
Modélisation multi-échelles du lissage

4.1	Approche multi-échelles	111
4.2	Suivi de forme	112
4.2.1	Écart de forme outil – pièce	113
4.2.2	Calculs de dimensionnement	115
4.3	Lissage	122
4.3.1	Indicateur de qualité de lissage	123
4.3.2	Résultats de fabrication	124
4.3.3	Simulation du lissage – poix synthétique.	130
4.3.4	Simulation du lissage – poix naturelle	137
4.4	Synthèse	145
4.4.1	Suivi de forme	147
4.4.2	Lissage	147
4.4.3	Synoptique de choix d’outil de lissage	148
4.5	Perspectives	148
4.5.1	Suivi de forme	148
4.5.2	Lissage	149

4.1 APPROCHE MULTI-ÉCHELLES

La qualité d’un cycle de lissage se mesure par deux critères principaux :

4. MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLES DU LISSAGE

- le suivi de la forme
- le lissage des défauts.

Les échelles spatiales et temporelles associées à ces deux phénomènes sont différentes et une approche multi-échelles est donc choisie afin d'adresser ces deux problématiques séparément.

Dans un premier temps, on cherche à dimensionner un outil permettant d'assurer un suivi de forme optimal de l'asphérisation de la pièce. Une méthode par éléments finis est utilisée dans cette partie afin de calculer la pression de contact outil – pièce pour le plus grand écart de forme outil – pièce rencontré au cours d'un cycle de lissage.

Ensuite, le lissage à l'interface poix – pièce est étudié à l'aide du modèle DEM de poix présenté au chapitre précédent. Les résultats de fabrication sont analysés à l'aide d'un critère d'efficacité de lissage et ensuite comparés aux résultats obtenus par des expériences numériques de lissage de défauts sinusoïdaux.

La Fig. 4.1 présente les outils développés et l'influence de chaque couche de l'outil ainsi que la méthode et les outils de modélisation choisis.

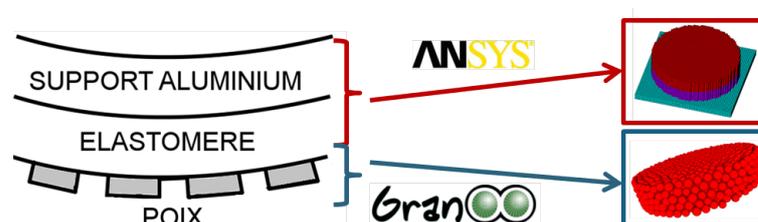


FIGURE 4.1 – Modélisation multi-échelles des outils de lissage par éléments finis (ANSYS) et éléments discrets (GranOO).

On s'intéresse donc dans un premier temps au suivi de la forme. Il faut pouvoir définir l'outil et les conditions opératoires de façon à ce que l'outil soit capable de suivre la forme de la pièce sans générer d'enlèvement matière parasite.

4.2 SUIVI DE FORME

Le but de cette étude est, à l'aide d'une modélisation sous ANSYS, de dimensionner la ou les épaisseurs de matériau souple optimale(s) garantissant un bon suivi de la forme des lentilles à polir. Une charge

optimale à appliquer sur l'outil doit aussi être déterminée. La méthodologie de détermination d'écart de forme instantané entre un outil et une pièce donnés est tout d'abord détaillée. L'étude paramétrique par éléments finis et les résultats obtenus sont alors décrits.

4.2.1 Écart de forme outil – pièce

Définition de l'écart de forme maximum

En raisonnant ici en terme de dimensionnement, le paramètre intéressant est l'écart de forme ("misfit") maximum entre l'outil et la pièce. C'est dans cette situation que la répartition de pression sera la moins uniforme et générera donc les différences d'enlèvement matière les plus fortes. Si l'uniformité de pression est suffisante dans ce cas critique, on considère qu'elle est assurée pour toutes les positions de l'outil sur la pièce.

On rappelle que le déplacement de l'outil sur la pièce est la composition d'une rotation (celle de la pièce) et de deux translations (battement de l'outil pour générer l'effet de lissage, et excentrique pour rendre le mouvement aléatoire). En pratique, le battement génère la vitesse la plus importante, c'est donc ce mouvement qui génère l'écart de forme le plus important.

On considère un outil infiniment rigide. Au départ après mise en pression au centre de la pièce, l'outil est complémentaire de la forme asphérique de la pièce. Lors du battement de l'outil, ce dernier se déplace et l'écart de forme outil – pièce augmente jusqu'à atteindre un maximum lorsque l'outil est à son maximum de battement.

⇒ Le misfit maximal est donc l'écart de forme outil – pièce obtenu pour l'amplitude maximale du battement de l'outil en considérant un déplacement instantané de l'outil.

Méthode de calcul

Initialement, l'outil infiniment rigide est représenté par la même équation que la pièce asphérique. Le battement de l'outil génère une translation (le vertex de l'outil se déplace) ainsi qu'une rotation autour de l'axe vertical de l'outil pour s'adapter à la forme "quasi-sphérique" de la pièce. Une nouvelle position de l'outil est alors obtenue, représentée par une nouvelle équation. La soustraction entre la nouvelle position et la position originale représente alors l'écart de forme maximum outil – pièce.

4. MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLES DU LISSAGE

⇒ On peut alors voir l'écart de forme outil – pièce comme le résidu d'une translation et rotation de courbe conique.

