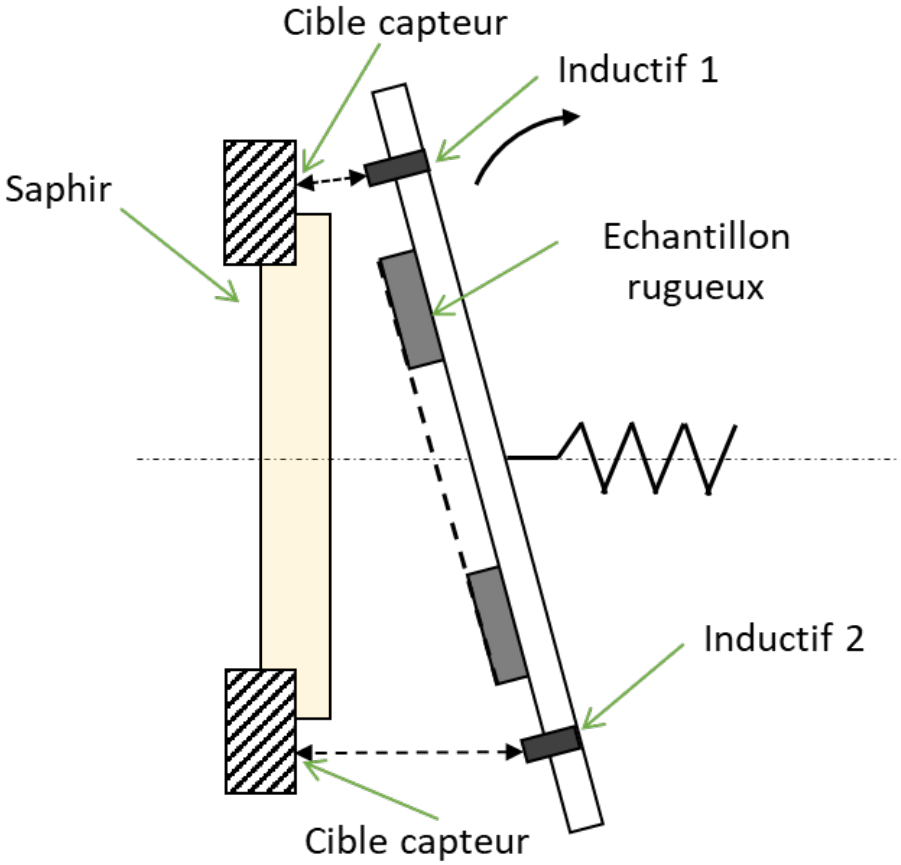


Figure 19: Distance échantillon–saphir

Les étapes suivantes détaillent l'approche permettant de passer des mesures relatives des capteurs à la distance réelle échantillon–saphir.

Étape 1 : Mise en contact direct de l'échantillon avec le saphir

L'échantillon est mis en contact direct avec la surface du saphir, sans air à l'interface et sous la charge maximale. Le repère de référence est défini de telle sorte que son plan coïncide avec celui du saphir $z = 0$ et que son origine (x_0 , y_0) corresponde au centre du disque de saphir (Fig.20).

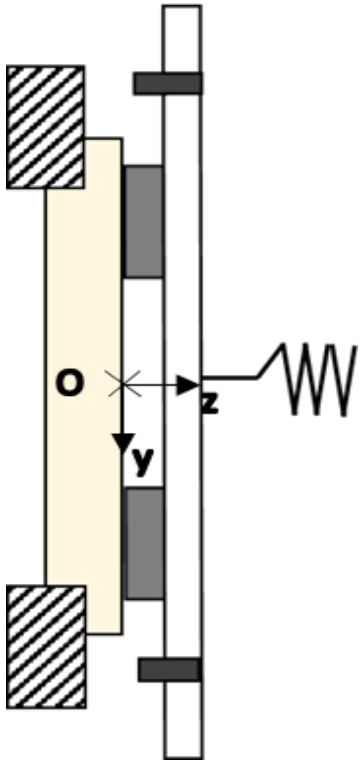


Figure 20: Position de référence (à charge maximale)

Dans cette position, chacun des trois capteurs inductifs $i \epsilon \{1,2,3\}$ placé en (x_i , y_i) donne un signal que l'on convertit, à l'aide de la courbe d'étalonnage des capteurs, en position correspondante $r_i^{(0)}$ (position de référence).

Pour chaque charge axiale appliquée sur l'échantillon, on détermine la position $\boldsymbol{r_i}$, puis on calcule la distance locale z_i par rapport à la position de référence :

$$z_i = r_i - r_i^{(0)} \qquad (20)$$

Cela nous donne les coordonnées complètes des trois points $P_i = \{x_i , y_i , z_i\}$ représentant les positions des capteurs inductifs à chaque charge appliquée.

Étape 2 : Détermination de l'équation du plan

Les trois points identifiés définissent le plan incliné de l'échantillon (plan rouge Fig. 21), écrit sous la forme normalisée :

$$ax + by + cz = 1 \qquad (21)$$

Les coefficients (a, b, c) sont obtenus en résolvant le système linéaire :

$$ax_i + by_i + cz_i = 1, \qquad (i = 1,2,3) \qquad (22)$$

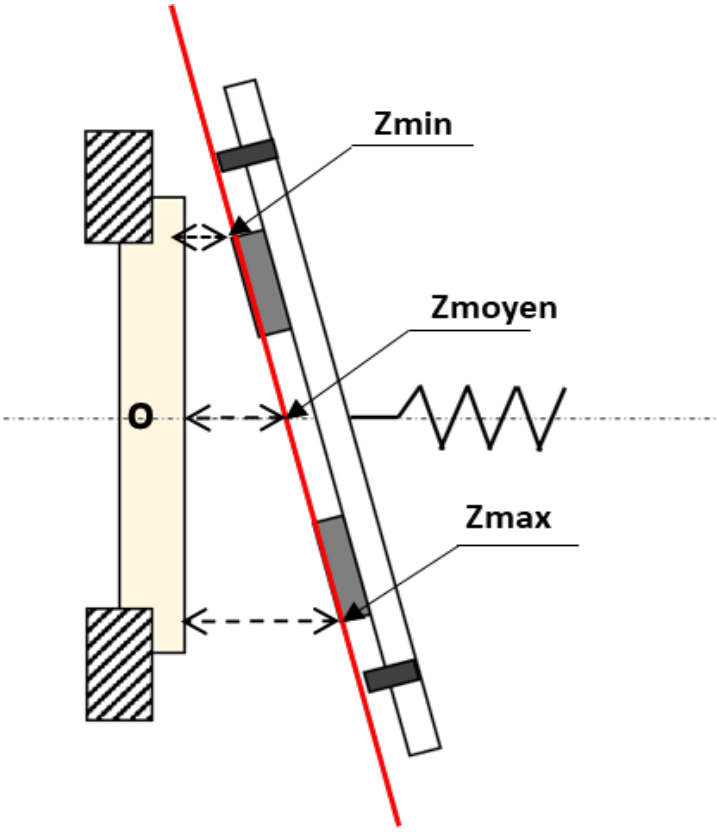


Figure 21: Position de l'échantillon sous charge et distances caractéristiques : Z_{max}, Z_{min}, Z_{moyen}

Étape 3 : Intersection du plan rouge avec le contour de l'échantillon

Pour calculer l'intersection de ce plan avec le contour de l'échantillon (considéré comme un cercle de rayon R et de centre $(x_0\ , y_0)$) :

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \qquad (23)$$

L'équation paramétrique de la projection du cercle représentant le contour de l'échantillon sur le plan rouge est :

$$\begin{cases} x = x_0 + R\cos\theta \\ y = y_0 + R\sin\theta \end{cases} \quad (24)$$

où θ est l'angle polaire paramétrant le contour du disque dans le plan (x,y).

L'équation du plan s'écrit alors :

$$z = \frac{1}{c} - \frac{a(x_0 + R\cos\theta)}{c} - \frac{b(y_0 + R\sin\theta)}{c} \quad (25)$$

Les distances Z_{max} et Z_{min} (Fig.21) sont obtenues après avoir résolu l'équation :

$$\frac{\partial z}{\partial \theta} = 0 \quad (26)$$

La solution de cette équation est :

$$\theta = arctan\frac{b}{a} + k\pi, \qquad k = 0 \text{ ou } 1 \quad (27)$$

Où

$$\sin\theta = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (28)$$

$$\cos\theta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (29)$$

Il résulte :

$$Z_{max} = \frac{1 - ax_0 - by_0}{c} + \frac{R\sqrt{a^2 + b^2}}{c} \quad (30)$$

$$Z_{min} = \frac{1 - ax_0 - by_0}{c} - \frac{R\sqrt{a^2 + b^2}}{c} \quad (31)$$

En tenant compte que $x_0 = y_0 = 0$, on obtient :

$$Z_{max} = \frac{1}{c} + \frac{R\sqrt{a^2 + b^2}}{c} \quad (32)$$

$$Z_{min} = \frac{1}{c} - \frac{R\sqrt{a^2 + b^2}}{c} \quad (33)$$

Dans la suite de l'étude, nous utiliserons Z_{max} et Z_{min} pour les calculs ; pour la représentation des résultats expérimentaux, nous ne retiendrons que Z_{moyen} .

2.4 Géométrie et matériaux des disques

La conception des disques et le choix des matériaux ont été définis de manière à garantir un contact représentatif et reproductible. La section suivante précise la géométrie et les principales caractéristiques des matériaux utilisés.

2.4.2 Géométrie et spécifications

Le contact s'établit entre deux disques présentant des géométries différentes. L'échantillon rugueux est de forme annulaire, avec un diamètre extérieur de 30 mm, un diamètre intérieur de 14 mm et une épaisseur de 6 mm (Fig.22).

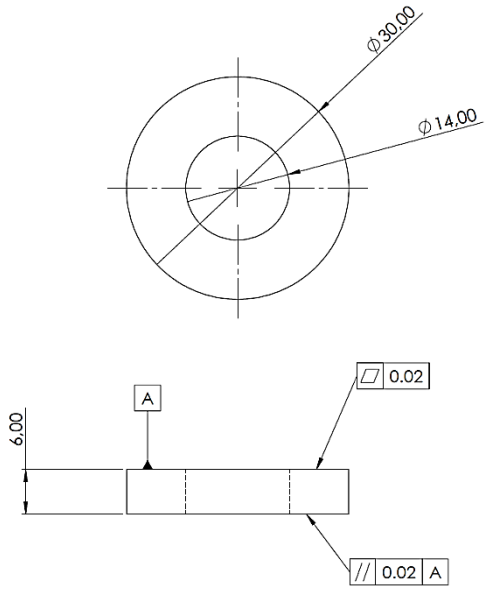


Figure 22: Plan du disque de l'échantillon

Le disque transparent en saphir, qui constitue la contre-face en rotation, est un disque plein de 50 mm de diamètre et 10 mm d'épaisseur (Fig.23).

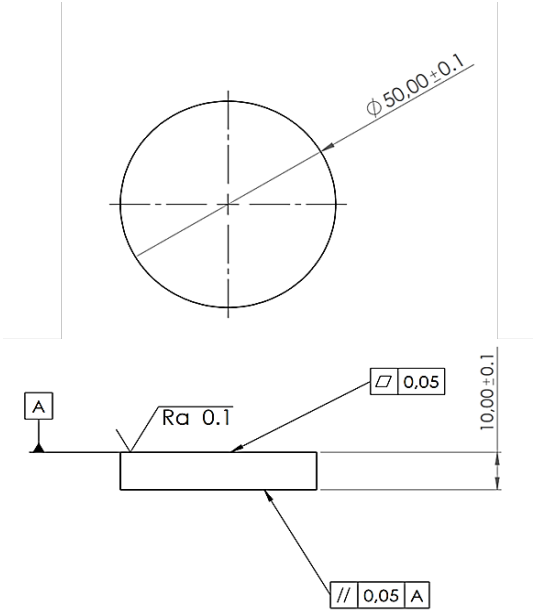


Figure 23: Plan du disque de saphir

Ces spécifications géométriques et dimensionnelles assurent à la fois la coaxialité, le contrôle précis du contact et la répétabilité des essais. En effet, la géométrie annulaire de l'échantillon, associée à la planéité du disque en saphir, permet de maîtriser la répartition de la pression à l'interface, de réduire les désalignements et de garantir des conditions de contact similaires d'un essai à l'autre.

2.4.2 Matériaux et propriétés mécaniques

Deux matériaux ont été testés pour l'échantillon rugueux : le graphite JP900 et le carbure de silicium SiC PS5000. Le graphite isostatique JP900 fabriqué par Mersen (graphite moulé isostatiquement), dont les propriétés sont présentées dans le tableau 2, est un matériau isotrope à grain fin qui se distingue par sa forte densité, sa faible porosité et ses excellentes propriétés mécaniques, lui conférant une stabilité dimensionnelle remarquable ainsi qu'une tenue fiable sous charge. Sa microstructure homogène résulte du pressage isostatique de poudres de carbone très fines, suivi d'une graphitisation à haute température, ce qui garantit une orientation aléatoire des grains et donc des propriétés isotropes. Cette structure compacte, associée à une faible teneur en impuretés, confère au JP900 à la fois une grande uniformité et une inertie chimique élevée.

Densité	1.82 g/cm³
Taille moyenne des grains	10 µm
Résistance à la flexion	50 MPa
Résistance à la compression	130 MPa
Limite de traction	32 MPa
Module d'Young	14 GPa
Dureté (Shore C2)	65

Tableau 2: Propriétés mécaniques du Carbone Graphite JP900 [51]

Le carbure de silicium grade PS5000 fabriqué par Morgan Advanced Materials constitue le deuxième matériau testé comme échantillon rugueux. Ce SiC fritté a été spécialement développé par Morgan pour les applications nécessitant une haute résistance mécanique et une excellente tenue à l'usure. Il se distingue par sa dureté élevée, sa grande stabilité face à la corrosion ainsi que par sa microstructure dense et homogène, issue du frittage de poudres de SiC très fines, qui lui confère de hautes performances mécaniques et une excellente résistance aux chocs thermiques. Ces caractéristiques en font un matériau privilégié pour les environnements sévères tels que les garnitures mécaniques et les composants soumis à de fortes contraintes. Ses propriétés principales sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Densité	3,21 g/cm³
Taille moyenne des grains	4–10 µm
Résistance à la flexion	390 MPa
Résistance à la compression	3 500 MPa
Limite de traction	250 MPa
Module d'Young	410 GPa
Dureté (Vickers)	2 800 HV

Tableau 3: Propriétés mécaniques du SiC PS5000 [52]

Le disque transparent est réalisé en saphir optique monocristallin (Al_2O_3), un matériau reconnu pour sa combinaison unique de propriétés mécaniques et optiques. Avec une dureté très élevée, une excellente résistance à l'usure, à la corrosion et aux chocs thermiques, il offre également une large transparence spectrale, allant de l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge moyen. Ces

caractéristiques en font un matériau privilégié pour les applications optiques et mécaniques de haute performance. Ses propriétés principales sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Densité	3,98 g/cm³
Résistance à la flexion	760 MPa
Résistance à la compression	2 000 MPa
Limite de traction	400 MPa
Module d'Young	420 GPa
Dureté (Vickers)	2000 HV
Plage de transparence optique	0,15 – 5,5 µm (UV à IR)

Tableau 4: Propriétés principales du saphir [78]

Le banc expérimental développé dans le cadre du projet *MIXER* et présenté dans ce chapitre constitue un outil original pour l'étude du régime de lubrification mixte à gaz. Sa conception, reposant sur un contact coaxial et parallèle entre deux disques, offre une géométrie modèle simple, stable et contrôlable. De plus, l'utilisation d'un disque transparent en saphir ouvre la possibilité de développer ultérieurement des techniques optiques d'observation directe de la zone de contact. Les procédures d'étalonnage mises en place, ainsi que la méthodologie de calcul de la distance réelle entre les surfaces, garantissent la précision et la fiabilité des mesures expérimentales. Le choix des matériaux à tester, graphite et SiC, permet de comparer deux comportements tribologiques contrastés : celui d'un matériau tendre, déformable et poreux, face à un matériau dur et non poreux. Le chapitre suivant sera consacré à la préparation et à la caractérisation des surfaces avant la réalisation des essais expérimentaux.

CHAPITRE 3

PRÉPARATION & CARACTÉRISATION DES ÉCHANTILLONS

3. Préparation et Caractérisation des échantillons

3.1 Préparation des surfaces

La qualité des surfaces de contact joue un rôle déterminant dans les performances des garnitures mécaniques. Ces surfaces, issues d'opérations d'usinage de haute précision, doivent présenter une rugosité aussi faible que possible afin de permettre la formation d'un film fluide de très faible épaisseur [1].

Toutefois, dans les conditions réelles, les garnitures mécaniques fonctionnent aussi en régime mixte, où coexistent la lubrification fluide et le contact solide entre les aspérités de surface. Ce régime apparaît généralement lorsque l'épaisseur du film lubrifiant est comparable à l'amplitude des rugosités, ce qui signifie que le fluide ne parvient pas à séparer totalement les deux surfaces [53]. Dans ces conditions, la présence d'une micro-rugosité contrôlée n'est pas un défaut mais une nécessité : elle favorise la rétention du fluide, permet la régénération du film lubrifiant et stabilise le fonctionnement en limitant les fuites [54]. Selon Bachchhav et al. [55], la rugosité de surface joue un rôle clé dans les performances tribologiques : une surface trop rugueuse augmente le frottement et l'usure, tandis qu'une surface trop lisse compromet la rétention du lubrifiant. Une micro-rugosité contrôlée par polissage permet au contraire de piéger et redistribuer le fluide, assurant la stabilité du film lubrifiant et une réduction du frottement. Plusieurs travaux consacrés aux joints mécaniques à rainures et à surfaces texturées ont montré que la modification contrôlée de la topographie de surface pouvait considérablement améliorer le comportement tribologique [12]- [56].

Dans le but d'analyser l'effet des échelles de forme et des paramètres de rugosité sur la portance des surfaces et sur les grandeurs macroscopiques mesurées par le banc expérimental *MIXER* (le couple de frottement, le débit de fuite et l'épaisseur du film), nos échantillons en carbure de silicium et en carbone ont été polis avec des procédés de polissage spécifiques. L'objectif était de générer des états de surface caractérisés par différents paramètres de rugosité et d'ondulation, ainsi que par différentes formes de rayures issues du polissage.

Pour les échantillons en carbure de silicium (SiC), nous avons utilisé des disques micro-abrasifs diamantés, un choix justifié par la dureté extrême du SiC (9,5 sur l'échelle de Mohs) qui rend nécessaire l'emploi d'un matériau plus dur pour un enlèvement efficace de matière, tout en produisant des surfaces fines et homogènes, sans micro-fissures ni dommages [57] [58].

Les disques diamantés employés présentaient des granulométries précises comprises entre 30 µm et 1 µm, chaque échantillon étant poli avec une taille de grain définie afin d'obtenir des états de surface différenciés.

Pour le polissage du graphite, des papiers abrasifs en carbure de silicium (SiC) ont été utilisés, un choix adapté à la nature plus tendre et plus fragile de ce matériau. Les papiers abrasifs employés présentaient une granulométrie variable allant de P120 (125 µm) à P1200 (15 µm), ce qui a permis de générer différents états de surface. Selon le procédé appliqué, certains échantillons ont présenté une texture isotrope, caractérisée par une surface homogène, tandis que d'autres ont montré des textures anisotropes marquées par deux formes distinctes de stries, directionnelles et circonférentielles.

L'ensemble des opérations de polissage a été réalisé à l'aide d'une polisseuse manuelle (Annexe A). Le caractère manuel du procédé confère une grande flexibilité, puisqu'il permet de moduler la pression exercée, la durée de contact et le mouvement imposé à l'échantillon. Ces paramètres influencent la topographie finale, permettant de générer des textures de surface variées, allant d'états isotropes homogènes à des surfaces anisotropes caractérisées par différents types de stries.

3.2 Mesure des surfaces

Le polissage a permis de générer des états de surface variés. Afin de quantifier ces différences et d'évaluer leur impact sur les grandeurs macroscopiques mesurées expérimentalement, il est nécessaire de procéder à une analyse fine des surfaces polies.

Avant chaque mesure, les échantillons ont été nettoyés à l'éthanol puis séchés à l'air comprimé afin d'éliminer toute contamination de surface susceptible d'influencer les mesures.

Cette partie est consacrée à la caractérisation topographique des échantillons, à travers la mesure de paramètres de rugosité et d'ondulation.

3.2.1 Dispositif de mesure de surface

Nous nous situons à l'échelle micrométrique, ce qui nécessite l'utilisation d'instruments de mesure de haute précision afin de bien caractériser les défauts de rugosité et de topographie des surfaces polies. Dans notre cas, deux systèmes de microscopie optique ont été employés : le Polytec TMS 500 TopMap Pro.Surf+ et le Talysurf CCI 6000.

Ces deux appareils sont des microscopes interférométriques à lumière blanche, offrant l'avantage de réaliser des mesures sans contact. Le principe de mesure repose sur l'envoi d'un faisceau lumineux vers la surface étudiée. Une partie du signal est réfléchie par l'échantillon tandis qu'une autre est réfléchie par un miroir de référence ; l'interaction entre ces deux signaux génère un phénomène d'interférence. L'analyse de ces interférences permet alors de reconstruire avec une grande précision la topographie de la surface.

Le Polytec est particulièrement adapté à la mesure de grandes surfaces. Il permet de couvrir une zone de 45 mm × 45 mm par fenêtre de mesure, ce qui le rend plus approprié à l'étude d'échantillons de taille importante ou nécessitant une vision d'ensemble de leur topographie. Son balayage vertical atteint jusqu'à 70 mm, offrant la possibilité de caractériser des surfaces présentant des reliefs marqués. Sa résolution latérale, c'est-à-dire la distance séparant deux pixels adjacents dans l'image reconstruite, est de 28,2 µm. Ces caractéristiques le rendent plus efficace pour la mesure de l'ondulation, c'est-à-dire l'analyse des irrégularités de grande longueur d'onde, mais pas pour des longueurs d'ondes inférieur à 14,1 µm.

Le Talysurf se distingue par sa précision élevée, bien que son aire de mesure soit relativement limitée. Contrairement au Polytec, il est particulièrement adapté à la mesure de la rugosité. Sa résolution verticale sub-nanométrique permet en effet de caractériser les surfaces avec une très grande finesse, rendant possible l'analyse des irrégularités de faible amplitude présentes sur des surfaces polies. Il est équipé de trois objectifs, dont les spécificités sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Objectif	**Surface mesurée [mm²]**	**Pas d'échantillonnage [µm]**	**Distance de travail [mm]**
5x	3,6 × 3,6	3,5	9,3
20x	0,9 × 0,9	0,88	4,7
50x	0,363 × 0,363	0,35	3,4

Tableau 5: Caractéristiques des objectifs optiques du Talysurf CCI 6000

Pour la mesure des surfaces de graphite et de SiC, nous avons utilisé l'objectif 50×, qui offre une haute résolution latérale de 0,35 µm. Il permet de mesurer des surfaces de 0,363 mm × 0,363 mm avec une matrice de 1024 × 1024 pixels et une résolution verticale d'environ 0,01 nm.

Le logiciel Mountains (Talymap) a été utilisé pour le traitement des données, notamment pour le redressement des surfaces, la correction de forme, l'extraction de profils, le calcul des rugosités et les analyses fréquentielles.

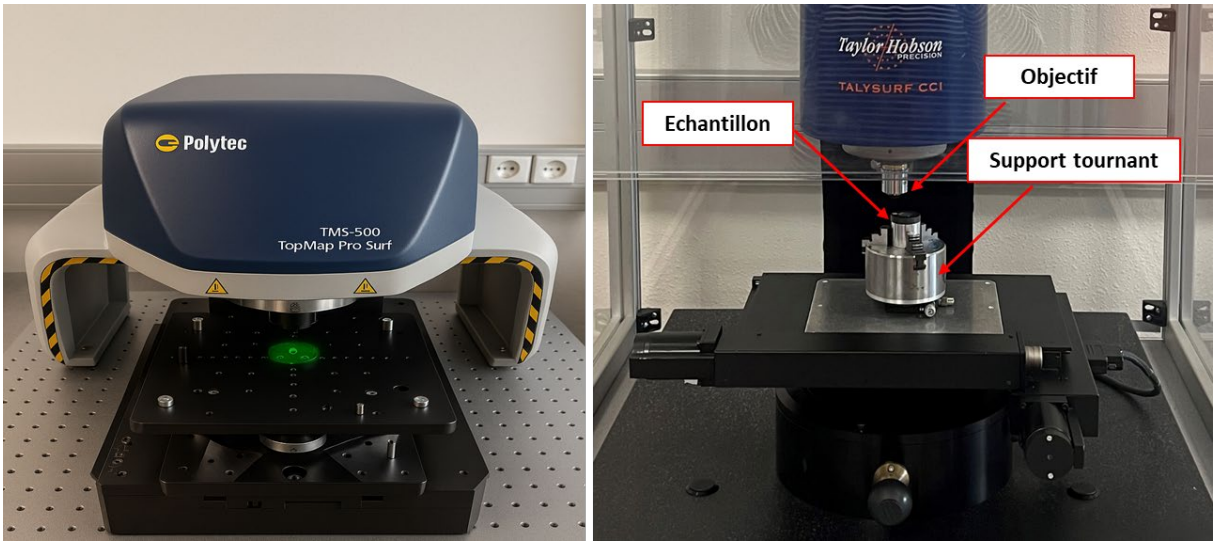


Figure 24: Polytec TMS 500 Pro.Surf+ et Talysurf CCI 6000

3.2.2 Méthodes de mesure de la rugosité et de l'ondulation

3.2.2.1 Mesure de la rugosité

Les échantillons ont été mesurés à l'aide du Talysurf équipé de l'objectif 50×. Pour assurer une rotation contrôlée, ils ont été fixés sur un support tournant placé sur le plateau de l'appareil (Fig.24). L'objectif est resté fixe durant les mesures, positionné à mi-rayon de la surface de l'échantillon. Pour les surfaces en graphite, la rotation du support a été réalisée par incréments réguliers de 20°, permettant d'effectuer des mesures dans 18 zones équidistantes réparties tout autour de l'échantillon (Fig.25). Concernant les surfaces en carbure de silicium, seules 8 mesures ont été effectuées, leur aspect homogène après polissage rendant un maillage moins dense suffisant pour représenter l'état de surface. À partir de l'ensemble de ces acquisitions, les paramètres de rugosité de la surface ont été déterminés.

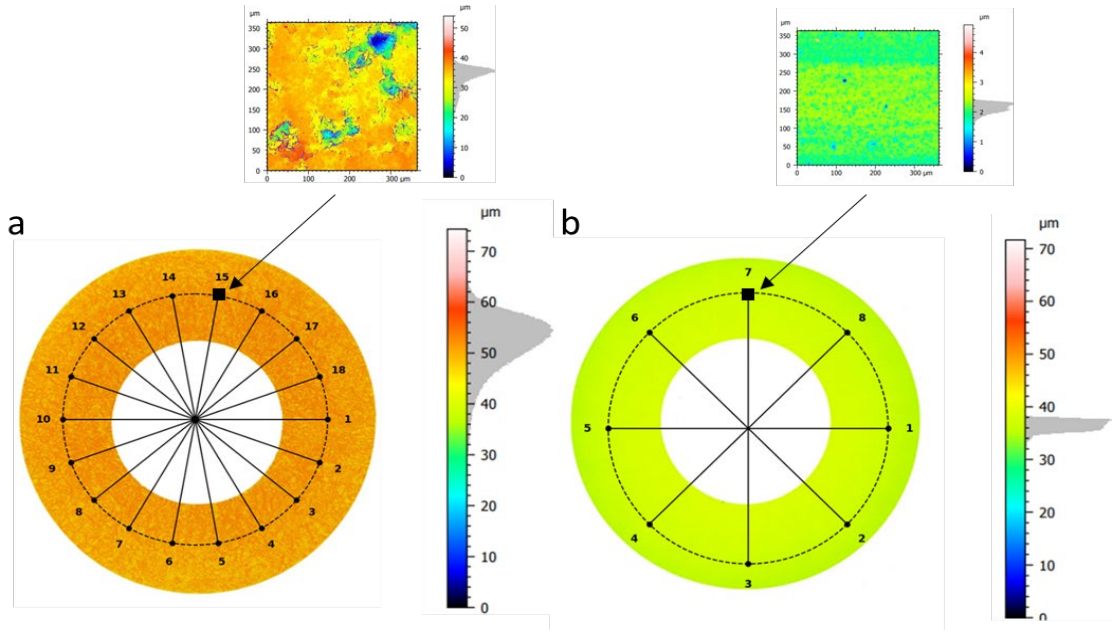


Figure 25: Position des zones mesurées sur la surface du graphite a) et du carbure de silicium b)

Chaque mesure est suivie d'un traitement de données. Celui-ci consiste en un redressement de la surface, qui permet de supprimer la pente générale résultant d'une mesure effectuée avec un léger défaut de perpendicularité par rapport à la surface. La figure 26 présente une zone mesurée, tandis que la figure 27 montre cette même zone après le redressement. Dans certains cas, le redressement est complété par une étape de seuillage, qui consiste à tronquer artificiellement la surface mesurée à une altitude donnée. Cette opération permet d'éliminer les pics excessifs, souvent dus à des poussières ou à des artéfacts, qui peuvent masquer la topographie réelle de la surface. Ces artéfacts peuvent également provenir des limites de l'interférométrie optique, notamment dans les zones peu réfléchissantes où la reconstruction du signal peut générer des points aberrants.

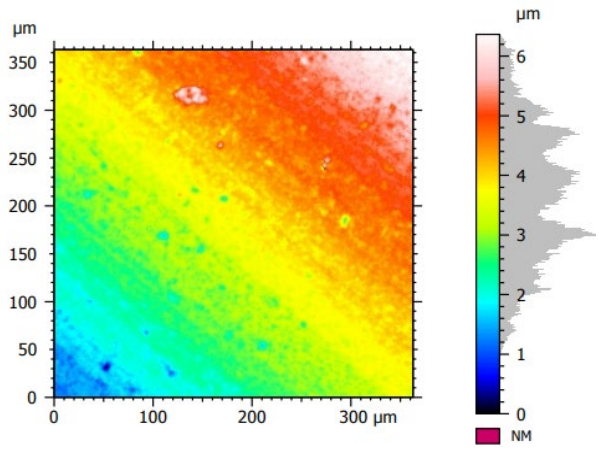


Figure 26: Surface mesurée sur une face de SiC (repère cartésien (x, y))

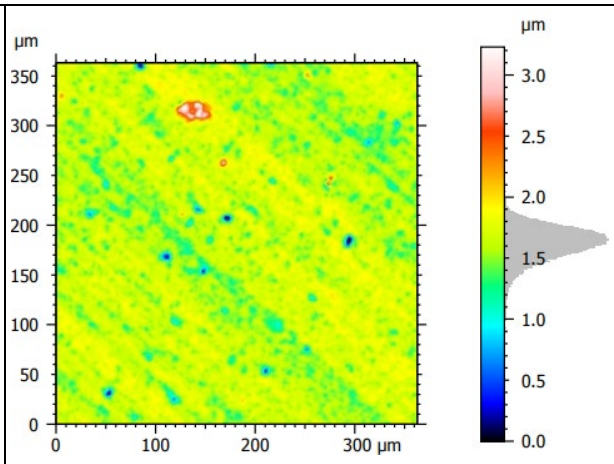


Figure 27: Surface après redressement

3.2.2.2 Mesure de l'ondulation

Les mesures des ondulations ont été réalisées à l'aide du Polytec. Les profils de surface ont été traités à l'aide d'un filtre passe-bas de 1,25 mm^{-1} (correspondant à une longueur d'onde $\lambda = 0,8$ mm), permettant de séparer la rugosité des ondulations. Les amplitudes maximales d'ondulation Wt ont ensuite été déterminées par la méthode crête à crête[2] appliquée sur des profils filtrés. Les mesures ont été effectuées le long de quatre rayons cardinaux R1, R2, R3 et R4, ainsi que sur trois circonférences concentriques C1, C2 et C3 (Fig.28 : a)).

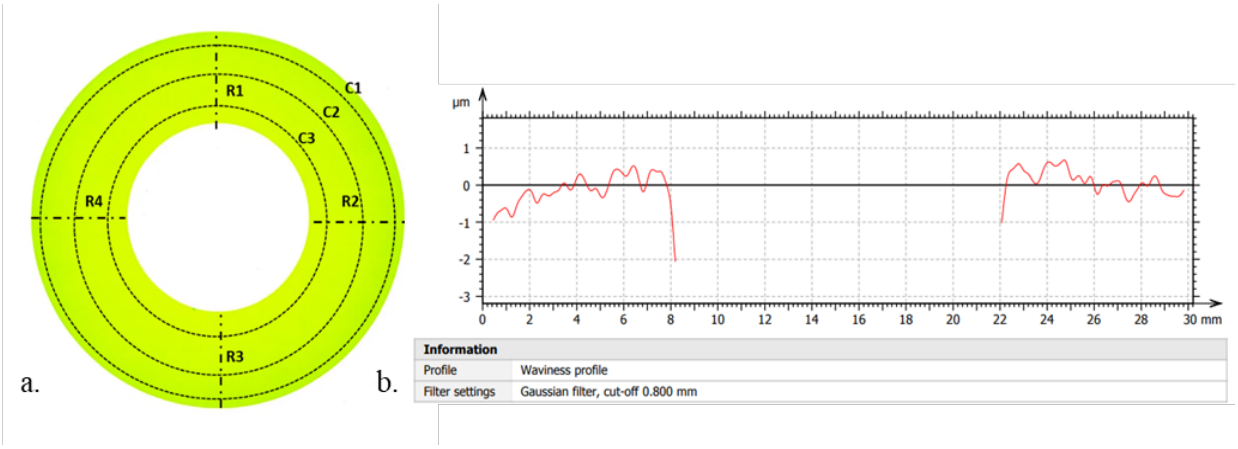


Figure 28: a) Position des profils pour la mesure d'ondulation ; b) exemple de profil d'ondulation (R4–R2)

Afin de limiter les effets de bord, les profils d'ondulation ont été extraits à une distance minimale de 1 cm du bord de l'échantillon.

3.2.3 Résultats de polissage

Toutes les surfaces, brutes et polies, ont été mesurées avec le Polytec afin d'obtenir une vision globale de la topographie des échantillons. Ces mesures permettent de visualiser la forme générale de la surface ainsi que la direction des stries issues du polissage. La figure 29 présente la surface de graphite en état brut (surface de référence).

[2] La méthode crête à crête (ou peak to peak) consiste à mesurer l'amplitude maximale d'une ondulation en calculant la différence de hauteur entre le point le plus élevé (crête) et le point le plus bas (creux) d'un profil filtré permettant de séparer l'ondulation de la rugosité.

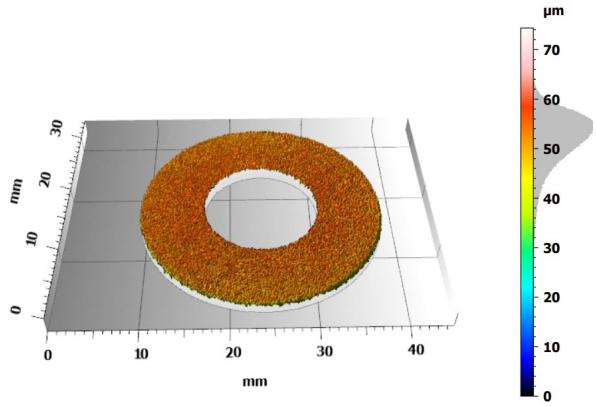
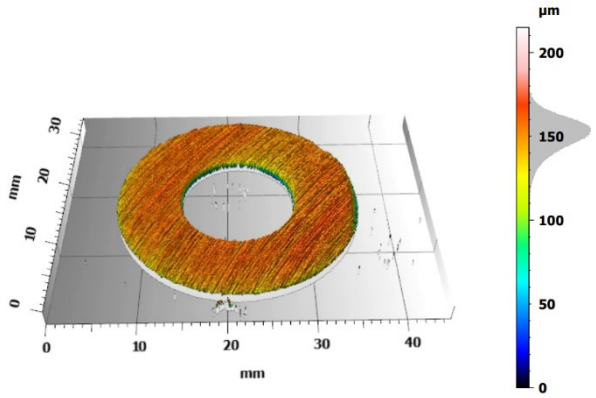
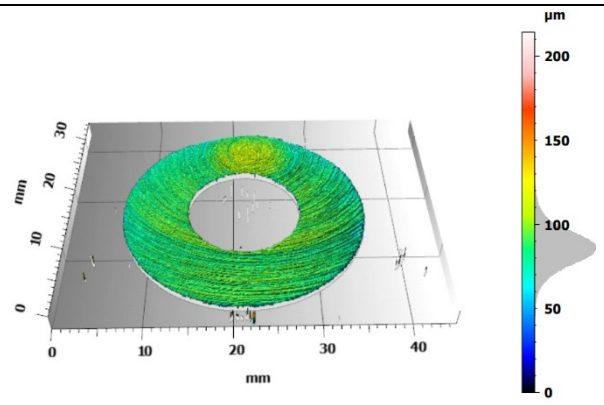
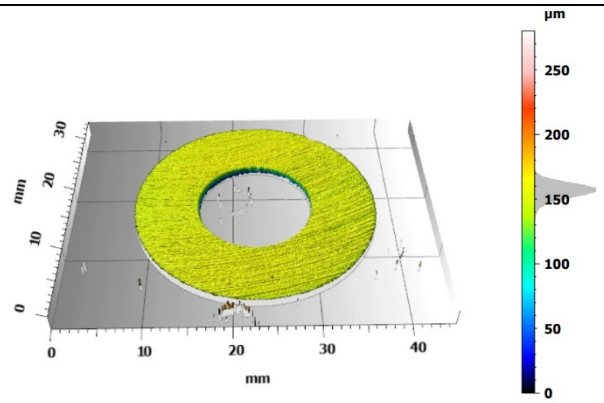
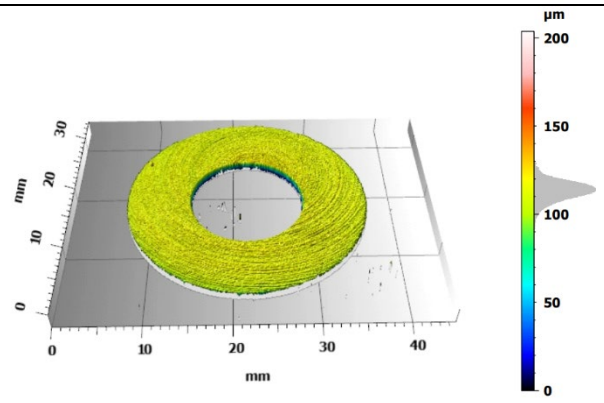
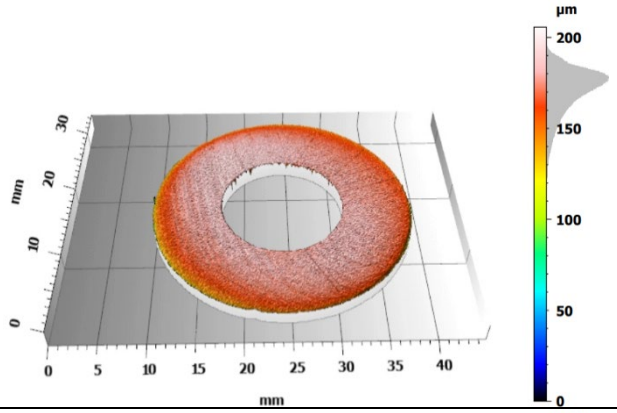
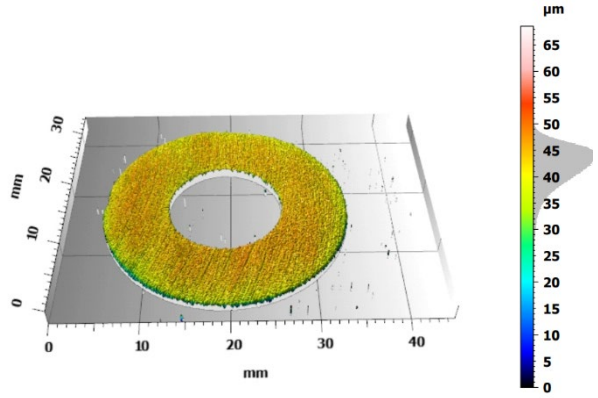


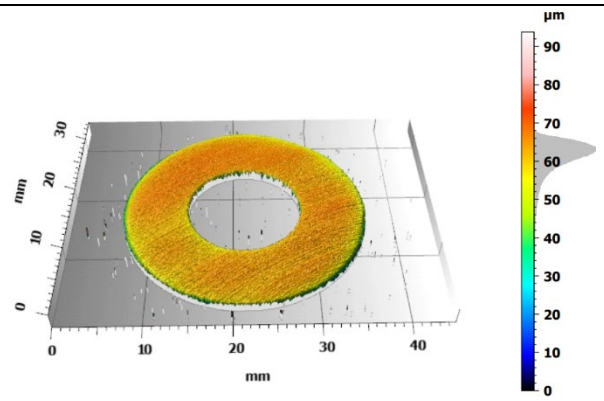
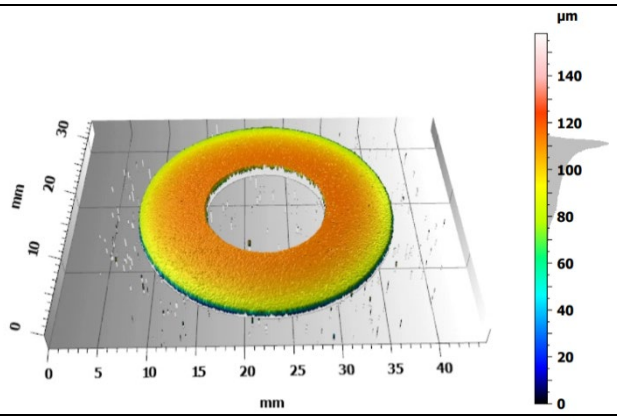
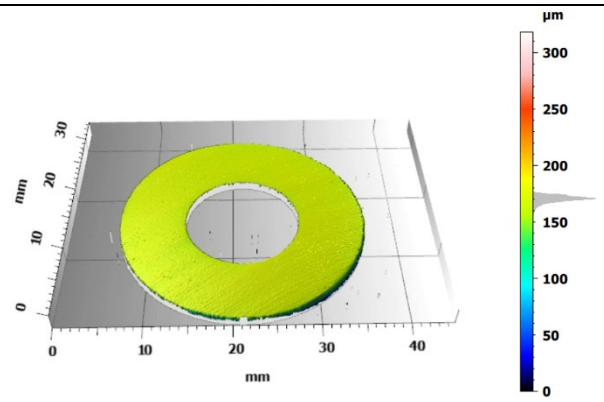
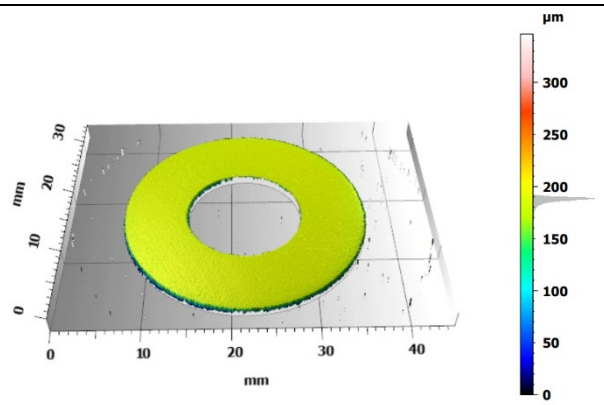
Figure 29: Surface de graphite Mersen à l'état brut

Dans le tableau ci-dessous, les dix surfaces polies du graphite sont classées selon la taille de grain utilisée pour le polissage. Les échelles d'altitude diffèrent d'une surface à l'autre, les amplitudes de topographie étant fortement dépendantes de la granulométrie de l'abrasif utilisé.

Tableau 6: Surfaces de graphite polies : taille de grain vs mesures Polytec non filtrées

Grain de polissage	Surface polie mesurée par le Polytec
P120 (125 µm) Stries directionnelles	
P120 (125 µm) Stries circonférentielles	

P180 (82 µm) Stries directionnelles	
P180 (82 µm) Stries circonférentielles	
P360 (40µm)	
P400 (35µm)	

P600 (26 µm)	
P800 (21µm)	
P1000 (18 µm)	
P1200 (15 µm)	

De même pour le carbure de silicium, la surface brute a été mesurée par le Polytec (Fig. 30). Le tableau suivant regroupe les huit surfaces polies de SiC, également mesurées avec le Polytec, et classées en fonction de la taille de grain de polissage utilisée.