Ce genre de problème peut être traité par un logiciel propriétaire Reosc. Le battement se traduit par un déplacement du vertex de la courbe de l'outil. Dans le calcul, la rotation est un facteur d'optimisation : on cherche l'angle de rotation générant l'écart minimal entre position finale et initiale. Cet angle de rotation correspond physiquement à l'angle duquel l'outil doit tourner pour suivre la composante sphérique du profil de la pièce.

Les pièces présentant une symétrie de révolution, l'orientation du battement n'a pas d'influence sur le résultat. On considère donc un déplacement latéral selon l'axe X pour simplifier. La Fig. 4.2 présente les valeurs d'écart de forme maximal pour différentes valeurs de battement.

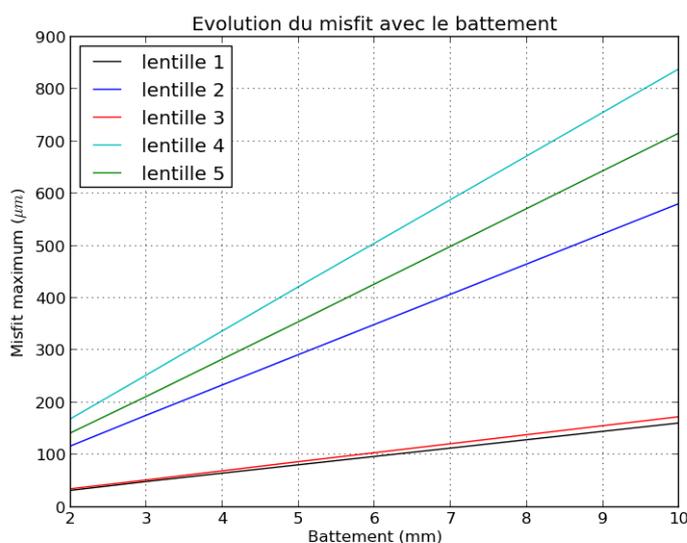


FIGURE 4.2 – Évolution de l'écart de forme outil – pièce en fonction du battement de l'outil.

⇒ L'écart de forme maximal évolue donc linéairement avec le battement d'outil. Seule la pente varie en fonction de la lentille considérée.

Les écarts de forme calculés sur 5 lentilles asphériques à fabriquer pour un battement de ± 5 mm sont présentés Fig. 4.3.

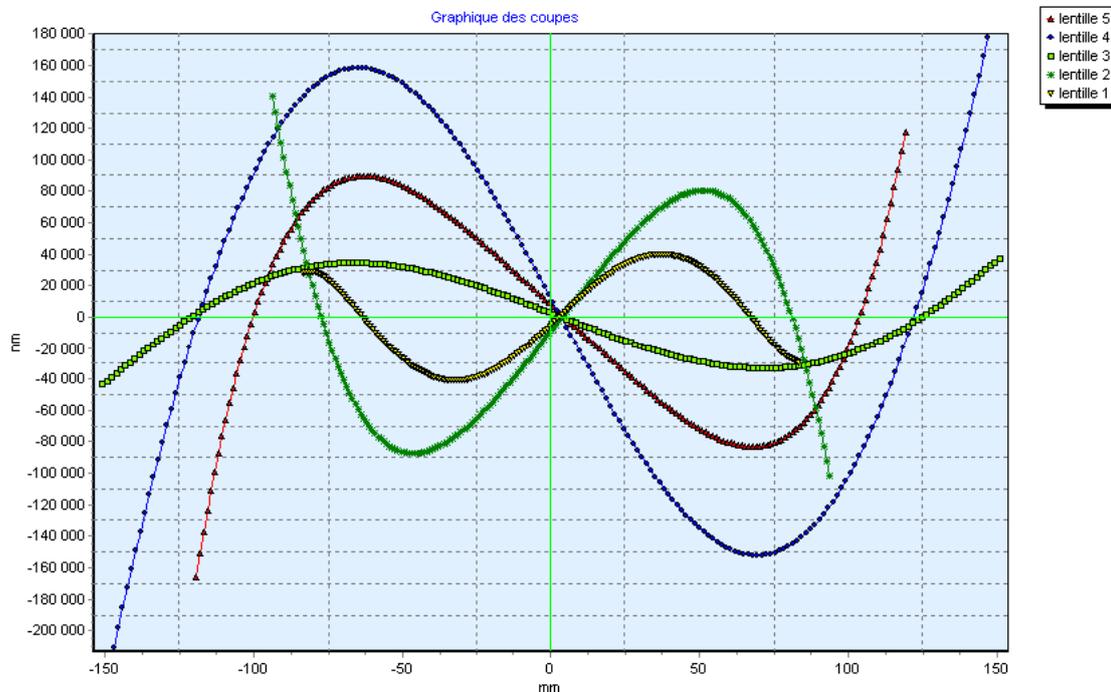


FIGURE 4.3 – Profils d'écart de forme pour 5 lentilles et un battement de ± 5 mm.

Les lentilles 2, 4 et 5 présentent les pentes et les écarts de forme maximaux les plus importants. Ce sont donc ces lentilles qui seront traitées par la suite.

4.2.2 Calculs de dimensionnement

Hypothèses préliminaires

Dans le suivi de forme, on cherche à dimensionner un matériau souple garantissant une uniformité de pression suffisante pour ne pas induire de trop grande déformation du profil asphérique de la pièce. On s'affranchit de l'influence de la poix en ne considérant que la partie supérieure de l'outil : support rigide et matériau souple. Ainsi on peut dimensionner au mieux la couche souple indépendamment du média de polissage utilisé. On tient cependant compte de la surface réelle qui est en contact avec la pièce qui est approximativement après mesure sur

4. MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLES DU LISSAGE

TABLE 4.1 – Paramètres optimaux prenant compte des limitations expérimentales.

matériau	module de Young	coefficient de Poisson
support aluminium	69 GPa	0.3
matériau souple	variable	0.4 (pas d'influence)
surface en verre	1 TPa	0.2 (pas d'influence)

un outil de 50% de la surface développée de l'outil. En effet, la couche de poix est fractionnée (comme présenté Fig. 2.23) et la charge appliquée entraîne ainsi des pressions de contact plus importantes que si la charge porte sur toute la surface de l'outil.

Les paramètres influant sur la pression de contact "outil" – pièce dans le cas d'un écart de forme maximum sont :

- l'écart de forme maximum outil – pièce qui dépend de l'amplitude du battement
- la nature du matériau souple
- la pression appliquée sur l'outil.

L'intérêt de travailler avec des cartes d'écart de forme est d'éliminer la sphéricité du problème et de permettre de travailler avec un outil plan, plutôt que de travailler avec un outil asphérique sur une surface asphérique, plus difficile à modéliser et mailler régulièrement.

Pour simplifier cette étude de dimensionnement, on considère que la couche souple (élastomère, mousse. . .) travaille dans la zone de son plateau caoutchoutique, donc à module constant. On considère de plus que son comportement est élastique linéaire dans la gamme de déformations nécessaire que l'on essaiera par la suite de limiter en-dessous de 10%. Deux mousses sont envisagées, et leur module a été caractérisé expérimentalement. Une caractérisation DMA d'une des mousses utilisées est présentée Fig. 4.4. On remarque que pour les basses fréquences, le module de perte est négligeable devant le module de conservation. Le matériau a donc un comportement à dominante élastique. De plus, le module dynamique est quasiment constant sur les basses fréquences (< 1 Hz), justifiant donc les hypothèses effectuées.

Les paramètres mécaniques des matériaux choisis sont présentés dans la Table 4.1. La surface est considéré comme infiniment rigide.

Le diamètre des lentilles étant de 200 à 300 mm, la masse maximum

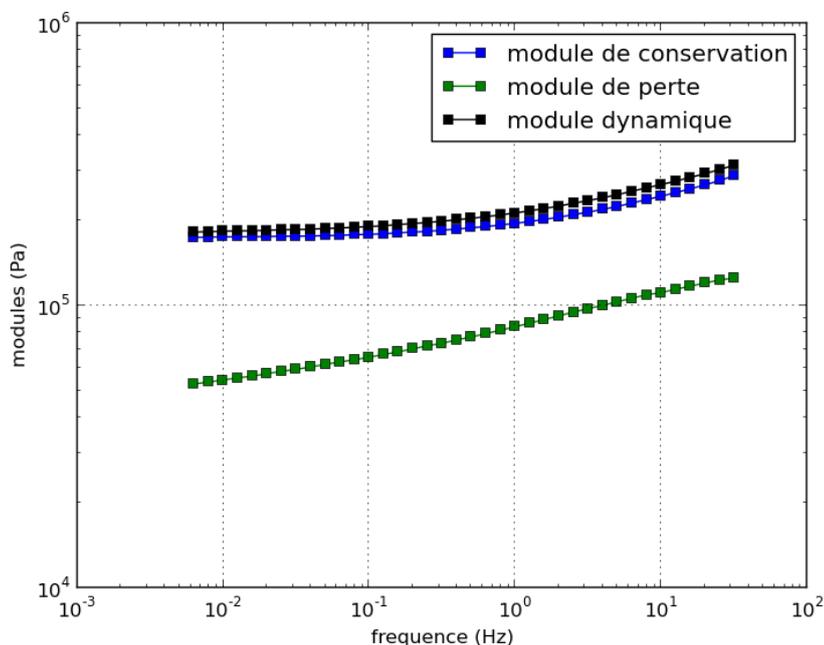


FIGURE 4.4 – Module dynamique à 22°C d'une mousse utilisée.

applicable (dépôt de masselottes sur la surface de l'outil) sur l'outil est de 26 kg. Le module de mousse minimal disponible est de 0.2 MPa et l'épaisseur limite fixée pour conserver un bon contrôle du comportement mécanique de l'outil est de 12 mm.

Maillage

On réalise un maillage cubique régulier de la surface de la pièce à partir des cartes d'écart de forme. On échantillonne ces dernières à 2 mm/pixel de façon à pouvoir créer à partir du fichier de points obtenu des éléments cubiques de taille 2x2x2 mm.

Une première couche plane de nœuds espacés de 2 mm est d'abord créée à partir du fichier de points puis copiée dans l'épaisseur de manière à créer une épaisseur de pièce suffisante (4 mm). L'altitude de la couche supérieure est alors modifiée pour l'adapter aux valeurs d'altitude échantillonnées à partir de la carte d'écart de forme.

Le maillage de l'outil est ensuite réalisé de la même manière par positionnement manuel des nœuds de la couche inférieure puis copie.

4. MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLES DU LISSAGE

Les nœuds sont balayés couche par couche pour générer les éléments cubiques et les matériaux sont affectés aux différentes couches (Fig. 4.5).

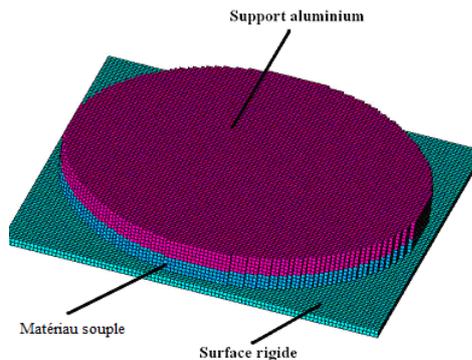


FIGURE 4.5 – Géométrie des modèles ANSYS créés.