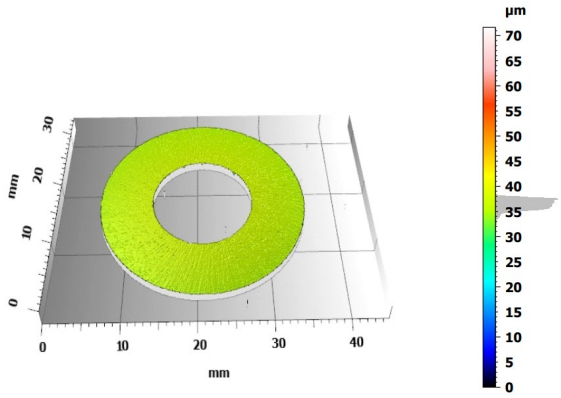
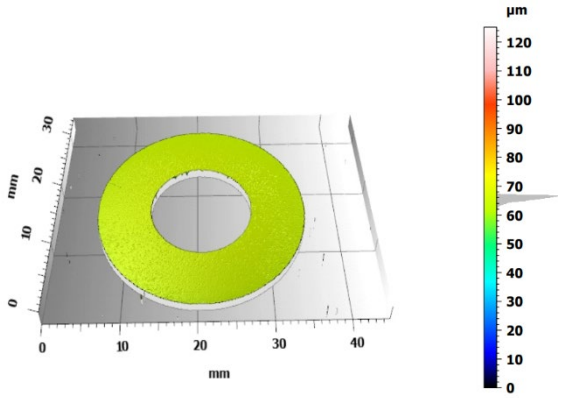
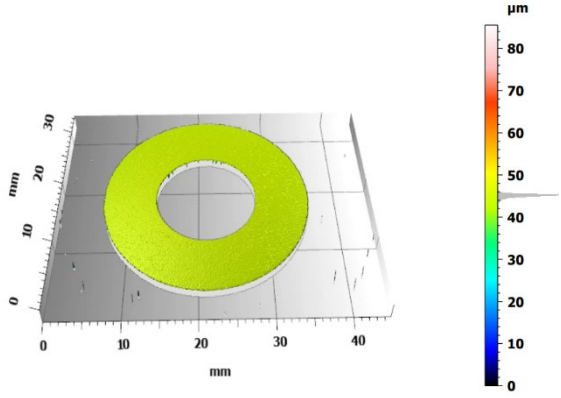
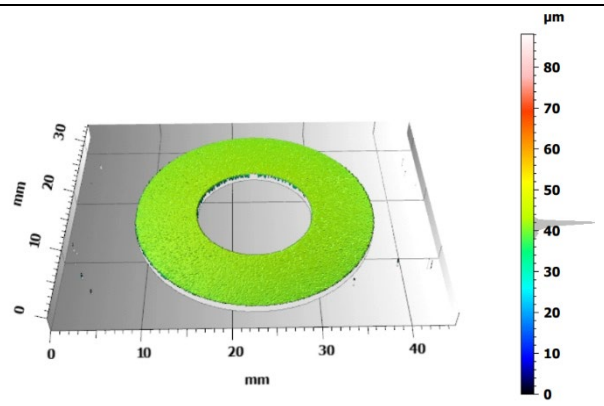
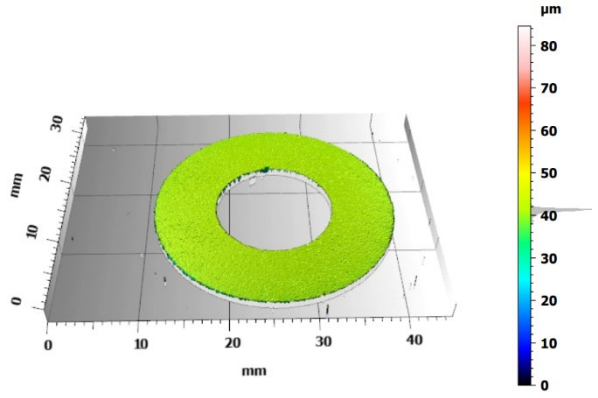
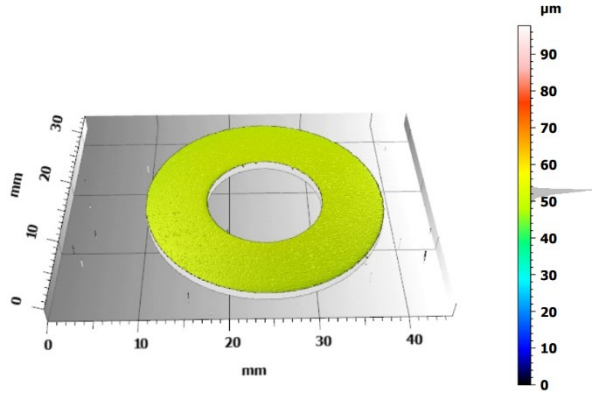
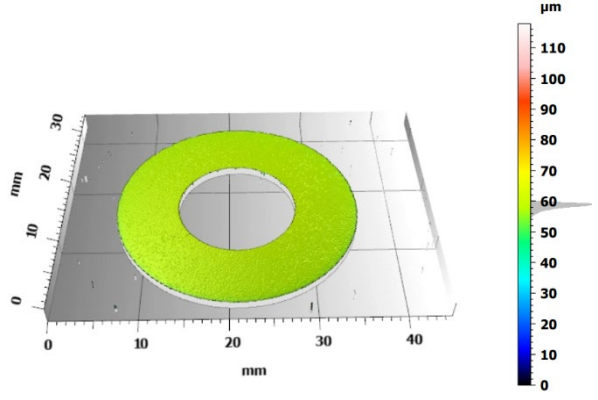
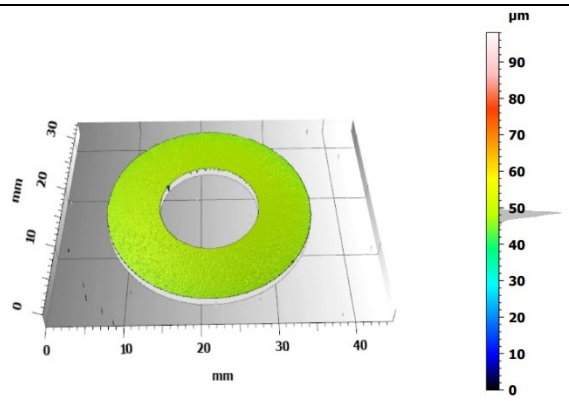
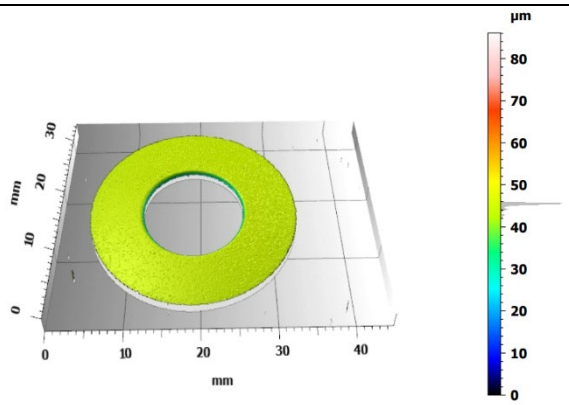


Figure 30: Surface de SiC en état brut

Tableau 7: Surfaces de SiC polies : taille de grain vs mesures Polytec non filtrées

Grain de polissage	Surface polie mesurée par le Polytec
D1 (30 µm)	
D2 (20 µm)	

D3 (15 µm)	
D4 (9 µm)	
D5 (6 µm)	
D6 (3 µm)	

D7 (1.5 µm)	
D8 (1 µm)	

D’après les mesures de topographie réalisées avec le Polytec, le polissage à l’aide de différentes tailles de grain a permis de générer un ensemble d’états de surface distincts, présentant des morphologies variées. Cet effet apparaît particulièrement marqué dans le cas du graphite. En raison de sa structure plus tendre, ce matériau est en effet plus sensible aux conditions de polissage, de sorte que la variation de la granulométrie du papier abrasif entraîne des modifications plus prononcées de l’état de surface. Cela se traduit notamment par une évolution plus nette de la morphologie de surface en fonction de la granulométrie, ainsi que par l’apparition de stries plus marquées lorsque des grains plus grossiers sont utilisés.

3.3 Caractérisation du saphir

La surface de la contre-face (le saphir) a également été caractérisée. Plusieurs mesures ont été réalisées à l'aide du Talysurf, avec un objectif 20×, sur les deux faces de saphir. Cet objectif permet de mesurer des surfaces de 0,900 mm × 0,900 mm.

La figure 31 présente les résultats obtenus sur les deux faces du saphir, ainsi que les profils de rugosité et d'ondulation correspondants. On constate que les deux faces présentent une surface très lisse, avec une rugosité nanométrique et une planéité quasi parfaite, ce qui montre l'excellente qualité de surface du saphir.

Ainsi, pendant les essais, c'est la topographie de l'échantillon rugueux (qu'il soit en graphite ou en SiC) qui dominera le comportement du contact, plutôt que celle du saphir.

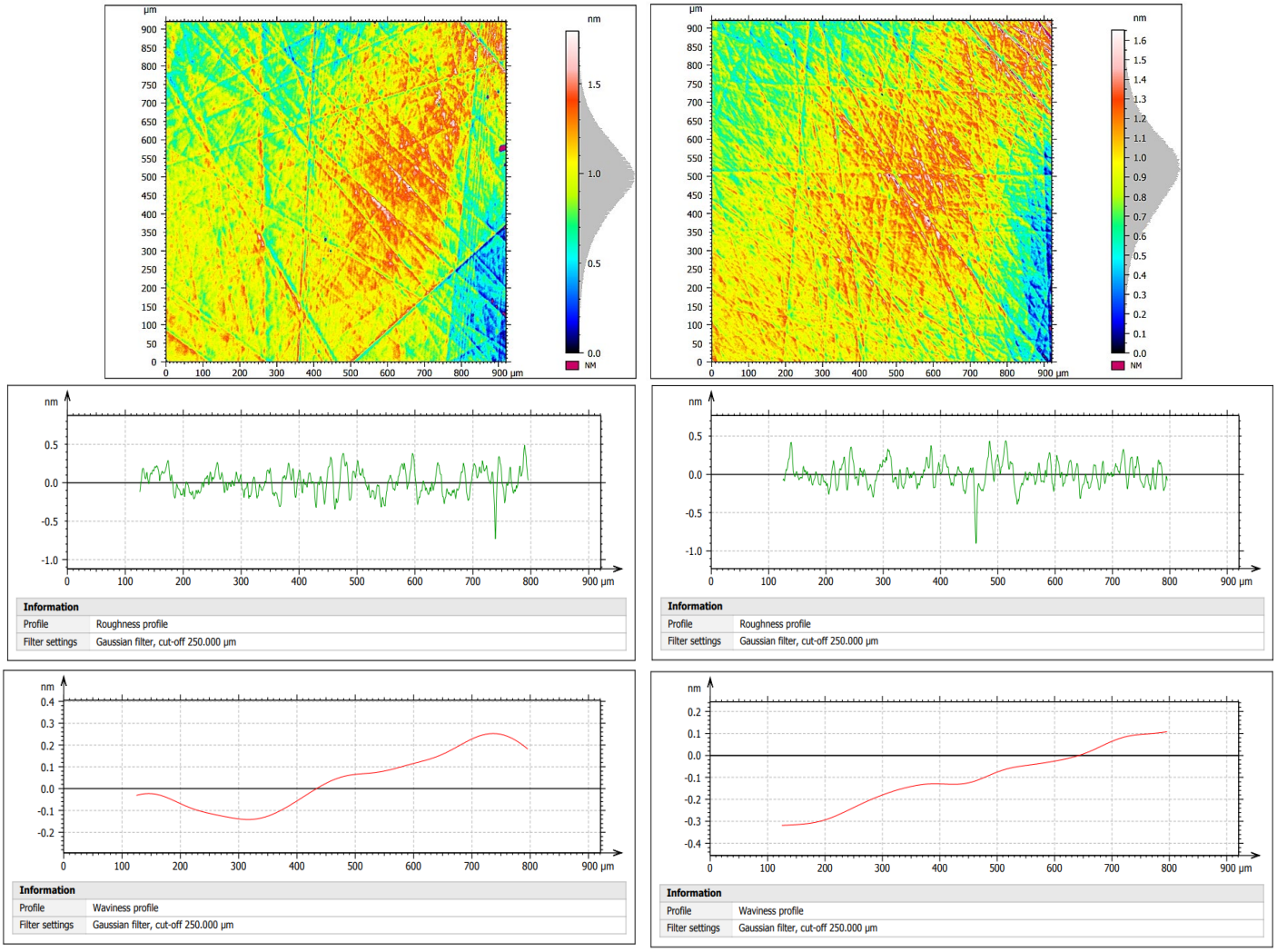


Figure 31: Images Talysurf et profils de rugosité et d'ondulation des deux faces du saphir (face 1 à gauche et face 2 à droite)

3.4 Dénomination et classement des échantillons

Afin de comparer l'influence de la direction et de la granulométrie du polissage sur la morphologie des surfaces, les échantillons en graphite ont été regroupés en deux catégories principales. La première correspond au polissage anisotrope, réalisé soit de manière directionnelle, soit circulaire, avec différentes tailles de grains abrasifs (P120, P180, P360 et P400). La seconde correspond au polissage isotrope, effectué avec des grains plus fins (P600 à P1200). Cette classification permet d'évaluer l'effet de la granulométrie et de l'orientation des stries sur l'état de surface, notamment en termes de paramètres de rugosité et d'ondulation.

Le tableau suivant synthétise la classification des échantillons de graphite, numérotés de G1 à G8, la surface brute non polie étant désignée sous le nom Graphite_brut. Les échantillons ayant été polis avec un même grain portent le même numéro, la différence étant précisée par l'orientation des stries : **dir** pour directionnelles et **circ** pour circonférentielles.

	Surfaces anisotropes					
Grain de polissage	**P120** (125 µm)	**P120** (125 µm)	**P180** (82 µm)	**P180** (82 µm)	**P360** (40 µm)	**P400** (35 µm)
Nomination échantillon	**G1_dir**	**G1_circ**	**G2_dir**	**G2_circ**	**G3_circ**	**G4_dir**

Surfaces isotropes			
P600 (26 µm)	**P800** (21 µm)	**P1000** (18 µm)	**P1200** (15 µm)
G5	**G6**	**G7**	**G8**

Tableau 8: Classification des échantillons de graphite

Les surfaces SiC ont aussi été classifiées selon la taille des grains abrasifs utilisées lors du polissage. Cette classification, allant de 30 µm à 1 µm, correspond aux échantillons numérotés de SiC1 à SiC8, du polissage grossier (SiC1) au polissage fin à 1 µm (SiC8). Étant donné la dureté du carbure de silicium et la difficulté d'enlever de la matière, le polissage a été réalisé de manière à obtenir un lissage aussi isotrope que possible.

	Surfaces isotropes							
Grain de polissage	**D1** (30 µm)	**D2** (20 µm)	**D3** (15 µm)	**D4** (9 µm)	**D5** (6 µm)	**D6** (3 µm)	**D7** (1,5 µm)	**D8** (1 µm)
Nomination échantillon	**SiC1**	**SiC2**	**SiC3**	**SiC4**	**SiC5**	**SiC6**	**SiC7**	**SiC8**

Tableau 9: Classification des échantillons de SiC

3.5 Analyse des résultats de mesure

3.5.1 Rugosité

L'un des objectifs de cette étude est de disposer de données suffisantes pour caractériser la micro-géométrie des surfaces. Pour ce faire, plusieurs paramètres de rugosité, présentés dans le chapitre 1, ont été retenus à partir des mesures de Talysurf :

- ***Sa*** : la rugosité arithmétique moyenne, représentant la moyenne absolue des écarts de hauteur par rapport au plan moyen ;
- ***Sq*** : l'écart-type de la rugosité, qui traduit l'amplitude globale des hauteurs ;
- ***Sz*** : la hauteur maximale des irrégularités, correspondant à la différence entre le pic le plus élevé et le creux le plus profond ;
- ***Ssk*** : le paramètre d'asymétrie, qui renseigne sur la dissymétrie de la distribution des hauteurs ;
- ***Sku*** : le paramètre d'étalement (kurtosis), qui caractérise la concentration ou la dispersion des hauteurs autour de la valeur moyenne ;
- ***Sal*** : la longueur d'autocorrélation, qui décrit la taille caractéristique de la texture de surface.

Le choix de ces paramètres de rugosité repose sur leur pertinence pour classer nos surfaces selon leur niveau de rugosité et décrire leur micro-géométrie. Ces paramètres sont également adaptés au cadre de cette étude, qui porte sur un contact statique sans usure ni frottement.

Pour chaque paramètre, les valeurs présentées correspondent à la moyenne des mesures effectuées par le Talysurf dans dix-huit zones pour le graphite et dans huit zones pour le SiC (Fig.25). Les barres d'incertitude représentent l'écart type calculé à partir de ces mesures.

Les courbes dans les figures 32, 33 et 34 présentent les paramètres d'amplitude de rugosité **(***Sa, Sq et Sz***)** pour les surfaces brutes et polies des deux matériaux, le graphite à gauche et le carbure de silicium à droite. On constate une diminution nette de l'amplitude de rugosité avec la réduction de la taille des grains de polissage. Pour les deux matériaux, l'utilisation de grains grossiers engendre des surfaces avec des irrégularités marquées, se traduisant par des valeurs élevées des paramètres *Sa*, *Sq* et *Sz*. En revanche, une granulométrie plus fine conduit à des surfaces plus homogènes et régulières : plus le grain est fin, plus la surface obtenue est lisse.

Pour le graphite, les quatre premiers grains de polissage (G1_dir, G1_circ, G2_dir et G2_circ) ont modifié de manière significative l'état de surface brut. Comme l'ont déjà montré les images obtenues avec le Polytec, ces abrasifs ont généré des stries marquées sur la surface. Cette texturation a conduit à une augmentation des paramètres d'amplitude de rugosité par rapport à la surface brute. Les derniers échantillons (G5 à G8), polis avec les grains les plus fins, présentent des valeurs plus faibles de *Sa*, *Sq* et *Sz*, indiquant une surface isotrope et plus lisse que l'état brut ou que les polis initiaux.

Concernant le carbure de silicium, les résultats mettent également en évidence une diminution nette de la rugosité en fonction de la granulométrie des abrasifs. Chaque surface polie avec une granulométrie plus fine présente ainsi une rugosité inférieure à celle obtenue avec un abrasif plus grossier. Toutefois, le carbure de silicium, matériau beaucoup plus dur et résistant que le graphite, présente dès l'état brut des valeurs de rugosité relativement faibles (*Sa* = 0,44 µm; *Sz* = 11 µm) et réagit de manière plus régulière au polissage. Les surfaces deviennent rapidement homogènes dès l'utilisation des premiers abrasifs, avec des rugosités qui se stabilisent à des niveaux très bas (< 0,2 µm pour Sa).

Ces résultats confirment que le polissage par abrasifs de différentes granulométries permet de maîtriser les paramètres de rugosité et de produire des surfaces rugueuses aux amplitudes contrôlées.

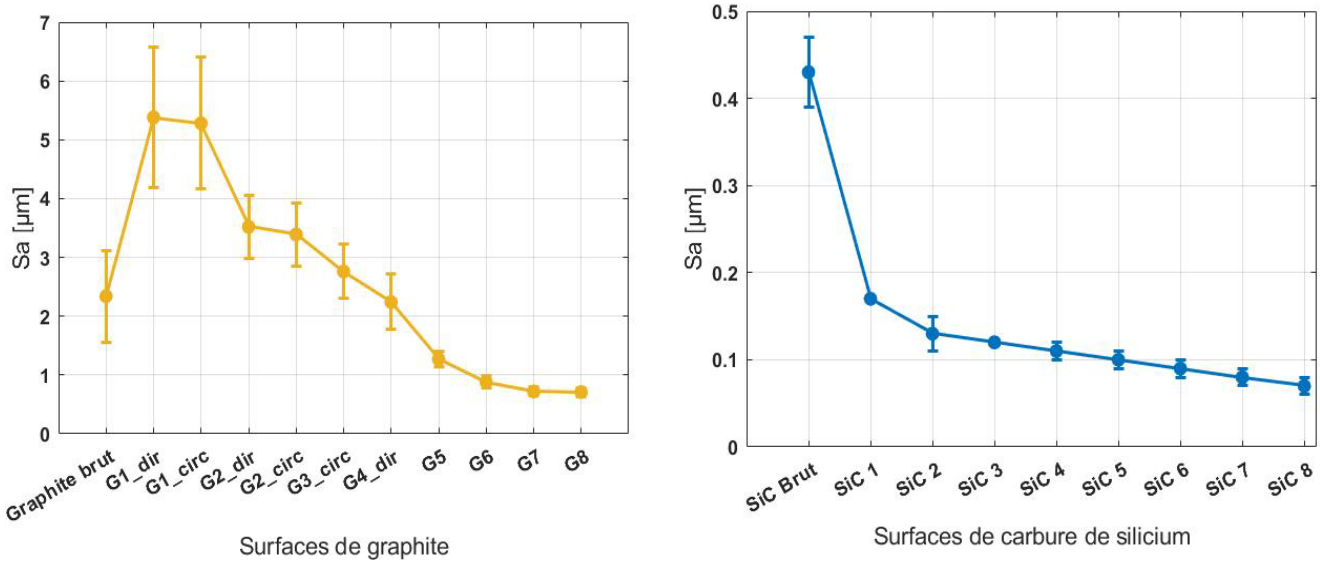


Figure 32: Paramètres d'amplitude de rugosité (Sa) : surfaces graphite et surfaces SiC

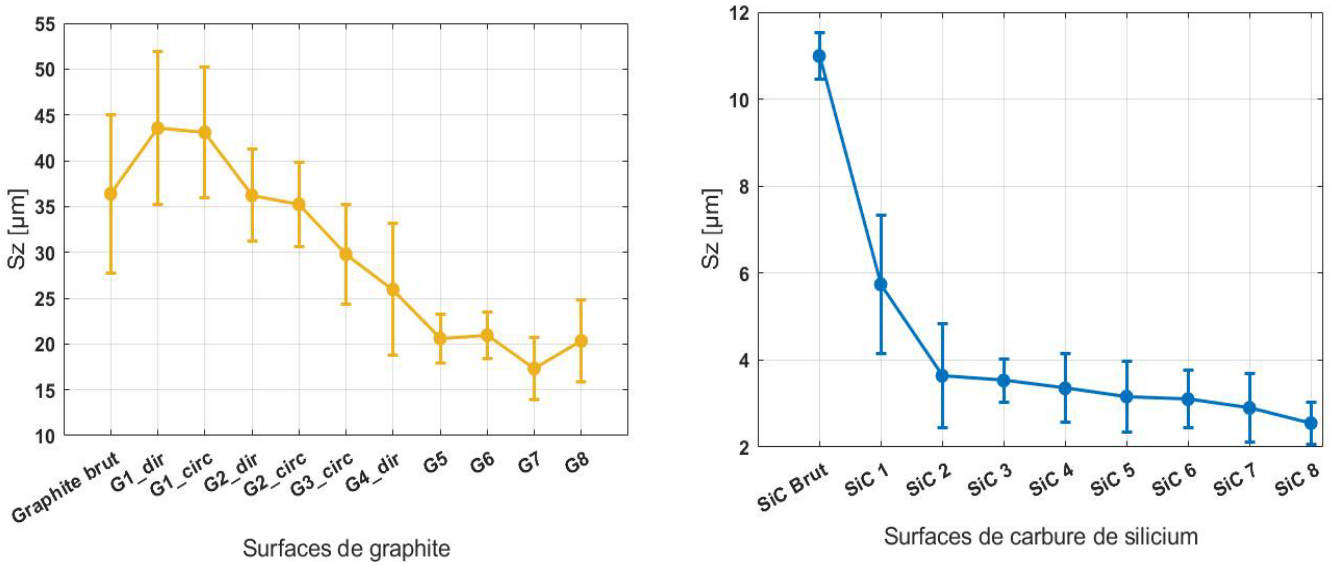


Figure 33: Paramètre d'amplitude de rugosité (Sz) : surfaces graphite et surfaces SiC

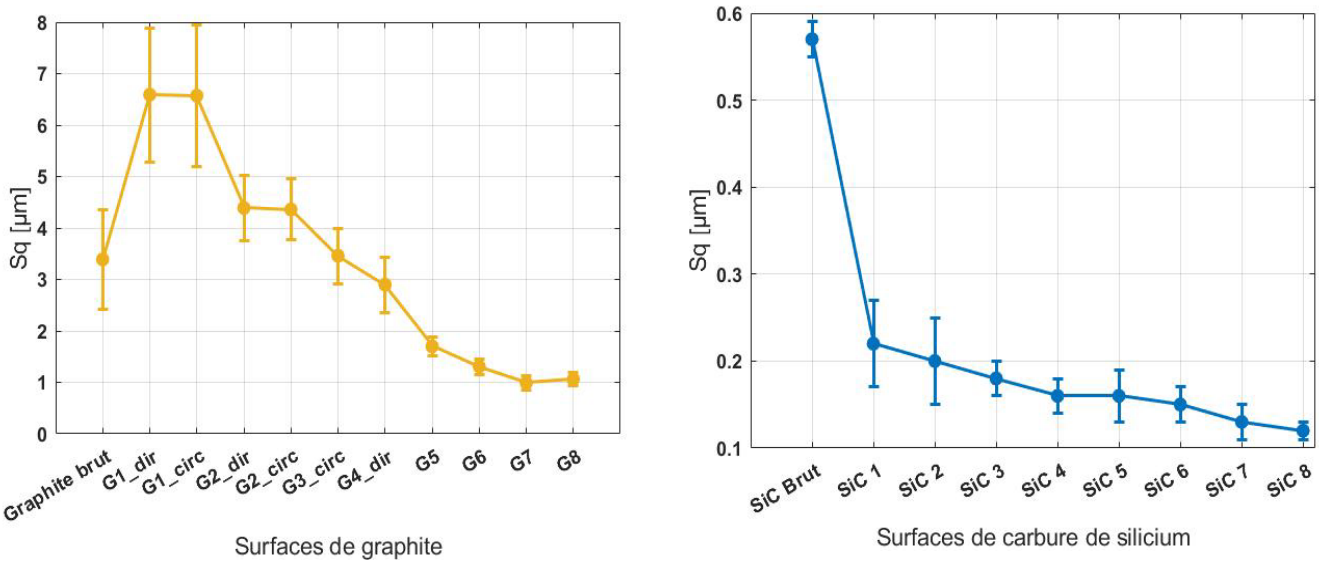


Figure 34: Paramètre d'amplitude de rugosité (Sq) : surfaces graphite et surfaces SiC

L'analyse des paramètres de forme *Ssk* et *Sku* (Fig.35 et Fig.36) apporte des informations complémentaires sur la distribution des hauteurs de surface. Concernant le graphite, la surface présente globalement une asymétrie négative ($Ssk < 0$), ce qui implique que la surface présente plus de vallées que de pics. Les valeurs se rapprochent de zéro pour les surfaces (G1_dir, G1_circ, G2_dir, G2_circ et G3_circ), indiquant une surface plus symétrique dans la répartition des hauteurs. Ces résultats sont corrélés avec le paramètre d'étalement *Sku*, voisin de 3 pour ces échantillons, traduisant des distributions proches d'une surface gaussienne.

Toutefois, *Sku* augmente nettement pour certains échantillons (G6–G8), ce qui indique que les surfaces ne présentent que très peu de pics pointus et de vallées étroites : la distribution des hauteurs est resserrée autour de la valeur médiane. Les surfaces SiC présentent également un *Ssk* qui oscille entre valeurs négatives et proches de zéro selon la granulométrie, montrant une alternance entre surfaces dominées par des creux et surfaces plus équilibrées. En revanche, *Sku* présente des variations plus marquées, avec des pics atteignant des valeurs très élevées (> 80 pour SiC6), ce qui traduit la présence ponctuelle de pics ou de creux profonds sur certaines surfaces.

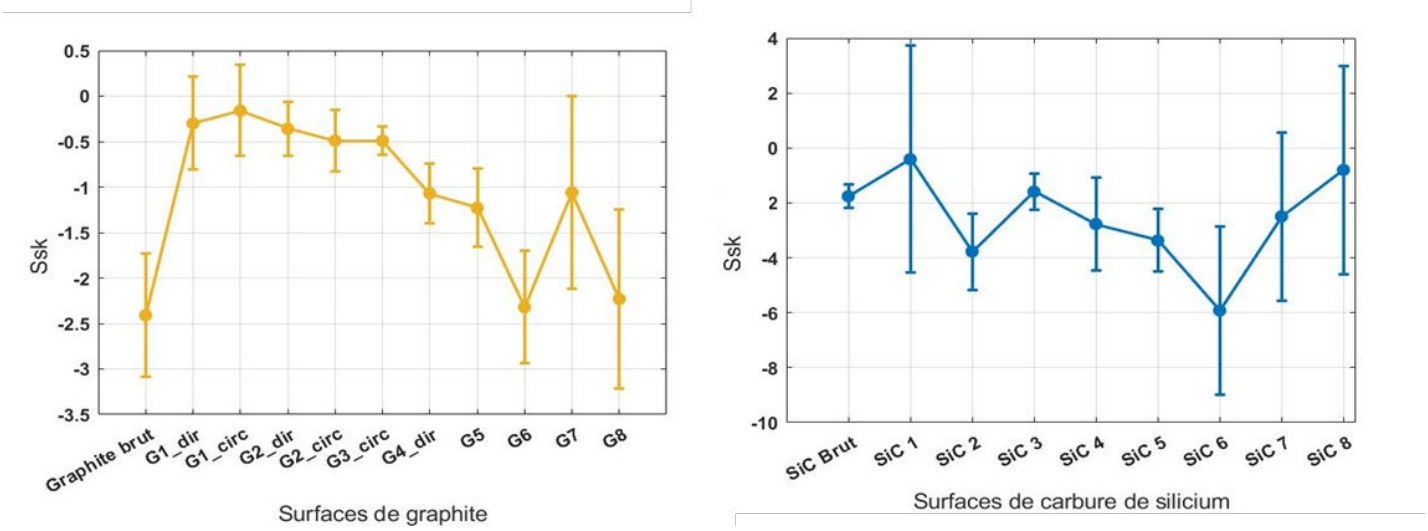


Figure 35: Paramètre d'asymétrie (Ssk) : surfaces graphite et surfaces SiC

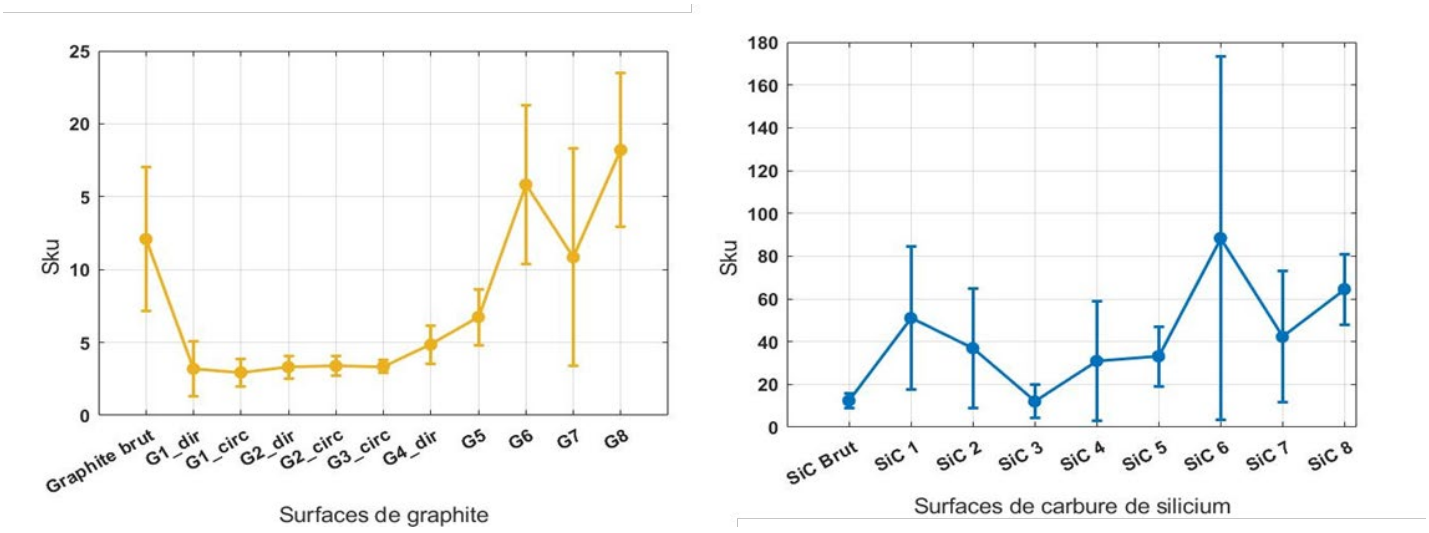


Figure 36: Paramètre d'étalement (*Sku*): surfaces graphite et surfaces SiC

Les paramètres spatiaux, et notamment le *Sal*, jouent également un rôle essentiel dans la caractérisation de la texture de surface puisqu'ils renseignent sur la longueur de corrélation des structures. La comparaison des valeurs de *Sal* (Fig.37) entre le graphite et le carbure de silicium met en évidence des évolutions similaires mais d'amplitude différente. Pour le graphite, la surface brute et celles polies avec des abrasifs de gros grains présentent des valeurs de Sal élevées (> 20 µm), caractéristiques de motifs de rugosité de grande étendue spatiale et une organisation de grande dimension. Lorsque la granulométrie diminue, le *Sal* décroît progressivement pour atteindre environ 10 µm avec les abrasifs les plus fins, traduisant une surface plus isotrope et mieux structurée. En revanche, pour le carbure de silicium, la valeur initiale de *Sal* est déjà plus faible (surface SiC brute) et chute rapidement dès les premiers polissages (SiC1–SiC3), pour se stabiliser autour de 7–8 µm, ce qui révèle des motifs de rugosité d'étendue spatiale moins importante et une surface très homogène. Ainsi, bien que les deux matériaux suivent une tendance générale comparable pour le *Sal*, le graphite conserve des longueurs de corrélation plus élevées, tandis que le carbure de silicium atteint plus rapidement des surfaces homogènes caractérisées par des structures de plus petite dimension.

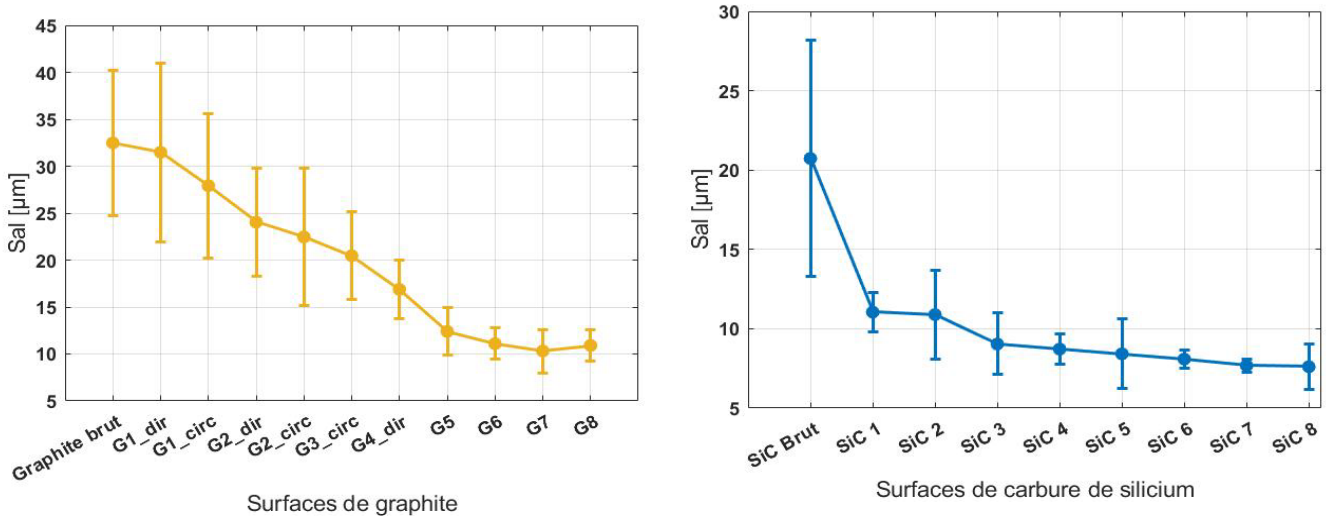


Figure 37: Longueur d'autocorrélation (Sal) : surfaces graphite et surfaces SiC

L'ensemble des mesures de rugosité met en évidence que le polissage par abrasifs de granulométries variées ne se limite pas à réduire la rugosité, mais permet surtout de générer une large gamme de surfaces différenciées, caractérisés par des amplitudes, des distributions statistiques et des structures spatiales variées et bien contrôlées.

3.5.2 Ondulation

La caractérisation d'une surface ne peut se limiter à l'étude de la rugosité, qui décrit principalement les irrégularités fines de l'ordre du micromètre. La prise en compte de l'ondulation est également nécessaire, car elle concerne des irrégularités de plus grande longueur d'onde, situées entre la rugosité et les défauts de forme. Dans cette étude, l'amplitude moyenne d'ondulation a été déterminée pour chaque surface. Le calcul a été réalisé à partir des profils extraits des mesures effectuées avec le Polytec, en appliquant un filtre gaussien qui ne laisse passer que les composantes de grande longueur d'onde, et par la méthode crête à crête comme décrit dans le paragraphe 3.2.2 « *Méthodes de mesure de la rugosité et de l'ondulation* ».

La figure 38 présente l'amplitude moyenne d'ondulation mesurée sur les dix surfaces polies et la surface brute de graphite, chacune ayant été polie avec une taille de grain différente. Les résultats montrent une large dispersion des amplitudes, comprises entre environ 7 µm et 48 µm. On constate que les surfaces polies avec le plus gros grain (G1-dir et G1-circ) présentent des ondulations particulièrement marquées, tandis que la surface brute affiche l'une des amplitudes les plus faibles. En revanche, cette variation n'est pas corrélée à la taille du grain de polissage: plusieurs surfaces polies avec des grains différents présentent des amplitudes similaires, alors que d'autres montrent des écarts importants malgré des conditions de polissage proches. Ces résultats indiquent que l'ondulation du graphite dépend non seulement de la taille du grain abrasif, mais aussi d'autres facteurs tels que l'hétérogénéité du matériau. Elle est difficilement maîtrisable par le choix du grain de polissage.

La figure 39, correspondant au carbure de silicium, présente des amplitudes moyennes d'ondulation beaucoup plus faibles que celles mesurées sur le graphite, ce qui s'explique par la dureté élevée du matériau ainsi que par sa structure cristalline homogène. On observe néanmoins des très légères variations d'une surface à l'autre. Toutefois, ces fluctuations ne suivent aucune tendance générale claire et ne semblent pas directement corrélées à la taille du grain de polissage.

En résumé, le polissage du graphite et du SiC avec des abrasifs de granulométries variées permet de générer des états de surface contrastés, pour lesquels les paramètres de rugosité sont maîtrisés et contrôlés, tandis que l'ondulation reste non maîtrisable par ce procédé.

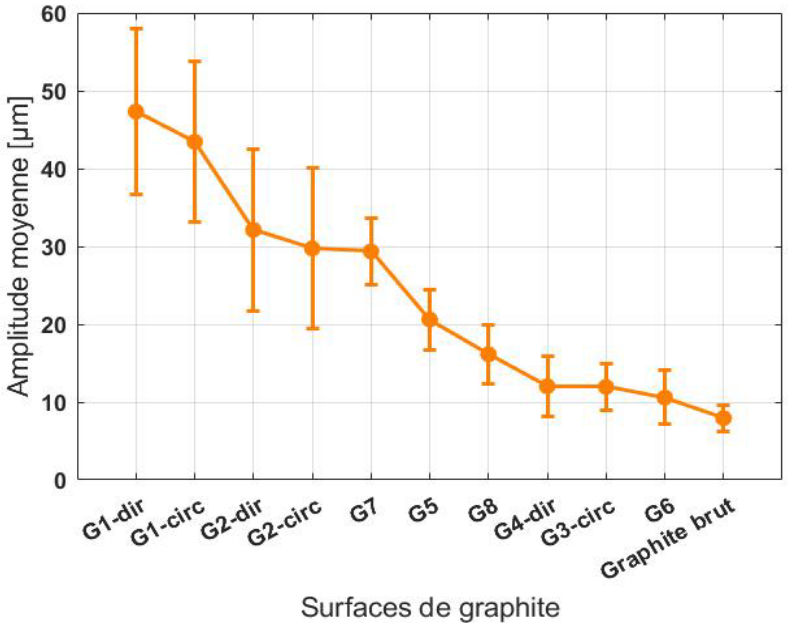


Figure 38: Valeur moyenne de l'amplitude maximale d'ondulation Wt des surfaces de graphite

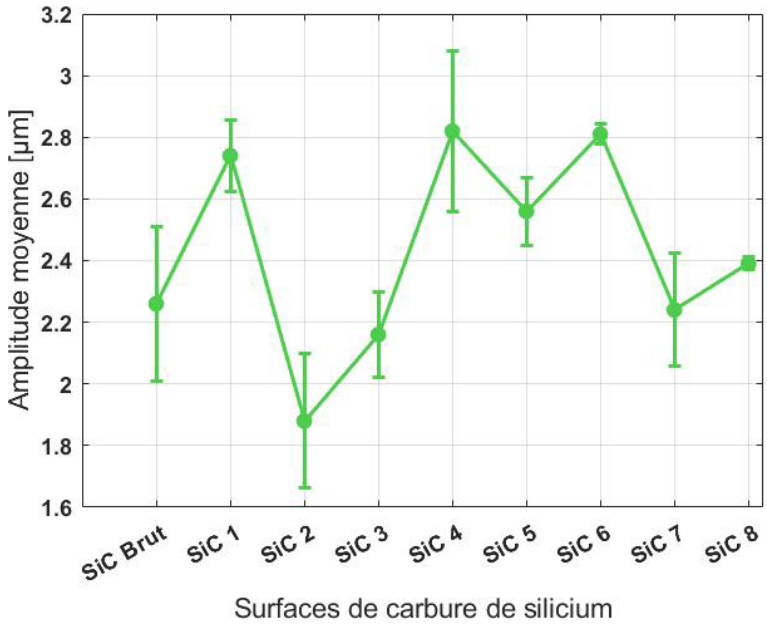


Figure 39: Valeur moyenne de l'amplitude maximale d'ondulation Wt des surfaces de SiC

Une autre méthode a été utilisée pour comparer les profils d'ondulation, la transformée de Fourier rapide (FFT)[3]. Cette approche permet d'analyser la répartition des amplitudes en fonction des composantes fréquentielles, c'est-à-dire selon les différentes longueurs d'onde présentes sur les profils mesurés.

[3] Le critère de Nyquist est respecté, puisque le pas d'échantillonnage de 28 µm conduit à une fréquence de Nyquist largement supérieure aux fréquences d'ondulation considérées (1,25 mm^{-1}), garantissant ainsi l'absence d'aliasing.

Les figures 40 et 41 présentent les spectres de Fourier des profils d'ondulation radiaux (R1, R2, R3, R4) et circonférentiels (C1, C2, C3) pour deux types de surfaces polies de graphite : une surface anisotrope présentant des stries directionnelles (échantillon G1_dir) et une surface isotrope (échantillon G8).

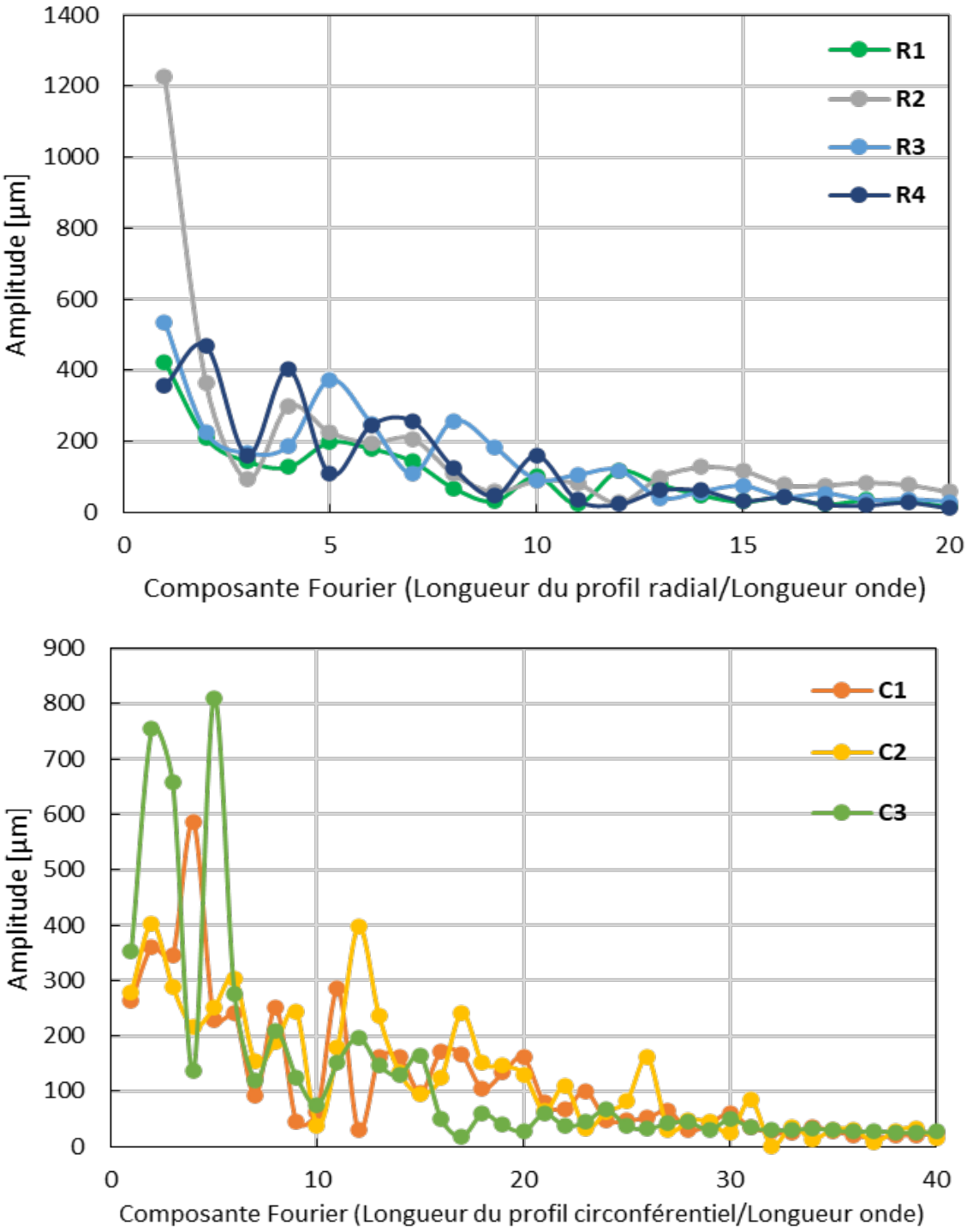


Figure 40: Spectres de Fourier des profils d'ondulation radiaux et circonférentiels de la surface G1_dir (surface anisotrope)

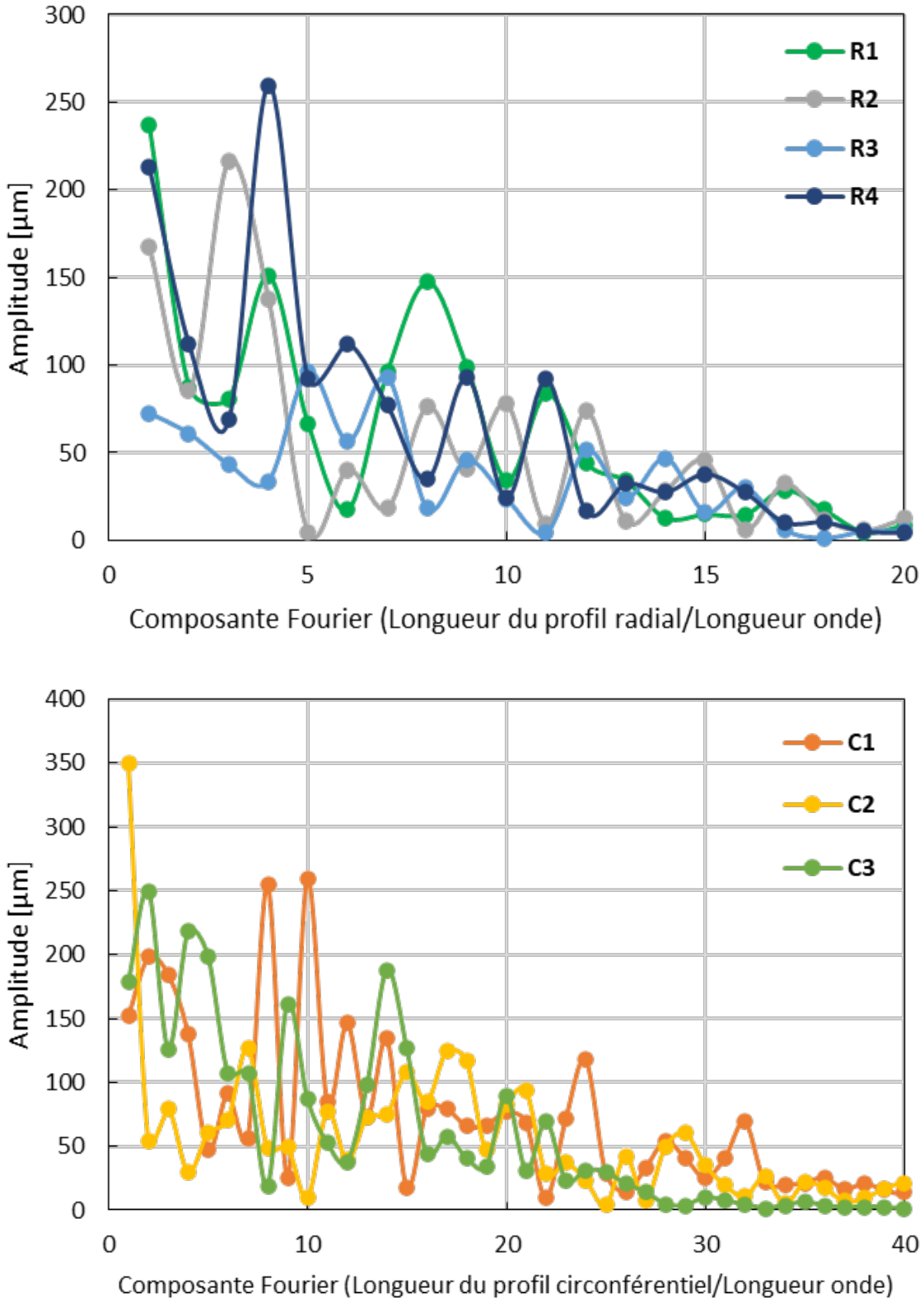


Figure 41: Spectres de Fourier des profils d'ondulation radiaux et circonférentiels de la surface G8 (surface isotrope)

L'analyse fréquentielle (FFT) met clairement en évidence la différence de comportement spectral entre les deux types de surfaces de graphite. Pour la surface G1_dir anisotrope, les amplitudes sont nettement plus élevées aux basses fréquences (longues longueurs d'onde), indiquant la présence d'ondulations marquées et orientées selon une direction privilégiée. À l'inverse, la surface G8 isotrope présente une répartition plus homogène des amplitudes sur l'ensemble du spectre fréquentiel, avec moins de pics marqués. Cela traduit une absence de direction dominante et une distribution aléatoire de la topographie, caractéristiques d'une texture isotrope.

Après la comparaison des spectres fréquentiels des deux surfaces de graphite polies de manière différente, il est également intéressant de les confronter à ceux obtenus sur une surface en carbure de silicium (SiC1). La figure 42 présente les spectres de Fourier des profils d'ondulation radiaux et circonférentiels mesurés sur cette surface. On observe que, contrairement au graphite, les amplitudes mesurées sur la surface SiC1 sont beaucoup plus faibles, traduisant une surface plus lisse et présentant des ondulations de faible amplitude. Les composantes fréquentielles se répartissent de manière relativement homogène, indiquant une texture quasi isotrope, sans direction privilégiée marquée. Cette différence de comportement spectral met en évidence l'homogénéité et la plus grande régularité de la surface en SiC, comparée à celle du graphite.

En conclusion, la préparation et la caractérisation des échantillons en graphite et en carbure de silicium ont permis de générer une variété d'états de surface différenciés. Les mesures ont montré que la rugosité peut être maîtrisée grâce au choix de la granulométrie des disques de polissage, tandis que l'ondulation reste moins contrôlable et dépend fortement du matériau. Le graphite présente une variabilité de surface plus marquée, car le polissage de ce matériau conduit à une large diversité d'états de surface selon la granulométrie utilisée. Cette sensibilité s'explique par sa structure poreuse et sa nature tendre, qui réagit fortement aux conditions de polissage. À l'inverse, le carbure de silicium atteint rapidement des surfaces homogènes et stables, en raison de la dureté élevée et de la structure cristalline uniforme du matériau.

Ces résultats fournissent une base expérimentale essentielle : un panel de surfaces représentatives destiné à analyser, à l'aide du banc expérimental *MIXER*, l'influence de la micro-géométrie des surfaces sur le comportement macroscopique. Les échantillons de SiC, présentant des ondulations similaires, permettront d'isoler l'influence des rugosités de surface. Au contraire, les échantillons de graphite montreront l'impact de variations combinées de rugosités et d'ondulations. Le chapitre suivant sera consacré à l'analyse des résultats des essais expérimentaux.

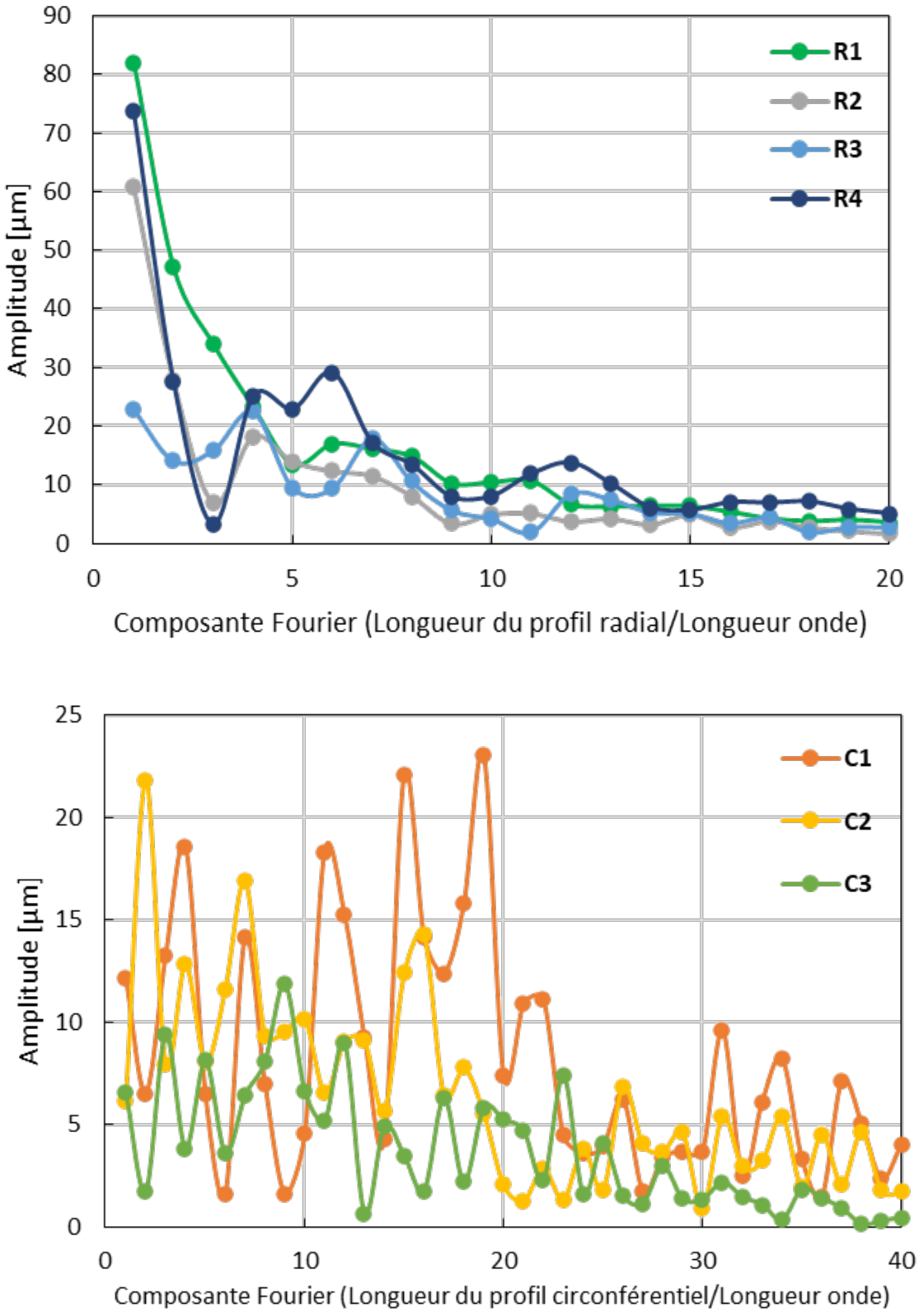


Figure 42: Spectres de Fourier des profils d'ondulation radiaux et circonférentiels de la surface SiC1

CHAPITRE 4

ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

4. Analyse des résultats expérimentaux

L'ensemble des essais présentés dans ce chapitre a été réalisé sans mouvement relatif entre les surfaces, afin de se concentrer sur le comportement statique du contact. Ce choix est motivé par une volonté de mieux comprendre les phénomènes fondamentaux qui se produisent dans des conditions stationnaires, avant d'aborder les effets plus complexes liés au régime dynamique.

Cette approche vise à isoler ces phénomènes liés à la géométrie, à l'état de surface et aux propriétés des matériaux des échantillons, sans interférence des effets dynamiques accompagnés d'une éventuelle usure de l'échantillon. La réalisation des essais en conditions stationnaires doit permettre une analyse fine, maîtrisée et reproductible des effets géométriques et mécaniques associés à la topographie des surfaces.

Sans mouvement relatif, on supprime également les couplages dynamiques thermo-tribologiques qui peuvent masquer ou modifier les phénomènes purement mécaniques observés au niveau du contact. Cette démarche permet donc d'établir une base expérimentale solide pour la compréhension du comportement du système « échantillon-disque saphir » dans des conditions simplifiées et bien contrôlées.

Dans la littérature plusieurs travaux ont adopté la même démarche, considérant que l'analyse statique constitue une étape essentielle pour isoler les mécanismes mécaniques de base avant l'introduction des effets dynamiques. Par exemple, Li et al. [59] ont étudié la friction à l'échelle microscopique en régime statique afin d'identifier les contributions intrinsèques de surface avant l'apparition du glissement. De même, Liang et al. [60] ont montré expérimentalement que la caractérisation du contact sous chargement statique permet une compréhension plus précise de la relation entre la force de friction et la surface réelle de contact.

Ce chapitre présente donc une série d'essais visant à quantifier l'influence des différentes topographies de surface sur le débit de fuite et la distance au contact. Les résultats obtenus mettent en évidence les corrélations entre les paramètres de rugosité et d'ondulation et les grandeurs macroscopiques mesurées.

4.1 Procédure expérimentale

Les essais ont été réalisés sur les deux matériaux : le carbure de silicium (SiC) et le graphite. Pour chacun d'eux, plusieurs échantillons, décrits dans le chapitre précédent, présentant des états de surface différents, ont été testés sous différents chargements.

La procédure expérimentale adoptée consiste à augmenter progressivement la charge appliquée sur la surface de l'échantillon en fermant de manière contrôlée l'électrovanne qui régule la pression dans la chambre de charge (Fig.16, chapitre 2). Pour chaque palier de charge, les mesures suivantes ont été effectuées :

- le débit de fuite à travers l'échantillon,
- la distance à la surface du saphir : Zmin, Zmax et Zmoyen,
- la pression d'air à l'entrée du contact.

L'interface de contact a été testée pour deux pressions d'alimentation en air comprimé pour chaque matériau. Les essais réalisés sur les échantillons en graphite ont été menés sous des pressions relatives d'alimentation du contact de 1 bar et 2 bar, sur un total de onze échantillons présentant des topographies de surface différentes (surface brute et surfaces polies). Les essais effectués sur les échantillons en carbure de silicium (SiC) ont été conduits dans des conditions expérimentales similaires, avec des pressions relatives d'alimentation de 1,5 bar et 2 bar, sur un total de neuf échantillons. Concernant les essais réalisés sur les échantillons en SiC, la pression d'alimentation a été augmentée de 1 bar à 1,5 bar afin d'éviter le bruit provoqué par l'instabilité pneumatique, dit « Hammer noise[4] », observé lors des essais SiC effectués à 1 bar.

Les valeurs de débit de fuite et de la distance *Zmoyen* prises en compte correspondent aux conditions pour lesquelles la force exercée par l'air (somme de la force normale au centre de l'échantillon et de la force du film mince d'air) reste inférieure à la force totale appliquée sur la surface. Ce critère garantit la cohérence physique des résultats en écartant les points où la poussée du fluide dépasse la charge imposée. Par conséquent, pour les essais réalisés à des pressions d'alimentation du contact de 1 et 1,5 bar, un nombre plus important de points est

[4] Le bruit Hammer (Hammer noise) correspond à des variations transitoires de pression dans le circuit d'air comprimé alimentant la zone de contact. Ce phénomène, dû à la compressibilité de l'air ainsi qu'aux oscillations et vibrations provoquées par l'écoulement de l'air. Il peut alors perturber les signaux enregistrés par les capteurs de déplacement et les débitmètres, entraînant des bruits parasites et une diminution de la précision des mesures.

conservé. À l'inverse, pour une pression d'alimentation 2 bar, la force exercée par le fluide augmente et dépasse dans un plus grand nombre de points la force totale appliquée, ce qui entraîne l'exclusion d'un nombre plus élevé de mesures au début.

L'enregistrement des données a été réalisé sur une durée de 30 secondes pour chaque palier de charge. Afin de vérifier la reproductibilité des résultats, chaque essai a été répété au moins trois fois.

4.2 Résultats expérimentaux

Dans cette partie, nous présentons les résultats relatifs au débit de fuite ainsi qu'à la distance moyenne entre les deux surfaces Zmoyen en fonction de la charge appliquée, pour les différentes surfaces étudiées de carbure de silicium (SiC) et de graphite.

Ces mesures ont permis de mettre en évidence l'influence de la nature du matériau ainsi que de l'état de surface sur le débit de fuite et la distance Zmoyen . Les erreurs associées aux mesures ont été calculées et présentées en annexe.

4.2.1 Résultats sur les surfaces SiC

4.2.1.1 Évolution du débit en fonction de la force appliquée

Les figures 43 et 44 présentent l'évolution du débit expérimental en fonction de la force appliquée pour différentes surfaces de carbure de silicium (SiC), sous deux pressions relatives d'alimentation de l'interface : $\Delta P = 1{,}5$ bar et $\Delta P = 2$ bar. Chaque courbe correspond à un échantillon de surface SiC (SiC1 à SiC8), comparé à la surface brute (SiC_Brut), sachant que la dénomination des échantillons suit un ordre inverse de la rugosité (SiC i : i élevé = Rugosité faible).

Il apparaît que, pour l'ensemble des essais, le débit de fuite diminue avec l'augmentation de la force appliquée. Les valeurs mesurées varient sur environ deux ordres de grandeur, allant de $8{,}0 \times 10^{-5}$ kg/s pour le débit le plus élevé, observé sur la surface brute, à $3{,}4 \times 10^{-7}$ kg/s pour le débit le plus faible, correspondant à la surface la plus lisse (SiC8). De plus, le débit est directement corrélé à la rugosité des surfaces, plus la surface est rugueuse, plus le débit est élevé. Parallèlement, les échantillons polis avec les grains les plus fins présentent un débit de fuite beaucoup plus faible, et ce dès les faibles charges appliquées.

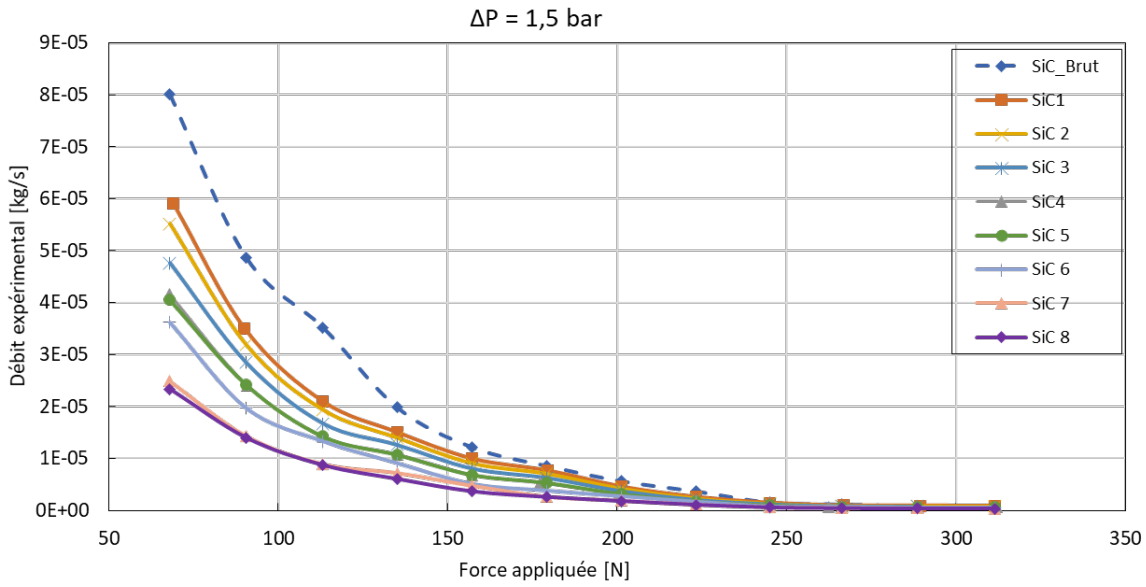


Figure 43: Évolution du débit expérimental en fonction de la force appliquée pour les surfaces SiC (ΔP = 1 bar), (SiC i : i élevé = Rugosité faible)

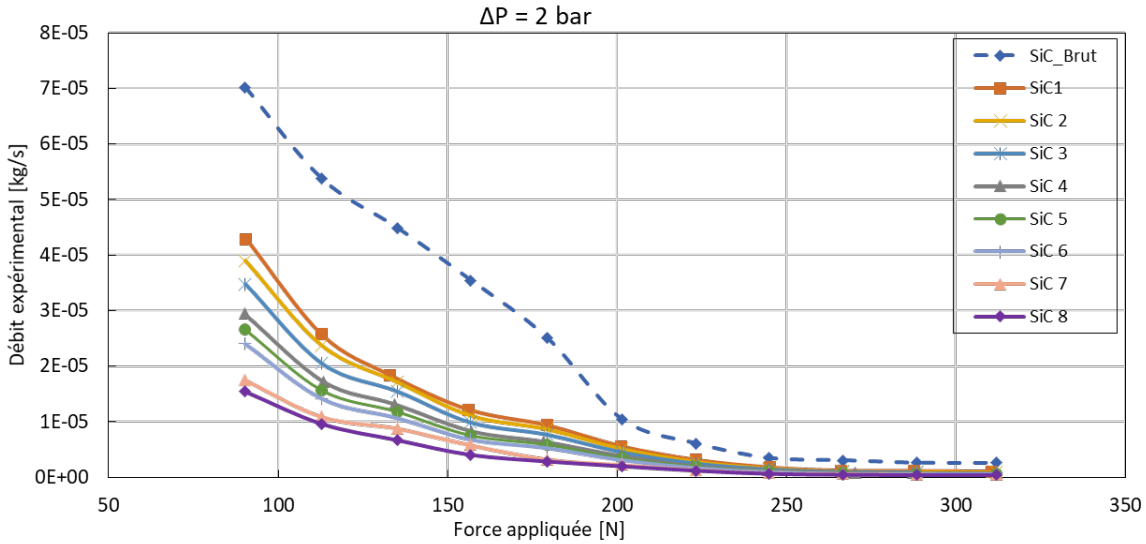


Figure 44: Évolution du débit expérimental en fonction de la force appliquée pour les surfaces SiC (ΔP = 2 bar), (SiC i : i élevé = Rugosité faible)

Lorsqu'on observe la même courbe présentée à la figure 44 avec une réduction d'échelle (Fig.45), on distingue plus clairement les différences de comportement entre les échantillons polis et la surface brute. La surface brute (SiC_Brut) présente un débit de fuite nettement plus élevé, même lorsqu'on s'approche du point de contact, ce qui s'explique par sa rugosité importante, mise en évidence lors de la caractérisation des surfaces. On remarque également que, pour des forces supérieures à 250 N, toutes les courbes tendent à se stabiliser vers des valeurs de débit très faibles. Cette représentation met aussi en évidence que, même à faibles

charges, les surfaces les plus lisses (SiC7 et SiC8) atteignent rapidement un niveau de fuite minimal, tandis que les surfaces plus rugueuses nécessitent une charge plus forte pour obtenir la même étanchéité.

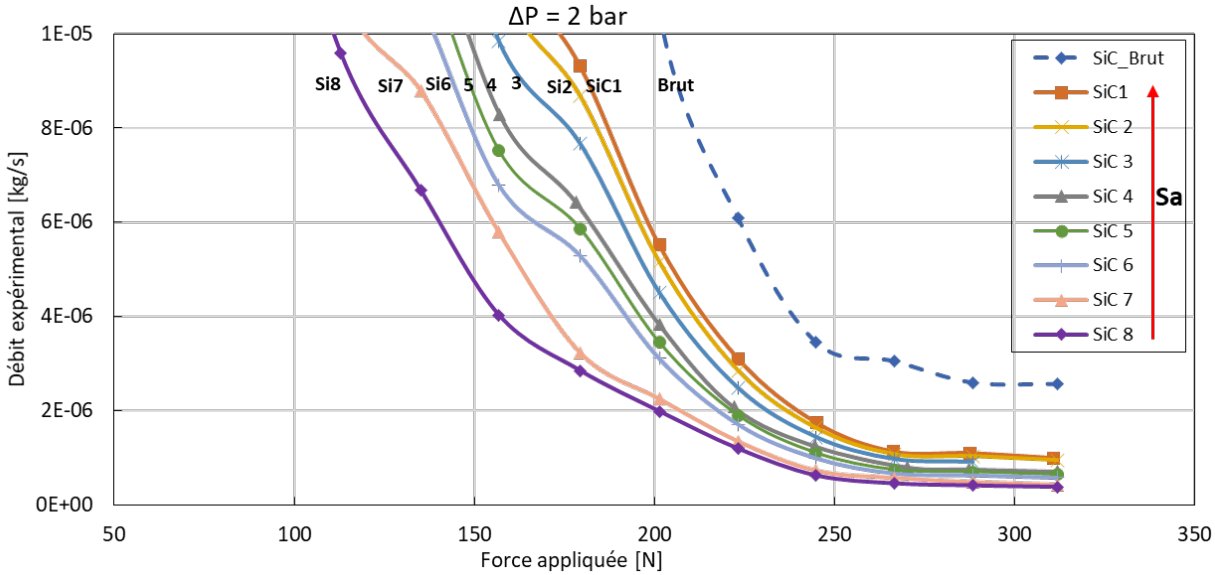


Figure 45: Évolution du débit expérimental en fonction de la force appliquée (ΔP = 2 bar, détail de la figure 47)

On constate également que, pour une charge donnée, les différents échantillons de SiC présentent des débits de fuite du même ordre de grandeur, ce qui traduit une variation limitée des valeurs. Afin d'évaluer cette variation, le rapport entre le débit le plus élevé et le plus faible a été déterminé à chaque niveau de charge. La figure 46 présente l'évolution de ce rapport pour toutes les surfaces SiC : on observe qu'il décroît lorsque la charge augmente, indiquant une réduction progressive de la variation entre échantillons à mesure que l'on s'approche du contact.

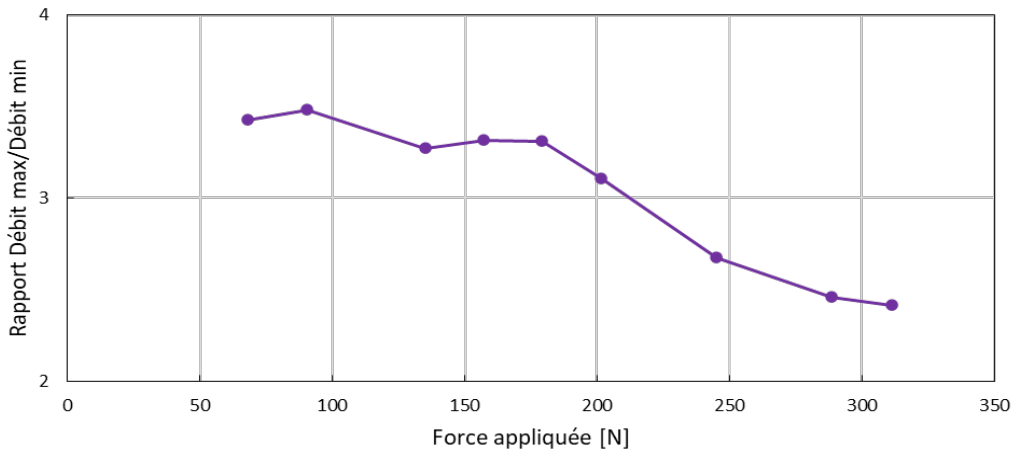


Figure 46: Évolution du rapport (Débit max / min) en fonction de la force appliquée pour toutes les surfaces en SiC

4.2.1.2 Évolution de la distance Zmoyen en fonction de la force appliquée

Les figures 47 et 48 présentent l'évolution de la distance moyenne entre les surfaces en contact, *Zmoyen*=(*Zmax*+*Zmin*)/2 en fonction de la force appliquée.

On observe clairement que *Zmoyen* diminue avec l'augmentation de la force, ce qui s'explique par un rapprochement progressif des deux surfaces sous l'effet de la charge. La surface brute (SiC_Brut) présente toujours des valeurs de *Zmoyen* plus élevées, ce qui reflète un contact moins homogène, tandis que les échantillons polis affichent des valeurs plus faibles de *Zmoyen*, indiquant un contact mieux réparti et plus uniforme. Cette différence, clairement visible sur les courbes à ΔP = 2 bar, s'explique par l'état de surface initial.

En effet, comme déjà montré dans le chapitre 3, paragraphe 3.5 « *Analyse des résultats de mesure* », la surface brute possède des paramètres de rugosité (*Sa*, *Sq*, *Sz*) plus élevés que ceux des surfaces polies, indiquant l'existence de pics et de vallées plus marqués qui augmentent la distance moyenne entre les surfaces. Le polissage, au contraire, atténue ces irrégularités et rend la surface plus lisse et mieux adaptée au contact. Par ailleurs, il est important de noter que tous les échantillons de SiC présentaient des valeurs d'ondulation très proches, ce qui confirme que les différences observées sur le débit proviennent principalement de la rugosité de surface. Ces résultats sont cohérents avec l'évolution du débit en fonction de la force appliquée présentée précédemment. La diminution de *Zmoyen* entraîne une réduction progressive du débit de fuite, car le rapprochement des surfaces limite les chemins d'écoulement de l'air.

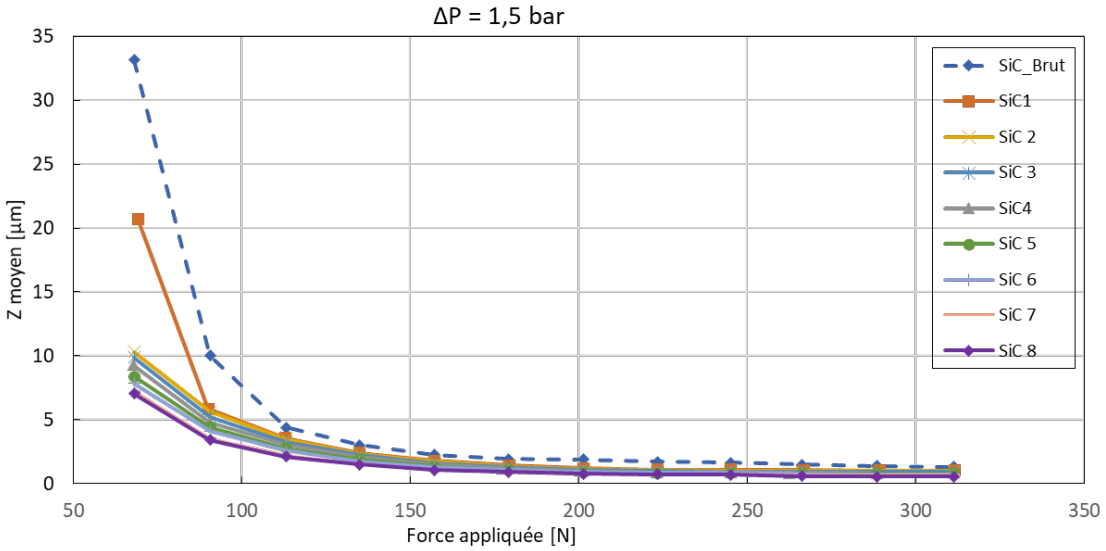


Figure 47: Evolution du Zmoyen en fonction de la force appliquée pour les surfaces SiC (ΔP = 1,5 bar), (SiC i : i élevé = Rugosité faible)

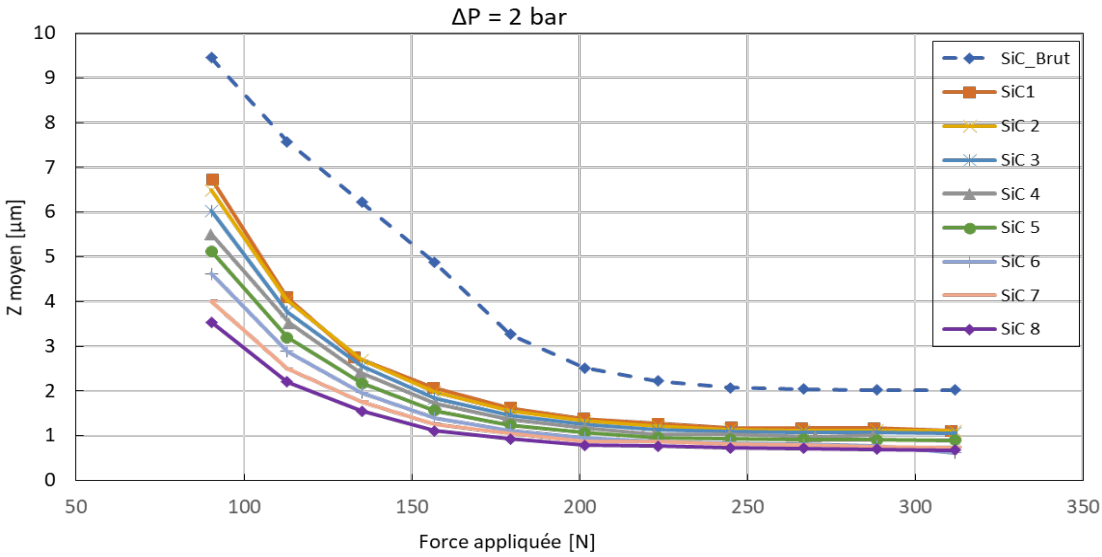


Figure 48: Evolution du *Zmoyen* en fonction de la force appliquée pour les surfaces SiC (ΔP = 2 bar), (SiC i : i élevé = Rugosité faible)

4.2.1.3 Évolution de la distance Zmoyen en fonction de la rugosité

Les figures 49, 50 et 51 présentent la variation de la distance *Zmoyen* en fonction des trois paramètres de rugosité *Sa*, *Sq* et *Sz*, pour trois charges appliquées de 100, 150 et 250N. Les étiquettes numérotées de 1 à 8 font référence respectivement aux échantillons SiC1 à SiC8.

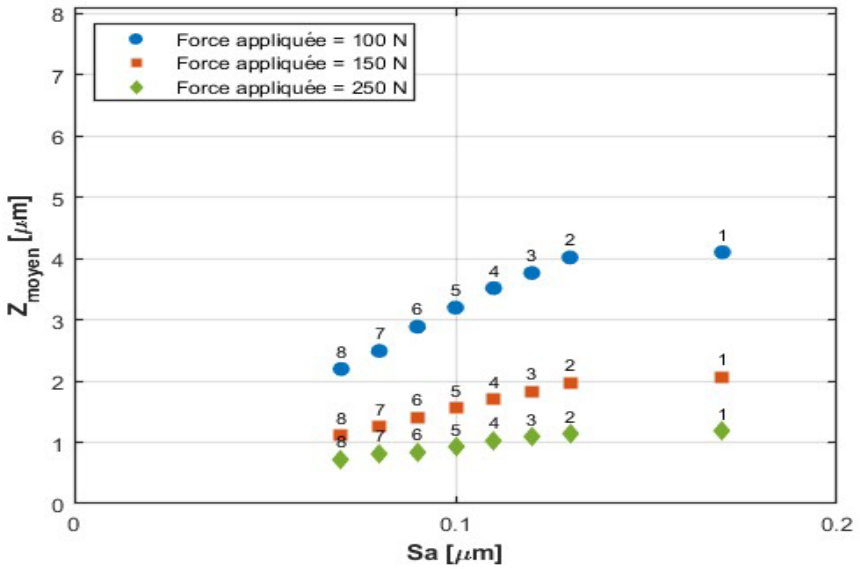


Figure 49: Évolution de la distance Zmoyen en fonction du paramètre de rugosité Sa

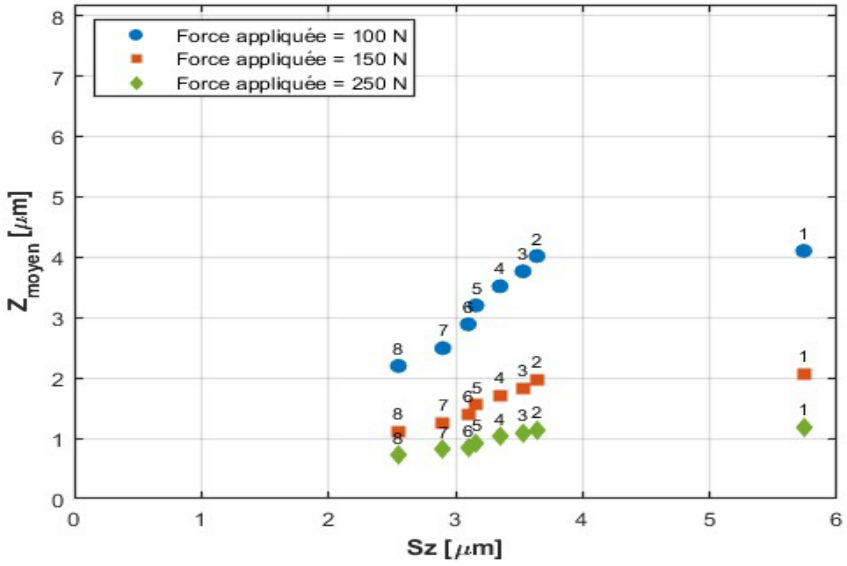


Figure 50: Évolution de la distance Zmoyen en fonction du paramètre de rugosité Sz

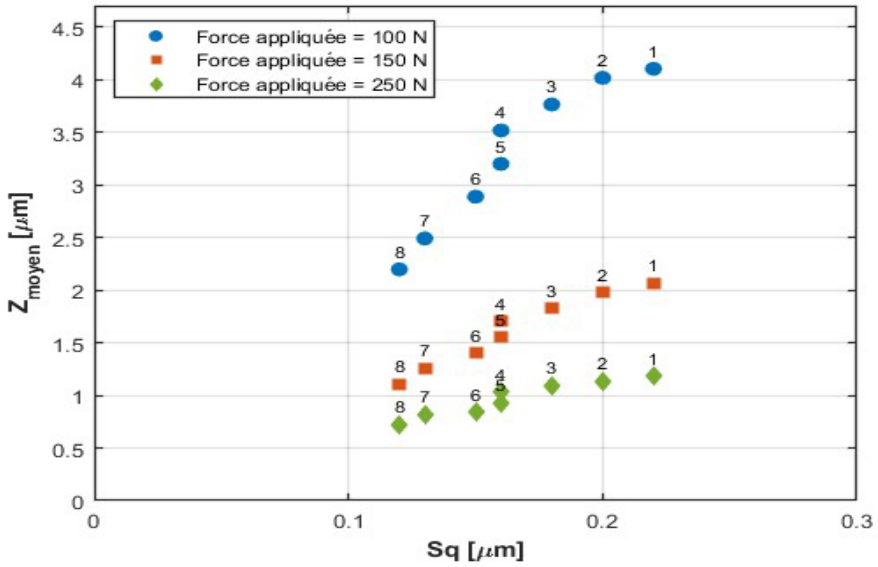


Figure 51: Évolution de la distance Zmoyen en fonction du paramètre de rugosité Sq

Cette représentation montre plus clairement la corrélation entre la rugosité de surface et la distance moyenne entre les surfaces en contact. L'analyse des courbes confirme les tendances observées précédemment. La distance moyenne Zmoyen diminue avec la réduction de la rugosité, quel que soit le paramètre considéré (*Sa*, *Sq*, *Sz*) et la charge appliquée. Les surfaces polies présentent des valeurs de Zmoyen plus faibles que la surface brute, traduisant un contact plus homogène. Ces résultats confirment que la rugosité de surface influence directement la distance au contact pour les surfaces SiC.

4.2.1.4 Évolution de la distance *Zmoyen* en fonction de débit

On peut représenter le débit en fonction de la distance moyenne entre les surfaces, ce qui est physiquement plus représentatif, car ça relie directement l'état des surfaces en contact à l'écoulement de l'air.

Rappelons que les surfaces SiC ont été classées selon leur niveau de rugosité, caractérisé par les paramètres *Sa*, *Sq* et *Sz* . L'indice i correspond à un ordre croissant de rugosité : plus i est faible, plus la surface est rugueuse. On constate que le débit de fuite devient fortement corrélé à la rugosité à partir d'une certaine distance *Zmoyen*, c'est-à-dire lorsque les surfaces s'approchent du contact (Fig.52).

La courbe principale qui représente le débit en fonction de la distance *Zmoyen* pour les surfaces SiC a été décomposée en sous-courbes afin de mieux séparer les différentes zones :

Pour des distances *Zmoyen* >5µm, les courbes des différents échantillons SiC se superposent, indiquant que l'air s'écoule librement entre les surfaces sans interaction avec les aspérités de surface. Dans cette zone, la rugosité, caractérisée par *Sa*, *Sq* et *Sz* , n'influence plus le débit, qui dépend alors uniquement de la distance moyenne séparant les surfaces en contact.

À une distance intermédiaire 2< *Zmoyen* <5 µm, l'influence de la rugosité commence à se manifester. Les surfaces les plus rugueuses, caractérisées par des valeurs plus élevées de Sa, Sq et Sz, présentent des pics et des vallées plus marqués, ce qui modifie légèrement les chemins d'écoulement du fluide.

À faibles distances Zmoyen <1,5 µm, le débit devient fortement dépendant de la rugosité. Les surfaces les plus polies, caractérisées par des valeurs plus faibles de de Sa, Sq et Sz, présentent un débit plus faible. À l'inverse, la surface brute, plus rugueuse, conserve des chemins d'écoulement résiduels liés à sa microtopographie, favorisant une fuite d'air plus importante. Donc, la rugosité de surface a une influence fort lorsque les surfaces SiC sont proches du contact, où la microtopographie contrôle directement le passage du fluide à travers l'interface.

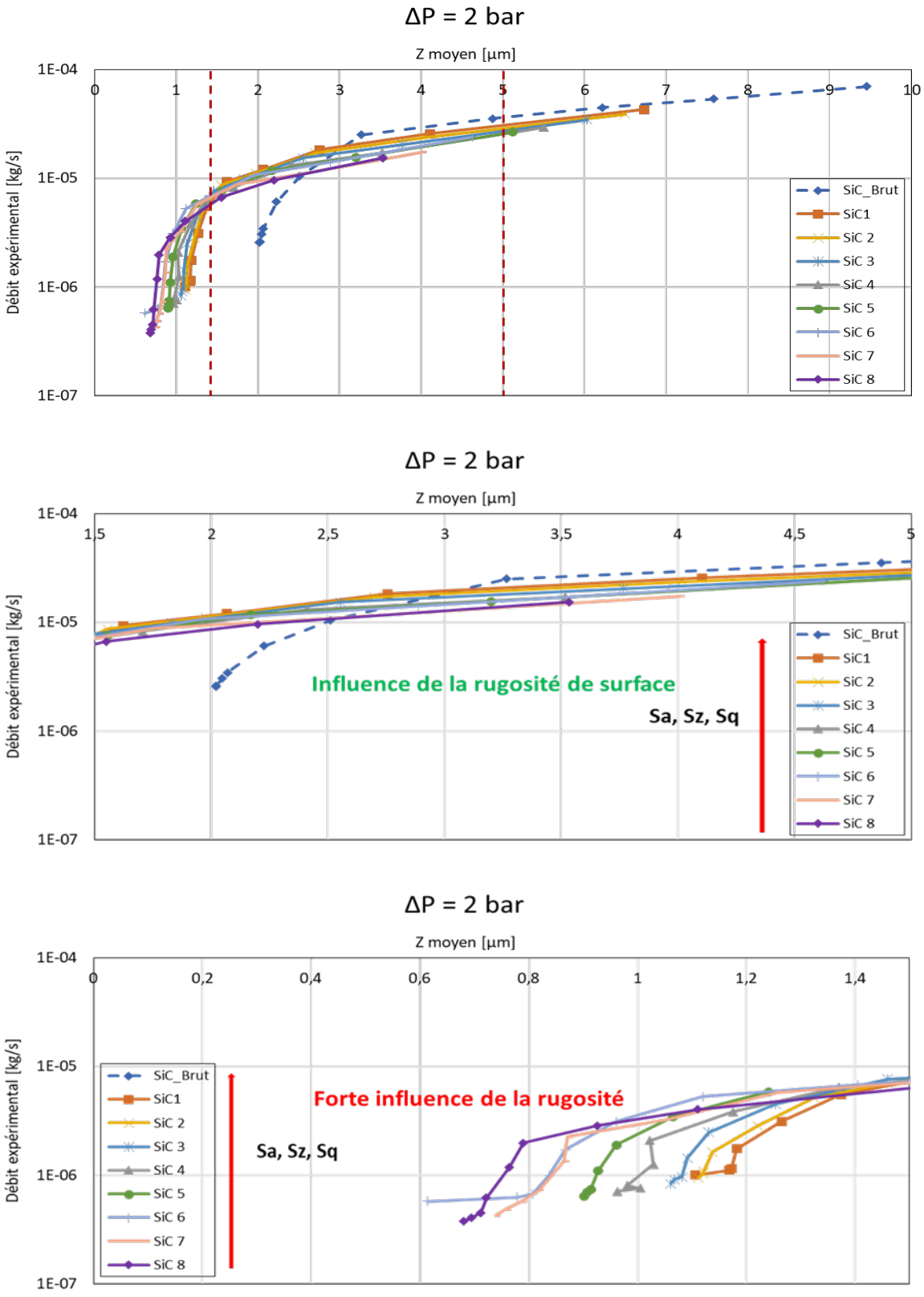


Figure 52: Évolution du débit expérimental en fonction de la distance moyenne entre les surfaces Zmoyen (ΔP = 2 bar), (SiC i : i élevé = Rugosité faible)

4.2.1.5 Adimensionnement des courbes

Les courbes précédentes ont montré que le débit de fuite dépend directement de la distance moyenne entre les surfaces et que l'influence de la rugosité devient de plus en plus importante à mesure que les surfaces se rapprochent. Pour comparer le comportement des différents échantillons de SiC sur une base commune, les résultats sont exprimés sous forme adimensionnelle. Cette représentation permet d'identifier une tendance générale en prenant en compte à la fois la microgéométrie des surfaces et les paramètres physiques de l'écoulement.

La distance moyenne entre les surfaces Zmoyen a été adimensionnée par le produit Sq Sdq, de manière à combiner un paramètre d'amplitude de rugosité et un paramètre décrivant la microgéométrie locale de la surface. Alors que Sq traduit la dispersion des hauteurs, Sdq, correspondant au gradient quadratique moyen de surface, rend compte de la pente moyenne des aspérités. Le débit de fuite a, quant à lui, été adimensionné par le terme $\rho\ Sq^3\ \Delta P / \mu$, où μ la viscosité dynamique de l'air, ρ la masse volumique de l'air et ΔP la pression à l'interface.

La courbe suivante (Fig.53) présente l'évolution du débit de fuite adimensionné en fonction de la distance Zmoyen adimensionnée pour les surfaces SiC.

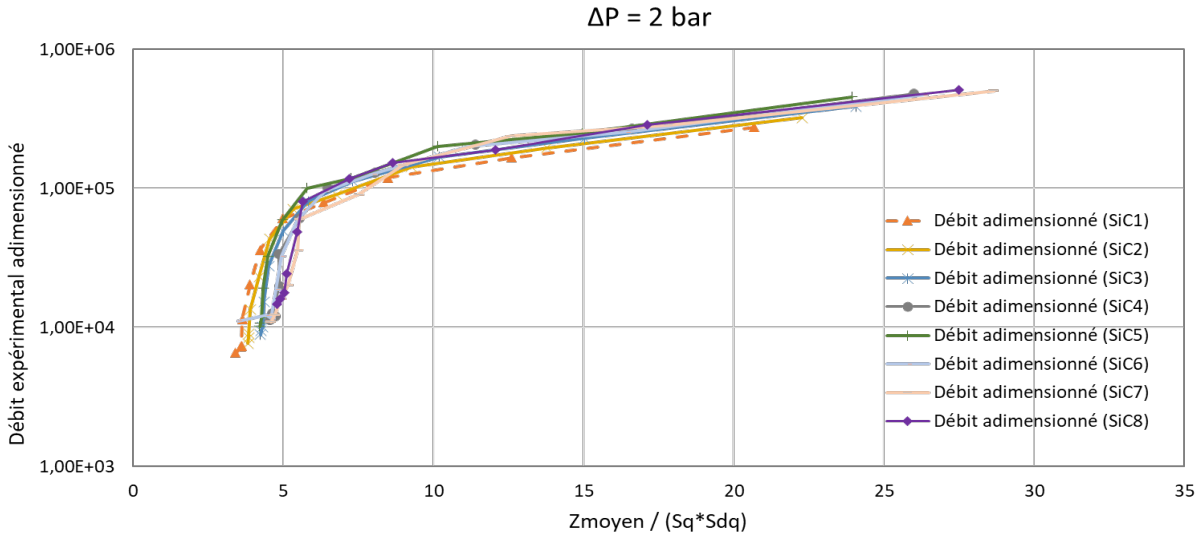


Figure 53: Évolution du débit de fuite adimensionné en fonction de la distance moyenne adimensionnée (ΔP = 2 bar)

On constate que cette représentation réduit la dispersion observée sur les courbes obtenues sans adimensionnement. La superposition des courbes reste toutefois imparfaite, ce qui laisse supposer que d'autres caractéristiques topographiques des surfaces interviennent également dans l'évolution du débit de fuite.

4.2.2 Résultats sur les surfaces graphite

4.2.2.1 Évolution du débit en fonction de la force appliquée

Les figures 54 et 55 présentent l'évolution du débit expérimental en fonction de la force appliquée pour différentes surfaces de graphite, pour deux pressions relatives d'alimentation d'air de l'interface : ΔP = 1 bar et ΔP = 2 bar. Les courbes sont représentées en échelle logarithmique, plus adaptée à la lecture des résultats des essais sur le graphite. La dénomination des échantillons suit un ordre inverse de la rugosité (Gi : i élevé = Rugosité faible).

Les valeurs mesurées varient de 5,74 × 10^{-4} kg/s pour le débit le plus élevé à 1,95 × 10^{-6} kg/s pour le plus faible. Généralement, on observe que le débit de fuite diminue avec l'augmentation de la force appliquée. Ce comportement est cohérent avec celui observé pour les surfaces en SiC. Cependant, contrairement au cas du SiC, le débit n'est pas directement corrélé à la rugosité des surfaces. En effet, certains échantillons présentant une rugosité plus élevée affichent des débits comparables, voire inférieurs, à ceux de surfaces plus lisses. Cela indique que, pour le graphite, d'autres paramètres que la rugosité influencent le débit de fuite.

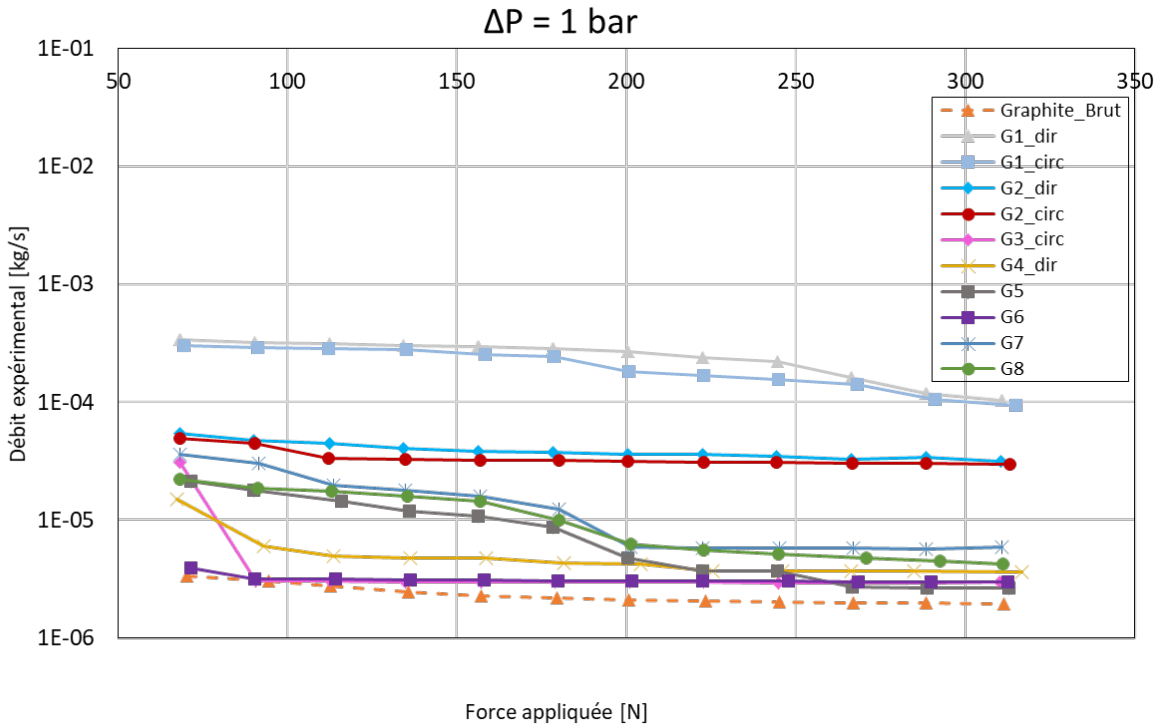


Figure 54: Évolution du débit expérimental en fonction de la force appliquée pour les surfaces graphite (ΔP = 1 bar), (Gi : i élevé = Rugosité faible)

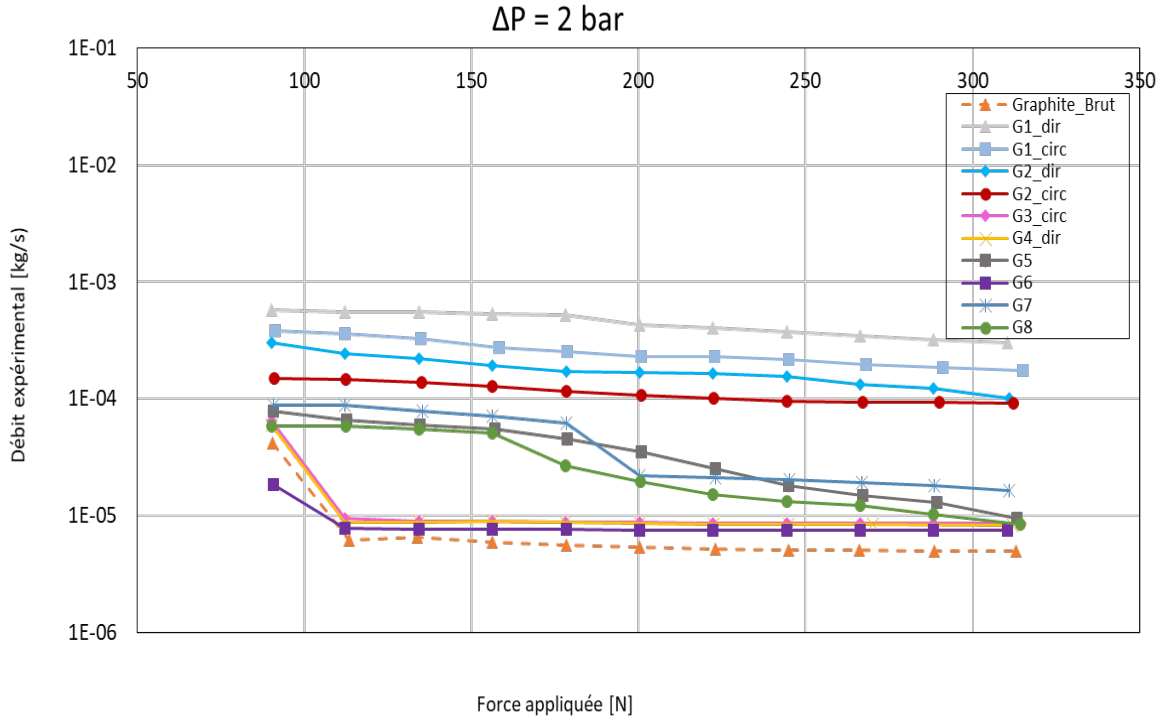


Figure 55: Évolution du débit expérimental en fonction de la force appliquée pour les surfaces graphite (ΔP = 2 bar), (Gi : i élevé = Rugosité faible)

Il est également important de noter que, contrairement à ce qui a été observé lors des essais sur le SiC, les différents échantillons de graphite présentent, à charge équivalente, des débits de fuite différant de plusieurs ordres de grandeur. Le rapport entre le débit maximal et le débit minimal (Fig. 56) est plus important, traduisant une variation plus marquée des valeurs.