Calcul

ANSYS réalise un calcul de contact quasi-statique (calcul des équilibres successifs pour de petits incréments de pression, jusqu'à application de la pression finale spécifiée) qui permet d'accéder aux deux paramètres intéressants de notre étude :

- statut du contact (contact/non-contact)
- pression de contact.

Les conditions aux limites considérées sont les suivantes :

- la charge est appliquée sur toute la surface de l'outil, sous la forme d'une pression
- l'outil est maintenu latéralement en son centre pour éviter les rotations et glissements
- la pièce à polir est considérée fixe : la couche d'éléments inférieure a un déplacement nul.

Les éléments choisis sont de type SOLID45 (hexaédriques linéaires, 8 nœuds et 3 degrés de liberté par nœud) et le contact est généré avec une méthode par pénalité.

On effectue une étude paramétrique portant sur le module et l'épaisseur du matériau ainsi que la pression appliquée sur l'outil, et ce pour les différentes lentilles asphériques à fabriquer.

Résultats.

Variation d'épaisseur à charge constante. Les résultats d'une variation d'épaisseur à charge constante sont présentés Fig. 4.6 dans le cas de la lentille 2.

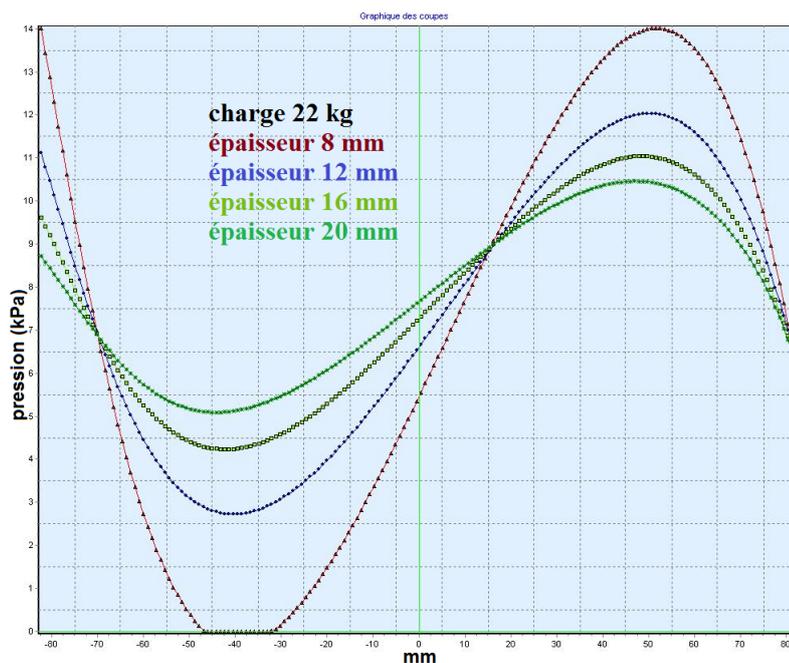


FIGURE 4.6 – Variation de la pression en fonction de l'épaisseur souple.

⇒ Une variation d'épaisseur ne change pas la pression moyenne et impacte uniquement l'uniformité de pression.

L'évolution de l'amplitude de pression peut être approximée par une loi puissance dont les paramètres vont varier pour chaque lentille (Fig. 4.7)

Variation de charge à épaisseur constante. Les résultats d'une variation de charge à épaisseur constante sont présentés Fig. 4.8 dans le cas de la lentille 2.

⇒ Une variation de charge impacte uniquement la pression moyenne et ne change pas l'uniformité de pression.

L'évolution de l'amplitude de pression peut être approximée par une loi linéaire, dont les paramètres vont varier pour chaque lentille (Fig. 4.9)

4. MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLES DU LISSAGE

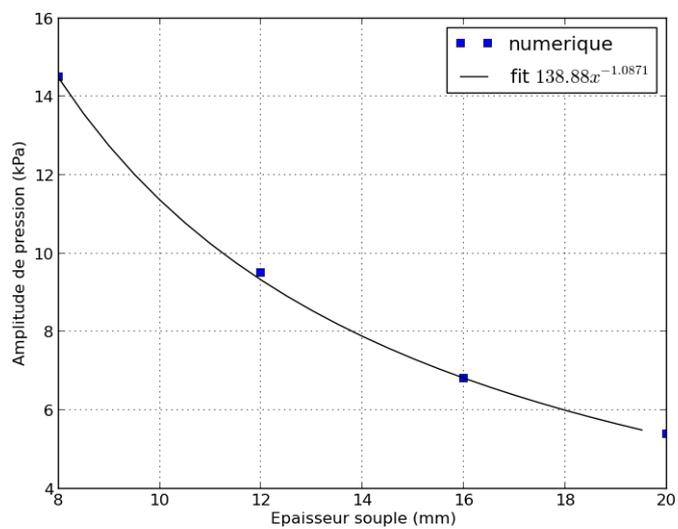


FIGURE 4.7 – Variation de la pression en fonction de l'épaisseur.