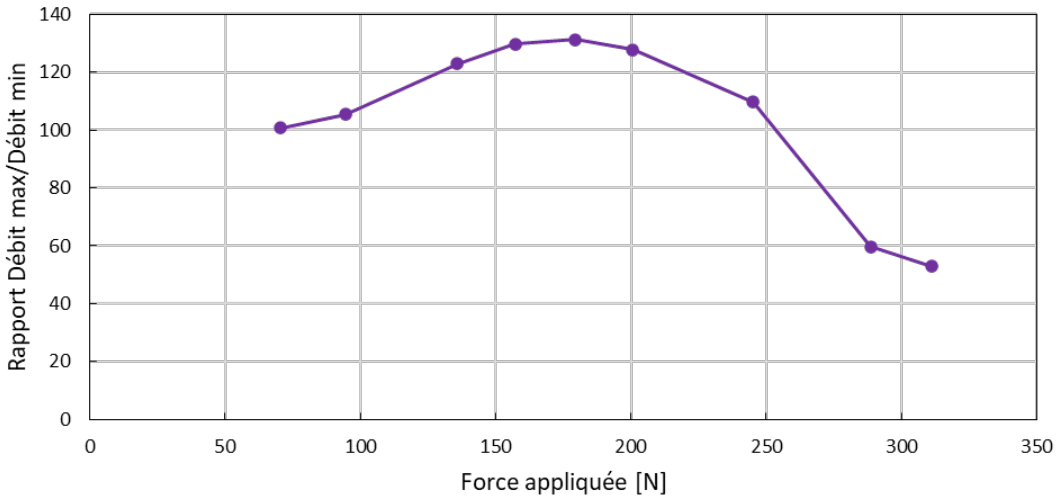


Figure 56: Évolution du rapport (Débit max / min) en fonction de la force appliquée (Graphite)

4.2.2.2 Évolution de la distance *Zmoyen* en fonction de la force appliquée

Les figures 57 et 58 présentent l'évolution de la distance moyenne *Zmoyen* pour les surfaces en graphite en fonction de la force appliquée, sous deux pressions relatives d'alimentation d'air de l'interface : ΔP = 1 bar et ΔP = 2 bar.

De même que pour le débit de fuite, seuls les quatre premiers échantillons de graphite, polis avec les deux grains les plus gros, présentent une évolution du débit et de la distance *Zmoyen* cohérente avec leur niveau de rugosité. Pour les autres échantillons, cette corrélation n'est plus observée, ce qui laisse penser que d'autres paramètres, tels que la porosité du matériau ou la direction de la texture de surface, pourraient intervenir.

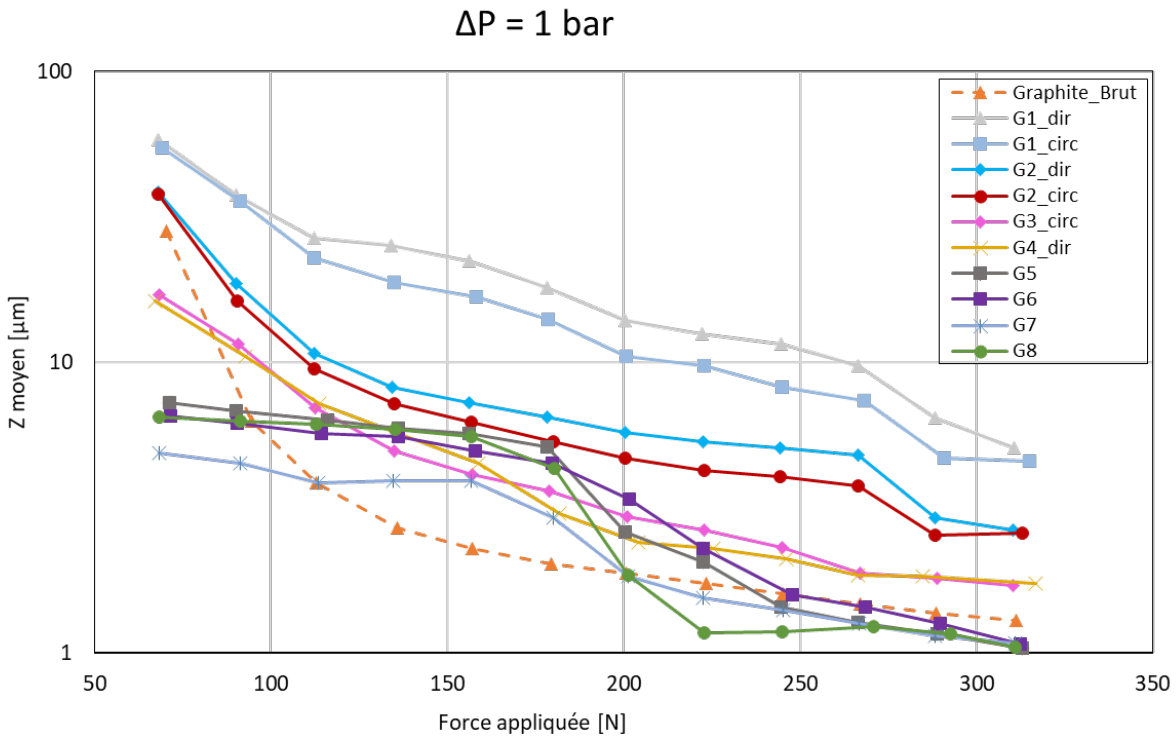


Figure 57: Evolution du *Zmoyen* en fonction de la force appliquée pour les surfaces graphite (ΔP = 1 bar), (Gi : i élevé = Rugosité faible)

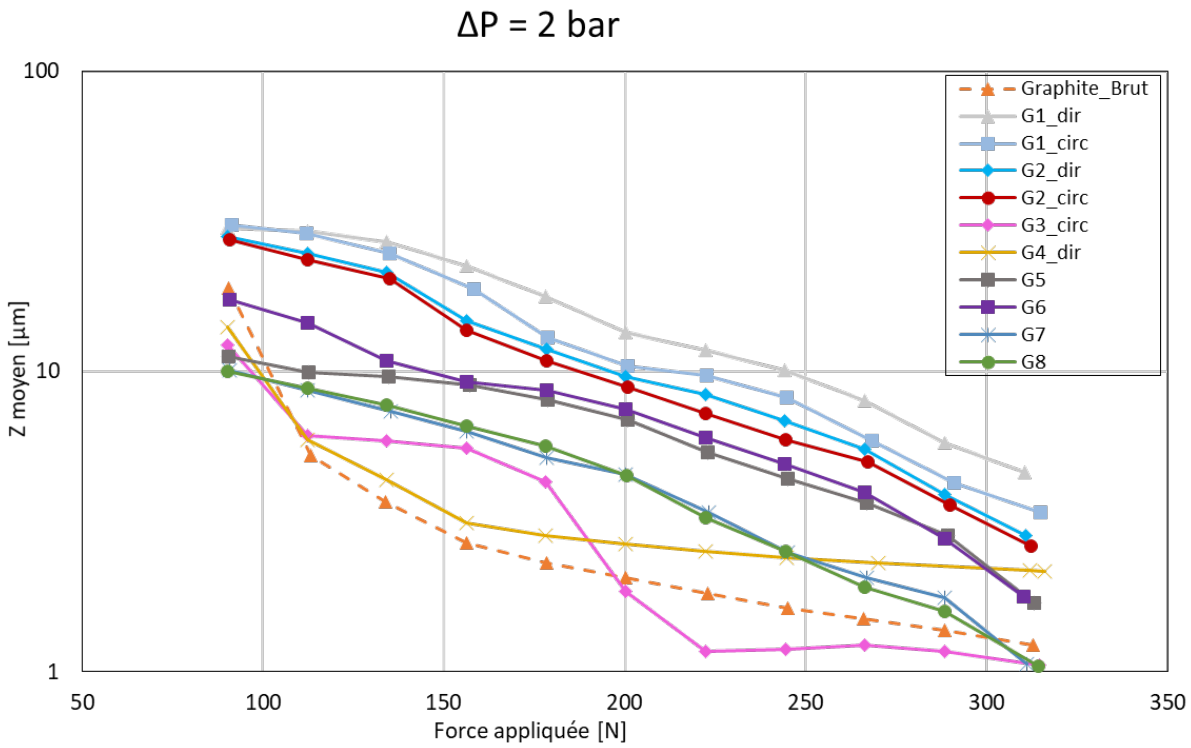


Figure 58: Evolution du Zmoyen en fonction de la force appliquée pour les surfaces graphite (ΔP = 2 bar), (Gi : i élevé = Rugosité faible)

4.2.2.1 Évolution de la distance *Zmoyen* en fonction de débit

La courbe représentant le débit en fonction de la distance Zmoyen est la plus représentative pour analyser le comportement du contact, car elle met directement en relation la géométrie de l'interface et le débit d'air qui la traverse. La figure 59 présente cette courbe pour les surfaces de graphite, à une pression relative d'alimentation de ΔP = 2 bar.

Ainsi, lorsque l'on compare les surfaces polies avec la même taille de grain mais des orientations de stries différentes (G1_dir, G1_circ, G2_dir, G2_circ), on constate que, à grain de polissage identique, les surfaces présentant des stries radiales directionnelles génèrent un débit de fuite plus élevé que celles présentant des stries circonférentielles (Fig.59). Cela montre que la direction des stries de polissage influence également la distance Zmoyen et le débit de fuite, en modifiant les chemins d'écoulement du fluide et la manière dont les surfaces de graphite entrent en contact sous l'effet de la charge appliquée.

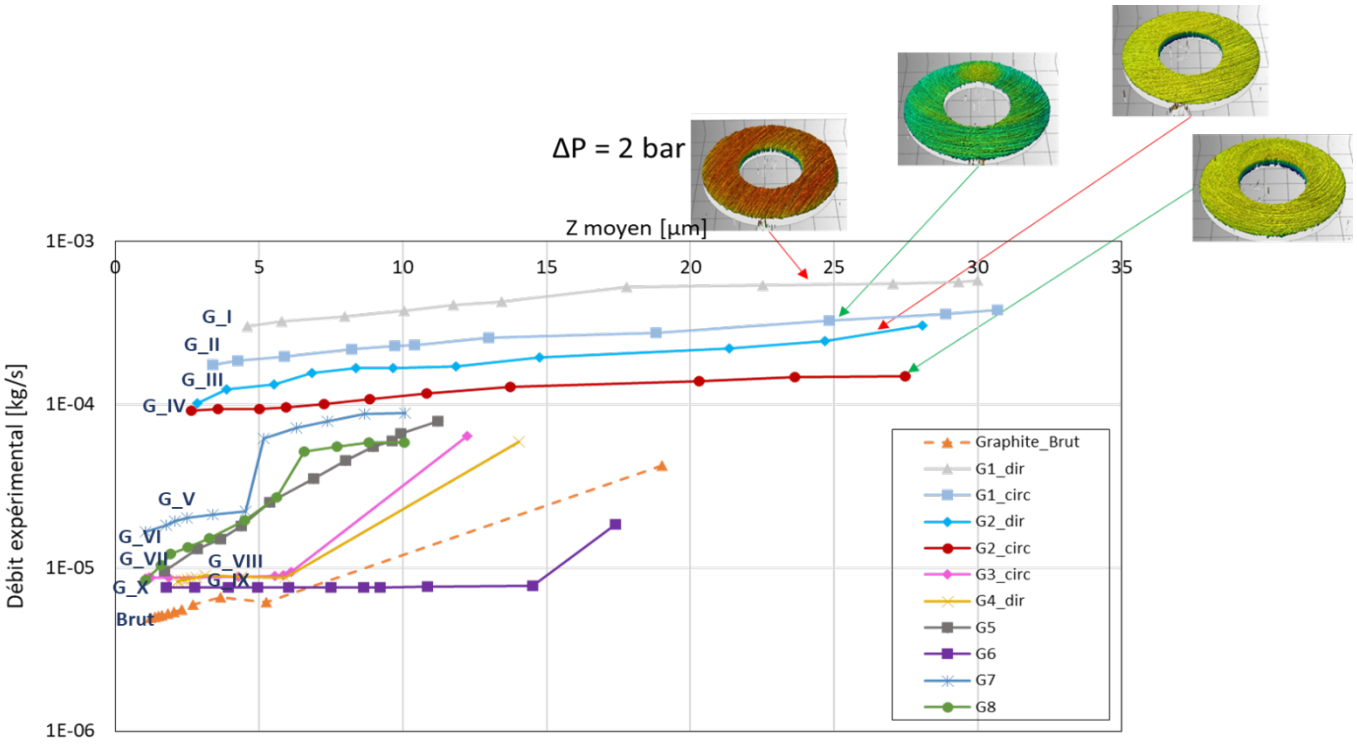


Figure 59: Évolution du débit expérimental en fonction de la distance Zmoyen (ΔP = 2 bar)

Si l'on observe maintenant la figure 60, les surfaces du graphite ont été renommés selon le classement de leur ondulation moyenne. La numérotation en chiffres romains correspond à un ordre inverse de l'ondulation : plus le numéro est élevé, plus l'ondulation est faible.

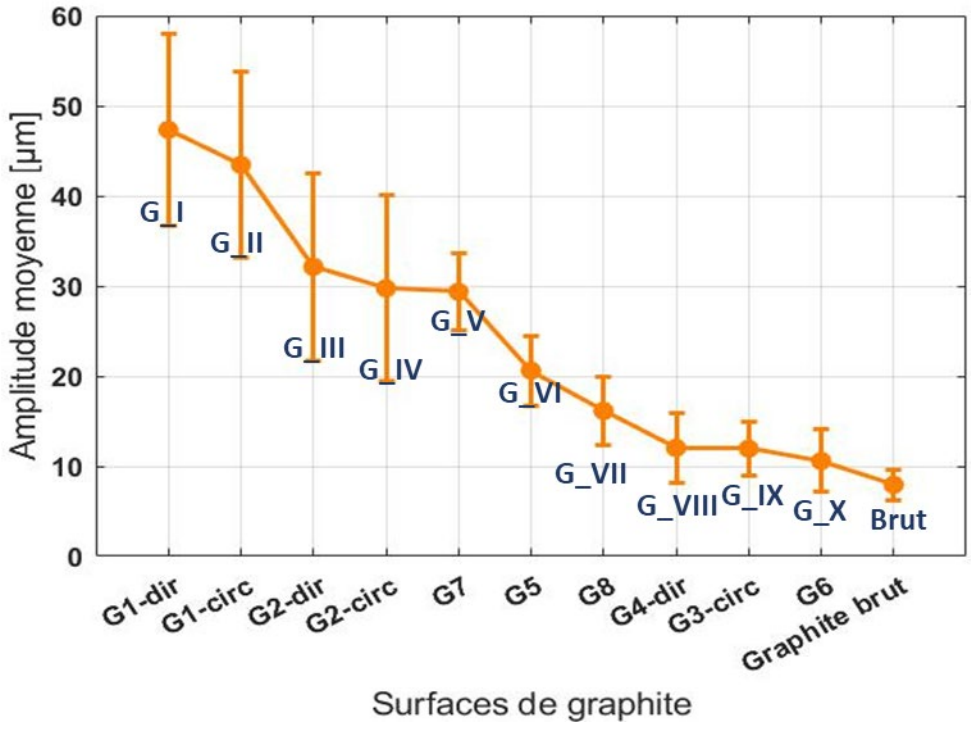


Figure 60: Classement des surfaces de graphite selon leur amplitude d'ondulation

En reportant ce classement sur la figure 59, qui représente le débit en fonction de *Zmoyen* pour les surfaces du graphite, on constate que les débits suivent clairement cette tendance. Les surfaces présentant une ondulation importante génèrent les débits les plus élevés, tandis que celles caractérisées par une ondulation plus faible présentent des débits nettement inférieurs.

Cette évolution est beaucoup plus cohérente que celle obtenue lorsque les surfaces sont classées selon leur rugosité. Cela montre que, pour le graphite, ce n'est pas la rugosité fine qui contrôle le comportement du contact, mais plutôt la morphologie à grande échelle de la surface, c'est-à-dire l'ondulation. En effet, le graphite étant un matériau tendre et poreux, les aspérités fines (rugosité) se compriment facilement sous la charge, tandis que les irrégularités de plus grande taille (ondulations) contrôlent la distribution des zones de contact et la continuité des chemins de fuite.

4.2.3 Discussion et comparaison des résultats SiC / graphite

L'analyse comparative des résultats obtenus sur les deux matériaux, SiC et graphite, met en évidence des comportements très différents face à la variation de la charge et de la topographie de surface.

Pour le SiC, matériau dur et non poreux, le débit de fuite est directement lié à la rugosité : les surfaces les plus rugueuses présentent des débits initiaux élevés qui diminuent progressivement avec la charge. À l'inverse, les surfaces polies atteignent rapidement un débit minimal, signe d'un contact plus homogène. La rugosité constitue donc le paramètre principal contrôlant le comportement du contact pour ce matériau.

Le graphite, en revanche, présente un comportement plus complexe. Si les échantillons les plus rugueux conservent une certaine cohérence entre rugosité, *Zmoyen* et débit de fuite, cette corrélation disparaît pour les surfaces plus lises. Cette différence s'explique par la nature même du graphite, matériau à structure lamellaire, poreux et déformable, dont la texture influence la répartition des zones de contact et la continuité des chemins d'écoulement. L'orientation des stries de polissage joue également un rôle : à grain identique, les surfaces graphite à stries radiales génèrent des débits plus élevés que celles à stries circonférentielles. Cette observation montre que la texture directionnelle agit sur la manière dont les surfaces se rapprochent et sur la distribution des zones de contact.

Enfin, la classification des surfaces du graphite selon leur ondulation montre une tendance beaucoup plus cohérente que celle obtenue avec la rugosité. Cette observation confirme que, pour le graphite, c'est principalement l'ondulation, c'est-à-dire la topographie à grande échelle, qui contrôle le comportement du contact.

En résumé, le SiC est gouverné par la rugosité de surface, tandis que le graphite est dominé par son ondulation moyenne. Il convient toutefois de nuancer cette conclusion. Les surfaces de SiC étudiées présentaient des ondulations très faibles et relativement similaires entre elles. Si des variations d'ondulation plus marquées avaient existé, il est possible que le SiC ait présenté un comportement comparable à celui observé pour le graphite. L'influence prépondérante de la rugosité dans ce cas pourrait donc résulter de la faible amplitude des ondulations sur ces échantillons, et non d'une absence d'effet de l'ondulation elle-même. Cette interprétation doit donc être considérée comme une hypothèse.

Ces résultats soulignent donc la nécessité d'une approche multi-échelle, intégrant rugosité, ondulation et texture directionnelle pour décrire le comportement des surfaces en contact.

CHAPITRE 5

ANALYSE MULTI-ÉCHELLE DU CONTACT : PORTANCE ET DÉBIT DE FUITE

5. Analyse multi-échelle du contact : portance et débit de fuite

Comme montré dans le chapitre précédent, la distance moyenne et le débit de fuite entre deux surfaces rugueuses soumises à une force de contact sont des facettes d'un problème multi-échelle : pour l'échantillon en SiC, les résultats sont contrôlés par la rugosité, tandis que pour celui en graphite, les ondulations jouent un rôle prépondérant.

Une modélisation numérique peut englober les deux échelles à la fois, tout comme elle peut être basée sur une distinction entre les deux échelles de longueur (Fig.61). L'effort de calcul associé à la première approche risque d'être rapidement trop important à cause des différentes échelles de longueur, séparées par plusieurs ordres de grandeur, à prendre en compte. De ce point de vue, la deuxième approche semble plus convenable, car elle sera basée sur des modélisations distinctes appliquées à chaque échelle et qui communiquent entre elles. Une approche similaire est décrite en [61] pour traiter les contacts entre deux surfaces rugueuses dans des problèmes d'élasticité non-linéaire.

Les problèmes abordés numériquement seront le calcul de la force de contact théorique entre les aspérités et le calcul du débit de fuite, en tenant compte qu'en plus des états des surfaces, on dispose des informations expérimentales suivantes :

- la distance moyenne entre les surfaces à chaque charge appliquée, déterminée à partir des mesures de déplacement comme indiqué au chapitre 2 ;
- le débit d'air injecté ;
- la force normale appliquée par le piston (Fig. 16, chapitre 2) ;
- la force normale au centre de l'échantillon, estimée à partir de la pression de l'air à l'entrée du contact (la sortie du contact étant à la pression atmosphérique), mesurée par le capteur de pression.

La différence entre la force normale appliquée par le piston et la force normale au centre de l'échantillon, estimée à partir de la pression de l'air, sera égale à la force de contact.

Les validations auront lieu à la macro-échelle, avec les surfaces mesurées par le Polytec. La résolution spatiale de ces surfaces est de 28 μm et les informations liées à la distribution spatiale des rugosités sont absentes. Seules les informations liées aux ondulations sont présentes sur ces surfaces. L'impact des rugosités sera déterminé sur les surfaces mesurées par le Talysurf, avec une résolution spatiale de 0,5 μm. Les informations qui seront transmises de la micro-échelle vers la macro-échelle seront les pressions des contacts entre aspérités, moyennées sous la forme

de la pression de contact apparente, et les modifications du débit de fuite local provoquées par les rugosités. Ces modifications correspondent à la diminution du débit de fuite, provoquée par une différence de pression entre l'entrée et la sortie des surfaces rugueuses, par rapport au débit entre deux surfaces sans rugosités, espacées de la même distance moyenne. Le rapport des deux débits est connu sous le nom de facteur d'écoulement.

Avec ces deux informations (pression de contact apparente et facteur d'écoulement en fonction de la distance locale entre les deux surfaces), le problème à macro-échelle pourra être résolu pour des ondulations arbitraires de la surface équivalente. La résolution à macro-échelle comportera aussi un problème de contact et un problème d'écoulement couplés. Des hypothèses simplificatrices raisonnables permettent le découplage de ces deux problèmes, dans le cas des faibles pressions utilisées pour l'alimentation en air.

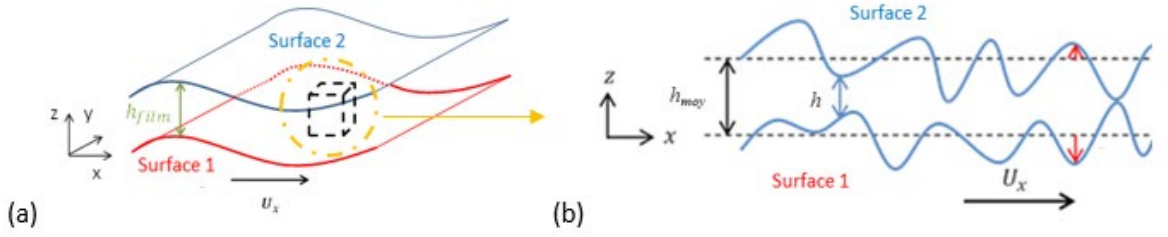


Figure 61: Séparation des échelles entre ondulations (a) et rugosités (b)

5.1 Analyse micro-échelle

L'analyse à micro-échelle est donc effectuée sur les surfaces mesurées sur l'interféromètre Talysurf (Fig.62).

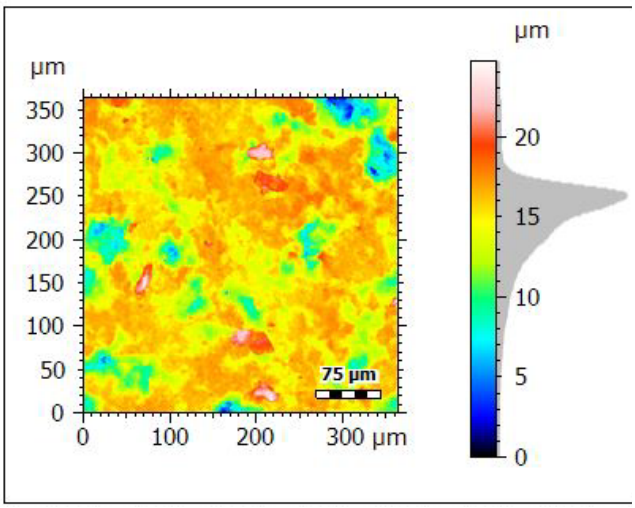


Figure 62. Image d'une mesure Talysurf sur la surface du graphite

Comme mentionné, deux problèmes doivent être résolus pour la micro-échelle :

- Le calcul de la pression apparente de contact en fonction de la distance entre les surfaces ;
- L'estimation des facteurs d'écoulements, qui conditionnent les débits d'air entre les deux surfaces.

Seule la situation d'un débit provoqué par une différence de pression entre l'entrée et la sortie du contact est analysée.

5.1.1 Le problème de contact

5.1.1.1 Le modèle de Greenwood et Williamson discret

Le problème de contact entre les rugosités (c'est-à-dire les pressions de contact et la variation de la force de contact avec la distance moyenne entre les surfaces) est résolu à l'aide d'une amélioration de l'approche de Greenwood et Williamson [40]. Tout comme dans le modèle classique de Greenwood et Williamson, l'approche généralisée utilise le concept de surface somme, où les hauteurs des rugosités d'une surface sont additionnées à celles de l'autre surface afin d'obtenir le contact entre une surface rugueuse « équivalente » et une surface lisse (Fig.63).

Pour les essais analysés, cette approximation n'est pas nécessaire, car les rugosités se trouvent uniquement sur la surface de l'échantillon, la surface du saphir étant parfaitement lisse.

Dans le modèle classique (statistique) de Greenwood et Williamson [40], la distance entre les surfaces, $h(x_i)$, suit une distribution normale, ce qui permet de déterminer analytiquement :

- le nombre de contacts,
- la surface réelle de contact,
- la charge supportée par le contact,

étant donnés trois paramètres :

- la densité surfacique des rugosités,
- le rayon (équivalent) des rugosités (identique pour tous les pics),
- l'écart type de la distribution,

et en utilisant les formules de Hertz pour le contact élastique sphère/plan.

La distribution spatiale des rugosités ne joue aucun rôle, car les interactions entre les pics en contact sont négligées. On pourrait répéter le calcul pour une autre distribution surfacique des hauteurs du profil, le résultat serait le même.

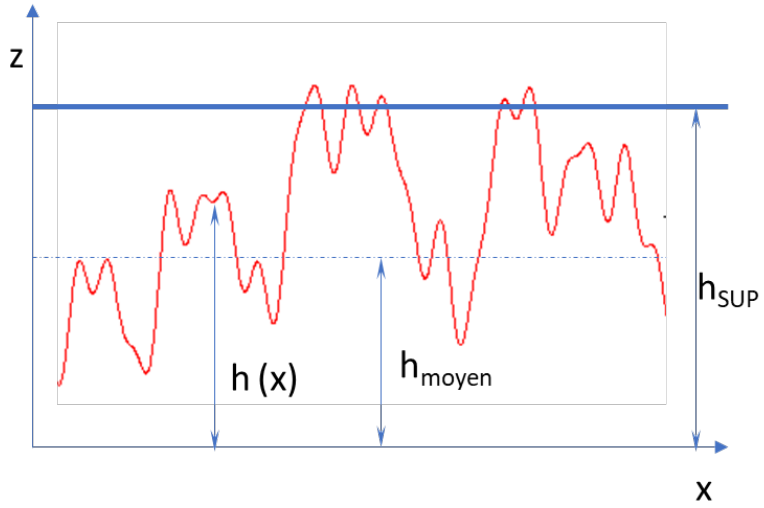


Figure 63: Hauteurs des rugosités

Le modèle de GW "discret" [34], [53] est une extension du modèle original qui prend en compte la distribution spatiale des rugosités. Les étapes de l'analyse sont :

1. Identification des pics de la surface (Fig.63). Cette identification doit être effectuée sur un nombre suffisant de points, par exemple sur 25 points pour un maillage rectangulaire (Fig.64).

$$h_{i,j} \geq h_{a,b},\ a = \{i-2, i-1, i, i+1, i+2\},\ b = \{j-2, j-1, j, j+1, j+2\} \qquad (34)$$

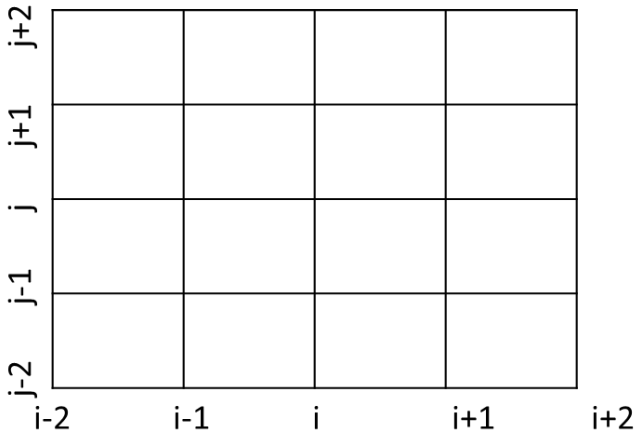


Figure 64: Nœuds d'un maillage rectangulaire utilisés pour l'identification des pics

2. Pour chaque pic identifié, ainsi que pour les 25 points qui l'entourent, on calcule les rayons de courbure dans les deux directions en utilisant des polynômes de Lagrange d'ordre 4.

$$R_x^{-1} = \sum_{k=i-2}^{i+2} \frac{d^2 \mathcal{L}_k^{(4)}(x)}{dx^2} h_{k,j} \, , R_y^{-1} = \sum_{k=i-2}^{i+2} \frac{d^2 \mathcal{L}_k^{(4)}(y)}{dy^2} h_{i,k} \tag{35}$$

Il faut aussi vérifier que $Rx < 0$ et $Ry < 0$; sinon, le pic est rejeté, car il s'agit d'un point selle. Le rayon équivalent est défini par :

$$R = \sqrt{R_x R_y} \tag{36}$$

Selon différents auteurs [62], l'identification peut également être effectuée sur 9 points :

$$\frac{1}{R} = \sqrt{\frac{1}{R_x R_y} - \frac{1}{R_{xy}^2}} \tag{37}$$

$$\frac{1}{R_{xy}} = \frac{h_{i+1,j+1} + h_{i-1,j-1} - h_{i+1,j-1} - h_{i-1,j+1}}{4\Delta x \Delta y}, \frac{1}{R_x} = \frac{h_{i+1,j} - 2h_{i,j} + h_{i-1,j}}{\Delta x^2} \tag{38}$$

3. Les formules de Hertz sont toujours utilisées, mais les calculs ne sont plus analytiques comme dans le modèle original de Greenwood et Williamson. Cela permet de conserver une vitesse de calcul élevée, car les interactions entre les pics sont toujours négligées.

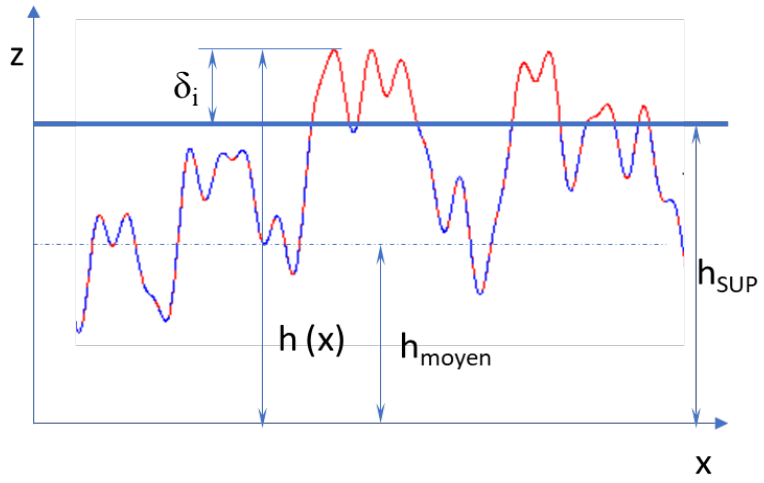


Figure 65: Pics en interférences

L'interférence entre les pics de la surface rugueuse et la contre-surface lisse (Fig.65) est :

$$\delta_i = \langle h_i - h_{SUP} \rangle = max\ (h_i - h_{SUP}, 0) \tag{39}$$

La surface de contact du pic déformé par le contact, ainsi que son rayon, sont estimées à partir des relations de Hertz :

$$A_i = \pi R_i \delta_i \qquad , \qquad a_i = \sqrt{R_i \delta_i} \tag{40}$$

tandis que la force de contact est donnée par :

$$F_i = \frac{4}{3} E^* R_i^{1/2} \delta_i^{3/2} \qquad , \qquad \frac{1}{E^*} = \frac{1 - {\nu_1}^2}{E_1} + \frac{1 - {\nu_2}^2}{E_2} \tag{41}$$

Ce qui donne pour la pression de contact :

$$p_i = \frac{F_i}{A_i} = \frac{4}{3\pi} E^* \sqrt{\frac{\delta_i^3}{R_i^2}} \tag{42}$$

Toutefois, ces relations doivent être corrigées si la pression de contact dépasse un seuil à partir duquel les pics deviennent plastifiés. La manière la plus simple de modéliser ce seuil consiste à le représenter par HRB, la contrainte d'indentation[5] :

$$si\ p_i \geq HRB\ alors\ \ F_i = A_i HRB$$

Le paramètre HRB correspond ici à une valeur de dureté fournie par le fabricant du matériau.

[5] Cette approche, généralement acceptée dans la littérature, reste une approximation assez simplifiée, car elle néglige le comportement du matériau entre la limite élastique et la plastification complète.

Le calcul de la force totale de contact, de la surface réelle de contact et de la pression de contact apparente est alors direct :

$$F = \sum_i F_i \,, \qquad A = \sum_i A_i \,, \qquad p = \frac{F}{A} \tag{43}$$

L'approche de Greenwood et Williamson discrète est attractive, car elle est très rapide. Toutefois, il existe certaines situations où cette approche rencontre des difficultés. Par exemple, sur la figure 66, les contacts aux pics P6, P7 et P9, P10 peuvent coalescer et donner naissance à de nouveaux contacts P6+7 et P9+10. D'un point de vue mathématique, cela se traduit par le fait que la somme des rayons de contact, $a_i = \sqrt{R_i \delta_i}$, devient supérieure à la distance entre les pics :

$$a_6 + a_7 \geq dist_{6,7} \qquad , \qquad a_9 + a_{10} \geq dist_{9,10}$$

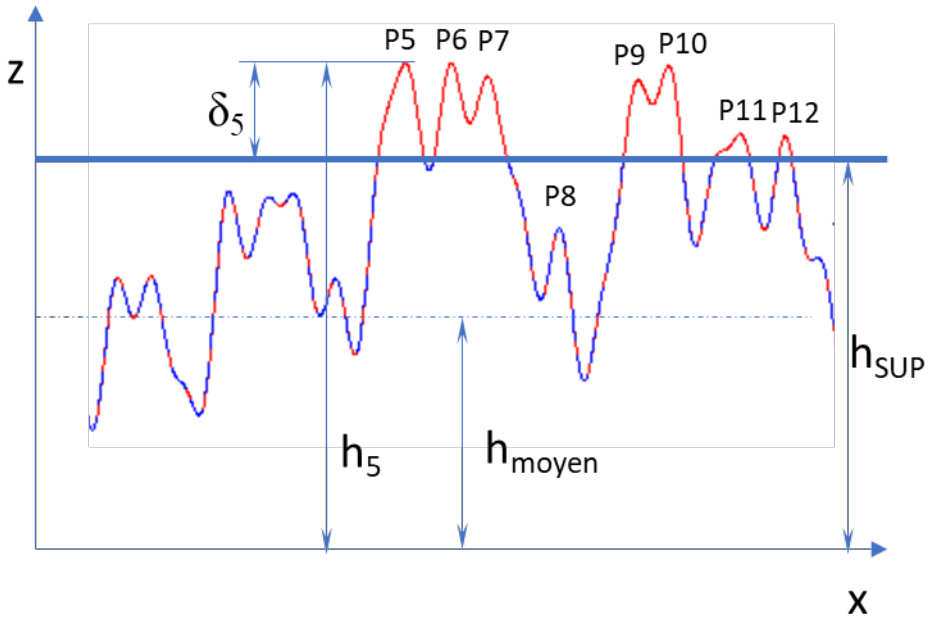


Figure 66: Pics en interférences qui peuvent coalescer

On peut, dans ce cas [50], réunir $(h_{i,j})_6$ et $(h_{i,j})_7$ sous $(h_{i,j})_{6\ et\ 7}$, par exemple :

$$(h_{i,j})_{6\ et\ 7} = \left\{h_{i,j}\ \middle|\ i = \min_i\left[(h_{i,j})_6, (h_{i,j})_7\right] \cdots \max_i\left[(h_{i,j})_6, (h_{i,j})_7\right]\ et\right.$$
$$\left. j = \min_j\left[(h_{i,j})_6, (h_{i,j})_7\right] \cdots \max_j\left[(h_{i,j})_6, (h_{i,j})_7\right]\right\} \quad (44)$$

et approximant, au sens des moindres carrés, une surface d'équation :

$$h_{6,7}(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy \quad (45)$$

où l'on identifie le pic et les rayons de courbure qui remplacent les pics P6 et P7 (Fg.67).

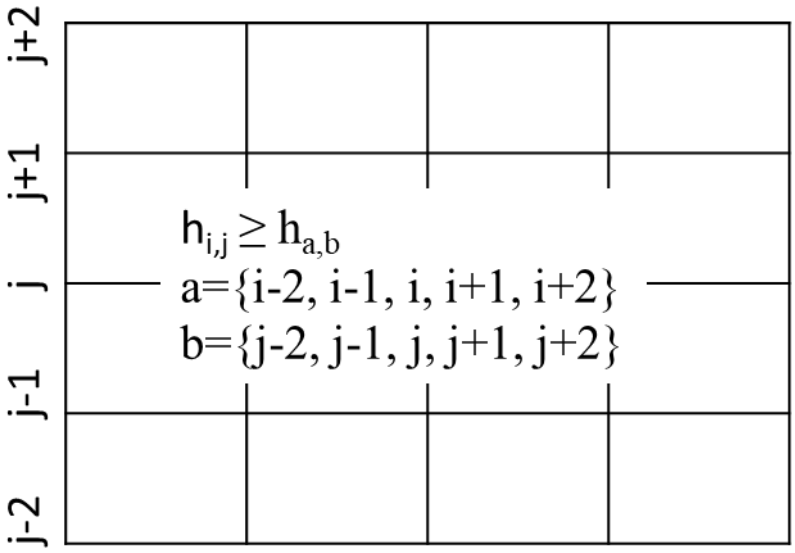


Figure 67: Surface équivalente des pics qui peuvent coalescer

5.1.1.2 Le modèle de GW amélioré

Le modèle de Greenwood et Williamson amélioré [49], [63]constitue une évolution du modèle discret, puisqu'il prend en compte les interactions entre les pics.

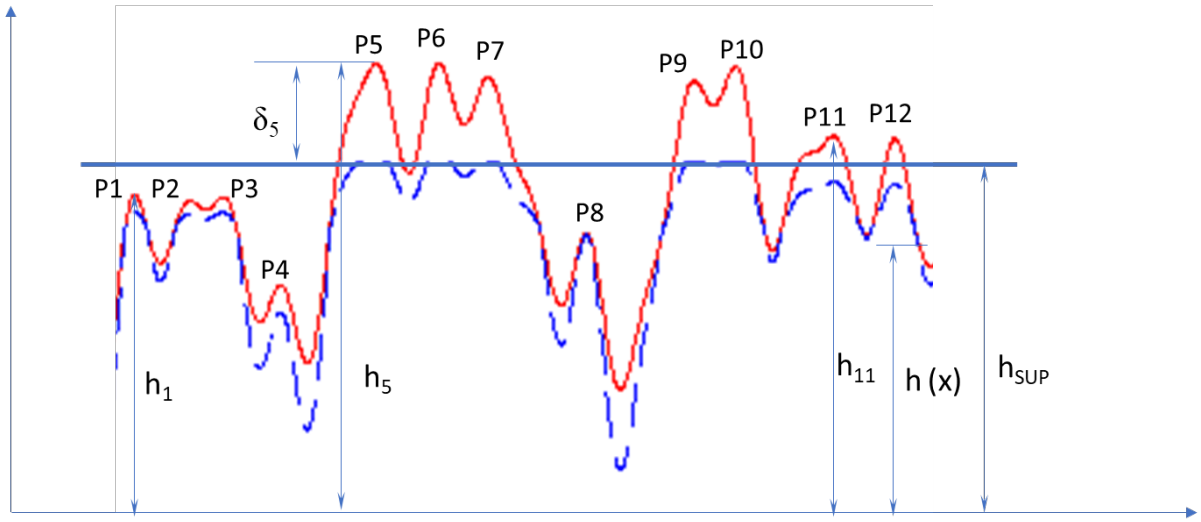


Figure 68: Surface déformé tenant compte des interactions entre les pics

Le déplacement total d'un pic correspond à la somme de la déformation élastique due à l'interférence avec la contre-surface et de l'enfoncement produit par les autres pics en contact :

$$\delta_i = \langle h_i - h_{SUP} \rangle - u_i = \delta_{e,i} + \delta_{z,i} \tag{46}$$

Le premier terme, la déformation élastique, est estimé à partir des relations de Hertz :

$$\delta_{e,i} = \frac{a_i^2}{R_i}, F_i = \frac{4}{3}\frac{E^* a_i^3}{R_i} \tag{47}$$

L'enfoncement dû aux autres pics en contact s'exprime par :

$$\delta_{z,i} = \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1 a_i} F_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j\neq i}}^{n} \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1 dist_{ij}} F_j, \quad dist_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \tag{48}$$

L'équation (46) s'écrit donc pour chaque pic en contact, donnant un système non linéaire :

$$Residu_i(a_1, a_2, \ \ldots, a_n) = \delta_i - \overbrace{\frac{a_i^2}{R_i}}^{\delta_{e,i}} - \overbrace{\frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1 a_i}\overbrace{\frac{4}{3}\frac{E^* a_i^3}{R_i}}^{F_i}}^{\delta_{z,i}} + \sum_{\substack{i=1 \\ j\neq i}}^{n} \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1 dist_{ij}}\overbrace{\frac{4}{3}\frac{E^* a_j^3}{R_j}}^{F_j} = 0 \tag{49}$$

Le système est résolu numériquement, en utilisant une méthode d'optimisation dans le sens des moindres carrés, avec des contraintes linéaires $a_i \geq 0$ [64], [65].
Il convient de souligner que le problème est doublement non linéaire, car si le contact est perdu en P11 et P12 suite à l'enfoncement de la surface inférieure (Fig.68), le calcul doit être répété avec une nouvelle hypothèse des pics en contact. En résumé, les pics estimés en contact au début du calcul doivent se retrouver en contact à la fin du calcul. Des itérations sont donc nécessaires pour éliminer (et toujours éliminer, jamais ajouter) les pics qui, après la résolution numérique du système, ne se trouvent plus en contact.

Les résultats obtenus pour le problème de contact à micro-échelle, à partir des modèles de Greenwood et Williamson (discret et amélioré), sont présentés sur la figure 69.

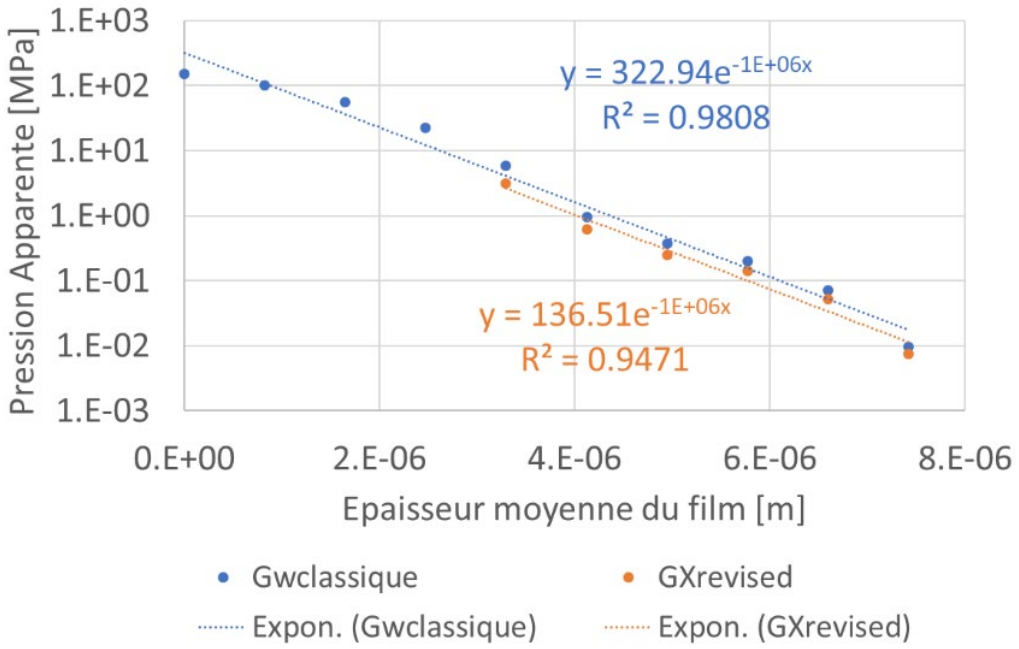


Figure 69: Pressions apparentes en fonction de la distance moyenne entre les deux surfaces (épaisseur moyenne du film)

Les deux résultats sont approximés par des fonctions exponentielles également présentées sur la figure 69. On peut observer que le modèle discret prédit des valeurs presque 2,5 fois plus grandes que celles obtenues avec le modèle amélioré.

5.2.1 Le problème de l'écoulement

Le domaine à micro-échelle est la surface mesurée par l'interféromètre Talysurf (Fig.62). L'épaisseur du film est calculée pour différentes distances entre la moyenne de la surface mesurée par le Talysurf et une contre-surface considérée plane.

Tout comme dans le modèle classique de Greenwood et Williamson, l'approche généralisée utilise le concept de surface somme, où les hauteurs des rugosités d'une surface sont additionnées à celles de l'autre surface afin d'obtenir le contact entre une surface rugueuse « équivalente » et une surface lisse.
L'analyse de l'écoulement à micro-échelle ou à macro-échelle est faite en utilisant l'équation de Reynolds pour un gaz. Il est supposé que l'écoulement est isotherme et que le gaz est parfait.

L'équation de Reynolds s'écrit [66] :

$$\frac{\partial}{\partial \bar{x}}\left(\bar{P}\bar{h}^3\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}}\right)+\frac{\partial}{\partial \bar{y}}\left(\bar{P}\bar{h}^3\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{y}}\right)=0 \qquad (50)$$

$$\bar{P}=P/P_a,\ \bar{h}=h/h_{min},\ \bar{x}=x/L\ ,\bar{y}=y/L \qquad (51)$$

L'information que la micro-échelle devra transmettre à la macro-échelle est la diminution des débits due à la présence des rugosités. Le rapport entre le débit en présence des rugosités et le débit correspondant à une même hauteur des surfaces moyennes lisses (dépourvues de rugosités) porte le nom de facteur d'écoulement. L'estimation des facteurs d'écoulement peut être réalisée soit suivant une approche basée sur la méthode rigoureuse de l'homogénéisation mathématique, soit à partir d'une analyse statistique des résultats obtenus directement à partir de la définition donnée plus haut.

5.2.1.1 L'homogénéisation de l'équation de Reynolds

L'homogénéisation mathématique de l'équation de Reynolds est une pratique devenue courante [67] [68] [69] [70] [71] [72] [73] , et elle a déjà été utilisée pour déterminer les facteurs d'écoulement entre surfaces rugueuses [27], [74]. La méthode part du constat que la description des distances entre deux surfaces rugueuses (ou entre la surface rugueuse équivalente et la contre-surface plane) dépend des échelles de longueur (ou des dimensions des surfaces)

utilisées pour les mesurer. Les rugosités sont mesurées sur des longueurs comprises entre 2,5 µm et 250 µm, tandis que les ondulations sont mesurées sur des longueurs allant de 250 µm à 2,5 mm. Ces deux échelles de longueurs sont espacées d'au moins un ordre de grandeur. La surface rugueuse peut être ainsi décrite en mettant en évidence les deux échelles de longueur :

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_0 + \varepsilon \boldsymbol{x}_1 \tag{52}$$

où $\boldsymbol{x} = (x, y)$ est la surface analysée et $\boldsymbol{x}_0, \boldsymbol{x}_1 \in [0,1] \times [0,1]$. Suite à l'adimensionnement décrit par la relation (51), $\boldsymbol{x}_0$ et $\boldsymbol{x}_1$ sont de l'ordre de l'unité, tandis que ε est un petit paramètre, inférieur à l'unité d'au moins un ordre de grandeur.

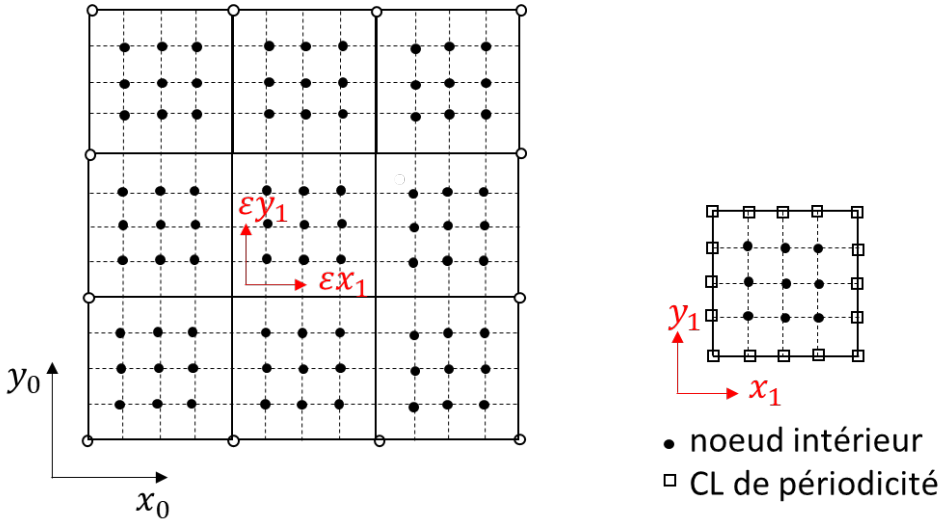


Figure 70: Décomposition du domaine suite à la séparation des échelles

Cette situation est décrite sur la figure 70 où, pour lisibilité, le domaine à macro-échelle (x_0, y_0) est discrétisé en 3 x 3 sous-domaines (x_1, y_1) à micro-échelle. Toujours pour lisibilité, les sous-domaines à micro-échelle sont discrétisés avec un maillage de 4 x 4 cellules.
Dans la méthode de l'homogénéisation, il est supposé que la pression du fluide décrite par l'équation de Reynolds est décrite de la même manière.

$$P = P_0 + \varepsilon P_1 \tag{53}$$

Après le remplacement des hypothèses (21) et (22) dans l'équation de Reynolds (19) on obtient une série des d'équations différentielles séparées par des ordres de grandeur ε^{-2}, ε^{-1}, ε^{0}, ε, etc. Seules les équations obtenues pour les trois premiers ordres de grandeur sont utilisées par

la méthode d'homogénéisation, les autres (ε, ε^2,…) sont négligées. L'équation obtenue pour l'échelle ε^0 est l'équation de Reynolds homogénéisée sur le domaine analysé.

$$\frac{\partial}{\partial x_0}\left(P_0 A_{xx}\frac{\partial P_0}{\partial x_0}\right)+\frac{\partial}{\partial x_0}\left(P_0 A_{xy}\frac{\partial P_0}{\partial y_0}\right)+\frac{\partial}{\partial y_0}\left(P_0 A_{yy}\frac{\partial P_0}{\partial y_0}\right)+\frac{\partial}{\partial y_0}\left(P_0 A_{yx}\frac{\partial P_0}{\partial x_0}\right)=0 \qquad (54)$$

où A_{ij} sont des facteurs d'écoulement de Poiseuille et de Couette, respectivement, déterminés à partir des équations sur l'échelle ε^{-1} , donc sur chacun des domaines, avec des conditions de périodicité.

L'équation à l'échelle ε^{-2}

$$\frac{\partial}{\partial x_1}\left(h^3\frac{\partial P_0^2}{\partial x_1}\right)+\frac{\partial}{\partial y_1}\left(h^3\frac{\partial P_0^2}{\partial y_1}\right)=0 \qquad (55)$$

indique seulement que la pression à la macro-échelle est constante sur la micro-échelle, $P_0 = const.$

Pour le problème de l'écoulement de l'air entre l'échantillon en graphite ou en SiC et le disque en saphir, seuls les facteurs d'écoulement de Poiseuille, A_{ij}, $i,j = x,y$ sont à prendre en compte, car la vitesse de rotation est nulle.

Le calcul des A_{ij} est fait sur les surfaces mesurées par le Talysurf (360µm x 360µm) discrétisées en 16 x 16 carrés comme montré sur la figure 70 et pour différentes distances entre la surface rugueuse moyenne et la contre-surface lisse. Pour des interférences (contacts) entre les deux surfaces, deux approximations sont possibles :

- L'épaisseur négative du film est remplacée par une valeur positive très faible, par exemple h_{min}=10^{-3} µm.
- Le débit est annulé sur les arêtes du maillage où l'épaisseur du film devient négative.

Les deux approches donnent des résultats très proches.

L'analyse statistique montre que les $16^2 A_{ij}$ ne suivent pas une distribution normale, résultat qui s'explique par le traitement approximatif des interférences. La moyenne et l'écart type des facteurs d'écoulement A_{ij} sont ensuite calculés après avoir écarté les points erratiques, donc pour $n^{(k)} \leq 16^2$ valeurs. Cette estimation est répétée pour chacune des 8 surfaces mesurées au Talysurf de chaque échantillon.

$$\bar{A}_{ij}^{(k)} = \frac{1}{n^{(k)}} \sum_{l=1}^{n^{(k)}} A_{ij}^{(k),l}, \sigma_{ij}^{(k)} = \sqrt{\frac{1}{n^{(k)}} \sum_{l=1}^{n^{(k)}} \left[A_{ij}^{(k),l} - \bar{A}_{ij}^{(k)} \right]^2}, k = 1 \dots 8 \quad (56)$$

Conformément au théorème limite central, les moyennes ainsi obtenues suivent une distribution normale, et la moyenne des 8 valeurs a un écart type inférieur de $2\sqrt{2} \cong 2{,}83$ à l'écart type obtenu pour chacune des 8 surfaces.

$$\bar{A}_{ij} = \frac{1}{8} \sum_{k=1}^{8} \bar{A}_{ij}^{(k)}, \sigma_{ij} = \frac{1}{8\sqrt{8}} \sum_{k=1}^{8} \sigma_{ij}^{(k)} \quad (57)$$

Le facteur d'écoulement A_{11} est représenté sur la figure 72.

La hauteur moyenne entre les surfaces est adimensionnée avec l'écart type des hauteurs de la surface mesurée sur le Talysurf :

$$\bar{h}_{moyen} = h_{moyen}/S_q \text{ (pour la surface donnée en exemple, } S_q\text{=3,3 µm)} \quad (58)$$

On observe que, pour des valeurs très faibles de la hauteur moyenne, le facteur d'écoulement peut avoir des valeurs négatives, ce qui est irréaliste. Ceci est dû au fait que les résultats des calculs d'homogénéisation ont été extrapolés vers des valeurs $\bar{h}_{moyen} = 1$.

5.2.1.2 L'approche basée sur les facteurs d'écoulement

Une autre approche des facteurs d'écoulement est possible à partir de la définition du débit dans le contact à micro-échelle avec des conditions de périodicité [25], [75].
Une différence de pression est appliquée entre les frontières supérieure et inférieure et des conditions de périodicité sont imposées à droite et à gauche du domaine décrit sur la figure 71. Pour des surfaces parallèles et lisses, séparées par une distance h_{moyen} et en supposant une variation linéaire de la pression entre l'entrée, P_0, et la sortie, P_1 (hypothèse acceptable même pour un gaz car la longueur L_x du domaine est faible) le débit volumique est :

$$Q_{x,0} = \frac{h_{moyen}^3}{12\mu}\frac{P_0 - P_1}{L_x}L_z \tag{59}$$

La présence des rugosités sur les surfaces conduit à un débit plus faible, qui pourra être décrit en utilisant un facteur d'écoulement $\bar{A}_{xx} \leq 1$:

$$Q_x = \bar{A}_{xx}\frac{h_{moyen}^3}{12\mu}\frac{P_0 - P_1}{L_x}L_z \tag{60}$$

Le même débit est évalué à partir de la résolution numérique de l'équation de Reynolds (50) en utilisant les épaisseurs de film locales.

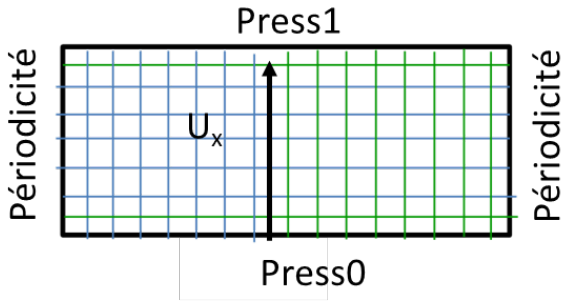


Figure 71: Maillage rectangulaire et conditions aux limites pour l'équation de Reynolds

Les débits élémentaires sur la frontière d'entrée ou de sortie (en haut et en bas de la figure 71) sont calculés après la résolution de l'équation de Reynolds :

$$Q_{x,Re} = \int_0^{L_z}\int_0^{h(x=0,z)} udydz = \int_0^{L_z}\int_0^{h(x=L_x,z)} udydz \tag{61}$$

Le facteur d'écoulement est alors donné par :

$$\bar{A}_{xx} = \frac{Q_{x,Re}}{\frac{h_{moyen}^3}{12\mu}\frac{P_0 - P_1}{L_x}L_z} \tag{62}$$

Le résultat est également présenté sur la figure 72.

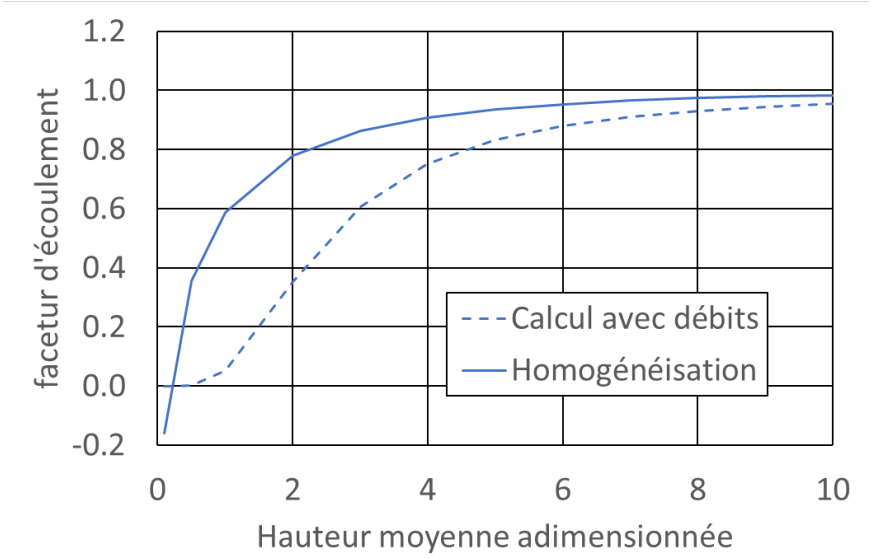


Figure 72: Facteurs d'écoulement calculés à partir de l'homogénéisation de l'équation de Reynolds et à l'aide des débits

Toutefois, il faut souligner que, pour être précis, les facteurs d'écoulement ainsi calculés devraient être estimés à partir d'une approche de type Monte-Carlo. Cette approche nécessite l'estimation des facteurs d'écoulement pour un nombre suffisant de surfaces rugueuses statistiquement identiques. La distribution, la moyenne et l'écart type des facteurs d'écoulement sont ensuite déterminés. Dans nos travaux, nous ne disposons que de 8 surfaces mesurées pour chaque matériau. Il est donc difficile de réaliser une analyse statistique correcte, à moins de décomposer les surfaces mesurées en sous-surfaces afin d'enrichir l'analyse statistique.

5.2 Analyse macro-échelle

L'analyse à macro-échelle est effectuée sur la totalité de la surface mesurée par le Polytec. L'échantillon est un disque défini par un rayon intérieur R_1=7 mm et un rayon extérieur R_2=15 mm. Le disque est discrétisé en cellules de longueur radiale et d'amplitude circonférentielle constantes (Fig.73).

$$\Delta r = (R_2 - R_1)/n_r \, , \Delta\theta = 2\pi/n_\theta \qquad (63)$$

où n_r et n_θ sont les nombres de cellules du maillage dans les directions radiale et circonférentielle.

Les cellules du maillage ont donc la même taille suivant la direction circonférentielle, mais des tailles différentes suivant la dimension radiale (les cellules du maillage diminuent de $R_2\Delta\theta$ à $R_1\Delta\theta$).

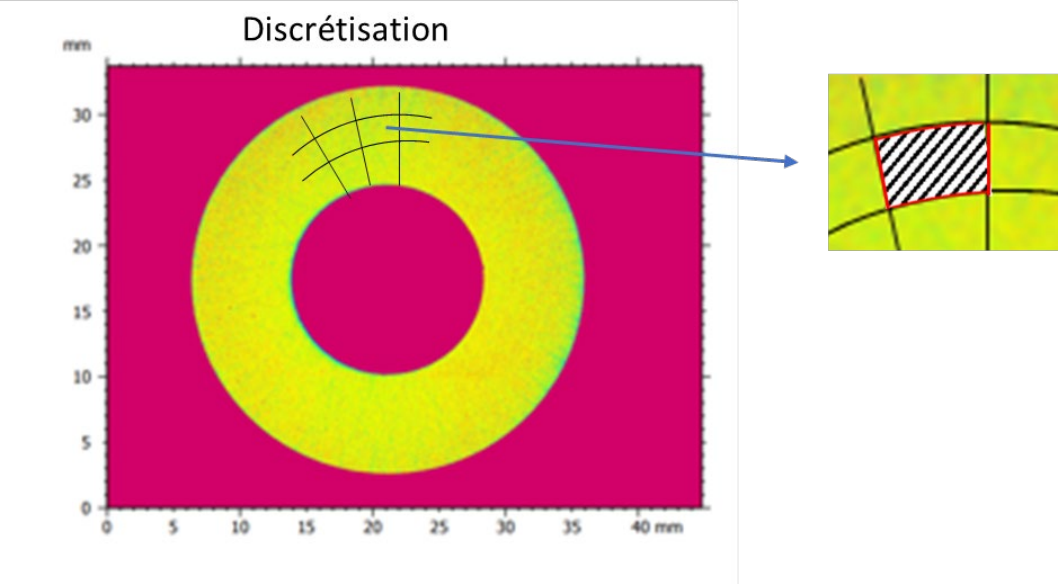


Figure 73: Maillage régulier du disque échantillon

5.2.1 Interpolation et filtrage des hauteurs sur la macro-échelle

Les valeurs mesurées sur le Polytec, avec une résolution spatiale de 28 µm, doivent être interpolées et filtrées aux sommets des cellules de discrétisation. Cette double opération est nécessaire, car d'une part les sommets des cellules ne coïncident pas avec les points mesurés (d'où la nécessité de l'interpolation), et d'autres part, il faut éliminer les hauteurs de surface liées à la micro-échelle (considérées comme des rugosités) pour isoler les ondulations de la surface. Il est supposé que les défauts de forme sont absents, ou ont été enlevés par une autre procédure.

Pour $z(\xi,\eta)$ la hauteur mesurée par le Polytec et $w(x,y)$ la hauteur calculée aux sommets du maillage, cette double opération (interpolation et filtrage passe bas) est effectuée avec un filtre gaussien plan linéaire [76] :

$$w(x,y) = \frac{\iint \gamma(x-\xi, y-\eta) z(\xi,\eta) d\xi d\eta}{\iint \gamma(x-\xi, y-\eta) d\xi d\eta} \quad (64)$$

$$\gamma(x-\mu, y-\nu) = \frac{1}{(\alpha\lambda_c)^2} e^{-\pi\frac{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}{(\alpha\lambda_c)^2}} \quad (65)$$

où $\alpha = \sqrt{ln2/\pi} \cong 0{,}4697$ spécifie l'amortissement de 50% de l'amplitude.
Les fonctions de poids $\gamma(x-\xi, y-\eta)$ n'ont pas de support compact (elles ne sont pas limitées dans les directions x et y).
Pour cette raison $\gamma(x-\xi, y-\eta) = 0$ lorsque $\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2} > 0{,}6\lambda_c$ (des valeurs nulles leur seront imposées au-delà d'un cercle centré sur le point (*x,y*) où le filtrage est fait).

5.2.2 Résolution du problème à macro-échelle

La pression dans une cellule du maillage présenté sur la figure 7 est due à la fois aux contacts entre les rugosités et à l'écoulement du fluide.

$$P_A = P_{c,A} + P_{f,A} \quad (66)$$

Dans le cas le plus rigoureux, les deux pressions, $P_{c,A}$ et $P_{f,A}$, doivent être calculées simultanément, ce qui conduit à un problème couplé à l'échelle macroscopique.
La pression de contact entre les rugosités est déterminée à partir de la distance moyenne entre les deux surfaces et de la loi « pression de contact apparente – distance moyenne entre les surface » déduite du problème de contact à micro-échelle et représentée sur la figure 69.

A la macro-échelle, la distance entre les surfaces, h_A, est mesurée au centre *A* de la cellule du maillage.

$$P_{c,A} = P_c(h_A) = P_{c1} e^{P_{c2} h_A} \quad (67)$$

où $P_{c1,2}$ sont les coefficients de l'approximation logarithmique de la loi de contact à micro-échelle.

Comme les surfaces sont élastiques et semi-infinies, cette pression va provoquer des enfoncements dans tous les points voisins. Ces enfoncements seront calculés avec l'approche proposée par Johnson (1985), page 53 [77]. Pour une pression donnée sur le quadrangle

$A_1A_2A_3A_4$ représenté sur la figure 74 (les cellules du maillage de l'échantillon sont toutes des quadrangles), l'enfoncement dans un point B est :

$$u_{z,B} = \frac{1-\nu^2}{E} \iint_S p(s,\phi) ds d\phi \tag{68}$$

Où ds et $d\phi$ sont considérés dans un système de coordonnées cylindrique.

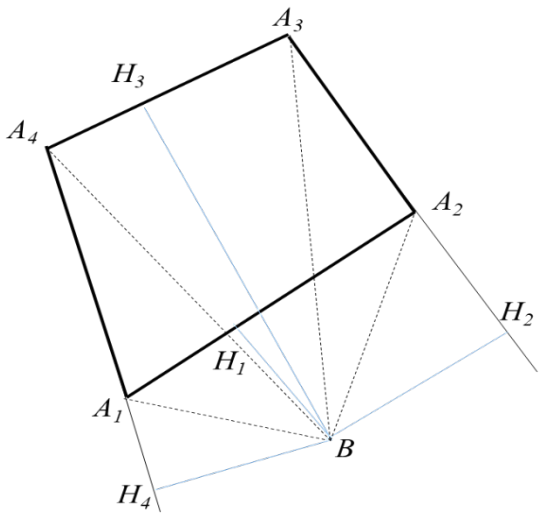


Figure 74: Quadrangle de la discrétisation

Les points H_i sont définis comme les projections orthogonales du point B sur les arêtes du quadrangle $A_1A_2A_3A_4$.

Si la pression est considérée constante sur le quadrangle, l'enfoncement au point B s'exprime comme :

$$u_{z,B} = \frac{1-\nu^2}{E} P \iint_S ds d\phi \tag{69}$$

L'intégrale est ensuite calculée en tenant compte de la décomposition du quadrangle en triangles rectangles :

$$A_1A_2A_3A_4 = BA_4H_4 + BH_3A_4 + BA_3H_3 + BH_2A_3 - BA_1H_4 - BH_1A_1 - BA_2H_1 - BH_2A_2 \tag{70}$$

Johnson (1985) [77], page 53-54 montre que ces intégrales peuvent être calculées analytiquement à partir de la relation illustrée sur la figure 75.

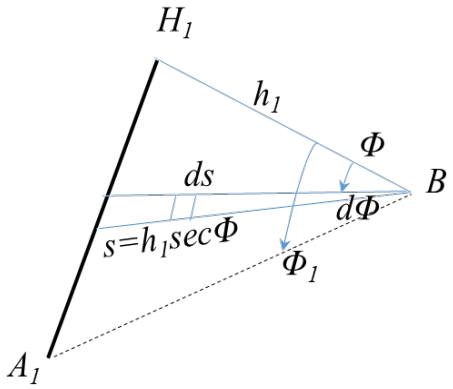


Figure 75: Triangle rectangle de la discrétisation

$$\iint_S ds d\phi = \int_0^{\phi_1} \int_0^{s_1} ds\, d\phi = \int_0^{\phi_1} h_1 sec\phi_1 d\phi = \frac{h_1}{2} ln\left(\frac{1+sin\phi_1}{1-sin\phi_1}\right) \tag{71}$$

La relation (71) servira de solution pour les intégrales effectuées le long des arrêtes du quadrangle :

$$\iint_S ds d\phi = \iint_{A_1A_2} ds d\phi + \iint_{A_2A_3} ds d\phi + \iint_{A_3A_4} ds d\phi + \iint_{A_4A_1} ds d\phi \tag{72}$$

Par exemple, pour la figure 76, l'équation de la droite qui passe par $A_1(x_1, y_1)$ et $A_2(x_2, y_2)$ s'écrit (dans ce sens) :

$$Ax + By + C = 0 \tag{73}$$

Avec

$$A = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \qquad B = -1, \qquad C = y_1 - Ax_1 \tag{74}$$

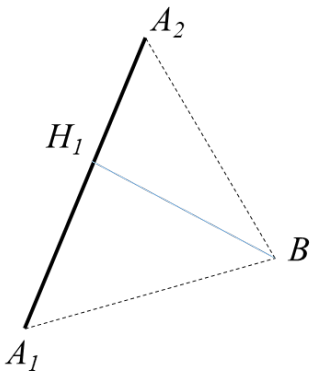


Figure 76: Triangle rectangle de la discrétisation

Le point H est le pied de la perpendiculaire du point B sur la droite A_1A_2 . Ses coordonnées sont données par :

$$x_H = \frac{Ay_B + x_B - A(y_1 - Ax_1)}{1 + A^2}, y_H = Ax_H + y_1 - Ax_1 \tag{75}$$

Les sinus des angles $\phi_{1,2}$ sont déterminés à l'aide des produits vectoriels :

$$sin\phi_{1,2} = \frac{\left|\overrightarrow{BA}_{1,2} \times \overrightarrow{BH}\right|}{\left|\overrightarrow{BA}_{1,2}\right|\left|\overrightarrow{BH}\right|} \tag{76}$$

La contribution du segment $\overrightarrow{A_1A_2}$ est alors donnée par :

$$k_{A_1A_2} = \frac{\left|\overrightarrow{BH}\right|}{2}\left[ln\left(\frac{1 + sin\phi_1}{1 - sin\phi_1}\right) sign\left(\left|\overrightarrow{BA}_1 \times \overrightarrow{BH}\right|\right) - ln\left(\frac{1 + sin\phi_2}{1 - sin\phi_2}\right) sign\left(\left|\overrightarrow{BA}_2 \times \overrightarrow{BH}\right|\right)\right] \tag{77}$$

Les deux termes correspondent à deux triangles énumérés dans la relation (70) formés lors de la décomposition du quadrangle. En sommant sur toutes les arêtes, la contribution totale de la cellule du maillage s'obtient alors directement.

Pour une cellule quadrangulaire du maillage, il résulte :

$$k_{i,j} = k_{A,B} = k_{12} + k_{23} + k_{34} + k_{41} \tag{78}$$

Où la relation (77) est répétée pour chaque arrête de la cellule.

L'enfoncement de la surface dans le centre d'une cellule du maillage sera donc :

$$u_{z,i} = \frac{1-\nu^2}{E} \sum_{i=1}^{n_{total}} k_{i,j} P_j \tag{79}$$

Ou, sous forme matricielle :

$$\boldsymbol{u_z = KP = K\left(P_c + P_f\right)}$$

$$K_{i,j} = \frac{1-\nu^2}{E} k_{i,j} \tag{80}$$

où les pressions fluides $\boldsymbol{P_f}$ sont déterminée à partir de l'équation de Reynolds (54) avec des facteurs d'écoulement.

Le système d'équations (80) n'est pas linéaire, car les pressions de contact et les pressions fluides dépendent de la distance entre les deux surfaces rugueuses :

$$h_A = h_{A,0} + u_{z,A} \tag{81}$$

Ou, sous forme matricielle :

$$\boldsymbol{h = h_0 + u_z} \tag{82}$$

L'équation non-linéaire pour les enfoncements s'écrit alors :

$$\boldsymbol{u_z = KP = K\left[P_{c1} e^{P_{c2}(h_0 + u_z)} + P_{f,h_0+u_z}\right]} \tag{83}$$

La résolution de ce système non-linéaire pour les enfoncements à macro-échelle devrait donc être couplée avec la résolution de l'équation de Reynolds pour calculer les pressions fluides $\boldsymbol{P_{f,h_0+u_z}}$. Toutefois, si l'on suppose que la contribution des pressions fluides est faible, hypothèse acceptable pour les faibles pressions utilisées pour l'air, le système se simplifie et devient :

$$\boldsymbol{u_z = K\left[P_{c1} e^{P_{c2}(h_0+u_z)} + P_{f,h_0}\right]} \tag{84}$$

Ce système est résolu par la méthode de Newton–Raphson, appliquée aux résidus :

$$\boldsymbol{Res = u_z - K\left[P_{c1} e^{P_{c2}(h_0+u_z)} + P_{f,h_0}\right]} \tag{85}$$

La matrice jacobienne correspondante est donnée par :

$$Jac_{i,j} = \frac{\partial Res_i}{u_{z,j}} = \delta_{ij} - K_{i,j} P_{c1} P_{c2} e^{P_{c2}(h_{0,j}+u_{z,j})}, \delta_{ij} = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases} \tag{86}$$

Il faut toutefois souligner que, si pour le débit de fuite la validation est directe, le problème de contact peut être abordé soit en « charge imposée », soit en « distance imposée ». Dans le premier cas, la force de contact est connue à partir de la différence entre la force appliquée par le piston et la force aérostatique au centre de l'échantillon (deux informations expérimentales), et la distance moyenne entre les surfaces constitue alors l'information validée, par comparaison entre les calculs et les mesures. Dans le deuxième cas, la distance moyenne entre les surfaces est imposée à partir des mesures, et la force de contact entre les aspérités devient l'information validée. La deuxième approche de validation, en « distance imposée », présente l'avantage d'être plus directe, tandis que la première suppose la mise en place d'un algorithme additionnel de résolution non linéaire.

Les résultats expérimentaux ont bien permis d'alimenter et de paramétrer le modèle. Toutefois, faute de temps, son exploitation complète n'a pas pu être menée dans le cadre de ce travail. La poursuite de cette analyse constituera la suite naturelle de l'étude.

Conclusions et perspectives

Les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans le cadre du projet *MIXER*, dont l'objectif est de mieux comprendre les phénomènes qui gouvernent la lubrification mixte observée dans les étanchéités dynamiques à gaz. Ce régime particulier, caractérisé par la coexistence de zones de contact solide et de zones lubrifiées par un film de très faible épaisseur, reste difficile à maîtriser en raison des interactions étroites entre la topographie multi-échelle des surfaces, les propriétés des matériaux et la physique de l'écoulement compressible.

Afin d'aborder cette problématique, une approche combinant caractérisation multi-échelle, expérimentation et modélisation a été développée dans le cadre de ce travail.

Dans un premier temps, une étude bibliographique a été menée afin d'établir le cadre des travaux. Elle a permis de présenter le principe de fonctionnement des garnitures mécaniques, les matériaux utilisés et les mécanismes de lubrification impliqués. Une attention particulière a été portée à la caractérisation des surfaces rugueuses et à leur influence sur le régime de lubrification mixte, avant d'aborder la modélisation du contact rugueux, depuis les approches classiques de type Greenwood jusqu'aux modèles améliorés intégrant la plasticité, la coalescence et les interactions entre aspérités.

Dans le second chapitre de ce mémoire, les travaux ont porté sur le développement du banc d'essai *MIXER*, spécifiquement conçu pour l'étude du contact entre surfaces rugueuses lubrifiées par un fluide compressible en régime mixte. Ce dispositif, reposant sur une géométrie simplifiée de type disque annulaire/disque plein, permet de reproduire de manière contrôlée les conditions d'un contact plan. Il offre la possibilité de mesurer simultanément plusieurs grandeurs : le débit de fuite, la distance entre les surfaces en contact, la charge appliquée ainsi que le couple de frottement. De plus, l'utilisation d'un disque transparent en saphir ouvre la voie au développement de techniques optiques d'observation directe de la zone de contact. Ce banc expérimental constitue ainsi un outil original pour l'étude du régime de lubrification mixte à gaz, un domaine pour lequel les données expérimentales disponibles restent encore rares dans la littérature.

Dans le troisième chapitre, un travail a été consacré à la préparation et à la caractérisation topographique des surfaces. Deux matériaux couramment utilisés dans les garnitures mécaniques à gaz ont été étudiés : le carbure de silicium et le graphite.

Différents procédés de polissage ont été appliqués pour obtenir des surfaces présentant des rugosités et des ondulations variées.

Les analyses interférométriques ont montré que le carbure de silicium (SiC) développe, après polissage, une texture isotrope à faible ondulation, tandis que le graphite présente à la fois des textures isotropes et anisotropes, marquées par des stries directionnelles et circonférentielles ainsi qu'une ondulation prononcée. Cette variabilité du graphite, fortement influencée par la granulométrie des disques abrasifs de polissage, s'explique par sa structure poreuse et sa faible dureté, contrairement au SiC, matériau dur, qui atteint rapidement des surfaces homogènes. Ces travaux ont ainsi permis de constituer un panel de surfaces représentatives, qui a ensuite été analysé à l'aide du banc expérimental *MIXER*, afin d'évaluer l'influence de la micro-géométrie des surfaces sur le comportement macroscopique du contact.

Les essais expérimentaux présentés dans le chapitre 4 ont mis en évidence l'influence prépondérante de la topographie de surface sur la distance entre les surfaces en contact et le débit de fuite. Les résultats ont également montré des différences marquées entre les deux matériaux étudiés. Pour le carbure de silicium (SiC), la rugosité contrôle principalement le comportement du contact. Les surfaces rugueuses présentent des débits de fuite initiaux élevés, qui diminuent progressivement avec l'augmentation de la charge appliquée, tandis que les surfaces plus lisses atteignent rapidement un débit minimal, traduisant un contact plus homogène. Le graphite, en revanche, présente un comportement plus complexe, fortement influencé par son ondulation. L'orientation des stries de polissage joue également un rôle déterminant, les stries radiales favorisent des débits de fuite plus importants que les stries circonférentielles, ce qui met en évidence l'impact de la texture directionnelle sur la formation et la répartition des chemins d'écoulement. Ces observations démontrent la nécessité d'une approche multi-échelle, intégrant rugosité et ondulation, pour bien décrire le comportement des surfaces en contact dans le régime de lubrification mixte à gaz.

L'analyse menée dans la dernière partie de ce manuscrit a permis de développer une approche multi-échelle du contact. La description microscopique considère les interactions entre les aspérités à l'aide de modèles de contact rugueux établis, tandis que la description macroscopique prend en compte l'effet des ondulations. L'homogénéisation de l'équation de Reynolds pour un fluide compressible, associée à des facteurs d'écoulement, permis d'intégrer l'influence de la rugosité dans le calcul du film.

Les travaux de cette thèse ont permis de mieux comprendre le rôle de la topographie multi-échelle dans le régime de lubrification mixte à gaz. Les résultats obtenus montrent que la performance d'un contact ne dépend pas seulement de sa géométrie, mais aussi de la rugosité, de l'ondulation, de l'anisotropie et de la nature même du matériau constituant les surfaces. Ces conclusions ouvrent la voie à la conception de surfaces optimisées pour les systèmes d'étanchéité dynamiques à gaz.

Les perspectives concernant la poursuite de cette étude se situent sur plusieurs axes. Dans un premier temps, la réalisation d'essais sans accouplement élastique permettrait d'isoler les effets de forme sur le comportement du contact, indépendamment des autres influences. Des essais en rotation sont également envisagés afin de mesurer le couple de frottement et d'évaluer l'impact des conditions dynamiques, notamment la vitesse de rotation. Par ailleurs, l'étude pourrait être étendue à des matériaux métalliques usinés ou texturés. Enfin, la mise en œuvre de techniques de visualisation optique in situ, rendue possible grâce au disque transparent en saphir, offrirait la possibilité d'observer directement les zones de contact et la répartition du film d'air au sein de l'interface.

Bibliographie

[1] G. W. Stachowiak et A. W. Batchelor, Engineering Tribology, 4th ed., Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2014.

[2] «Selecting mechanical seal materials, « Turbomachinery international »,» 22 may 2018. [En ligne]. Available: https://www.turbomachinerymag.com/view/selecting-mechanical-seal-materials. [Accès le 15 Mars 2022].

[3] S. C. Lim, M. F. Ashby et J. H. Brunton, «The effects of sliding conditions on the dry friction of metals,» *Acta Metallurgica,* vol. 37, n° 13, p. 767–772, 1989.

[4] M. Huebner, «Material Selection in Mechanical Seals,» *Proceedings of the Twenty-Second International Pump Symposium,* p. 127–135, 2005.

[5] X. Wang, K. Kato et K. Adachi, «The lubrication effect of micro-pits on parallel sliding faces of SiC in water,» *Tribology Transactions,* vol. 45, p. 294–301, 2002.

[6] K. Delbé, S. Lafon-Placette et J. a. Denape, «Tribological characterization of silicon carbide and carbon materials,» *Journal of the European Ceramic Society,* vol. 35, p. 1147–1159, 2014.

[7] Y. Zhang, H. Liu et W. Chen, «Wear monitoring of dry gas seals through seal face structure design,» *Journal of Tribology and Mechanical Seals,* vol. 58, n° 12, p. 145–157, 2025.

[8] B. Hamrock, S. R. Schmid et B. Jacobson, Fundamentals of Fluid Film Lubrication, Boca Raton, FL: CRC Press, 2004.

[9] T. Mang et W. Dresel, Lubricants and Lubrication, Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2007.

[10] B. Bhushan, Modern Tribology Handbook, Boca Raton, FL: CRC Press, 2001.

[11] R. F. Salant, «Numerical simulation of mechanical seal behavior with mixed lubrication and asperity contact,» *Journal of Tribology,* vol. 123, n° 13, p. 576–582, 2001.

[12] A. O. Lebeck, Principle and Design of Mechanical Face Seal, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991.

[13] AFMHP, «Garnitures mécaniques - technologie,» Les Techniques de l'Ingénieur (BM5425), 2001.

[14] M. B. Dobrica, *Prise en compte de la lubrification mixte lors de l'évaluation des performances des paliers très chargés,* Université de Poitiers: Thèse de doctorat, 2008.

[15] K. J. Stout, Development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions, London: Penton Press, 2006.

[16] Roughness Measurement Guidebook: Introduction to Surface Roughness Measurement, Olympus Inc., 2017.

[17] O. Reynolds, «On the theory of lubrication and its application to Mr Beauchamp Tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil,» *Phil. Trans. Roy. Soc. A177, 157,* 1886.

[18] T. E. Tallian , Y. P. Chiu , D. F. Huttelocher et J. A. Kamensh, «Lubricant films in rolling contact of rough surfaces,» *ASLE Trans. 7, 109–124,* 1964.

[19] L. Houpert et P. Leenders, «A study of mixed lubrication conditions in modern deep-groove ball bearing,» *Proceedings, 11th Leeds-Lyon Symposium, Mixed Lubrication and Lubricated Wear,* 1984.

[20] L. D. Wedeven et C. Cusano, «Elastohydrodynamic film thickness measurements of artificially produced surfaces dents and grooves,» *ASLE Trans. 22, 369–381,* 1979.

[21] T. Touche, J. Cayet-Barroiz et D. Mazuyer, «Friction of Textured Surfaces in EHL and Mixed lubrication: Effect of the Groove Topography,» *Tribol Lett 63, 25,* 2016.

[22] J. Guegan , A. Kadicric et H. A. Spikes , «Study of the Lubrication of EHL Point Contact in the Presence of Longitudinal Roughness,» *Tribol Lett 59, 22,* 2015.

[23] F. Guo, Q. Wang, C. Shen et H. Wang, «Experimental study on the friction and wear performance under mixed lubrication using textured surfaces,» *Tribology International, 109, 1–10,* 2017.

[24] X. Gao, L. Wang, F. Guo et Y. Liu, «Experimental investigation of mixed lubrication with nanoscale surface texturing,» *Tribology International, 135, 384–393,* 2019.

[25] N. Patir et H. Cheng, «Journal of Lubrication Technology,» vol. 101, n° 13, p. 220–229, 1979.

[26] D. Zhu et Y. Hu, «A mixed lubrication model of point contacts including asperity contact,» *Tribology International,* vol. 33, n° 110, p. 719–732, 2000.

[27] F. Sahlin, R. Larsson, S. Glavatskih, A. Almqvist et T. Lundström, «A mixed lubrication model incorporating measured surface topography. Part 1: Theory of flow factors,» *Proceedings of the IMechE, Part J: Journal of Engineering Tribology,* vol. 223, n° 13, p. 405–412, 2009.

[28] G. Morales-Espejel, H. Lund et P. Lugt, «Advanced mixed lubrication model including surface roughness and surface fatigue,» *Tribology International,* vol. 43, n° 110, p. 1902–1910, 2010.

[29] H. Evans et R. Snidle, «Elastohydrodynamic lubrication at micro-contacts,» *Proceedings of the IMechE, Part J: Journal of Engineering Tribology,* vol. 210, n° 12, p. 75–87, 1996.

[30] Y. Jiang, T. Higuchi et Y. Kawaguchi, «A mixed lubrication model for line contacts,» vol. 32, n° 4, p. 223–231, 1999.

[31] B. Jacod, N. Brunetière, J. Bouyer et M. Fillon, «A mixed lubrication model applied to mechanical seals,» *Journal of Tribology,* vol. 125, n° 13, p. 653–660, 2003.

[32] N. Brunetière et M. Fillon, «Influence of surface roughness on the performances of hydrodynamic thrust bearings,» *Tribology International,* vol. 40, n° 1601–607, p. 4, 2007.

[33] N. Brunetière, J. Bouyer et M. Fillon, «Modeling mixed lubrication regimes in mechanical face seals with real surface topography,» *Tribology Transactions,* vol. 59, n° 1288–297, p. 2, 2016.

[34] M. Minet, B. Jacod et N. Brunetière, «Transient mixed lubrication analysis in mechanical face seals with real surface roughness,» *Tribology International,* vol. 44, n° 1622–630, p. 5, 2011.

[35] D. Bonneau, A. Fatu et D. Souchet, Hydrodynamic Bearings, Wiley-ISTE, 2014.

[36] M. Dobrica et M. Fillon, «About the validity of Reynolds equation and the importance of the pressure-velocity coupling in hydrodynamic lubrication,» *Journal of Tribology,* vol. 128, n° 14, p. 913–918, 2006.

[37] S. Dahite, «Modélisation hydrodynamique des joints radiaux segmentés à portance (JRSP),» Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2020.

[38] A. Mariot, « Étude dynamique des joints segmentés et à bague flottante,» Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2015.

[39] J. Greenwood et J. Tripp, «The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,* vol. 185, p. 625–633, 1970–1971.

[40] J. Greenwood et J. Williamson, «Contact of nominally flat surfaces,» *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences,* vol. 295, n° 11442, p. 300–319, 1966.

[41] J. Greenwood et J. Tripp, «The Elastic Contact of Rough Spheres,» *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics,* vol. 34, n° 1153–159, 1967.

[42] T. Hisakado, «Effects of Surface Roughness on Contact between Solid Surfaces,» *Wear,* vol. 28, p. 217–234, 1974.

[43] A. Bush, R. Gibson et T. Thomas, «The Elastic Contact of a Rough Surface,» *Wear,* vol. 35, p. 87–111, 1975.

[44] W. Chang, I. Etsion et D. Bogy, «An Elastic-Plastic model for the contact of rough surfaces,» *ASME Journal of Tribology,* vol. 109, p. 263, 1987.

[45] J. Pullen et J. Williamson, «On the plastic contact of rough surfaces,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology,* vol. 185, p. 625–633, 1972.

[46] Y. Zhao, D. Maletta et L. Chang, «An asperity microcontact model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow,» *ASME Journal of Tribology,* vol. 122, p. 6–93, 2000.

[47] F. Robbe-Valloire, «Statistical analysis of asperities on a rough surface,» *Wear,* vol. 249, p. 401–408, 2001.

[48] B. Persson, «Elastoplastic contact between randomly rough surfaces,» *Physical Review Letters,* vol. 87, n° 111, p. 116101, 2001.

[49] M. Ciavarella, J. Greenwood et M. Paggi, «Inclusion of interaction in the Greenwood and Williamson contact theory,» *Wear,* vol. 265, p. 729–734, 2008.

[50] L. Afferrante, G. Carbone et G. Demelio, «Interacting and coalescing Hertzian asperities: a new multiasperity contact model,» *Wear,* vol. 278–279, p. 28–33, 2012.

[51] Mersen, «Graphite Grade JP900 – Technical Data Sheet,» Mersen France, Gennevilliers, France, 2004.

[52] M. A. Materials, «Performance SiC – Technical Data Sheet,» Morgan Advanced Materials PLC, Windsor, UK, 2013.

[53] A. P. Nyemeck, N. Brunetière et B.Tournerie, «A Multiscale Approach to the Mixed Lubrication Regime: Application to Mechanical Seals,» *Tribology Letters,* vol. 3, n° 1417–429, p. 47, 2012.

[54] I. Etsion et G. Halperin, «Tribological Performance of Surface Texturing in Mechanical Applications – A Review,» *Wear,* vol. 267, n° 111, p. 210–1217, 2009.

[55] B. Bachchhav, M. Kande et M. Nandgaonkar, «Effect of surface roughness on friction and lubrication in sliding contact: A study using pin-on-disk tests,» *Materials Today: Proceedings,* vol. 46, p. 10200–10206, 2021.

[56] D. Gropper, L. Wang et T. J. Harvey, «The effects of surface texturing on friction and wear of mechanical components: A review,» *Lubricants,* vol. 5, n° 14, p. 41, 2017.

[57] C. H. Hsieh, «Recent advances in silicon carbide chemical mechanical polishing,» *Nanomaterials,* vol. 12, n° 120, p. 3619, 2022.

[58] G. Ma, S. Li, F. Liu, C. Zhang, Z. Jia et X. Yin, «A review on precision polishing technology of single-crystal SiC,» *Crystals,* vol. 12, n° 11, p. 101, 2022.

[59] Li, T., Xu, H., Liu, Y., and Wang, Q. J., «Toward Zero Static Friction at the Microscale,» *Physical Review Letters,* vol. 133, n° 123, p. 236202, 2024.

[60] Liang, X. M., Li, D., and Liu, Y., «An experimental study on the relation between friction force and real contact area,» *Scientific Reports,* vol. 11, p. 99909, 2021.

[61] P. Wriggers, Computational Contact Mechanics, 2nd ed, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.

[62] A. Pogacnik et M. Kalin, «How to determine the number of asperity peaks, their radii and their heights for engineering surfaces: A critical appraisal,» *Wear,* vol. 300, p. 143–154, 2013.

[63] F. Maaboudallah, M. Najah et N. Atalla, «A Review on the Contact Mechanics Modeling of Rough Surfaces in the Elastic Regime: Fundamentals, Theories, and Numerical Implementations,» chez *Tribology of Machine Elements - Fundamentals and Applications, G. Pintaude, T. Cousseau, and A. Rudawska*, IntechOpen, 2022.

[64] I. Corporation, «Developer Reference for Intel® Math Kernel Library 2017 – Fortran,» Intel, 2017.

[65] A. R. Conn, N. I. M. Gould et P. L. Toint, Trust-region Methods.SIAM Society for Industrial & Applied Mathematics, Englewood Cliffs, New Jersey: MPS-SIAM Series on Optimization, 2000.

[66] J. Frêne et e. al., Lubrification hydrodynamique. Paliers et Butées, Paris: Éditions Eyrolles, 1990.

[67] G. Bayada et M. Chambat, «New models in the theory of the hydrodynamic lubrication of rough surfaces,» *Journal of Tribology,* vol. 110, n° 13, p. Journal of Tribology, 1988.

[68] A. Almqvist et J. Dasht, «The homogenization process of the Reynolds equation describing compressible liquid flow,» *Tribology International,* vol. 39, n° 19, p. 994–1002, 2006.

[69] A. Fatu, D. Bonneau et R. Fatu, «Computing hydrodynamic pressure in mixed lubrication by modified Reynolds equation,» *Proceedings of the IMechE, Part J: Journal of Engineering Tribology,* vol. 226, n° 112, p. 1074–1094, 2012.

[70] G. C. Buscaglia et M. Jai, «Homogenization of the generalized Reynolds equation for ultra-thin gas films and its resolution by FEM,» *Journal of Tribology,* vol. 126, n° 13, p. 547–552, 2004.

[71] M. Jai, «Homogenization and two-scale convergence of the compressible Reynolds lubrication equation modelling the flying characteristics of a rough magnetic head over a rough rigid disk,» *Modélisation Mathématique et Analyse Numérique,* vol. 29, n° 12, p. 199–233, 1995.