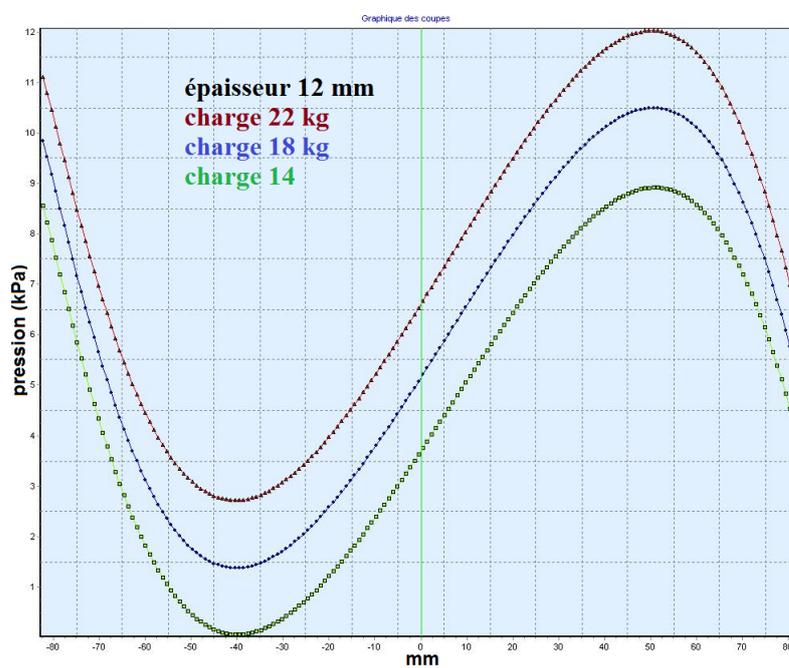


FIGURE 4.8 – Variation de la pression en fonction de la charge appliquée.

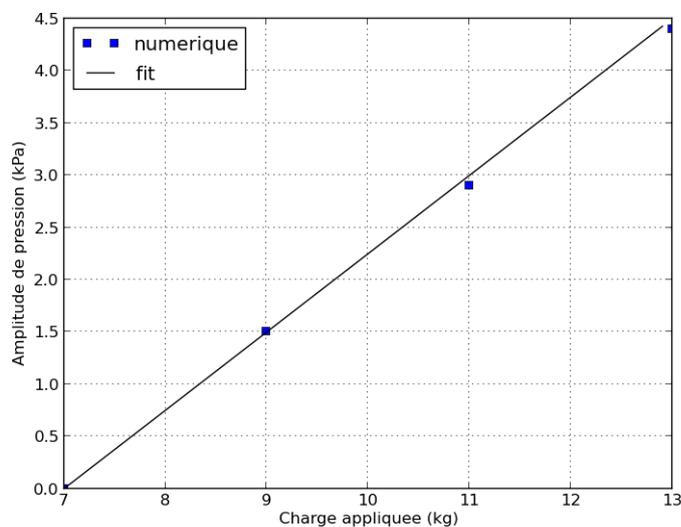


FIGURE 4.9 – Variation de la pression en fonction de la charge appliquée.

Il est apparu rapidement que compte-tenu des limitations expérimentales, le critère initial d'uniformité de la pression était impossible à atteindre sur des lentilles présentant des asphérisations aussi importantes. On a donc cherché à obtenir au moins le contact sur toute la pièce avec une pression supérieure à environ $10g.cm^{-2}$. Par expérience industrielle, ceci doit permettre d'éviter l'apparition de défauts d'aspect sur les lentilles (frayures, rayures...) observée expérimentalement pour des pressions trop faibles. On a aussi cherché à minimiser l'amplitude de l'écart de pression tout en conservant des valeurs de paramètres réalistes au niveau de l'atelier (Table ??, en rouge une valeur hors spécifications expérimentales, et en orange une valeur de pression minimale insuffisante).

⇒ Cette étude donne à la société Reosc une méthodologie plus précise de détermination de paramètres d'outil de lissage pour tout type d'optique et dans le cas présent, les outils de lissage utilisés en fabrication ont ensuite été réalisés sur la base des résultats présentés ici.

L'épaisseur souple et la charge sont donc déterminées pour chaque lentille à fabriquer, ce qui permet de compléter les procédures de fabrica-

4. MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLES DU LISSAGE

TABLE 4.2 – Exemples de pressions obtenues pour divers modules, épaisseurs de matériau souple et charges.

lentille	module (MPa)	épaisseur (mm)	charge (kg)	P_{min} (g.cm ⁻²)	P_{max} (g.cm ⁻²)
n° 2	0.4	8	13	9	156
	0.4	12	9	14	106
n° 4	0.4	24	26	3	133
	0.2	12	26	12	79
n° 5	0.4	16	14	7	103
	0.4	12	16	2	123
	0.4	8	26	30	184
	0.2	8	16	16	67

tion des outils de lissage. La base des outils est donc fixée. Après cette première partie concernant le suivi de la forme, on se concentre donc maintenant sur lissage des défauts par la couche de poix.

4.3 LISSAGE

Après une première analyse du suivi de forme, cette section présente en détail l'étude du lissage de défauts par un outil poix. En première partie, un indicateur d'efficacité de lissage est choisi et les résultats de lissage expérimentaux obtenus sur lentilles sphériques et asphériques sont analysés grâce à cet indicateur. L'influence du comportement de la poix dans les résultats obtenus peut alors être mise en évidence. Dans une deuxième partie, les outils DEM et analytique de simulation numérique du lissage sont présentés. Les résultats obtenus pour chaque modèle sont ensuite analysés. La prise en compte du comportement de la poix permet de retrouver l'évolution expérimentale d'efficacité de lissage.