[72] A. Almqvist, J. Fabricius et P. Wall, «Homogenization of a Reynolds equation describing compressible flow,» *Journal of Mathematical Analysis and Applications,* vol. 390, n° 12, p. 456–471, 2012.

[73] M. Rom, F. Konig, S. Muller et G. Jacobs, «Why homogenization should be the averaging method of choice in hydrodynamic lubrication: Applications in engineering science,» *Applications in Engineering Science,* vol. 7, n° 19, p. 100055, 2021.

[74] F. Sahlin, A. Almqvist, R. Larsson et S. Glavatskih, «Rough surface flow factors in full film lubrication based on a homogenization technique,» *Tribology International,* vol. 40, n° 17, p. 1025–1034, 2007.

[75] N. Patir et H. S. Cheng, «An average flow model for determining effects of three-dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication,» *Journal of Lubrication Technology,* vol. 100, n° 11, p. 12–17, 1978.

[76] J. Seewig, «Areal Filtering Methods,» chez *Characterisation of Areal Surface Texture*, Berlin, , R. Leach, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.

[77] K.L, Johnson, Contact Mechanics, Cambridge: Cambridge University Press, 1985.

[78] SCERAM, «Material Sapphire – Technical Data Sheet,» SCERAM, Champagne au Mont d'Or, France, 2022.

[79] Norme Internationale ISO 16610-21, «Spécification Géométrique des Produits (GPS) — Filtrage — Partie 21 : Filtres de profil linéaires gaussiens,» ISO, 2012.

Liste des figures

Figure 1: Image d'une garniture mécanique réelle 5
Figure 2: Représentation schématique d'une garniture mécanique 6
Figure 3: Etat de surface d'une face en graphite poli 10
Figure 4: Profil extrait du plan de coupe (A-A) de la figure 3 10
Figure 5: Surface rugueuse, FAC, et longueurs d'autocorrélation 13
Figure 6: Exemple de courbe de Stribeck 14
Figure 7: Modélisation de la surface somme 18
Figure 8: Modèle de contact des aspérités GW 20
Figure 9: Contact entre une sphère et un plan rugueux [41] 21
Figure 10: Déformation plastique d'une aspérité [44] 22
Figure 11: Géométrie du tribomètre MIXER 26
Figure 12: Schéma du tribomètre MIXER (les flèches indiquent la direction de l'écoulement d'air : flèche verte = air entrant ; flèche rouge = air sortant) 27
Figure 13: Vue en coupe du banc Mixer 28
Figure 14: (a) Image banc MIXER, (b) Vue en coupe zone de contact 29
Figure 15: Schéma d'étalonnage du système de charge 30
Figure 16: Courbe d'étalonnage de la charge 31
Figure 17: Porte-échantillon : disposition des capteurs pour l'étalonnage (Keyence en vert, Inductif en bleu) 32
Figure 18: Courbe d'étalonnage du capteur inductif 1 32
Figure 19: Distance échantillon–saphir 33
Figure 20: Position de référence (à charge maximale) 34
Figure 21: Position de l'échantillon sous charge et distances caractéristiques : Z_{max}, Z_{min}, Z_{moyen} 35
Figure 22: Plan du disque de l'échantillon 37
Figure 23: Plan du disque de saphir 38
Figure 24: Polytec TMS 500 Pro.Surf+ et Talysurf CCI 6000 45
Figure 25: Position des zones mesurées sur la surface du graphite a) et du carbure de silicium b) 46
Figure 26: Surface mesurée sur une face de SiC (repère cartésien (x, y)) 46
Figure 27: Surface après redressement 46

Figure 28: a) Position des profils pour la mesure d'ondulation ; b) exemple de profil d'ondulation (R4–R2) 47
Figure 29: Surface de graphite Mersen à l'état brut 48
Figure 30: Surface de SiC en état brut 51
Figure 31: Images Talysurf et profils de rugosité et d'ondulation des deux faces du saphir ... 54
Figure 32: Paramètres d'amplitude de rugosité (Sa) : surfaces graphite et surfaces SiC 57
Figure 33: Paramètre d'amplitude de rugosité (Sz) : surfaces graphite et surfaces SiC 58
Figure 34: Paramètre d'amplitude de rugosité (Sq) : surfaces graphite et surfaces SiC 58
Figure 35: Paramètre d'asymétrie (Ssk) : surfaces graphite et surfaces SiC 59
Figure 36: Paramètre d'étalement (*Sku*): surfaces graphite et surfaces SiC 59
Figure 37: Longueur d'autocorrélation (Sal) : surfaces graphite et surfaces SiC 60
Figure 38: Valeur moyenne de l'amplitude maximale d'ondulation Wt des surfaces de graphite 62
Figure 39: Valeur moyenne de l'amplitude maximale d'ondulation Wt des surfaces de SiC . 62
Figure 40: Spectres de Fourier des profils d'ondulation radiaux et circonférentiels de la surface G1_dir (surface anisotrope) 63
Figure 41: Spectres de Fourier des profils d'ondulation radiaux et circonférentiels de la surface G8 (surface isotrope) 64
Figure 42: Spectres de Fourier des profils d'ondulation radiaux et circonférentiels de la surface SiC1 66
Figure 43: Évolution du débit expérimental en fonction de la force appliquée pour les surfaces SiC (ΔP = 1 bar), (SiC i : i élevé = Rugosité faible) 71
Figure 44: Évolution du débit expérimental en fonction de la force appliquée pour les surfaces SiC (ΔP = 2 bar), (SiC i : i élevé = Rugosité faible) 71
Figure 45: Évolution du débit expérimental en fonction de la force appliquée (ΔP = 2 bar, détail de la figure 47) 72
Figure 46: Évolution du rapport (Débit max / min) en fonction de la force appliquée pour toutes les surfaces en SiC 72
Figure 47: Evolution du Zmoyen en fonction de la force appliquée pour les surfaces SiC (ΔP = 1,5 bar), (SiC i : i élevé = Rugosité faible) 73
Figure 48: Evolution du *Zmoyen* en fonction de la force appliquée pour les surfaces SiC (ΔP = 2 bar), (SiC i : i élevé = Rugosité faible) 74
Figure 49: Évolution de la distance Zmoyen en fonction du paramètre de rugosité Sa 74
Figure 50: Évolution de la distance Zmoyen en fonction du paramètre de rugosité Sz 75

Figure 51: Évolution de la distance Zmoyen en fonction du paramètre de rugosité Sq 75
Figure 52: Évolution du débit expérimental en fonction de la distance moyenne entre les surfaces Zmoyen (ΔP = 2 bar), (SiC i : i élevé = Rugosité faible)..... 77
Figure 53: Évolution du débit de fuite adimensionné en fonction de la distance moyenne adimensionnée (ΔP = 2 bar) 78
Figure 54: Évolution du débit expérimental en fonction de la force appliquée pour les surfaces graphite (ΔP = 1 bar), (Gi : i élevé = Rugosité faible) 79
Figure 55: Évolution du débit expérimental en fonction de la force appliquée pour les surfaces graphite (ΔP = 2 bar), (Gi : i élevé = Rugosité faible) 80
Figure 56: Évolution du rapport (Débit max / min) en fonction de la force appliquée..... 80
Figure 57: Evolution du *Zmoyen* en fonction de la force appliquée pour les surfaces graphite (ΔP = 1 bar), (Gi : i élevé = Rugosité faible) 81
Figure 58: Evolution du Zmoyen en fonction de la force appliquée pour les surfaces graphite (ΔP = 2 bar), (Gi : i élevé = Rugosité faible) 82
Figure 59: Évolution du débit expérimental en fonction de la distance Zmoyen (ΔP = 2 bar) 83
Figure 60: Classement des surfaces de graphite selon leur amplitude moyenne 83
Figure 61: Séparation des échelles entre ondulations (a) et rugosités (b) 88
Figure 62. Image d'une mesure Talysurf sur la surface du graphite..... 88
Figure 63: Hauteurs des rugosités 90
Figure 64: Nœuds d'un maillage rectangulaire utilisés pour l'identification des pics..... 90
Figure 65: Pics en interférences 91
Figure 66: Pics en interférences qui peuvent coalescer..... 93
Figure 67: Surface équivalente des pics qui peuvent coalescer 94
Figure 68: Surface déformé tenant compte des interactions entre les pics 95
Figure 69: Pressions apparentes en fonction de la distance moyenne entre les deux surfaces (épaisseur moyenne du film) 96
Figure 70: Décomposition du domaine suite à la séparation des échelles 98
Figure 71: Maillage rectangulaire et conditions aux limites pour l'équation de Reynolds.... 101
Figure 72: Facteurs d'écoulement calculés à partir de l'homogénéisation de l'équation de Reynolds et à l'aide des débits 102
Figure 73: Maillage régulier du disque échantillon 103
Figure 74: Quadrangle de la discrétisation..... 105
Figure 75: Triangle rectangle de la discrétisation 106
Figure 76: Triangle rectangle de la discrétisation 107

Figure 77: Polisseuse manuelle et Disques abrasifs en carbure de silicium 122
Figure 78: Schéma de repérage des profils radiaux (R1 à R4) et circonférentiels (C1 à C3) 123

Liste des tableaux

Tableau 1: Plage de mesure des équipements banc MIXER..... 28
Tableau 2: Propriétés mécaniques du Carbone Graphite JP900 [51]..... 39
Tableau 3: Propriétés mécaniques du SiC PS5000 [52]..... 39
Tableau 4: Propriétés principales du saphir [78]..... 40
Tableau 5: Caractéristiques des objectifs optiques du Talysurf CCI 6000 44
Tableau 6: Surfaces de graphite polies : taille de grain vs mesures Polytec non filtrées..... 48
Tableau 7: Surfaces de SiC polies : taille de grain vs mesures Polytec non filtrées..... 51
Tableau 8: Classification des échantillons de graphite 55
Tableau 9: Classification des échantillons de SiC 55

Annexes

Annexe A : Dispositif et protocole de polissage

L'ensemble des opérations de polissage a été réalisé à l'aide d'une polisseuse manuelle (Fig.77). Cet équipement est constitué d'un plateau rotatif sur lequel sont fixés les disques abrasifs selon la nature du matériau à polir. Le plateau a été réglé à une vitesse de 15 tr/min, valeur choisie afin de garantir un enlèvement de matière progressif et contrôlé. La machine est équipée d'un système d'arrosage continu qui facilite l'évacuation des débris générés lors de l'abrasion, en particulier pour le graphite, dont la surface tendre et lamellaire favorise la production de grandes quantités de poudre. Après chaque étape de polissage, les échantillons ont été rincés à l'éthanol afin d'éliminer les particules et résidus d'abrasion présents à la surface, puis séchés à l'air comprimé.



Figure 77: Polisseuse manuelle et Disques abrasifs en carbure de silicium

Annexe B : Spectres de Fourier des profils d'ondulation

Les profils radiaux (R1 à R4) et circonférentiels (C1 à C3) ont été mesurés sur la surface Polytec comme montré dans la figure 79.

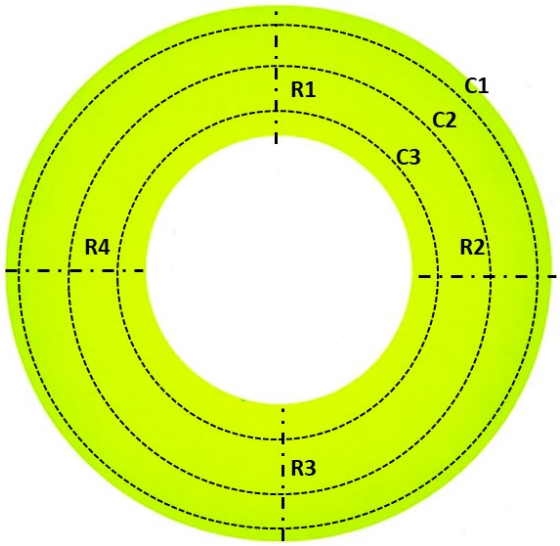
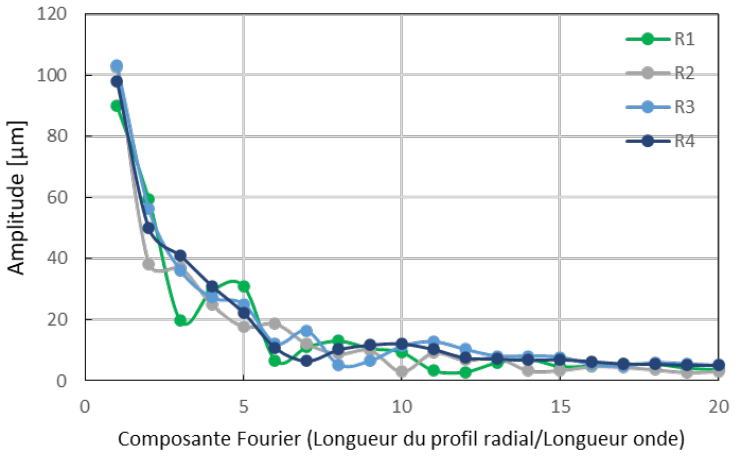
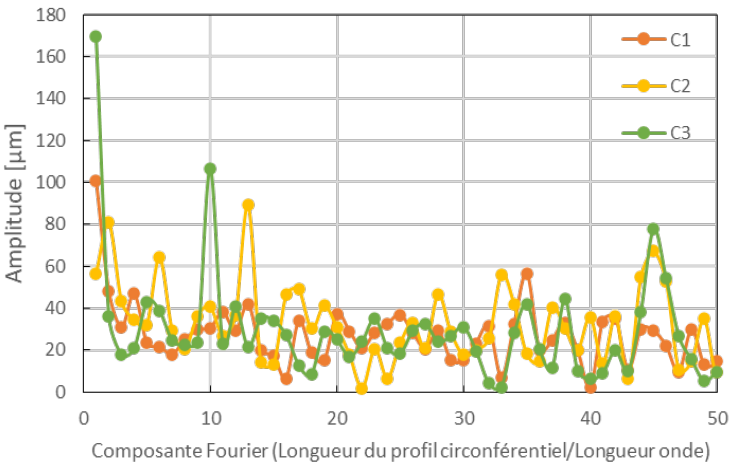


Figure 78: Schéma de repérage des profils radiaux (R1 à R4) et circonférentiels (C1 à C3)

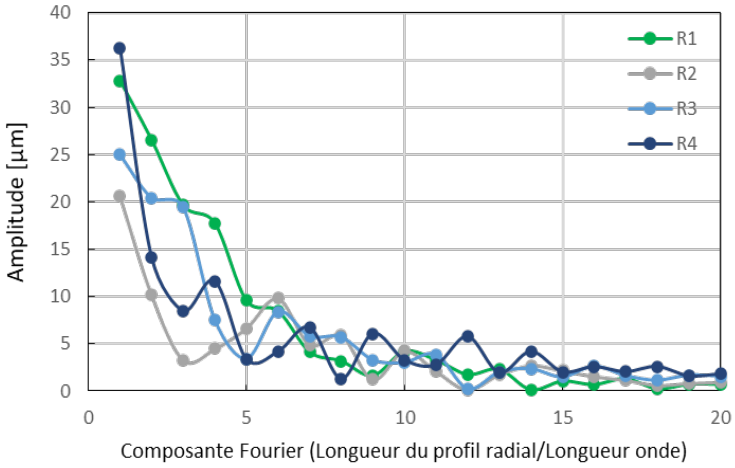
a. Surfaces SiC

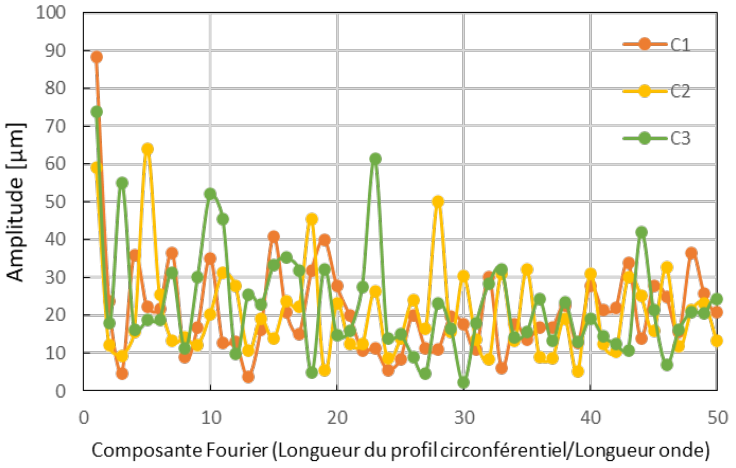
Echantillon SiC brut



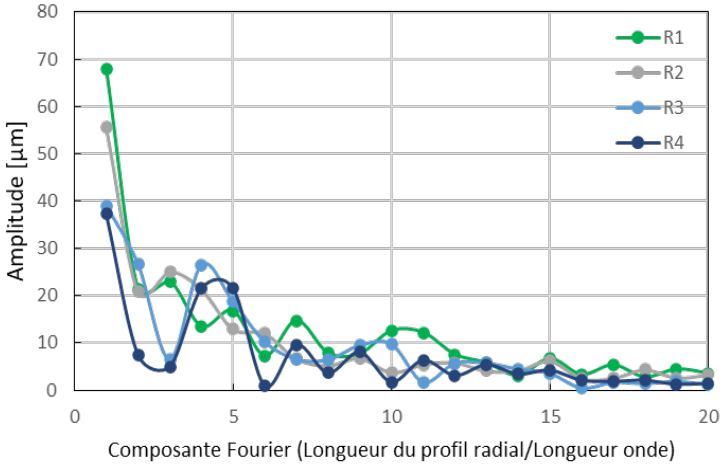


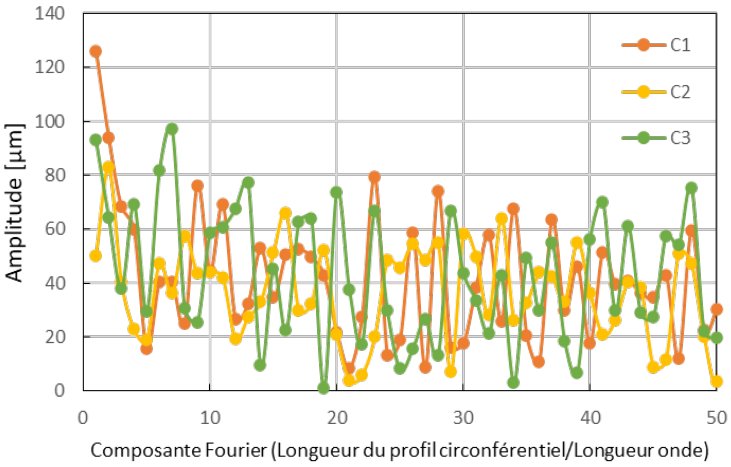
Echantillon SiC2



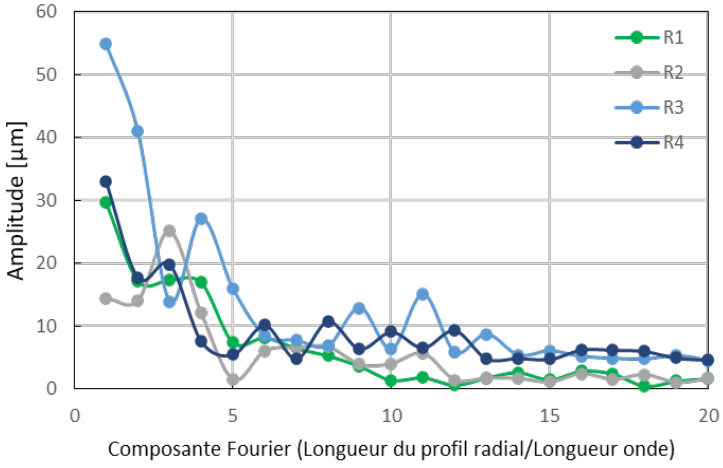


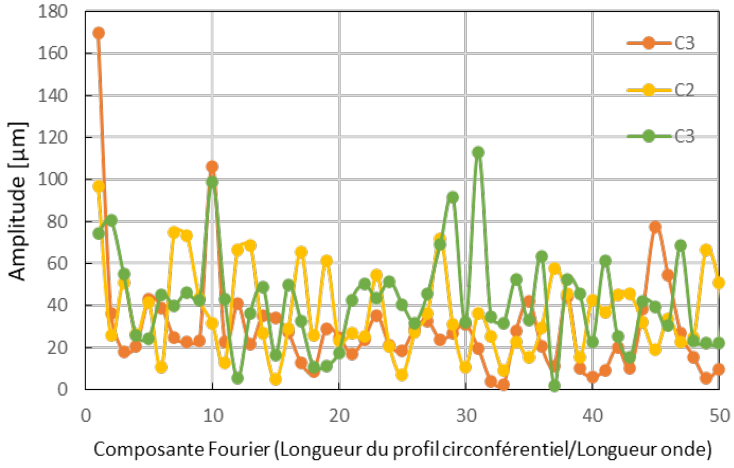
Echantillon SiC3



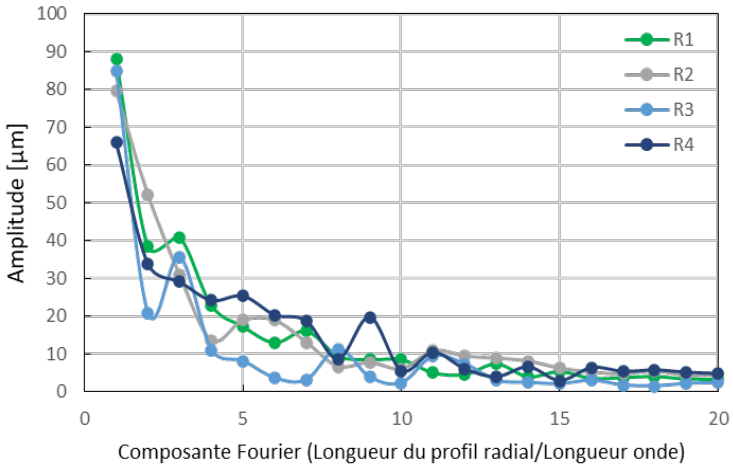


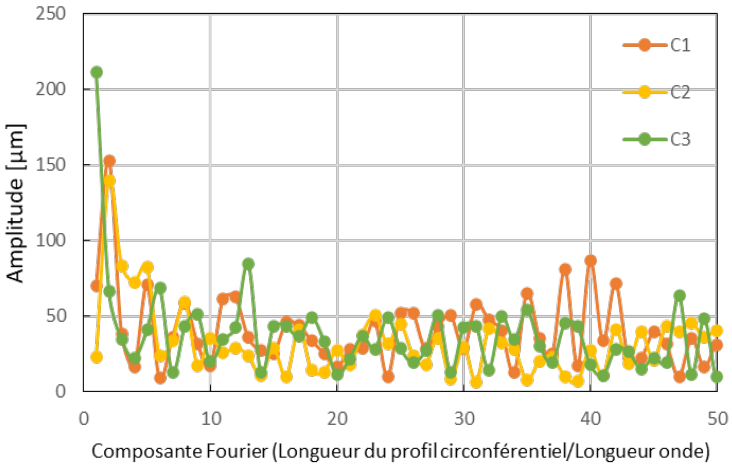
Echantillon SiC4



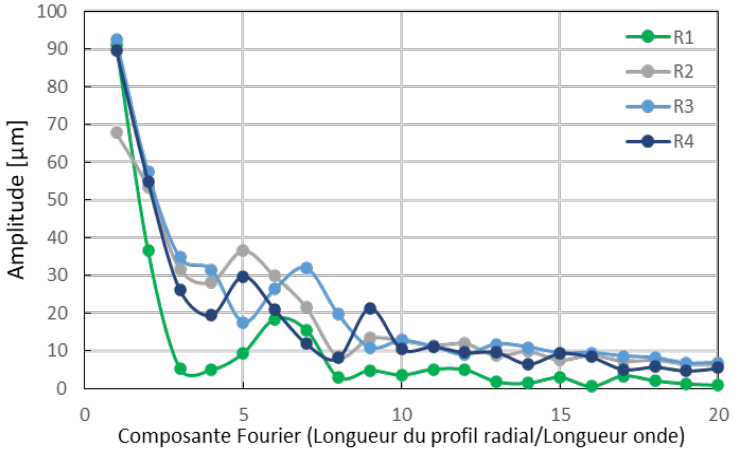


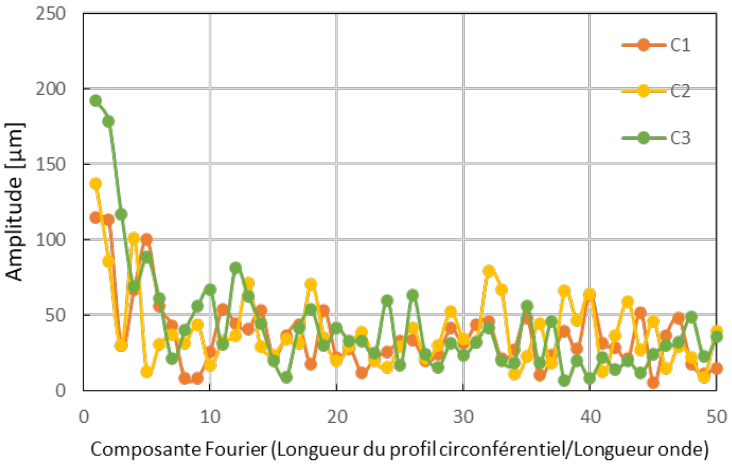
Echantillon SiC5



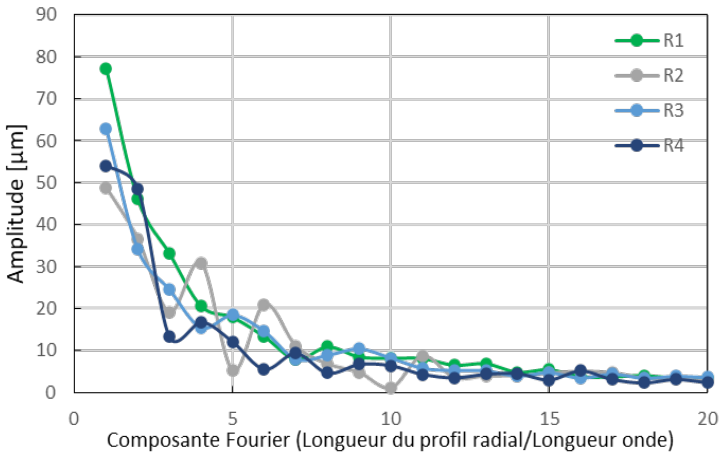


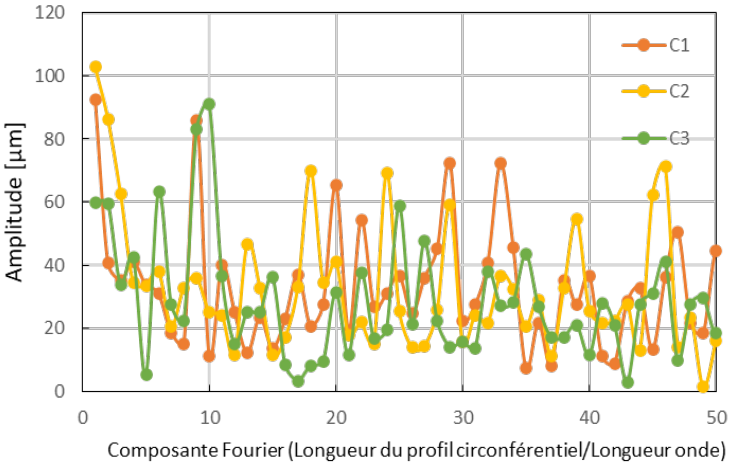
Echantillon SiC6



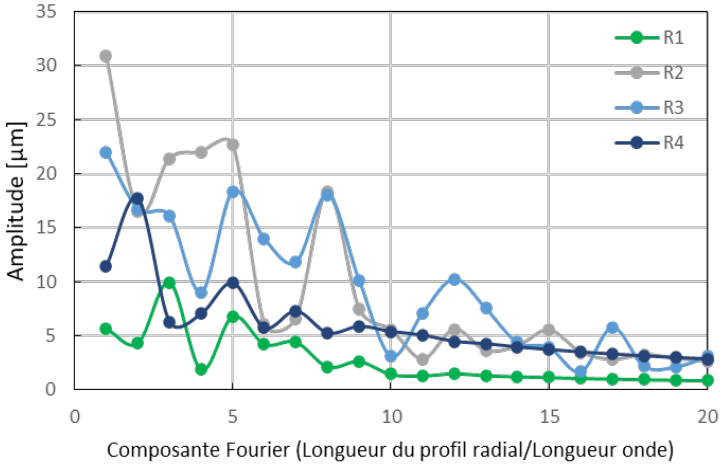


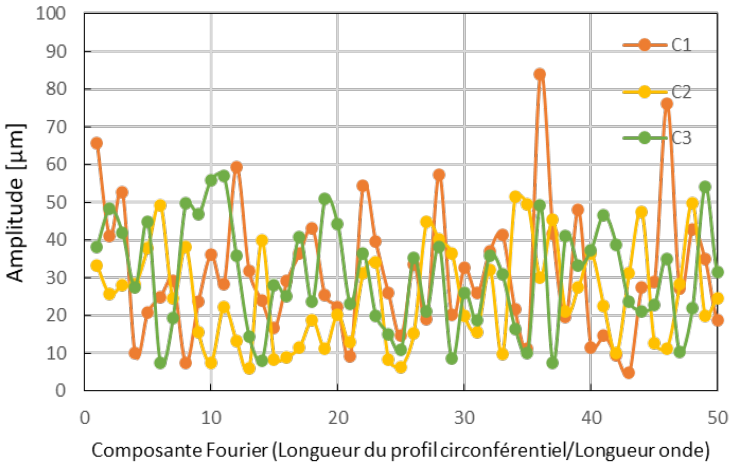
Echantillon SiC7





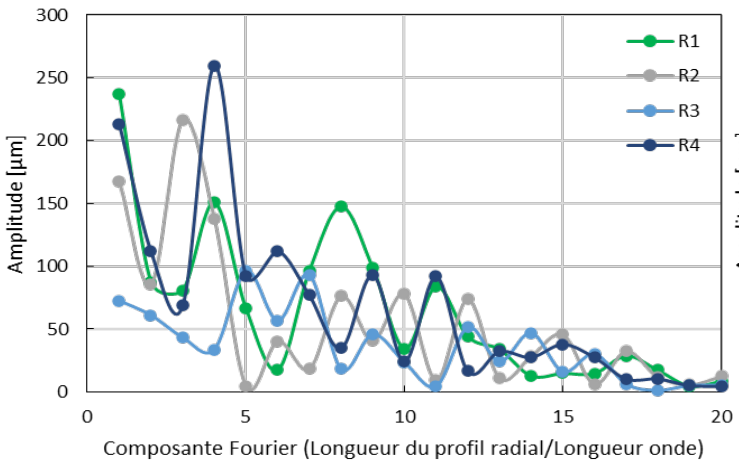
Echantillon SiC8

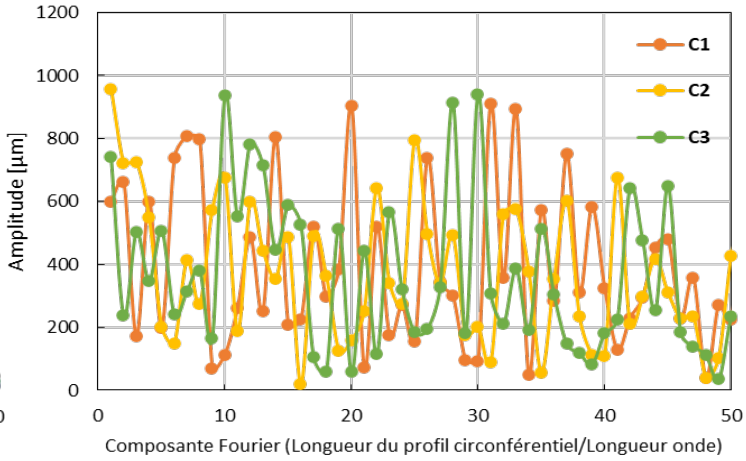




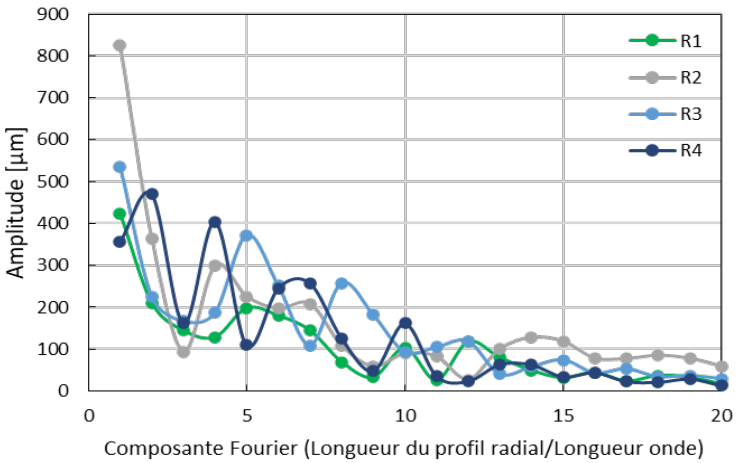
a. Surfaces graphite

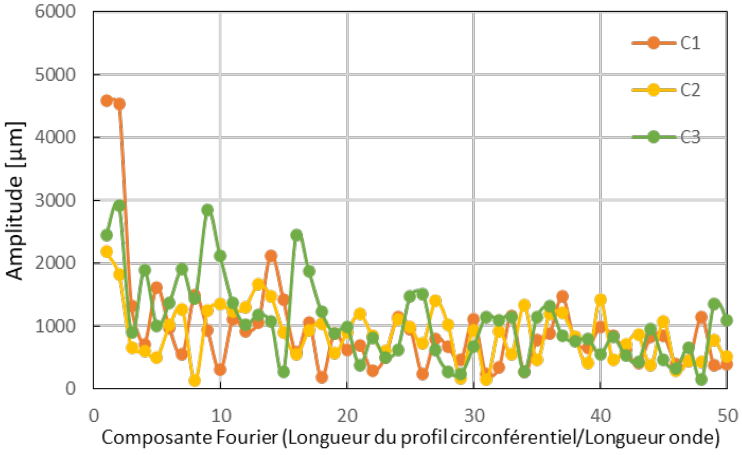
Echantillon Graphite brut



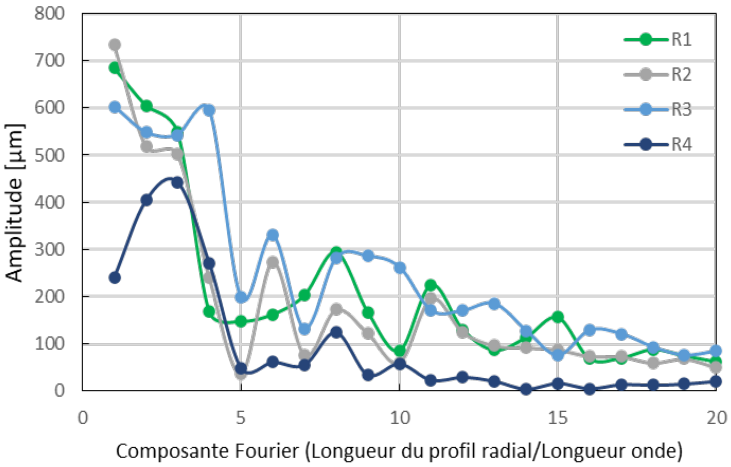


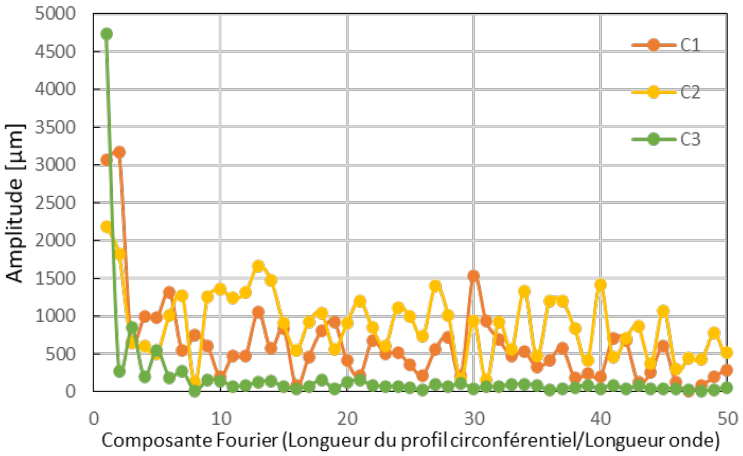
Echantillon G1_circ



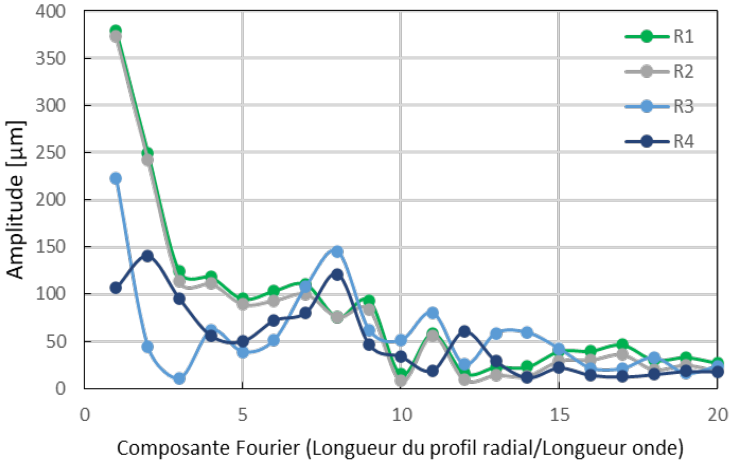


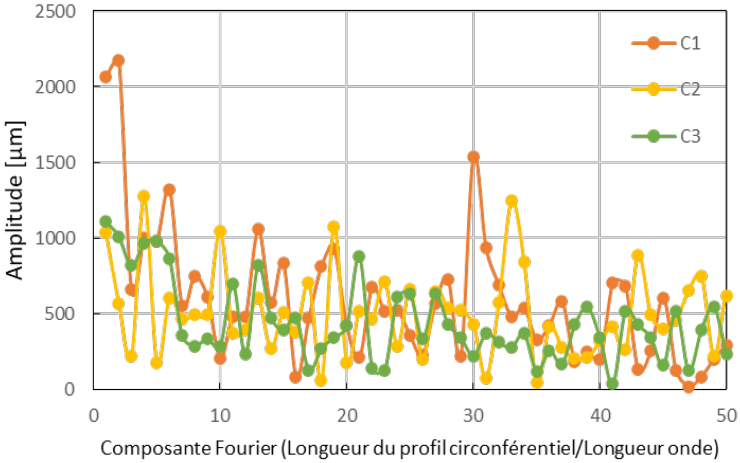
Echantillon G2_dir



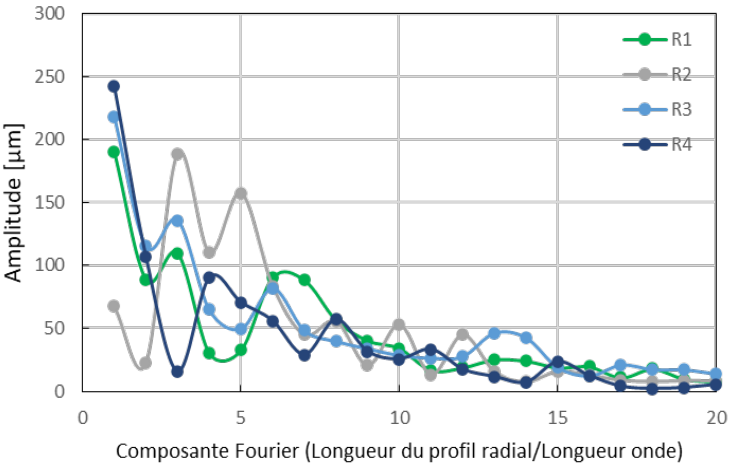


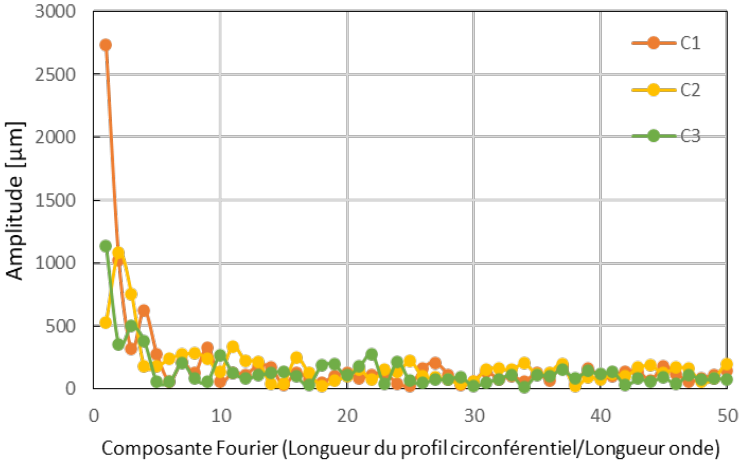
Echantillon G2_circ



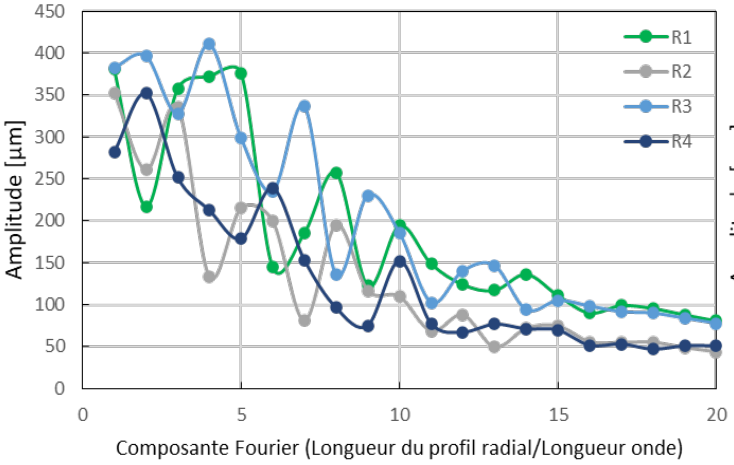


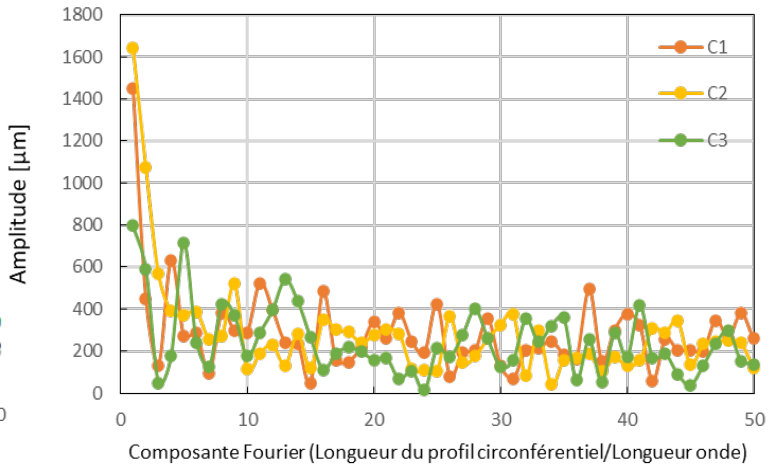
Echantillon G3_circ



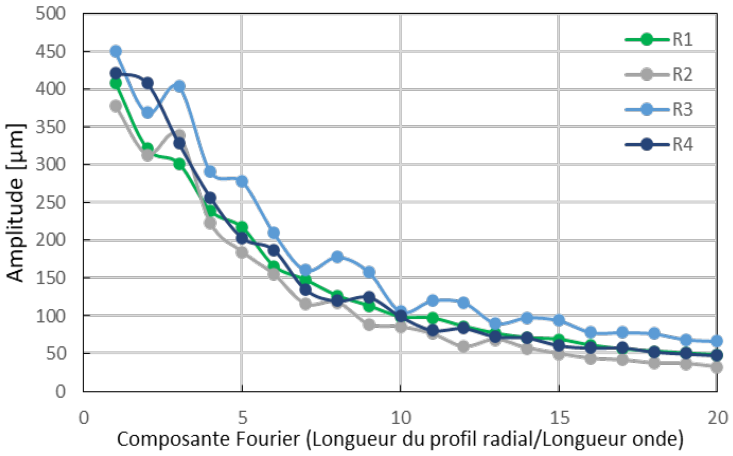


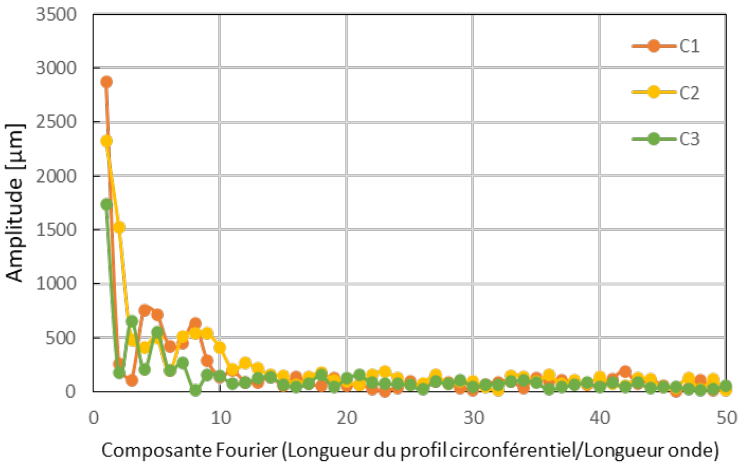
Echantillon G4_dir



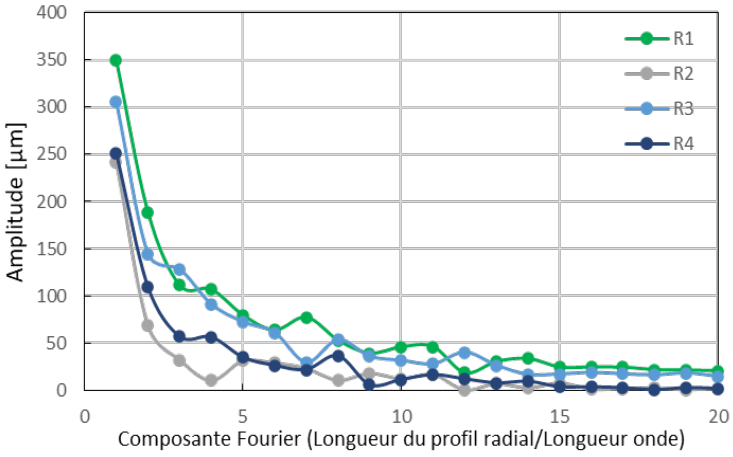


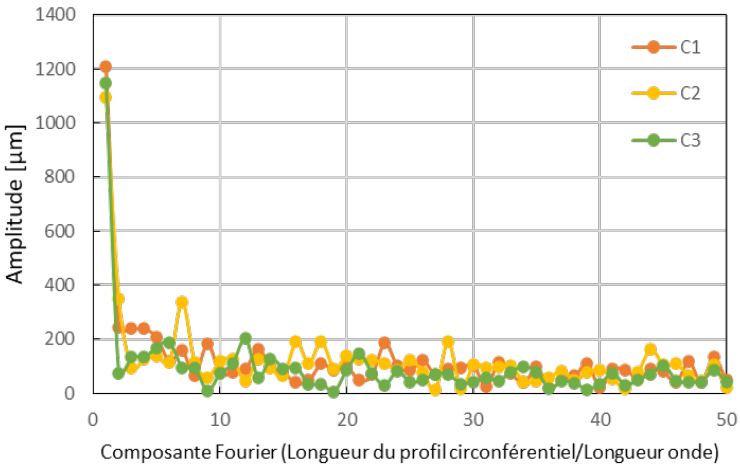
Echantillon G5



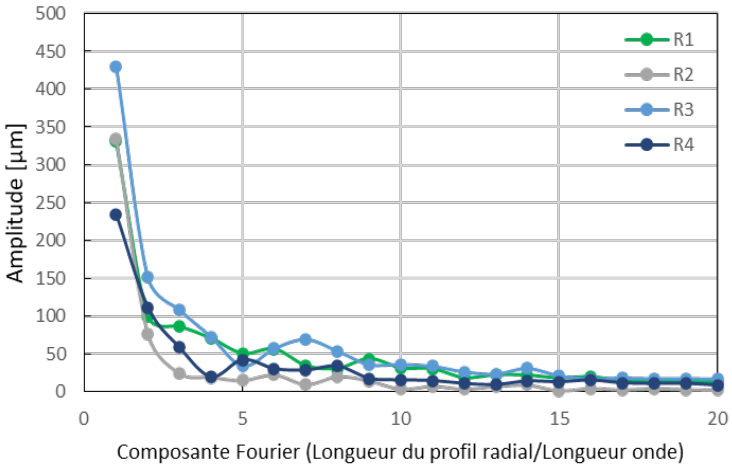


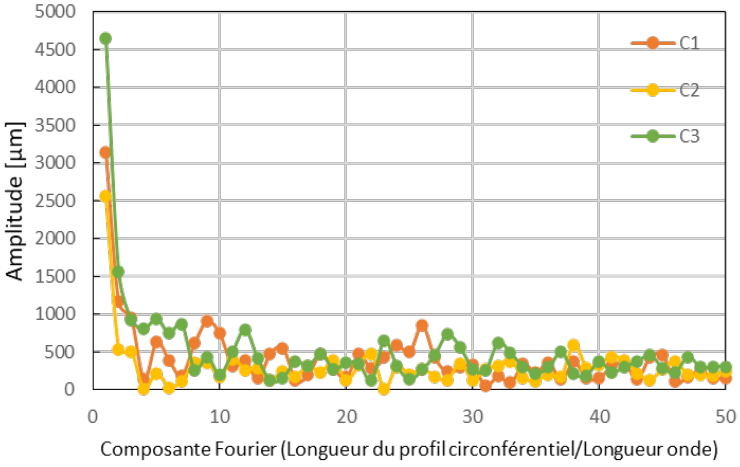
Echantillon G6





Echantillon G7





Annexe C : Calcul des incertitudes expérimentales

Incertitude sur le débit

L'incertitude sur le débit a été déterminée à partir des spécifications des débitmètres Bronkhorst utilisés, lesquelles indiquent une précision de ± 0,5 % de la valeur mesurée ($Qmesuré$), à laquelle s'ajoute une erreur fixe de ± 0,1 % de la pleine échelle de chaque débitmètre utilisé (QFS). L'incertitude totale sur chaque mesure de débit est donc calculée selon :

$$\Delta Q = \pm(0{,}5\ \%\ Qmesuré\ +\ 0{,}1\ \%\ QFS) \qquad (87)$$

Incertitude sur la force

L'incertitude sur la force appliquée provient de l'erreur sur la pression mesurée dans la chambre de charge. Cette dernière est déterminée à partir des spécifications du régulateur de pression de l'électrovanne, qui présente une précision de ± 0,5 % de sa pleine échelle. L'incertitude associée est :

$$\Delta F = S\ \Delta P \qquad (88)$$

où S représente la surface annulaire de poussée et ΔP l'erreur sur la pression dans la chambre de charge.