Industriellement, le lissage est effectué avec des fluides de polissage variés, et sur des lentilles dont les états de surface sont tous différents. Il est donc impératif de déterminer un critère le plus universel possible pour pouvoir analyser et comparer les lissages entre eux : l'efficacité de lissage.

4.3.1 Indicateur de qualité de lissage

L'efficacité de lissage doit être un critère permettant de quantifier l'action de lissage d'un outil dans une situation donnée. Ce critère doit être universel pour comparer des résultats obtenus avec des états de surface de pièce et des fluides de polissage différents. Il doit donc s'affranchir de l'état initial de la pièce. Un critère est défini par Kim [76] :

$$EL''_{Kim} = \frac{PTV_{init} - PTV_{final}}{EM_{nominal}} \quad (4.1)$$

où PTV_{init} et PTV_{final} sont respectivement l'amplitude du défaut initial et final après lissage et $EM_{nominal}$ l'enlèvement de matière moyen sur la pièce. Cependant, ce critère est complètement dépendant de l'état initial de la pièce. Ce critère est intéressant pour traiter des surfaces dont les défauts ont toujours la même amplitude initiale, quelle que soit la fréquence. Dans la réalité de la fabrication, les défauts n'ont bien évidemment pas la même amplitude : les défauts de fréquence plus élevée sont par exemple généralement d'amplitude plus faible. Avec ce critère, l'efficacité de lissage a de grandes chances d'être plus faible aux hautes fréquences alors qu'on observe expérimentalement le phénomène opposé. Il faut donc modifier le critère en se concentrant sur l'amélioration relative de l'amplitude des défauts après lissage :

$$diminution_{defaut} = \frac{PTV_{init} - PTV_{final}}{PTV_{init}} \quad (4.2)$$

L'efficacité de lissage doit aussi prendre en compte le temps nécessaire pour corriger les défauts. On peut faire apparaître ce critère en définissant un rapport entre le gain d'amplitude de défaut divisé par l'épaisseur moyenne enlevée sur la pièce, comme défini dans [76]. L'épaisseur moyenne pouvant facilement se relier au temps de lissage par connaissance du taux d'enlèvement matière, le critère d'efficacité de lissage devient donc :

$$EL = \frac{PTV_{init} - PTV_{final}}{PTV_{init} EM_{nominal}} \quad (4.3)$$

Cependant avec les outils industriels de PSD (analyse de Fourier de la topologie de surface) utilisés, on ne peut avoir accès au PTV d'une fréquence donnée, mais au RMS sur une gamme de fréquence. Le critère

est donc redéfini avec des amplitudes de défauts RMS :

$$EL = \frac{RMS_{init} - RMS_{final}}{RMS_{init}EM_{nominal}} \quad (4.4)$$

On a alors défini un critère répondant aux deux principales contraintes :
- insensibilité à la différence d'état de surface (amplitude des différents défauts)

- prise en compte de l'aspect temporel (par l'intermédiaire de la connaissance de l'enlèvement matière moyen)

Pour des questions de lisibilité, l'unité d'efficacité de lissage choisie est la diminution d'un défaut en % par 100 nm d'épaisseur nominale enlevée. Cela permet d'obtenir des valeurs de l'ordre de quelques % par 100 nm enlevés.

4.3.2 Résultats de fabrication

Tous les résultats de fabrication présentés ont été obtenus avec un mélange de poix naturelles N1 et N2 en proportion 50%-50%. Quatre fluides de polissages (F1, F2, F3, F4) , de différentes granulométries (la granulométrie augmente avec le numéro), ont été utilisés.

Lentilles sphériques

Tout d'abord, on s'intéresse aux résultats de lissage obtenus sur des lentilles sphériques avec des outils pleine taille. On espère avec ces outils pouvoir mieux observer le comportement de la poix. En effet, la poix étant moins fractionnée sur un outil pleine taille, les paramètres géométriques de taille et de forme de pastille de poix n'interviennent pas dans la capacité de l'outil à lisser. On peut donc isoler le comportement de la poix plus facilement.

Défauts de non-révolution. Dans certains cas, on observe que l'efficacité de lissage est mal distribuée entre les défauts de révolution et ceux de non-révolution. Il est connu que l'efficacité est souvent meilleure sur les défauts de non-révolution car il est difficile, avec la trajectoire aléatoire des outils, de reproduire un motif périodique de non-révolution. Sans dégradation issue de motifs périodiques, l'efficacité de correction de défauts est donc meilleure et exempte de perturbations. On remarque Fig. 4.10 que l'outil de lissage sphérique pleine taille a tendance à légèrement sillonner la pièce, il peut donc être intéressant dans certains cas de s'affranchir des défauts de révolution.

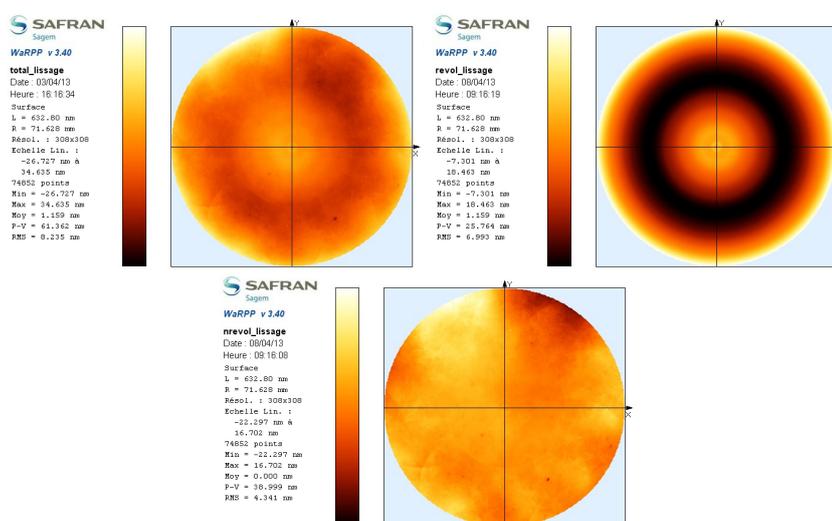


FIGURE 4.10 – Décomposition de la composante HF d’une surface en défauts de révolution et non-révolution. Le défaut de révolution est susceptible de contenir des HF parasites créées par l’outil.

Les résultats sont donc systématiquement analysés avec la carte de surface entière, puis la carte des défauts de non-révolution. En cas de grande différence entre les deux (Fig. 4.11), la carte de non-révolution est choisie pour l’analyse d’efficacité de lissage.

Allure générale des courbes. Le polissage est un procédé complexe multi-paramètres et qui utilise un matériau dont le comportement est très sensible à son environnement. De plus, on travaille ici sur des défauts de taille nanométrique pour lesquels l’efficacité peut varier énormément pour de petites dérives de procédé. La répétabilité du lissage est donc toujours un souci récurrent. Quelques résultats obtenus sont présentés Fig. 4.12.

On remarque que passée une fréquence de 0.1 mm^{-1} , la pente de toutes les courbes est relativement similaire : on observe une légère augmentation de l’efficacité avec la fréquence, tendant vers une stabilisation. Ceci est tout à fait cohérent avec le comportement typé Maxwell de la poix : le module augmente en BF, et en HF un plateau de module est atteint. Si le comportement de la poix est prépondérant dans le phénomène de

4. MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLES DU LISSAGE

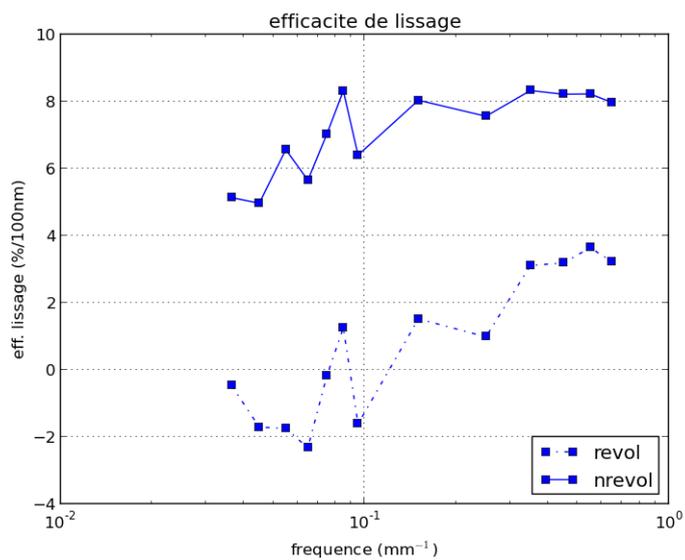


FIGURE 4.11 – Intérêt de la séparation des défauts de non-révolution pour le calcul d'efficacité de lissage.

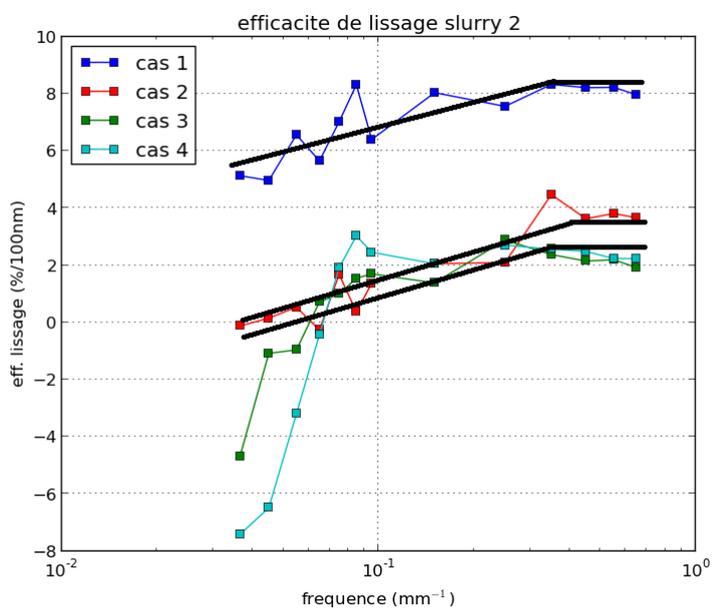


FIGURE 4.12 – Dispersion des résultats pour une même poix (N1-N2) et un même slurry (F2), pour différentes lentilles.

lissage, il en va donc de même pour l'efficacité de lissage, ce qui semble être vérifié ici.

⇒ Le lissage semble bien être commandé par le comportement de la poix.

La fréquence de coupure au-delà de laquelle l'efficacité tend à se stabiliser est environ 0.25 mm^{-1} (comprise entre 0.22 et 0.3 mm^{-1}).

Influence du fluide de polissage. L'influence du slurry a aussi pu être étudiée. Là encore, on observe une similitude de comportement entre les trois courbes (Fig. 4.13). La fréquence à laquelle on observe un plateau d'efficacité (0.2 mm^{-1}) reste similaire quel que soit le fluide utilisé. Le manque d'exemples pour certains fluides ne permet cependant pas de conclure définitivement sur la constance de la forme générale de la courbe d'efficacité lors d'un changement de fluide de polissage. La légère baisse d'efficacité aux HF n'est pour l'instant pas expliquée. La cause est probablement liée aux interactions entre l'outil et le fluide de polissage.