Incertitude sur la distance Zmoyen

Les grandeurs *Zmin*, *Zmax* et *Zmoyen* ont été déterminées à partir des trois mesures indépendantes fournies par les capteurs de déplacement : Z_1, Z_2 et Z_3. L'incertitude sur chacune de ces grandeurs est déterminée par la méthode de la propagation des incertitudes.

Comme $Zmin/max=f(Z_1, Z_2, Z_3)$, l'incertitude associée s'écrit :

$$\sigma^2{}_{Zmin/max} = \left(\frac{\partial Zmin/max}{\partial Z_1}\right)^2 \sigma_{Z_1}^2 + \left(\frac{\partial Zmin/max}{\partial Z_2}\right)^2 \sigma_{Z_2}^2 + \left(\frac{\partial Zmin/max}{\partial Z_3}\right)^2 \sigma_{Z_3}^2 \qquad (89)$$

Les trois capteurs de déplacement utilisés pour mesurer Z_1, Z_2 et Z_3 présentent la même précision.

$$\sigma_{Z_1} = \sigma_{Z_2} = \sigma_{Z_3} = \sigma_{capteur\ de\ déplacement} = 0{,}08\mu m$$

On obtient alors l'incertitude associée aux *Zmax* et *Zmin* :

$$\sigma_{Zmin/max} = \sqrt{\left(\frac{\partial Zmin/max}{\partial Z_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Zmin/max}{\partial Z_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial Zmin/max}{\partial Z_3}\right)^2} \times \sigma_{capteur\ de\ déplacement} \quad (90)$$

Comme *Zmoyen* dépend de *Zmax* et *Z*min, son incertitude découle de celles-ci.

$$Zmoyen = \frac{Zmax + Zmin}{2} \quad (91)$$

L'incertitude associée à *Zmoyen* est alors donnée par :

$$\sigma^2_{Zmoyen} = \sigma^2_{Zmax} + \sigma^2_{Zmin} \quad (92)$$

d'où :

$$\sigma_{Zmoyen} = \sqrt{\sigma^2_{Zmax} + \sigma^2_{Zmin}} \quad (93)$$

Les tableaux suivants présentent les grandeurs obtenues pour tous les essais ainsi que leurs incertitudes associées.

Essais sur les surfaces SiC

SiC_brut (ΔP = 1,5 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,25E+00	4,14E-02	6,71E+00	1,79E+02	1,62E+02	1,70E+02	5,42E-04	2,25E+00	6,99E-02	2,60E-02	7,46E-02	5,31E-06
1,27E+00	1,71E-01	2,10E+01	1,27E+02	1,15E+02	1,21E+02	6,59E-04	2,25E+00	6,99E-02	2,60E-02	7,46E-02	5,89E-06
1,40E+00	3,97E-01	4,58E+01	8,86E+01	8,02E+01	8,44E+01	5,36E-04	2,25E+00	6,99E-02	2,60E-02	7,46E-02	5,28E-06
1,57E+00	5,99E-01	6,80E+01	3,48E+01	3,15E+01	3,31E+01	8,01E-05	2,25E+00	6,99E-02	2,60E-02	7,46E-02	3,00E-06
1,57E+00	8,04E-01	9,06E+01	1,05E+01	9,50E+00	1,00E+01	4,87E-05	2,25E+00	6,99E-02	2,60E-02	7,46E-02	2,84E-06
1,58E+00	1,01E+00	1,13E+02	4,62E+00	4,18E+00	4,40E+00	3,52E-05	2,25E+00	6,99E-02	2,60E-02	7,46E-02	2,19E-07
1,56E+00	1,21E+00	1,35E+02	3,16E+00	2,86E+00	3,01E+00	1,98E-05	2,25E+00	6,99E-02	2,60E-02	7,46E-02	1,42E-07
1,57E+00	1,41E+00	1,57E+02	2,37E+00	2,15E+00	2,26E+00	1,21E-05	2,25E+00	6,99E-02	2,60E-02	7,46E-02	1,04E-07
1,56E+00	1,61E+00	1,79E+02	2,01E+00	1,82E+00	1,91E+00	8,56E-06	2,25E+00	6,99E-02	2,60E-02	7,46E-02	8,58E-08
1,56E+00	1,81E+00	2,01E+02	1,96E+00	1,77E+00	1,87E+00	5,60E-06	2,25E+00	6,99E-02	2,60E-02	7,46E-02	7,10E-08
1,57E+00	2,01E+00	2,23E+02	1,79E+00	1,62E+00	1,70E+00	3,65E-06	2,25E+00	6,99E-02	2,60E-02	7,46E-02	6,13E-08
1,62E+00	2,21E+00	2,45E+02	1,72E+00	1,55E+00	1,63E+00	1,50E-06	2,25E+00	6,99E-02	2,60E-02	7,46E-02	5,05E-08
1,58E+00	2,40E+00	2,66E+02	1,57E+00	1,42E+00	1,49E+00	1,17E-06	2,25E+00	6,99E-02	2,60E-02	7,46E-02	4,89E-08
1,56E+00	2,60E+00	2,88E+02	1,43E+00	1,30E+00	1,37E+00	8,00E-07	2,25E+00	6,99E-02	2,60E-02	7,46E-02	4,70E-08
1,56E+00	2,81E+00	3,11E+02	1,38E+00	1,25E+00	1,31E+00	7,78E-07	2,25E+00	6,99E-02	2,60E-02	7,46E-02	4,69E-08

SiC_brut (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,83E+00	4,11E-02	6,69E+00	2,16E+02	1,96E+02	2,06E+02	8,53E-04	2,25E+00	6,99E-02	2,59E-02	7,46E-02	6,86E-06
1,83E+00	1,72E-01	2,11E+01	1,61E+02	1,46E+02	1,53E+02	7,49E-04	2,25E+00	6,99E-02	2,59E-02	7,46E-02	6,34E-06
1,94E+00	3,89E-01	4,49E+01	9,93E+01	8,98E+01	9,45E+01	6,78E-04	2,25E+00	6,99E-02	2,59E-02	7,46E-02	5,99E-06
2,08E+00	6,13E-01	6,96E+01	2,04E+01	1,85E+01	1,94E+01	9,86E-05	2,25E+00	6,99E-02	2,59E-02	7,46E-02	3,09E-06
2,28E+00	8,01E-01	9,02E+01	9,92E+00	8,98E+00	9,45E+00	7,02E-05	2,25E+00	6,99E-02	2,59E-02	7,46E-02	2,95E-06
2,29E+00	1,01E+00	1,13E+02	7,96E+00	7,20E+00	7,58E+00	5,37E-05	2,25E+00	6,99E-02	2,59E-02	7,46E-02	2,87E-06
2,28E+00	1,21E+00	1,35E+02	6,53E+00	5,91E+00	6,22E+00	4,49E-05	2,25E+00	6,99E-02	2,59E-02	7,46E-02	2,82E-06
2,29E+00	1,41E+00	1,57E+02	5,11E+00	4,63E+00	4,87E+00	3,55E-05	2,25E+00	6,99E-02	2,59E-02	7,46E-02	2,20E-07
2,27E+00	1,61E+00	1,79E+02	3,43E+00	3,10E+00	3,27E+00	2,51E-05	2,25E+00	6,99E-02	2,59E-02	7,46E-02	1,68E-07
2,28E+00	1,81E+00	2,01E+02	2,64E+00	2,38E+00	2,51E+00	1,05E-05	2,25E+00	6,99E-02	2,59E-02	7,46E-02	9,53E-08
2,28E+00	2,01E+00	2,23E+02	2,34E+00	2,12E+00	2,23E+00	6,08E-06	2,25E+00	6,99E-02	2,59E-02	7,46E-02	7,34E-08
2,28E+00	2,21E+00	2,45E+02	2,17E+00	1,97E+00	2,07E+00	3,45E-06	2,25E+00	6,99E-02	2,59E-02	7,46E-02	6,02E-08
2,28E+00	2,40E+00	2,67E+02	2,15E+00	1,94E+00	2,05E+00	3,05E-06	2,25E+00	6,99E-02	2,59E-02	7,46E-02	5,82E-08
2,29E+00	2,60E+00	2,88E+02	2,12E+00	1,92E+00	2,02E+00	2,59E-06	2,25E+00	6,99E-02	2,59E-02	7,46E-02	5,60E-08
2,28E+00	2,82E+00	3,12E+02	2,12E+00	1,92E+00	2,02E+00	2,56E-06	2,25E+00	6,99E-02	2,59E-02	7,46E-02	5,58E-08

SiC1 (ΔP = 1,5 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,24E+00	4,16E-02	6,74E+00	1,34E+02	1,29E+02	1,31E+02	4,75E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,98E-06
1,30E+00	2,53E-01	3,00E+01	9,81E+01	9,37E+01	9,59E+01	4,73E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	4,96E-06
1,31E+00	4,26E-01	4,90E+01	6,45E+01	6,10E+01	6,28E+01	3,16E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	4,18E-06
1,41E+00	6,09E-01	6,91E+01	2,12E+01	2,02E+01	2,07E+01	5,90E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	2,90E-06
1,41E+00	7,99E-01	9,00E+01	5,95E+00	5,69E+00	5,82E+00	3,50E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	2,18E-07
1,41E+00	1,01E+00	1,13E+02	3,66E+00	3,45E+00	3,55E+00	2,10E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	1,48E-07
1,50E+00	1,21E+00	1,35E+02	2,43E+00	2,34E+00	2,39E+00	1,50E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	1,18E-07
1,51E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,83E+00	1,75E+00	1,79E+00	9,90E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	9,25E-08
1,51E+00	1,61E+00	1,80E+02	1,44E+00	1,37E+00	1,40E+00	7,63E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	8,12E-08
1,51E+00	1,81E+00	2,01E+02	1,22E+00	1,16E+00	1,19E+00	4,52E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	6,56E-08
1,61E+00	2,01E+00	2,23E+02	1,13E+00	1,06E+00	1,10E+00	2,54E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	5,57E-08
1,61E+00	2,21E+00	2,45E+02	1,11E+00	1,06E+00	1,08E+00	1,43E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	5,02E-08
1,61E+00	2,40E+00	2,67E+02	1,06E+00	1,01E+00	1,04E+00	9,33E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	4,77E-08
1,61E+00	2,61E+00	2,89E+02	1,06E+00	9,99E-01	1,03E+00	9,05E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	4,75E-08
1,61E+00	2,81E+00	3,12E+02	1,02E+00	9,86E-01	1,00E+00	8,20E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,71E-08

SiC1 (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,76E+00	4,16E-02	6,74E+00	1,54E+02	1,49E+02	1,52E+02	5,81E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	5,50E-06
1,76E+00	2,08E-01	2,51E+01	1,12E+02	1,09E+02	1,11E+02	5,79E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	5,49E-06
1,84E+00	4,02E-01	4,64E+01	7,49E+01	7,01E+01	7,25E+01	3,86E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,53E-06
2,04E+00	6,06E-01	6,88E+01	2,47E+01	2,31E+01	2,39E+01	7,22E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	2,96E-06
2,18E+00	8,04E-01	9,06E+01	6,92E+00	6,53E+00	6,72E+00	4,28E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	2,81E-06
2,17E+00	1,01E+00	1,13E+02	4,22E+00	3,99E+00	4,10E+00	2,57E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	1,71E-07
2,16E+00	1,19E+00	1,33E+02	2,86E+00	2,66E+00	2,76E+00	1,83E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	1,35E-07
2,15E+00	1,40E+00	1,56E+02	2,14E+00	2,00E+00	2,07E+00	1,21E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	1,04E-07
2,15E+00	1,61E+00	1,79E+02	1,65E+00	1,60E+00	1,62E+00	9,33E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	8,97E-08
2,15E+00	1,81E+00	2,01E+02	1,39E+00	1,35E+00	1,37E+00	5,53E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	7,06E-08
2,15E+00	2,01E+00	2,23E+02	1,29E+00	1,24E+00	1,27E+00	3,11E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	5,85E-08
2,15E+00	2,21E+00	2,45E+02	1,21E+00	1,16E+00	1,18E+00	1,75E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	5,17E-08
2,18E+00	2,40E+00	2,66E+02	1,20E+00	1,14E+00	1,17E+00	1,14E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	4,87E-08
2,14E+00	2,59E+00	2,88E+02	1,19E+00	1,15E+00	1,17E+00	1,11E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,85E-08
2,14E+00	2,80E+00	3,11E+02	1,14E+00	1,07E+00	1,11E+00	1,00E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	4,80E-08

SiC2 (ΔP = 1,5 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,24E+00	4,14E-02	6,71E+00	1,30E+02	1,24E+02	1,27E+02	5,35E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	5,27E-06
1,34E+00	1,71E-01	2,10E+01	9,64E+01	8,92E+01	9,28E+01	4,49E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,85E-06
1,35E+00	3,97E-01	4,58E+01	6,17E+01	5,77E+01	5,97E+01	2,91E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,06E-06
1,41E+00	5,99E-01	6,80E+01	1,06E+01	9,98E+00	1,03E+01	5,51E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	2,88E-06
1,41E+00	8,04E-01	9,06E+01	5,73E+00	5,52E+00	5,62E+00	3,19E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	2,02E-07
1,41E+00	1,01E+00	1,13E+02	3,55E+00	3,41E+00	3,48E+00	1,94E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	1,40E-07
1,41E+00	1,21E+00	1,35E+02	2,38E+00	2,30E+00	2,34E+00	1,40E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	1,13E-07
1,51E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,78E+00	1,65E+00	1,71E+00	9,10E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	8,85E-08
1,51E+00	1,61E+00	1,79E+02	1,39E+00	1,31E+00	1,35E+00	7,10E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	7,85E-08
1,51E+00	1,81E+00	2,01E+02	1,18E+00	1,11E+00	1,15E+00	4,22E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	6,41E-08
1,60E+00	2,01E+00	2,23E+02	1,07E+00	1,04E+00	1,06E+00	2,33E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	5,46E-08
1,61E+00	2,21E+00	2,45E+02	1,02E+00	9,47E-01	9,86E-01	1,34E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,97E-08
1,61E+00	2,40E+00	2,66E+02	1,02E+00	9,46E-01	9,81E-01	8,80E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,74E-08
1,61E+00	2,60E+00	2,88E+02	9,99E-01	9,60E-01	9,79E-01	8,45E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,72E-08
1,61E+00	2,81E+00	3,11E+02	9,82E-01	9,45E-01	9,64E-01	7,78E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,69E-08

SiC2 (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,84E+00	4,11E-02	6,69E+00	1,52E+02	1,41E+02	1,46E+02	6,31E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	5,76E-06
1,87E+00	1,72E-01	2,11E+01	1,08E+02	1,06E+02	1,07E+02	5,49E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	5,35E-06
1,93E+00	3,89E-01	4,49E+01	7,17E+01	6,62E+01	6,89E+01	3,56E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,38E-06
2,13E+00	6,13E-01	6,96E+01	1,21E+01	1,17E+01	1,19E+01	6,74E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	2,94E-06
2,26E+00	8,01E-01	9,02E+01	6,70E+00	6,28E+00	6,49E+00	3,90E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	2,38E-07
2,27E+00	1,01E+00	1,13E+02	4,12E+00	3,91E+00	4,02E+00	2,37E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	1,61E-07
2,23E+00	1,21E+00	1,35E+02	2,80E+00	2,60E+00	2,70E+00	1,71E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	1,29E-07
2,30E+00	1,41E+00	1,57E+02	2,05E+00	1,91E+00	1,98E+00	1,11E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	9,87E-08
2,28E+00	1,61E+00	1,79E+02	1,58E+00	1,54E+00	1,56E+00	8,69E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	8,64E-08
2,24E+00	1,81E+00	2,01E+02	1,36E+00	1,29E+00	1,32E+00	5,16E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	6,88E-08
2,30E+00	2,01E+00	2,23E+02	1,25E+00	1,20E+00	1,22E+00	2,85E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	5,72E-08
2,28E+00	2,21E+00	2,45E+02	1,16E+00	1,12E+00	1,14E+00	1,63E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	5,12E-08
2,24E+00	2,40E+00	2,67E+02	1,14E+00	1,10E+00	1,12E+00	1,08E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,84E-08
2,28E+00	2,60E+00	2,88E+02	1,14E+00	1,10E+00	1,12E+00	1,03E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,82E-08
2,31E+00	2,82E+00	3,12E+02	1,15E+00	1,08E+00	1,11E+00	9,51E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,78E-08

SiC3 (ΔP = 1,5 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,24E+00	4,14E-02	6,71E+00	1,24E+02	1,17E+02	1,21E+02	4,22E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	4,71E-06
1,30E+00	1,71E-01	2,10E+01	8,75E+01	8,43E+01	8,59E+01	3,91E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,56E-06
1,31E+00	3,97E-01	4,58E+01	5,68E+01	5,49E+01	5,59E+01	2,67E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	3,94E-06
1,41E+00	5,99E-01	6,80E+01	1,01E+01	9,60E+00	9,87E+00	4,76E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	2,84E-06
1,41E+00	8,04E-01	9,06E+01	5,39E+00	5,06E+00	5,22E+00	2,84E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	1,85E-07
1,41E+00	1,01E+00	1,13E+02	3,34E+00	3,19E+00	3,26E+00	1,67E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	1,27E-07
1,51E+00	1,21E+00	1,35E+02	2,30E+00	2,12E+00	2,21E+00	1,26E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	1,06E-07
1,51E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,63E+00	1,54E+00	1,58E+00	8,04E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	8,32E-08
1,51E+00	1,61E+00	1,79E+02	1,30E+00	1,23E+00	1,26E+00	6,27E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	7,43E-08
1,51E+00	1,81E+00	2,01E+02	1,11E+00	1,06E+00	1,09E+00	3,68E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	6,14E-08
1,51E+00	2,01E+00	2,23E+02	9,99E-01	9,59E-01	9,79E-01	2,02E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	5,31E-08
1,60E+00	2,21E+00	2,45E+02	9,76E-01	9,15E-01	9,45E-01	1,17E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	4,89E-08
1,61E+00	2,40E+00	2,66E+02	9,42E-01	9,00E-01	9,21E-01	7,92E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	4,70E-08
1,61E+00	2,60E+00	2,88E+02	9,25E-01	9,04E-01	9,15E-01	7,43E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	4,67E-08
1,61E+00	2,81E+00	3,11E+02	9,29E-01	8,89E-01	9,09E-01	6,81E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	4,64E-08

SiC3 (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,75E+00	4,11E-02	6,69E+00	1,42E+02	1,36E+02	1,39E+02	5,69E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	5,44E-06
1,86E+00	1,72E-01	2,11E+01	1,01E+02	9,75E+01	9,92E+01	4,79E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,99E-06
2,01E+00	3,89E-01	4,49E+01	6,67E+01	6,23E+01	6,45E+01	3,27E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,24E-06
1,97E+00	6,13E-01	6,96E+01	1,17E+01	1,11E+01	1,14E+01	5,83E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	2,89E-06
2,20E+00	8,01E-01	9,02E+01	6,27E+00	5,79E+00	6,03E+00	3,48E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	2,17E-07
2,21E+00	1,01E+00	1,13E+02	3,89E+00	3,64E+00	3,77E+00	2,05E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	1,45E-07
2,26E+00	1,21E+00	1,35E+02	2,58E+00	2,53E+00	2,55E+00	1,54E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	1,20E-07
2,16E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,85E+00	1,81E+00	1,83E+00	9,84E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	9,22E-08
2,34E+00	1,61E+00	1,79E+02	1,48E+00	1,44E+00	1,46E+00	7,66E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	8,13E-08
2,25E+00	1,81E+00	2,01E+02	1,29E+00	1,22E+00	1,25E+00	4,50E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	6,55E-08
2,20E+00	2,01E+00	2,23E+02	1,14E+00	1,12E+00	1,13E+00	2,47E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	5,54E-08
2,31E+00	2,21E+00	2,45E+02	1,12E+00	1,06E+00	1,09E+00	1,43E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	5,02E-08
2,36E+00	2,40E+00	2,67E+02	1,12E+00	1,05E+00	1,08E+00	9,68E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	4,78E-08
2,36E+00	2,60E+00	2,88E+02	1,09E+00	1,05E+00	1,07E+00	9,09E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,75E-08
2,31E+00	2,82E+00	3,12E+02	1,09E+00	1,03E+00	1,06E+00	8,33E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	4,72E-08

SiC4 (ΔP = 1,5 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,24E+00	4,40E-02	7,00E+00	1,14E+02	1,06E+02	1,10E+02	3,54E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,37E-06
1,24E+00	1,81E-01	2,21E+01	8,13E+01	7,72E+01	7,92E+01	2,32E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	3,76E-06
1,35E+00	4,39E-01	5,04E+01	5,28E+01	5,14E+01	5,21E+01	2,15E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	3,68E-06
1,41E+00	5,97E-01	6,78E+01	9,55E+00	9,01E+00	9,28E+00	4,16E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	2,51E-07
1,41E+00	8,05E-01	9,07E+01	4,83E+00	4,71E+00	4,77E+00	2,40E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	1,63E-07
1,51E+00	1,01E+00	1,13E+02	3,11E+00	2,99E+00	3,05E+00	1,41E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	1,13E-07
1,51E+00	1,21E+00	1,35E+02	2,13E+00	2,04E+00	2,09E+00	1,07E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	9,67E-08
1,51E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,52E+00	1,44E+00	1,48E+00	6,77E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	7,69E-08
1,51E+00	1,59E+00	1,77E+02	1,22E+00	1,15E+00	1,19E+00	5,25E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	6,93E-08
1,51E+00	1,80E+00	2,00E+02	1,05E+00	9,86E-01	1,02E+00	3,13E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	5,87E-08
1,60E+00	2,01E+00	2,23E+02	9,16E-01	8,56E-01	8,86E-01	1,70E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	5,15E-08
1,61E+00	2,21E+00	2,45E+02	9,04E-01	8,79E-01	8,91E-01	1,02E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,81E-08
1,61E+00	2,36E+00	2,62E+02	8,67E-01	8,32E-01	8,50E-01	6,56E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,63E-08
1,61E+00	2,60E+00	2,89E+02	8,54E-01	8,27E-01	8,41E-01	6,18E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,61E-08
1,61E+00	2,82E+00	3,12E+02	8,60E-01	8,08E-01	8,34E-01	5,79E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	4,59E-08

SiC4 (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,84E+00	3,95E-02	6,51E+00	1,31E+02	1,22E+02	1,27E+02	4,96E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	5,08E-06
1,91E+00	2,46E-01	2,92E+01	9,28E+01	9,01E+01	9,15E+01	4,06E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,63E-06
1,98E+00	4,21E-01	4,85E+01	6,17E+01	5,87E+01	6,02E+01	2,63E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	3,92E-06
2,09E+00	6,08E-01	6,91E+01	1,11E+01	1,03E+01	1,07E+01	5,08E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	2,85E-06
2,17E+00	7,99E-01	9,01E+01	5,63E+00	5,38E+00	5,50E+00	2,94E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	1,90E-07
2,27E+00	1,01E+00	1,13E+02	3,56E+00	3,48E+00	3,52E+00	1,72E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	1,29E-07
2,27E+00	1,20E+00	1,34E+02	2,50E+00	2,32E+00	2,41E+00	1,31E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	1,09E-07
2,27E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,76E+00	1,66E+00	1,71E+00	8,28E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	8,44E-08
2,26E+00	1,60E+00	1,78E+02	1,39E+00	1,35E+00	1,37E+00	6,42E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	7,51E-08
2,25E+00	1,81E+00	2,01E+02	1,21E+00	1,14E+00	1,18E+00	3,83E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	6,22E-08
2,19E+00	2,00E+00	2,22E+02	1,06E+00	9,85E-01	1,02E+00	2,08E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	5,34E-08
2,23E+00	2,20E+00	2,45E+02	1,05E+00	1,01E+00	1,03E+00	1,25E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,93E-08
2,25E+00	2,44E+00	2,70E+02	9,92E-01	9,70E-01	9,81E-01	8,02E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	4,70E-08
2,25E+00	2,59E+00	2,88E+02	1,02E+00	9,93E-01	1,01E+00	7,56E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	4,68E-08
2,25E+00	2,82E+00	3,12E+02	9,98E-01	9,28E-01	9,63E-01	7,09E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,65E-08

SiC5 (ΔP = 1,5 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,24E+00	4,14E-02	6,71E+00	1,06E+02	9,85E+01	1,02E+02	3,83E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,51E-06
1,30E+00	1,71E-01	2,10E+01	7,51E+01	7,09E+01	7,30E+01	3,33E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	4,26E-06
1,31E+00	3,97E-01	4,58E+01	4,80E+01	4,70E+01	4,75E+01	2,27E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	3,74E-06
1,41E+00	5,99E-01	6,80E+01	8,49E+00	8,28E+00	8,39E+00	4,05E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	2,45E-07
1,41E+00	8,04E-01	9,06E+01	4,52E+00	4,36E+00	4,44E+00	2,42E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	1,64E-07
1,41E+00	1,01E+00	1,13E+02	2,85E+00	2,69E+00	2,77E+00	1,42E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	1,14E-07
1,41E+00	1,21E+00	1,35E+02	1,94E+00	1,82E+00	1,88E+00	1,07E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	9,66E-08
1,51E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,37E+00	1,32E+00	1,35E+00	6,84E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	7,72E-08
1,51E+00	1,61E+00	1,79E+02	1,09E+00	1,06E+00	1,07E+00	5,33E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	6,96E-08
1,51E+00	1,81E+00	2,01E+02	9,32E-01	9,13E-01	9,23E-01	3,13E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	5,86E-08
1,51E+00	2,01E+00	2,23E+02	8,47E-01	8,18E-01	8,32E-01	1,72E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	5,16E-08
1,61E+00	2,21E+00	2,45E+02	8,28E-01	7,79E-01	8,04E-01	9,97E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	4,80E-08
1,61E+00	2,40E+00	2,66E+02	8,13E-01	7,76E-01	7,94E-01	6,73E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	4,64E-08
1,61E+00	2,60E+00	2,88E+02	8,02E-01	7,70E-01	7,86E-01	6,32E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,62E-08
1,70E+00	2,81E+00	3,11E+02	7,96E-01	7,65E-01	7,81E-01	5,79E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,59E-08

SiC5 (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,93E+00	4,11E-02	6,69E+00	1,20E+02	1,16E+02	1,18E+02	3,66E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,43E-06
1,92E+00	1,72E-01	2,11E+01	8,77E+01	8,09E+01	8,43E+01	3,36E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,28E-06
1,86E+00	3,89E-01	4,49E+01	5,69E+01	5,28E+01	5,48E+01	2,50E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	3,85E-06
2,04E+00	6,13E-01	6,96E+01	1,01E+01	9,30E+00	9,68E+00	4,46E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	2,82E-06
2,20E+00	8,01E-01	9,02E+01	5,28E+00	4,97E+00	5,12E+00	2,66E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	1,76E-07
2,34E+00	1,01E+00	1,13E+02	3,24E+00	3,17E+00	3,20E+00	1,56E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	1,21E-07
2,20E+00	1,21E+00	1,35E+02	2,20E+00	2,14E+00	2,17E+00	1,18E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	1,02E-07
2,38E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,58E+00	1,53E+00	1,56E+00	7,53E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	8,06E-08
2,18E+00	1,61E+00	1,79E+02	1,27E+00	1,21E+00	1,24E+00	5,86E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	7,23E-08
2,19E+00	1,81E+00	2,01E+02	1,10E+00	1,03E+00	1,07E+00	3,44E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	6,02E-08
2,17E+00	2,01E+00	2,23E+02	9,71E-01	9,51E-01	9,61E-01	1,89E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	5,25E-08
2,15E+00	2,21E+00	2,45E+02	9,47E-01	9,09E-01	9,28E-01	1,10E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,85E-08
2,38E+00	2,40E+00	2,67E+02	9,45E-01	8,84E-01	9,14E-01	7,41E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,67E-08
2,44E+00	2,60E+00	2,88E+02	9,30E-01	8,85E-01	9,07E-01	6,95E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	4,65E-08
2,34E+00	2,82E+00	3,12E+02	9,25E-01	8,78E-01	9,02E-01	6,37E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	4,62E-08

SiC6 (ΔP = 1,5 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,24E+00	4,14E-02	6,71E+00	9,68E+01	9,49E+01	9,59E+01	2,39E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	3,80E-06
1,24E+00	1,71E-01	2,10E+01	7,16E+01	6,65E+01	6,90E+01	2,38E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	3,79E-06
1,31E+00	3,97E-01	4,58E+01	4,57E+01	4,38E+01	4,47E+01	1,96E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	3,58E-06
1,41E+00	5,99E-01	6,80E+01	8,00E+00	7,63E+00	7,82E+00	3,62E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	2,24E-07
1,41E+00	8,04E-01	9,06E+01	4,17E+00	4,02E+00	4,10E+00	1,97E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	1,41E-07
1,41E+00	1,01E+00	1,13E+02	2,66E+00	2,48E+00	2,57E+00	1,33E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	1,09E-07
1,41E+00	1,21E+00	1,35E+02	1,75E+00	1,69E+00	1,72E+00	9,06E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	8,83E-08
1,41E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,33E+00	1,25E+00	1,29E+00	5,04E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	6,82E-08
1,50E+00	1,61E+00	1,79E+02	1,09E+00	1,07E+00	1,08E+00	3,76E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	6,18E-08
1,51E+00	1,81E+00	2,01E+02	9,46E-01	9,02E-01	9,24E-01	2,67E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	5,63E-08
1,61E+00	2,01E+00	2,23E+02	8,92E-01	8,43E-01	8,67E-01	1,63E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	5,11E-08
1,61E+00	2,21E+00	2,45E+02	8,73E-01	8,08E-01	8,41E-01	7,23E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,66E-08
1,61E+00	2,40E+00	2,66E+02	8,05E-01	7,78E-01	7,92E-01	6,15E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,61E-08
1,61E+00	2,60E+00	2,88E+02	7,29E-01	7,10E-01	7,20E-01	4,89E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,54E-08
1,61E+00	2,81E+00	3,11E+02	7,27E-01	6,75E-01	7,01E-01	5,18E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,56E-08

SiC6 (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,89E+00	4,11E-02	6,69E+00	1,11E+02	1,03E+02	1,07E+02	5,30E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	5,25E-06
1,82E+00	1,72E-01	2,11E+01	7,71E+01	7,51E+01	7,61E+01	2,30E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	3,75E-06
2,01E+00	3,89E-01	4,49E+01	5,11E+01	4,79E+01	4,95E+01	1,26E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	3,23E-06
2,18E+00	6,13E-01	6,96E+01	8,95E+00	8,53E+00	8,74E+00	4,02E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	2,44E-07
2,14E+00	8,01E-01	9,02E+01	4,74E+00	4,51E+00	4,63E+00	2,40E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	1,63E-07
2,33E+00	1,01E+00	1,13E+02	2,95E+00	2,82E+00	2,89E+00	1,41E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	1,14E-07
2,23E+00	1,21E+00	1,35E+02	2,00E+00	1,92E+00	1,96E+00	1,06E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	9,62E-08
2,25E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,46E+00	1,35E+00	1,40E+00	6,79E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	7,70E-08
2,33E+00	1,61E+00	1,79E+02	1,15E+00	1,08E+00	1,12E+00	5,29E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	6,95E-08
2,17E+00	1,81E+00	2,01E+02	9,76E-01	9,47E-01	9,61E-01	3,11E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	5,85E-08
2,20E+00	2,01E+00	2,23E+02	9,00E-01	8,35E-01	8,67E-01	1,71E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	5,15E-08
2,21E+00	2,21E+00	2,45E+02	8,53E-01	8,22E-01	8,37E-01	9,90E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,80E-08
2,42E+00	2,40E+00	2,67E+02	8,35E-01	7,79E-01	8,07E-01	6,68E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,63E-08
2,16E+00	2,60E+00	2,88E+02	8,10E-01	7,48E-01	7,79E-01	6,28E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,61E-08
2,17E+00	2,82E+00	3,12E+02	6,35E-01	5,92E-01	6,14E-01	5,75E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,59E-08

SiC7 (ΔP = 1,5 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,24E+00	4,14E-02	6,71E+00	8,28E+01	8,05E+01	8,17E+01	1,89E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	3,54E-06
1,31E+00	1,71E-01	2,10E+01	6,15E+01	5,72E+01	5,93E+01	1,72E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	3,46E-06
1,34E+00	3,97E-01	4,58E+01	4,30E+01	3,98E+01	4,14E+01	1,30E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	3,25E-06
1,41E+00	5,99E-01	6,80E+01	7,33E+00	6,99E+00	7,16E+00	2,48E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	1,67E-07
1,51E+00	8,04E-01	9,06E+01	3,55E+00	3,40E+00	3,47E+00	1,43E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	1,14E-07
1,51E+00	1,01E+00	1,13E+02	2,20E+00	2,12E+00	2,16E+00	8,89E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	8,74E-08
1,51E+00	1,21E+00	1,35E+02	1,57E+00	1,48E+00	1,52E+00	7,18E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	7,89E-08
1,51E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,12E+00	1,06E+00	1,09E+00	4,73E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	6,67E-08
1,51E+00	1,61E+00	1,79E+02	9,45E-01	8,74E-01	9,10E-01	2,64E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	5,62E-08
1,51E+00	1,81E+00	2,01E+02	7,81E-01	7,30E-01	7,55E-01	1,84E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	5,22E-08
1,51E+00	2,01E+00	2,23E+02	7,66E-01	7,31E-01	7,49E-01	1,10E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	4,85E-08
1,61E+00	2,21E+00	2,45E+02	7,33E-01	6,85E-01	7,09E-01	5,93E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,60E-08
1,61E+00	2,40E+00	2,66E+02	6,89E-01	6,74E-01	6,81E-01	4,67E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	4,53E-08
1,61E+00	2,60E+00	2,88E+02	6,78E-01	6,35E-01	6,56E-01	3,95E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,50E-08
1,70E+00	2,81E+00	3,11E+02	6,47E-01	6,34E-01	6,40E-01	3,47E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	4,47E-08

SiC7 (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,93E+00	4,11E-02	6,69E+00	9,64E+01	9,23E+01	9,43E+01	2,31E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	3,75E-06
1,94E+00	1,72E-01	2,11E+01	6,92E+01	6,78E+01	6,85E+01	2,10E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	3,65E-06
1,93E+00	3,89E-01	4,49E+01	4,97E+01	4,60E+01	4,78E+01	1,59E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	3,40E-06
2,06E+00	6,13E-01	6,96E+01	8,60E+00	7,94E+00	8,27E+00	3,04E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	1,95E-07
2,14E+00	8,01E-01	9,02E+01	4,09E+00	3,92E+00	4,01E+00	1,74E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	1,30E-07
2,36E+00	1,01E+00	1,13E+02	2,59E+00	2,40E+00	2,49E+00	1,09E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	9,74E-08
2,29E+00	1,21E+00	1,35E+02	1,82E+00	1,69E+00	1,76E+00	8,78E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	8,69E-08
2,43E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,28E+00	1,24E+00	1,26E+00	5,79E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	7,19E-08
2,21E+00	1,61E+00	1,79E+02	1,07E+00	1,03E+00	1,05E+00	3,23E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	5,91E-08
2,32E+00	1,81E+00	2,01E+02	9,05E-01	8,39E-01	8,72E-01	2,25E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	5,42E-08
2,31E+00	2,01E+00	2,23E+02	8,82E-01	8,46E-01	8,64E-01	1,34E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,97E-08
2,24E+00	2,21E+00	2,45E+02	8,41E-01	7,96E-01	8,19E-01	7,25E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	4,66E-08
2,20E+00	2,40E+00	2,67E+02	8,03E-01	7,70E-01	7,87E-01	5,71E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,59E-08
2,42E+00	2,60E+00	2,88E+02	7,67E-01	7,49E-01	7,58E-01	4,83E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	4,54E-08
2,40E+00	2,82E+00	3,12E+02	7,55E-01	7,24E-01	7,39E-01	4,24E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,51E-08

SiC8 (ΔP = 1,5 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,24E+00	4,14E-02	6,71E+00	8,23E+01	7,78E+01	8,00E+01	1,85E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	3,52E-06
1,24E+00	1,71E-01	2,10E+01	5,99E+01	5,63E+01	5,81E+01	1,68E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	3,44E-06
1,41E+00	3,97E-01	4,58E+01	4,12E+01	4,00E+01	4,06E+01	1,28E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	3,24E-06
1,41E+00	5,99E-01	6,80E+01	7,10E+00	6,94E+00	7,02E+00	2,34E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	1,60E-07
1,41E+00	8,04E-01	9,06E+01	3,46E+00	3,35E+00	3,40E+00	1,40E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	1,13E-07
1,41E+00	1,01E+00	1,13E+02	2,14E+00	2,09E+00	2,12E+00	8,71E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	8,65E-08
1,41E+00	1,21E+00	1,35E+02	1,54E+00	1,45E+00	1,49E+00	6,06E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	7,33E-08
1,51E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,10E+00	1,04E+00	1,07E+00	3,66E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	6,13E-08
1,51E+00	1,61E+00	1,79E+02	9,13E-01	8,70E-01	8,91E-01	2,59E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	5,59E-08
1,51E+00	1,81E+00	2,01E+02	7,78E-01	7,42E-01	7,60E-01	1,80E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	5,20E-08
1,51E+00	2,01E+00	2,23E+02	7,43E-01	7,28E-01	7,36E-01	1,08E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	4,84E-08
1,61E+00	2,21E+00	2,45E+02	7,17E-01	6,72E-01	6,95E-01	5,62E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,58E-08
1,61E+00	2,40E+00	2,66E+02	6,06E-01	5,73E-01	5,89E-01	4,09E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	4,50E-08
1,61E+00	2,60E+00	2,88E+02	5,64E-01	5,22E-01	5,43E-01	3,68E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,48E-08
1,70E+00	2,81E+00	3,11E+02	5,43E-01	5,12E-01	5,27E-01	3,40E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	4,47E-08

SiC8 (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,82E+00	4,11E-02	6,69E+00	8,44E+01	8,20E+01	8,32E+01	2,04E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	3,62E-06
1,81E+00	1,72E-01	2,11E+01	6,16E+01	5,93E+01	6,04E+01	1,85E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	3,53E-06
1,97E+00	3,89E-01	4,49E+01	4,27E+01	4,17E+01	4,22E+01	1,41E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	3,30E-06
2,12E+00	6,13E-01	6,96E+01	7,47E+00	7,12E+00	7,29E+00	2,57E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	1,72E-07
2,32E+00	8,01E-01	9,02E+01	3,66E+00	3,41E+00	3,53E+00	1,54E-05	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	1,20E-07
2,28E+00	1,01E+00	1,13E+02	2,28E+00	2,12E+00	2,20E+00	9,59E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	9,09E-08
2,27E+00	1,21E+00	1,35E+02	1,60E+00	1,50E+00	1,55E+00	6,67E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	7,63E-08
2,27E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,15E+00	1,07E+00	1,11E+00	4,03E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	6,31E-08
2,22E+00	1,61E+00	1,79E+02	9,43E-01	9,10E-01	9,26E-01	2,85E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	5,72E-08
2,26E+00	1,81E+00	2,01E+02	8,13E-01	7,67E-01	7,90E-01	1,98E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,44E-02	5,29E-08
2,24E+00	2,01E+00	2,23E+02	7,74E-01	7,55E-01	7,64E-01	1,19E-06	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	4,89E-08
2,32E+00	2,21E+00	2,45E+02	7,31E-01	7,13E-01	7,22E-01	6,18E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,55E-02	7,43E-02	4,61E-08
2,31E+00	2,40E+00	2,67E+02	7,32E-01	6,93E-01	7,12E-01	4,50E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	4,52E-08
2,31E+00	2,60E+00	2,88E+02	7,09E-01	6,80E-01	6,95E-01	4,05E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,56E-02	7,43E-02	4,50E-08
2,33E+00	2,82E+00	3,12E+02	7,07E-01	6,53E-01	6,80E-01	3,74E-07	2,25E+00	6,98E-02	2,58E-02	7,45E-02	4,49E-08

Essais sur les surfaces Graphite

Graphite_brut (ΔP = 1 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
7,73E-01	4,23E-02	6,81E+00	9,44E+01	2,09E+02	1,52E+02	3,87E-04	2,25E+00	1,98E-01	2,04E-01	2,85E-01	4,53E-06
8,99E-01	2,50E-01	2,96E+01	4,95E+01	1,69E+02	1,09E+02	3,47E-04	2,25E+00	2,08E+00	2,08E+00	2,94E+00	4,33E-06
9,90E-01	3,68E-01	4,27E+01	3,57E+01	1,10E+02	7,31E+01	7,20E-05	2,25E+00	7,36E-01	7,38E-01	1,04E+00	2,96E-06
1,05E+00	6,21E-01	7,05E+01	9,33E+00	4,72E+01	2,83E+01	3,35E-06	2,25E+00	4,66E-01	4,63E-01	6,57E-01	5,98E-08
1,06E+00	8,39E-01	9,45E+01	2,73E+00	9,76E+00	6,25E+00	3,07E-06	2,25E+00	1,19E+01	1,19E+01	1,68E+01	5,84E-08
1,07E+00	1,01E+00	1,13E+02	2,66E+00	5,02E+00	3,84E+00	2,76E-06	2,25E+00	1,40E-01	1,49E-01	2,04E-01	5,68E-08
1,06E+00	1,21E+00	1,36E+02	2,30E+00	3,08E+00	2,69E+00	2,46E-06	2,25E+00	8,71E-02	9,60E-02	1,30E-01	5,53E-08
1,06E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,80E+00	2,76E+00	2,28E+00	2,28E-06	2,25E+00	1,01E-01	1,11E-01	1,50E-01	5,44E-08
1,06E+00	1,61E+00	1,79E+02	1,52E+00	2,51E+00	2,02E+00	2,17E-06	2,25E+00	1,12E-01	1,22E-01	1,66E-01	5,39E-08
1,07E+00	1,80E+00	2,01E+02	1,33E+00	2,43E+00	1,88E+00	2,09E-06	2,25E+00	1,32E-01	1,41E-01	1,93E-01	5,35E-08
1,07E+00	2,01E+00	2,23E+02	1,15E+00	2,32E+00	1,74E+00	2,05E-06	2,25E+00	1,61E-01	1,69E-01	2,33E-01	5,33E-08
1,07E+00	2,21E+00	2,45E+02	9,70E-01	2,22E+00	1,59E+00	2,02E-06	2,25E+00	2,16E-01	2,23E-01	3,11E-01	5,31E-08
1,07E+00	2,41E+00	2,67E+02	8,30E-01	2,12E+00	1,48E+00	1,99E-06	2,25E+00	2,98E-01	3,02E-01	4,24E-01	5,30E-08
1,07E+00	2,60E+00	2,89E+02	7,26E-01	2,00E+00	1,36E+00	1,98E-06	2,25E+00	3,99E-01	4,03E-01	5,67E-01	5,29E-08
1,07E+00	2,81E+00	3,11E+02	6,09E-01	1,98E+00	1,30E+00	1,95E-06	2,25E+00	1,06E+00	1,07E+00	1,51E+00	5,28E-08

Graphite_brut (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,68E+00	4,14E-02	6,71E+00	7,27E+01	1,89E+02	1,31E+02	5,96E-04	2,25E+00	3,18E-01	3,22E-01	4,52E-01	5,58E-06
1,76E+00	2,67E-01	3,16E+01	5,53E+01	1,52E+02	1,04E+02	5,89E-04	2,25E+00	3,90E-01	3,94E-01	5,55E-01	5,55E-06
1,90E+00	4,44E-01	5,10E+01	1,99E+01	1,17E+02	6,84E+01	5,09E-04	2,25E+00	3,52E-01	3,47E-01	4,94E-01	5,15E-06
2,08E+00	6,02E-01	6,84E+01	7,98E+00	7,40E+01	4,10E+01	3,91E-04	2,25E+00	2,33E-01	2,26E-01	3,25E-01	4,55E-06
2,09E+00	8,02E-01	9,04E+01	1,15E+00	3,69E+01	1,90E+01	4,23E-05	2,25E+00	1,73E-01	1,63E-01	2,38E-01	2,54E-07
2,10E+00	1,01E+00	1,13E+02	1,14E+00	9,35E+00	5,24E+00	6,19E-06	2,25E+00	2,51E-01	2,45E-01	3,51E-01	7,40E-08
2,10E+00	1,20E+00	1,34E+02	1,83E+00	5,52E+00	3,67E+00	6,58E-06	2,25E+00	6,31E-01	6,33E-01	8,94E-01	7,59E-08
2,09E+00	1,40E+00	1,56E+02	2,05E+00	3,32E+00	2,69E+00	5,95E-06	2,25E+00	1,09E-01	1,18E-01	1,61E-01	7,28E-08
2,10E+00	1,60E+00	1,78E+02	1,89E+00	2,70E+00	2,30E+00	5,56E-06	2,25E+00	9,32E-02	1,03E-01	1,39E-01	7,08E-08
2,10E+00	1,80E+00	2,00E+02	1,74E+00	2,36E+00	2,05E+00	5,35E-06	2,25E+00	8,81E-02	9,71E-02	1,31E-01	6,98E-08
2,10E+00	2,01E+00	2,23E+02	1,57E+00	2,07E+00	1,82E+00	5,22E-06	2,25E+00	8,59E-02	9,46E-02	1,28E-01	6,91E-08
2,10E+00	2,21E+00	2,45E+02	1,38E+00	1,88E+00	1,63E+00	5,13E-06	2,25E+00	8,82E-02	9,72E-02	1,31E-01	6,87E-08
2,10E+00	2,40E+00	2,66E+02	1,23E+00	1,76E+00	1,50E+00	5,05E-06	2,25E+00	9,31E-02	1,03E-01	1,39E-01	6,83E-08
2,10E+00	2,60E+00	2,88E+02	1,09E+00	1,65E+00	1,37E+00	5,00E-06	2,25E+00	1,00E-01	1,10E-01	1,48E-01	6,80E-08
2,10E+00	2,82E+00	3,13E+02	9,55E-01	1,50E+00	1,23E+00	4,96E-06	2,25E+00	1,04E-01	1,14E-01	1,54E-01	6,78E-08

G1_dir (ΔP = 1 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
8,57E-01	4,28E-02	6,86E+00	1,16E+02	5,60E+01	8,62E+01	3,91E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,55E-06
9,17E-01	2,16E-01	2,59E+01	1,12E+02	5,38E+01	8,28E+01	3,79E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,49E-06
9,28E-01	3,77E-01	4,36E+01	1,07E+02	5,13E+01	7,89E+01	3,61E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,40E-06
9,42E-01	6,00E-01	6,82E+01	7,83E+01	3,77E+01	5,80E+01	3,37E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,29E-06
9,53E-01	8,00E-01	9,02E+01	5,05E+01	2,43E+01	3,74E+01	3,23E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,22E-06
9,69E-01	1,00E+00	1,12E+02	3,60E+01	1,73E+01	2,66E+01	3,14E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,17E-06
9,73E-01	1,20E+00	1,34E+02	3,40E+01	1,64E+01	2,52E+01	3,02E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,11E-06
9,79E-01	1,40E+00	1,56E+02	3,01E+01	1,45E+01	2,23E+01	2,96E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,08E-06
9,97E-01	1,60E+00	1,78E+02	2,44E+01	1,17E+01	1,81E+01	2,85E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,02E-06
1,01E+00	1,80E+00	2,00E+02	1,88E+01	9,07E+00	1,40E+01	2,67E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,93E-06
1,03E+00	2,00E+00	2,22E+02	1,69E+01	8,13E+00	1,25E+01	2,40E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,80E-06
1,05E+00	2,20E+00	2,44E+02	1,55E+01	7,48E+00	1,15E+01	2,21E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,71E-06
1,09E+00	2,40E+00	2,66E+02	1,32E+01	6,34E+00	9,75E+00	1,62E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,41E-06
1,11E+00	2,60E+00	2,88E+02	8,69E+00	4,18E+00	6,44E+00	1,18E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,19E-06
1,12E+00	2,80E+00	3,11E+02	6,87E+00	3,31E+00	5,09E+00	1,03E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,12E-06

G1_dir (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,87E+00	4,34E-02	6,93E+00	9,71E+01	4,58E+01	7,14E+01	6,22E-04	2,25E+00	7,23E-02	3,19E-02	7,90E-02	5,71E-06
1,87E+00	1,90E-01	2,31E+01	5,66E+01	1,41E+01	5,63E+01	6,22E-04	2,25E+00	7,56E-02	3,87E-02	8,49E-02	5,71E-06
1,91E+00	4,01E-01	4,63E+01	3,85E+01	1,87E+01	4,86E+01	5,98E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,59E-06
1,92E+00	6,01E-01	6,82E+01	3,29E+01	2,61E+01	3,95E+01	5,90E-04	2,25E+00	7,03E-02	2,69E-02	7,52E-02	5,55E-06
1,94E+00	8,00E-01	9,02E+01	3,30E+01	2,70E+01	3,00E+01	5,74E-04	2,25E+00	7,02E-02	2,66E-02	7,51E-02	5,47E-06
1,96E+00	1,00E+00	1,12E+02	3,66E+01	2,21E+01	2,93E+01	5,58E-04	2,25E+00	7,12E-02	2,93E-02	7,70E-02	5,39E-06
1,97E+00	1,20E+00	1,34E+02	3,64E+01	1,78E+01	2,71E+01	5,49E-04	2,25E+00	7,21E-02	3,15E-02	7,87E-02	5,34E-06
1,99E+00	1,40E+00	1,56E+02	3,30E+01	1,21E+01	2,25E+01	5,36E-04	2,25E+00	7,36E-02	3,46E-02	8,13E-02	5,28E-06
2,00E+00	1,60E+00	1,78E+02	2,89E+01	6,65E+00	1,78E+01	5,22E-04	2,25E+00	7,60E-02	3,95E-02	8,56E-02	5,21E-06
2,08E+00	1,80E+00	2,00E+02	1,46E+01	1,23E+01	1,35E+01	4,27E-04	2,25E+00	7,01E-02	2,64E-02	7,49E-02	4,74E-06
2,10E+00	2,00E+00	2,22E+02	1,36E+01	9,96E+00	1,18E+01	4,05E-04	2,25E+00	7,05E-02	2,75E-02	7,56E-02	4,63E-06
2,12E+00	2,20E+00	2,44E+02	1,24E+01	7,73E+00	1,01E+01	3,73E-04	2,25E+00	7,11E-02	2,89E-02	7,67E-02	4,46E-06
2,14E+00	2,40E+00	2,66E+02	9,66E+00	6,30E+00	7,98E+00	3,45E-04	2,25E+00	7,09E-02	2,85E-02	7,64E-02	4,33E-06
2,16E+00	2,60E+00	2,88E+02	6,50E+00	5,08E+00	5,79E+00	3,22E-04	2,25E+00	7,03E-02	2,69E-02	7,53E-02	4,21E-06
2,16E+00	2,80E+00	3,10E+02	4,74E+00	4,47E+00	4,60E+00	3,01E-04	2,25E+00	6,98E-02	2,57E-02	7,44E-02	4,10E-06

G1_circ (ΔP = 1 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
8,23E-01	4,45E-02	7,06E+00	1,17E+02	5,61E+01	8,64E+01	6,09E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,65E-06
9,64E-01	1,81E-01	2,21E+01	1,13E+02	5,42E+01	8,34E+01	6,09E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,65E-06
1,13E+00	3,65E-01	4,23E+01	1,05E+02	5,07E+01	7,80E+01	3,06E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,13E-06
1,14E+00	6,11E-01	6,93E+01	7,36E+01	3,54E+01	5,45E+01	3,01E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,10E-06
1,13E+00	8,10E-01	9,13E+01	4,82E+01	2,32E+01	3,57E+01	2,90E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,05E-06
1,11E+00	1,00E+00	1,12E+02	3,09E+01	1,49E+01	2,29E+01	2,87E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,04E-06
1,15E+00	1,21E+00	1,35E+02	2,54E+01	1,22E+01	1,88E+01	2,77E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,99E-06
1,16E+00	1,42E+00	1,58E+02	2,27E+01	1,09E+01	1,68E+01	2,56E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,88E-06
1,12E+00	1,60E+00	1,79E+02	1,89E+01	9,10E+00	1,40E+01	2,44E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,82E-06
1,16E+00	1,80E+00	2,01E+02	1,41E+01	6,77E+00	1,04E+01	1,81E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,51E-06
1,16E+00	2,00E+00	2,23E+02	1,31E+01	6,32E+00	9,73E+00	1,69E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,44E-06
1,12E+00	2,21E+00	2,45E+02	1,11E+01	5,34E+00	8,21E+00	1,57E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,39E-06
1,13E+00	2,42E+00	2,68E+02	9,95E+00	4,79E+00	7,37E+00	1,42E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,31E-06
1,13E+00	2,63E+00	2,91E+02	6,30E+00	3,03E+00	4,66E+00	1,05E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,13E-06
1,16E+00	2,84E+00	3,15E+02	6,19E+00	2,98E+00	4,58E+00	9,46E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,07E-06

G1_circ (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,76E+00	4,45E-02	7,06E+00	1,03E+02	4,96E+01	7,64E+01	6,09E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,65E-06
1,81E+00	1,81E-01	2,21E+01	7,21E+01	3,47E+01	5,34E+01	6,09E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,65E-06
1,82E+00	3,65E-01	4,23E+01	5,67E+01	2,73E+01	4,20E+01	6,06E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,63E-06
1,99E+00	6,11E-01	6,93E+01	3,31E+01	1,59E+01	2,45E+01	4,01E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,60E-06
2,08E+00	8,10E-01	9,13E+01	4,14E+01	1,99E+01	3,07E+01	3,79E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,49E-06
2,02E+00	1,00E+00	1,12E+02	3,90E+01	1,88E+01	2,89E+01	3,57E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,39E-06
2,08E+00	1,21E+00	1,35E+02	3,35E+01	1,61E+01	2,48E+01	3,27E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,24E-06
2,08E+00	1,42E+00	1,58E+02	2,54E+01	1,22E+01	1,88E+01	2,76E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,98E-06
2,08E+00	1,60E+00	1,79E+02	1,76E+01	8,45E+00	1,30E+01	2,55E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,87E-06
2,08E+00	1,80E+00	2,01E+02	1,41E+01	6,77E+00	1,04E+01	2,31E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,76E-06
2,06E+00	2,00E+00	2,23E+02	1,31E+01	6,32E+00	9,73E+00	2,29E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,74E-06
2,08E+00	2,21E+00	2,45E+02	1,11E+01	5,34E+00	8,21E+00	2,17E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,69E-06
2,08E+00	2,42E+00	2,68E+02	7,93E+00	3,82E+00	5,87E+00	1,96E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,58E-06
2,09E+00	2,63E+00	2,91E+02	5,76E+00	2,77E+00	4,26E+00	1,85E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,53E-06
2,08E+00	2,84E+00	3,15E+02	4,57E+00	2,20E+00	3,38E+00	1,75E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,47E-06

G2_dir (ΔP = 1 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
8,47E-01	4,46E-02	7,07E+00	1,21E+02	5,82E+01	8,95E+01	3,92E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,56E-06
9,38E-01	2,01E-01	2,43E+01	1,04E+02	5,02E+01	7,72E+01	3,69E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,44E-06
1,09E+00	3,68E-01	4,27E+01	9,30E+01	4,48E+01	6,89E+01	2,54E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,87E-06
1,15E+00	6,00E-01	6,82E+01	5,20E+01	2,50E+01	3,85E+01	5,47E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,87E-06
1,14E+00	8,00E-01	9,02E+01	2,51E+01	1,21E+01	1,86E+01	4,75E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,84E-06
1,16E+00	1,00E+00	1,12E+02	1,44E+01	6,94E+00	1,07E+01	4,44E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,82E-06
1,15E+00	1,20E+00	1,34E+02	1,10E+01	5,31E+00	8,17E+00	4,03E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,44E-07
1,15E+00	1,40E+00	1,56E+02	9,78E+00	4,71E+00	7,25E+00	3,84E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,35E-07
1,16E+00	1,60E+00	1,78E+02	8,72E+00	4,20E+00	6,46E+00	3,74E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,30E-07
1,15E+00	1,80E+00	2,00E+02	7,73E+00	3,72E+00	5,73E+00	3,65E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,25E-07
1,16E+00	2,00E+00	2,22E+02	7,18E+00	3,46E+00	5,32E+00	3,61E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,23E-07
1,16E+00	2,20E+00	2,44E+02	6,82E+00	3,29E+00	5,05E+00	3,50E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,18E-07
1,15E+00	2,40E+00	2,66E+02	6,49E+00	3,12E+00	4,81E+00	3,30E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,08E-07
1,16E+00	2,60E+00	2,88E+02	3,94E+00	1,90E+00	2,92E+00	3,38E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,12E-07
1,16E+00	2,80E+00	3,10E+02	3,57E+00	1,72E+00	2,65E+00	3,18E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,02E-07

G2_dir (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,80E+00	4,43E-02	7,03E+00	2,45E+02	1,18E+02	1,82E+02	6,18E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,69E-06
1,87E+00	2,23E-01	2,67E+01	1,83E+02	8,82E+01	1,36E+02	6,11E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,66E-06
1,94E+00	4,01E-01	4,62E+01	1,09E+02	5,23E+01	8,05E+01	5,05E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,13E-06
2,09E+00	6,00E-01	6,82E+01	9,98E+01	4,81E+01	7,39E+01	3,99E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,59E-06
2,16E+00	8,00E-01	9,02E+01	3,79E+01	1,83E+01	2,81E+01	3,05E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,12E-06
2,20E+00	1,00E+00	1,12E+02	3,33E+01	1,61E+01	2,47E+01	2,45E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,83E-06
2,21E+00	1,20E+00	1,34E+02	2,88E+01	1,39E+01	2,14E+01	2,21E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,71E-06
2,23E+00	1,40E+00	1,56E+02	1,99E+01	9,59E+00	1,48E+01	1,95E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,57E-06
2,23E+00	1,60E+00	1,78E+02	1,60E+01	7,71E+00	1,19E+01	1,71E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,45E-06
2,23E+00	1,80E+00	2,00E+02	1,30E+01	6,27E+00	9,65E+00	1,67E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,43E-06
2,23E+00	2,00E+00	2,22E+02	1,13E+01	5,43E+00	8,36E+00	1,66E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,43E-06
2,25E+00	2,20E+00	2,44E+02	9,24E+00	4,45E+00	6,84E+00	1,56E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,38E-06
2,23E+00	2,40E+00	2,66E+02	7,45E+00	3,58E+00	5,52E+00	1,33E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,27E-06
2,23E+00	2,60E+00	2,88E+02	5,24E+00	2,52E+00	3,88E+00	1,24E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,22E-06
2,24E+00	2,81E+00	3,11E+02	3,84E+00	1,85E+00	2,85E+00	1,02E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,11E-06

G2_circ (ΔP = 1 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
7,93E-01	4,55E-02	7,17E+00	1,24E+02	5,97E+01	9,19E+01	3,78E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,49E-06
8,88E-01	2,11E-01	2,53E+01	1,19E+02	5,72E+01	8,80E+01	3,52E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,36E-06
1,07E+00	4,02E-01	4,64E+01	9,41E+01	4,53E+01	6,97E+01	2,34E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,77E-06
1,08E+00	6,00E-01	6,82E+01	5,11E+01	2,46E+01	3,78E+01	4,94E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,85E-06
1,08E+00	8,02E-01	9,04E+01	2,19E+01	1,05E+01	1,62E+01	4,44E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,82E-06
1,06E+00	1,00E+00	1,12E+02	1,28E+01	6,15E+00	9,46E+00	3,35E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,11E-07
1,06E+00	1,21E+00	1,35E+02	9,68E+00	4,66E+00	7,17E+00	3,29E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,07E-07
1,06E+00	1,41E+00	1,57E+02	8,40E+00	4,05E+00	6,23E+00	3,24E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,05E-07
1,06E+00	1,62E+00	1,80E+02	7,17E+00	3,45E+00	5,31E+00	3,19E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,03E-07
1,06E+00	1,80E+00	2,00E+02	6,33E+00	3,05E+00	4,69E+00	3,14E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,00E-07
1,06E+00	2,01E+00	2,23E+02	5,72E+00	2,76E+00	4,24E+00	3,11E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,98E-07
1,06E+00	2,20E+00	2,44E+02	5,43E+00	2,62E+00	4,02E+00	3,07E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,96E-07
1,05E+00	2,40E+00	2,67E+02	5,09E+00	2,45E+00	3,77E+00	3,04E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,95E-07
1,06E+00	2,60E+00	2,88E+02	3,43E+00	1,65E+00	2,54E+00	3,01E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,93E-07
1,05E+00	2,83E+00	3,13E+02	3,48E+00	1,68E+00	2,58E+00	2,99E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,93E-07

G2_circ (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,78E+00	4,46E-02	7,07E+00	2,38E+02	1,15E+02	1,77E+02	6,06E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,63E-06
1,81E+00	2,16E-01	2,59E+01	2,01E+02	9,66E+01	1,49E+02	6,02E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,61E-06
1,89E+00	3,93E-01	4,54E+01	1,57E+02	7,57E+01	1,16E+02	5,23E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,22E-06
2,03E+00	6,00E-01	6,82E+01	1,00E+02	4,84E+01	7,44E+01	3,18E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,19E-06
2,14E+00	8,07E-01	9,10E+01	3,71E+01	1,79E+01	2,75E+01	1,49E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,35E-06
2,15E+00	1,00E+00	1,12E+02	3,19E+01	1,54E+01	2,36E+01	1,47E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,33E-06
2,15E+00	1,21E+00	1,35E+02	2,74E+01	1,32E+01	2,03E+01	1,39E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,29E-06
2,16E+00	1,40E+00	1,56E+02	1,85E+01	8,93E+00	1,37E+01	1,28E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,24E-06
2,16E+00	1,60E+00	1,78E+02	1,46E+01	7,05E+00	1,08E+01	1,16E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,18E-06
2,17E+00	1,81E+00	2,01E+02	1,20E+01	5,76E+00	8,86E+00	1,08E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,14E-06
2,16E+00	2,00E+00	2,22E+02	9,80E+00	4,72E+00	7,26E+00	1,01E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,10E-06
2,17E+00	2,20E+00	2,45E+02	8,02E+00	3,86E+00	5,94E+00	9,63E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,08E-06
2,16E+00	2,41E+00	2,67E+02	6,77E+00	3,26E+00	5,02E+00	9,42E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,07E-06
2,17E+00	2,62E+00	2,90E+02	4,83E+00	2,33E+00	3,58E+00	9,36E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,07E-06
2,16E+00	2,82E+00	3,12E+02	3,54E+00	1,71E+00	2,63E+00	9,16E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,06E-06

G3_circ (ΔP = 1 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
8,02E-01	4,38E-02	6,97E+00	1,65E+02	7,97E+01	1,23E+02	3,76E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,48E-06
9,60E-01	2,10E-01	2,53E+01	1,30E+02	6,25E+01	9,62E+01	2,72E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,96E-06
1,11E+00	4,01E-01	4,63E+01	5,45E+01	2,62E+01	4,04E+01	2,08E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,64E-06
1,11E+00	6,02E-01	6,83E+01	2,30E+01	1,11E+01	1,70E+01	3,10E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,98E-07
1,11E+00	8,04E-01	9,07E+01	1,55E+01	7,48E+00	1,15E+01	3,07E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,84E-08
1,10E+00	1,00E+00	1,13E+02	9,37E+00	4,51E+00	6,94E+00	3,04E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,82E-08
1,10E+00	1,21E+00	1,35E+02	6,66E+00	3,21E+00	4,93E+00	3,01E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,81E-08
1,10E+00	1,41E+00	1,57E+02	5,55E+00	2,67E+00	4,11E+00	2,99E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,80E-08
1,09E+00	1,61E+00	1,79E+02	4,88E+00	2,35E+00	3,62E+00	2,98E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,79E-08
1,09E+00	1,81E+00	2,01E+02	3,98E+00	1,92E+00	2,95E+00	2,97E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,79E-08
1,09E+00	2,01E+00	2,23E+02	3,57E+00	1,72E+00	2,64E+00	2,96E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,78E-08
1,09E+00	2,21E+00	2,45E+02	3,10E+00	1,49E+00	2,30E+00	2,95E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,78E-08
1,09E+00	2,41E+00	2,67E+02	2,54E+00	1,22E+00	1,88E+00	2,95E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,78E-08
1,08E+00	2,61E+00	2,89E+02	2,44E+00	1,17E+00	1,80E+00	2,95E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,78E-08
1,08E+00	2,80E+00	3,10E+02	2,30E+00	1,11E+00	1,70E+00	2,96E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,78E-08

G3_circ (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,83E+00	4,36E-02	6,96E+00	1,14E+02	5,48E+01	8,43E+01	6,01E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,60E-06
1,82E+00	1,77E-01	2,17E+01	8,52E+01	4,10E+01	6,31E+01	5,98E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,59E-06
2,02E+00	4,00E-01	4,62E+01	6,44E+01	3,10E+01	4,77E+01	4,30E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,75E-06
2,19E+00	6,01E-01	6,83E+01	4,92E+01	2,37E+01	3,65E+01	8,74E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,04E-06
2,21E+00	8,00E-01	9,02E+01	1,65E+01	7,97E+00	1,23E+01	6,42E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,92E-06
2,22E+00	1,00E+00	1,12E+02	8,25E+00	3,97E+00	6,11E+00	9,42E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	9,01E-08
2,24E+00	1,20E+00	1,34E+02	7,91E+00	3,81E+00	5,86E+00	8,99E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,79E-08
2,21E+00	1,40E+00	1,56E+02	7,47E+00	3,60E+00	5,54E+00	8,96E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,78E-08
2,24E+00	1,60E+00	1,78E+02	5,81E+00	2,80E+00	4,30E+00	8,85E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,72E-08
2,21E+00	1,80E+00	2,00E+02	2,50E+00	1,20E+00	1,85E+00	8,71E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,65E-08
2,21E+00	2,00E+00	2,22E+02	1,58E+00	7,61E-01	1,17E+00	8,69E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,65E-08
2,20E+00	2,20E+00	2,44E+02	1,60E+00	7,70E-01	1,19E+00	8,67E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,63E-08
2,20E+00	2,40E+00	2,66E+02	1,66E+00	7,98E-01	1,23E+00	8,66E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,63E-08
2,21E+00	2,60E+00	2,88E+02	1,57E+00	7,58E-01	1,17E+00	8,64E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,62E-08
2,19E+00	2,84E+00	3,15E+02	1,42E+00	6,82E-01	1,05E+00	8,62E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,61E-08

G4_dir (ΔP = 1 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
7,73E-01	4,36E-02	6,96E+00	1,51E+02	7,25E+01	1,12E+02	3,55E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,38E-06
8,99E-01	2,18E-01	2,61E+01	1,06E+02	5,12E+01	7,88E+01	2,81E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,00E-06
9,90E-01	4,02E-01	4,64E+01	6,22E+01	2,99E+01	4,61E+01	1,64E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,42E-06
1,05E+00	5,92E-01	6,73E+01	2,19E+01	1,06E+01	1,63E+01	1,50E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,18E-07
1,06E+00	8,25E-01	9,29E+01	1,41E+01	6,81E+00	1,05E+01	6,03E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	7,32E-08
1,07E+00	1,01E+00	1,14E+02	9,70E+00	4,67E+00	7,18E+00	4,93E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	6,77E-08
1,06E+00	1,22E+00	1,36E+02	7,69E+00	3,70E+00	5,70E+00	4,75E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	6,68E-08
1,06E+00	1,42E+00	1,59E+02	6,06E+00	2,92E+00	4,49E+00	4,73E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	6,67E-08
1,06E+00	1,63E+00	1,82E+02	4,06E+00	1,95E+00	3,01E+00	4,30E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	6,45E-08
1,07E+00	1,84E+00	2,04E+02	3,24E+00	1,56E+00	2,40E+00	4,20E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	6,40E-08
1,07E+00	2,03E+00	2,25E+02	3,09E+00	1,49E+00	2,29E+00	3,73E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	6,17E-08
1,07E+00	2,22E+00	2,46E+02	2,84E+00	1,37E+00	2,10E+00	3,69E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	6,15E-08
1,07E+00	2,40E+00	2,66E+02	2,50E+00	1,21E+00	1,86E+00	3,68E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	6,14E-08
1,07E+00	2,57E+00	2,85E+02	2,48E+00	1,19E+00	1,84E+00	3,67E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	6,14E-08
1,07E+00	2,86E+00	3,17E+02	2,35E+00	1,13E+00	1,74E+00	3,63E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	6,12E-08

G4_dir (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,76E+00	4,29E-02	6,88E+00	1,87E+02	8,99E+01	1,38E+02	5,87E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,54E-06
1,77E+00	1,87E-01	2,27E+01	1,08E+02	5,22E+01	8,03E+01	5,86E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,53E-06
1,86E+00	3,93E-01	4,54E+01	4,98E+01	2,40E+01	3,69E+01	5,42E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,31E-06
2,02E+00	6,00E-01	6,82E+01	2,21E+01	1,06E+01	1,63E+01	2,92E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,06E-06
2,17E+00	8,00E-01	9,02E+01	1,89E+01	9,12E+00	1,40E+01	5,93E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,90E-06
2,20E+00	1,00E+00	1,12E+02	7,98E+00	3,84E+00	5,91E+00	8,73E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,67E-08
2,21E+00	1,20E+00	1,34E+02	5,90E+00	2,84E+00	4,37E+00	8,77E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,69E-08
2,19E+00	1,40E+00	1,56E+02	4,21E+00	2,03E+00	3,12E+00	8,97E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,79E-08
2,19E+00	1,60E+00	1,78E+02	3,82E+00	1,84E+00	2,83E+00	8,73E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,67E-08
2,18E+00	1,80E+00	2,00E+02	3,60E+00	1,73E+00	2,67E+00	8,59E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,60E-08
2,19E+00	2,00E+00	2,22E+02	3,39E+00	1,63E+00	2,51E+00	8,50E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,55E-08
2,18E+00	2,21E+00	2,45E+02	3,23E+00	1,55E+00	2,39E+00	8,42E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,51E-08
2,20E+00	2,43E+00	2,70E+02	3,12E+00	1,50E+00	2,31E+00	8,40E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,50E-08
2,19E+00	2,82E+00	3,12E+02	2,94E+00	1,42E+00	2,18E+00	8,28E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,44E-08
2,19E+00	2,85E+00	3,16E+02	2,91E+00	1,40E+00	2,16E+00	8,24E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,42E-08

G5 (ΔP = 1 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
8,23E-01	4,34E-02	6,93E+00	1,99E+02	9,60E+01	1,48E+02	3,79E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,49E-06
9,64E-01	2,18E-01	2,62E+01	1,56E+02	7,50E+01	1,15E+02	3,00E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,10E-06
1,13E+00	4,03E-01	4,65E+01	1,57E+01	7,56E+00	1,16E+01	1,02E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,11E-06
1,14E+00	6,29E-01	7,14E+01	9,80E+00	4,72E+00	7,26E+00	2,13E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,50E-07
1,13E+00	8,00E-01	9,02E+01	9,15E+00	4,41E+00	6,78E+00	1,79E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,32E-07
1,11E+00	1,04E+00	1,16E+02	8,53E+00	4,11E+00	6,32E+00	1,45E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,16E-07
1,15E+00	1,22E+00	1,36E+02	8,00E+00	3,85E+00	5,92E+00	1,18E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,02E-07
1,16E+00	1,40E+00	1,56E+02	7,66E+00	3,69E+00	5,67E+00	1,08E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	9,70E-08
1,12E+00	1,60E+00	1,78E+02	6,91E+00	3,33E+00	5,12E+00	8,78E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,69E-08
1,16E+00	1,80E+00	2,00E+02	3,52E+00	1,69E+00	2,60E+00	4,75E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	6,68E-08
1,16E+00	2,00E+00	2,22E+02	2,77E+00	1,34E+00	2,05E+00	3,73E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	6,17E-08
1,12E+00	2,20E+00	2,44E+02	1,93E+00	9,31E-01	1,43E+00	3,71E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	6,16E-08
1,13E+00	2,40E+00	2,67E+02	1,72E+00	8,27E-01	1,27E+00	2,69E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,65E-08
1,13E+00	2,60E+00	2,89E+02	1,57E+00	7,54E-01	1,16E+00	2,67E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,64E-08
1,16E+00	2,82E+00	3,13E+02	1,40E+00	6,76E-01	1,04E+00	2,66E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,63E-08

G5 (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,68E+00	4,30E-02	6,89E+00	1,65E+02	7,96E+01	1,23E+02	5,80E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,50E-06
1,76E+00	2,14E-01	2,57E+01	1,44E+02	6,96E+01	1,07E+02	5,34E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,27E-06
1,90E+00	4,03E-01	4,65E+01	1,32E+02	6,35E+01	9,78E+01	3,82E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,51E-06
2,08E+00	6,02E-01	6,84E+01	5,79E+01	2,79E+01	4,29E+01	8,83E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,04E-06
2,09E+00	8,04E-01	9,07E+01	1,52E+01	7,30E+00	1,12E+01	7,88E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,99E-06
2,10E+00	1,00E+00	1,13E+02	1,34E+01	6,46E+00	9,94E+00	6,62E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,93E-06
2,10E+00	1,20E+00	1,35E+02	1,30E+01	6,27E+00	9,64E+00	5,95E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,90E-06
2,09E+00	1,41E+00	1,57E+02	1,21E+01	5,84E+00	8,98E+00	5,53E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,88E-06
2,10E+00	1,60E+00	1,79E+02	1,08E+01	5,21E+00	8,02E+00	4,52E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,83E-06
2,10E+00	1,81E+00	2,01E+02	9,33E+00	4,49E+00	6,91E+00	3,51E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,19E-07
2,10E+00	2,01E+00	2,23E+02	7,27E+00	3,50E+00	5,38E+00	2,51E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,69E-07
2,10E+00	2,21E+00	2,45E+02	5,91E+00	2,85E+00	4,38E+00	1,80E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,33E-07
2,10E+00	2,41E+00	2,67E+02	4,94E+00	2,38E+00	3,66E+00	1,50E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,18E-07
2,10E+00	2,61E+00	2,89E+02	3,85E+00	1,85E+00	2,85E+00	1,30E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,08E-07
2,10E+00	2,83E+00	3,13E+02	2,29E+00	1,10E+00	1,70E+00	9,50E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	9,05E-08

G6 (ΔP = 1 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
7,80E-01	4,29E-02	6,88E+00	1,54E+02	7,39E+01	1,14E+02	3,67E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,43E-06
8,96E-01	1,98E-01	2,39E+01	1,26E+02	6,08E+01	9,36E+01	3,10E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,15E-06
1,09E+00	4,01E-01	4,63E+01	8,79E+01	4,23E+01	6,51E+01	1,43E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,15E-07
1,08E+00	6,30E-01	7,15E+01	8,78E+00	4,23E+00	6,50E+00	3,90E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	6,25E-08
1,09E+00	8,02E-01	9,03E+01	8,31E+00	4,00E+00	6,15E+00	3,19E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,90E-08
1,09E+00	1,02E+00	1,14E+02	7,65E+00	3,68E+00	5,67E+00	3,16E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,88E-08
1,09E+00	1,22E+00	1,36E+02	7,46E+00	3,59E+00	5,52E+00	3,12E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,86E-08
1,09E+00	1,42E+00	1,58E+02	6,66E+00	3,21E+00	4,94E+00	3,08E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,84E-08
1,09E+00	1,61E+00	1,80E+02	6,07E+00	2,92E+00	4,49E+00	3,05E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,83E-08
1,09E+00	1,81E+00	2,02E+02	4,54E+00	2,19E+00	3,37E+00	3,03E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,82E-08
1,10E+00	2,00E+00	2,23E+02	3,10E+00	1,49E+00	2,29E+00	3,02E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,81E-08
1,09E+00	2,23E+00	2,48E+02	2,14E+00	1,03E+00	1,58E+00	3,02E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,81E-08
1,09E+00	2,42E+00	2,68E+02	1,95E+00	9,38E-01	1,44E+00	3,01E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,81E-08
1,09E+00	2,61E+00	2,90E+02	1,71E+00	8,21E-01	1,26E+00	3,01E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,81E-08
1,09E+00	2,82E+00	3,12E+02	1,45E+00	6,99E-01	1,08E+00	3,01E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,81E-08

G6 (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,67E+00	4,33E-02	6,92E+00	1,52E+02	7,31E+01	1,12E+02	5,80E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,50E-06
1,75E+00	2,17E-01	2,60E+01	1,35E+02	6,50E+01	1,00E+02	5,24E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,22E-06
1,90E+00	4,03E-01	4,65E+01	1,24E+02	5,98E+01	9,20E+01	3,74E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,47E-06
2,07E+00	6,03E-01	6,85E+01	1,05E+02	5,06E+01	7,78E+01	6,53E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,93E-06
2,08E+00	8,06E-01	9,08E+01	2,35E+01	1,13E+01	1,74E+01	1,85E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,36E-07
2,08E+00	1,00E+00	1,12E+02	1,96E+01	9,43E+00	1,45E+01	7,77E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,19E-08
2,08E+00	1,20E+00	1,34E+02	1,47E+01	7,06E+00	1,09E+01	7,70E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,15E-08
2,08E+00	1,40E+00	1,56E+02	1,24E+01	5,98E+00	9,20E+00	7,61E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,11E-08
2,08E+00	1,60E+00	1,78E+02	1,17E+01	5,61E+00	8,64E+00	7,59E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,10E-08
2,09E+00	1,80E+00	2,00E+02	1,01E+01	4,87E+00	7,49E+00	7,57E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,09E-08
2,08E+00	2,00E+00	2,22E+02	8,15E+00	3,92E+00	6,04E+00	7,56E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,08E-08
2,08E+00	2,20E+00	2,44E+02	6,66E+00	3,21E+00	4,94E+00	7,55E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,08E-08
2,08E+00	2,40E+00	2,66E+02	5,32E+00	2,56E+00	3,94E+00	7,55E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,08E-08
2,08E+00	2,60E+00	2,88E+02	3,75E+00	1,80E+00	2,77E+00	7,54E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,07E-08
2,09E+00	2,80E+00	3,10E+02	2,40E+00	1,16E+00	1,78E+00	7,54E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	8,07E-08

G7 (ΔP = 1 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
7,67E-01	4,20E-02	6,78E+00	1,35E+02	6,51E+01	1,00E+02	3,65E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,43E-06
8,61E-01	1,88E-01	2,29E+01	7,35E+01	3,54E+01	5,44E+01	3,37E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,28E-06
1,04E+00	4,17E-01	4,80E+01	7,90E+00	3,81E+00	5,86E+00	5,52E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,88E-06
1,07E+00	6,01E-01	6,83E+01	6,60E+00	3,18E+00	4,89E+00	3,63E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,25E-07
1,07E+00	8,11E-01	9,14E+01	6,08E+00	2,93E+00	4,51E+00	3,00E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,93E-07
1,06E+00	1,01E+00	1,13E+02	5,20E+00	2,51E+00	3,85E+00	1,98E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,42E-07
1,06E+00	1,20E+00	1,35E+02	5,28E+00	2,54E+00	3,91E+00	1,79E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,33E-07
1,07E+00	1,41E+00	1,57E+02	5,27E+00	2,54E+00	3,90E+00	1,60E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,23E-07
1,07E+00	1,62E+00	1,80E+02	3,94E+00	1,90E+00	2,92E+00	1,23E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,05E-07
1,08E+00	1,81E+00	2,01E+02	2,48E+00	1,19E+00	1,84E+00	5,88E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	7,24E-08
1,08E+00	2,00E+00	2,22E+02	2,09E+00	1,01E+00	1,55E+00	5,83E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	7,22E-08
1,08E+00	2,21E+00	2,45E+02	1,89E+00	9,10E-01	1,40E+00	5,77E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	7,19E-08
1,08E+00	2,41E+00	2,67E+02	1,70E+00	8,19E-01	1,26E+00	5,75E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	7,18E-08
1,08E+00	2,60E+00	2,88E+02	1,54E+00	7,43E-01	1,14E+00	5,72E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	7,16E-08
1,08E+00	2,81E+00	3,11E+02	1,46E+00	7,03E-01	1,08E+00	5,88E-06	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	7,24E-08

G7 (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,64E+00	4,20E-02	6,78E+00	1,42E+02	6,86E+01	1,05E+02	5,74E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,47E-06
1,67E+00	2,13E-01	2,56E+01	6,87E+01	3,31E+01	5,09E+01	5,71E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	5,46E-06
1,78E+00	4,17E-01	4,80E+01	2,93E+01	1,41E+01	2,17E+01	4,78E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	4,99E-06
1,95E+00	6,08E-01	6,90E+01	1,35E+01	6,49E+00	9,98E+00	2,68E-04	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,94E-06
2,03E+00	8,06E-01	9,09E+01	1,36E+01	6,56E+00	1,01E+01	8,82E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,04E-06
2,03E+00	1,00E+00	1,12E+02	1,17E+01	5,64E+00	8,68E+00	8,75E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	3,04E-06
2,04E+00	1,21E+00	1,35E+02	9,98E+00	4,80E+00	7,39E+00	7,88E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,99E-06
2,04E+00	1,40E+00	1,56E+02	8,49E+00	4,09E+00	6,29E+00	7,17E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,96E-06
2,05E+00	1,60E+00	1,78E+02	6,98E+00	3,36E+00	5,17E+00	6,19E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	2,91E-06
2,06E+00	1,80E+00	2,00E+02	6,12E+00	2,95E+00	4,54E+00	2,21E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,54E-07
2,06E+00	2,01E+00	2,23E+02	4,56E+00	2,20E+00	3,38E+00	2,12E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,49E-07
2,06E+00	2,21E+00	2,45E+02	3,38E+00	1,63E+00	2,51E+00	2,02E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,44E-07
2,06E+00	2,41E+00	2,67E+02	2,78E+00	1,34E+00	2,06E+00	1,93E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,39E-07
2,06E+00	2,60E+00	2,88E+02	2,38E+00	1,14E+00	1,76E+00	1,82E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,34E-07
2,06E+00	2,81E+00	3,11E+02	1,43E+00	6,91E-01	1,06E+00	1,66E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,26E-07

G8 (ΔP = 1 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
7,78E-01	4,36E-02	6,96E+00	1,04E+02	7,85E+01	9,14E+01	3,73E-04	2,25E+00	7,04E-02	2,72E-02	7,55E-02	4,46E-06
9,02E-01	2,28E-01	2,72E+01	4,88E+01	3,44E+01	4,16E+01	3,18E-04	2,25E+00	7,06E-02	2,78E-02	7,59E-02	4,19E-06
1,07E+00	4,02E-01	4,64E+01	1,17E+01	3,68E+00	7,69E+00	5,49E-05	2,25E+00	7,44E-02	3,63E-02	8,28E-02	2,87E-06
1,07E+00	6,01E-01	6,82E+01	1,00E+01	2,90E+00	6,47E+00	2,22E-05	2,25E+00	7,48E-02	3,72E-02	8,35E-02	1,54E-07
1,08E+00	8,10E-01	9,13E+01	9,75E+00	2,76E+00	6,25E+00	1,87E-05	2,25E+00	7,49E-02	3,74E-02	8,37E-02	1,36E-07
1,08E+00	1,01E+00	1,13E+02	9,56E+00	2,66E+00	6,11E+00	1,77E-05	2,25E+00	7,50E-02	3,76E-02	8,39E-02	1,31E-07
1,08E+00	1,21E+00	1,35E+02	9,20E+00	2,53E+00	5,86E+00	1,60E-05	2,25E+00	7,51E-02	3,77E-02	8,40E-02	1,23E-07
1,09E+00	1,41E+00	1,57E+02	8,72E+00	2,35E+00	5,54E+00	1,44E-05	2,25E+00	7,52E-02	3,79E-02	8,42E-02	1,15E-07
1,09E+00	1,62E+00	1,80E+02	6,90E+00	1,70E+00	4,30E+00	1,01E-05	2,25E+00	7,56E-02	3,88E-02	8,50E-02	9,34E-08
1,12E+00	1,81E+00	2,01E+02	3,29E+00	4,16E-01	1,85E+00	6,30E-06	2,25E+00	7,86E-02	4,43E-02	9,02E-02	7,45E-08
1,10E+00	2,01E+00	2,23E+02	2,29E+00	5,86E-02	1,17E+00	5,55E-06	2,25E+00	8,20E-02	5,02E-02	9,62E-02	7,08E-08
1,09E+00	2,21E+00	2,45E+02	2,32E+00	5,00E-02	1,19E+00	5,16E-06	2,25E+00	8,23E-02	5,05E-02	9,65E-02	6,88E-08
1,12E+00	2,44E+00	2,71E+02	2,41E+00	4,00E-02	1,23E+00	4,80E-06	2,25E+00	8,25E-02	5,09E-02	9,69E-02	6,70E-08
1,09E+00	2,64E+00	2,93E+02	2,30E+00	3,28E-02	1,17E+00	4,53E-06	2,25E+00	8,25E-02	5,10E-02	9,70E-02	6,57E-08
1,12E+00	2,81E+00	3,11E+02	2,11E+00	1,10E-02	1,05E+00	4,21E-06	2,25E+00	8,29E-02	5,16E-02	9,77E-02	6,41E-08

G8 (ΔP = 2 bar)

Pression relative alimentation contact [bar]	Pression relative dans la chambre de charge [bar]	Force appliquée [N]	Zmax [µm]	Zmin [µm]	Zmoyen [µm]	Débit expérimental [kg/s]	Erreur sur la force appliquée [N]	Erreur sur Zmax [µm]	Erreur sur Zmin [µm]	Erreur sur Zmoyen [µm]	Erreur sur le débit expérimental [kg/s]
1,70E+00	4,46E-02	7,07E+00	1,32E+02	9,99E+01	1,32E+02	5,93E-04	2,25E+00	7,04E-02	2,72E-02	7,55E-02	5,56E-06
1,71E+00	1,96E-01	2,37E+01	8,89E+01	6,59E+01	7,74E+01	5,92E-04	2,25E+00	7,05E-02	2,74E-02	7,56E-02	5,56E-06
1,84E+00	3,95E-01	4,57E+01	3,95E+01	2,69E+01	3,32E+01	4,80E-04	2,25E+00	7,07E-02	2,81E-02	7,61E-02	5,00E-06
1,97E+00	6,03E-01	6,85E+01	2,60E+01	1,66E+01	2,13E+01	2,75E-04	2,25E+00	7,10E-02	2,87E-02	7,66E-02	3,97E-06
2,10E+00	8,01E-01	9,03E+01	1,36E+01	6,51E+00	1,01E+01	5,84E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,17E-02	7,89E-02	2,89E-06
2,11E+00	1,00E+00	1,12E+02	1,22E+01	5,45E+00	8,83E+00	5,88E-05	2,25E+00	7,26E-02	3,24E-02	7,95E-02	2,89E-06
2,11E+00	1,20E+00	1,34E+02	1,10E+01	4,45E+00	7,70E+00	5,54E-05	2,25E+00	7,31E-02	3,35E-02	8,04E-02	2,88E-06
2,13E+00	1,40E+00	1,56E+02	9,72E+00	3,41E+00	6,57E+00	5,13E-05	2,25E+00	7,38E-02	3,51E-02	8,17E-02	2,86E-06
2,13E+00	1,60E+00	1,78E+02	7,59E+00	3,66E+00	5,62E+00	2,69E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,77E-07
2,13E+00	1,80E+00	2,01E+02	5,88E+00	3,12E+00	4,50E+00	1,95E-05	2,25E+00	7,18E-02	3,06E-02	7,80E-02	1,41E-07
2,12E+00	2,00E+00	2,22E+02	4,24E+00	2,28E+00	3,26E+00	1,51E-05	2,25E+00	7,17E-02	3,04E-02	7,79E-02	1,18E-07
2,13E+00	2,20E+00	2,44E+02	3,38E+00	1,63E+00	2,51E+00	1,34E-05	2,25E+00	7,22E-02	3,16E-02	7,88E-02	1,10E-07
2,13E+00	2,40E+00	2,66E+02	2,70E+00	1,14E+00	1,92E+00	1,21E-05	2,25E+00	7,28E-02	3,31E-02	8,00E-02	1,04E-07
2,13E+00	2,60E+00	2,88E+02	2,10E+00	1,08E+00	1,59E+00	1,03E-05	2,25E+00	7,20E-02	3,10E-02	7,84E-02	9,47E-08
2,13E+00	2,84E+00	3,14E+02	1,20E+00	8,83E-01	1,04E+00	8,38E-06	2,25E+00	7,04E-02	2,74E-02	7,56E-02	8,49E-08

Annexe D : Données de mesure d'ondulation Wt

Surface SiC	Wt (R1) [µm]	Wt (R2) [µm]	Wt (R3) [µm]	Wt (R4) [µm]	Wt (C1) [µm]	Wt (C2) [µm]	Wt (C3) [µm]
SiC brut	2,42	2,41	2,54	2,37	2,29	2,15	1,80
SiC 1	2,31	1,63	1,37	3,08	2,52	4,56	3,10
SiC 2	1,13	0,76	0,99	1,19	3,51	2,94	1,76
SiC 3	2,89	1,52	1,59	1,12	2,53	2,53	2,57
SiC 4	1,28	0,83	2,64	4,13	3,79	3,79	2,71
SiC 5	2,39	2,97	1,72	2,83	2,67	2,81	2,43
SiC 6	2,01	3,14	3,45	2,74	3,01	2,52	2,84
SiC 7	2,20	1,66	1,69	1,47	3,19	2,60	2,37
SiC 8	2,68	2,25	1,89	2,66	3,08	2,21	1,91

Surface graphite	Wt (R1) [µm]	Wt (R2) [µm]	Wt (R3) [µm]	Wt (R4) [µm]	Wt (C1) [µm]	Wt (C2) [µm]	Wt (C3) [µm]
G1-dir	34,07	31,56	55,21	27,11	73,28	47,46	52,30
G1-circ	16,42	39,79	20,81	19,18	65,97	72,48	49,98
G2-dir	22,33	21,92	18,08	24,86	53,46	37,85	36,03
G2-circ	21,65	21,19	19,38	19,87	48,50	35,14	33,16
G7	40,18	25,88	41,47	25,52	25,81	24,28	26,27
G5	31,57	25,64	33,32	27,21	8,75	12,10	14,50
G8	8,72	8,17	4,67	11,30	25,00	23,55	23,59
G4-dir	6,99	7,84	8,38	8,87	15,44	15,88	16,79
G3-circ	9,58	6,58	11,05	6,69	17,24	9,98	19,06
G6	12,04	5,57	10,55	7,47	13,18	12,82	10,73
Graphite brut	5,45	7,13	14,14	7,37	6,05	6,05	9,96

Résumé - Abstract

Les étanchéités dynamiques à gaz sont utilisées dans de nombreux dispositifs tels que les turbines, les compresseurs ou les pompes. Cependant, en raison des très mauvaises caractéristiques lubrifiantes des gaz, et de la double nécessité de limiter le débit de fuite et le frottement, ces étanchéités sont amenées à fonctionner souvent en régime mixte de lubrification et à des épaisseurs de film très faibles pour lesquelles les rugosités de surface commencent à influencer la lubrification. Bien que ce type d'étanchéité soit essentiel dans de nombreux systèmes mécaniques, son fonctionnement en régime mixte avec des fluides compressibles reste encore mal compris. Ce manque de compréhension a motivé ce projet, qui vise à étudier expérimentalement ce régime de lubrification dans lequel la portance entre deux surfaces rugueuses est assurée simultanément par les aspérités en contact et par les zones de film mince. Un tribomètre original nommé « *Mixer* » a été développé dans le cadre de ce travail, afin d'établir un régime de lubrification mixte à gaz entre deux disques coaxiaux en mouvement relatif. Ce dispositif permet à de l'air pressurisé de s'écouler entre deux surfaces rugueuses, tout en surveillant l'interface grâce à des capteurs. L'étude menée sur plusieurs états de surface a permis d'évaluer l'influence de l'ondulation et des paramètres de rugosité sur la génération de portance et le débit d'écoulement, depuis les très faibles épaisseurs de film, où la rugosité commence à influencer l'écoulement, jusqu'au contact direct entre les surfaces.

Mots-clés : Tribologie – Lubrification mixte – Étanchéités dynamiques à gaz – Banc expérimental – Débit de fuite – Rugosité – Ondulation – Multi-échelle.

Gas dynamic seals are used in various rotating machines such as turbines, compressors, and pumps. Due to the poor lubricating properties of gases, and the need to simultaneously limit leakage and friction, these seals frequently operate in a mixed lubrication regime, at very small film thicknesses where surface roughness begins to play a significant role. Yet, the behavior of such seals with compressible fluids under mixed lubrication remains insufficiently understood. In this work, an original tribometer called « *Mixer* » was developed to generate a controlled mixed gas lubrication regime between two rough coaxial disks in relative motion. Pressurized air flows through the interface, which is instrumented to monitor contact and film formation. Experiments conducted on different surface topographies demonstrate how waviness and roughness parameters influence load support and flow rate, from the onset of roughness-controlled thin film behavior down to direct asperity contact.

Keywords : Tribology – Mixed lubrication – Gas dynamic seals – Experimental test rig – Leakage flow – Surface roughness – Waviness – Multi-scale.