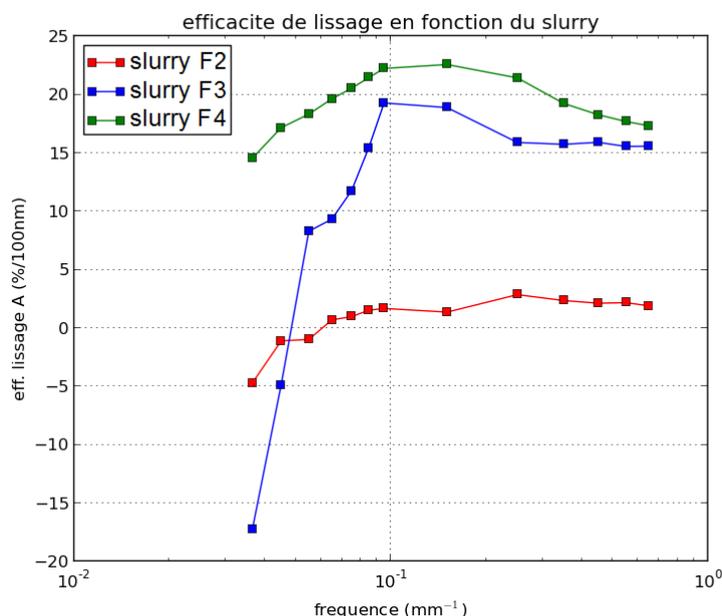


FIGURE 4.13 – Evolution de l'efficacité pour différents fluides de polissage.

4. MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLES DU LISSAGE

⇒ L'indépendance de la fréquence de coupure de la courbe d'efficacité vis-à-vis du fluide de polissage utilisé est un autre argument permettant d'affirmer que c'est bien le comportement de la poix qui contrôle l'évolution de l'efficacité de lissage sur la gamme de défauts observés. La fréquence de coupure est ici d'environ 0.2 mm^{-1} (comprise entre 0.15 et 0.25 mm^{-1}).

Lentilles asphériques

La progression sur les défauts HF pour une des lentilles à fabriquer est présentée Fig. 4.14.

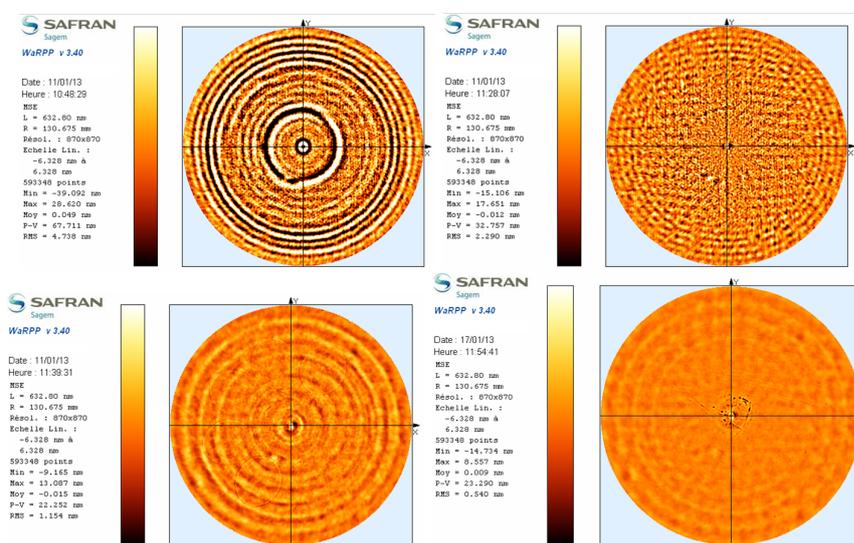


FIGURE 4.14 – Évolution des HF en cours de fabrication sur une lentille asphérique. De gauche à droite et de haut en bas : 4.74 → 2.29 → 1.154 → 0.54 nm RMS

On remarque que la passe de lissage génère des couronnes HF. Les défauts de révolution HF sont négativement impactés par le lissage à cause de l'apparition de ces couronnes. Si on souhaite analyser les capacités de lissage des outils sur les lentilles asphériques, il est donc préférable d'éliminer ses perturbations en se concentrant sur les défauts de non-révolution. Si ces couronnes perturbent l'analyse, elles ne sont pas réellement problématiques car elles peuvent être corrigées à l'aide d'un autre procédé interne à la société Reosc.

⇒ Le lissage asphérique, combiné à un autre procédé interne à la société Reosc, permet d'atteindre les spécifications HF demandées.

Une hypothèse de l'apparition de ces sillons sur la pièce est l'agencement des pastilles de poix sur l'outil qui génère des zones où le temps de résidence est supérieur, et d'autres où il est inférieur à la moyenne. Cette hypothèse est vérifiée par l'étude de l'efficacité de lissage. Une analyse d'efficacité de lissage sur les défauts HF de non-révolution sur plusieurs lentilles asphériques permet d'obtenir la Fig. 4.15. On peut noter une grosse perturbation aux fréquences de l'ordre de 0.06 mm^{-1} qui correspond à la taille moyenne des pastilles de poix : on fait bien apparaître l'effet du temps de résidence. La vitesse de glissement outil – pièce en rotation étant faible, certaines zones de l'outil restent longtemps en contact avec la même partie de la pièce et on voit donc apparaître la forme des pastilles de poix sur la pièce.

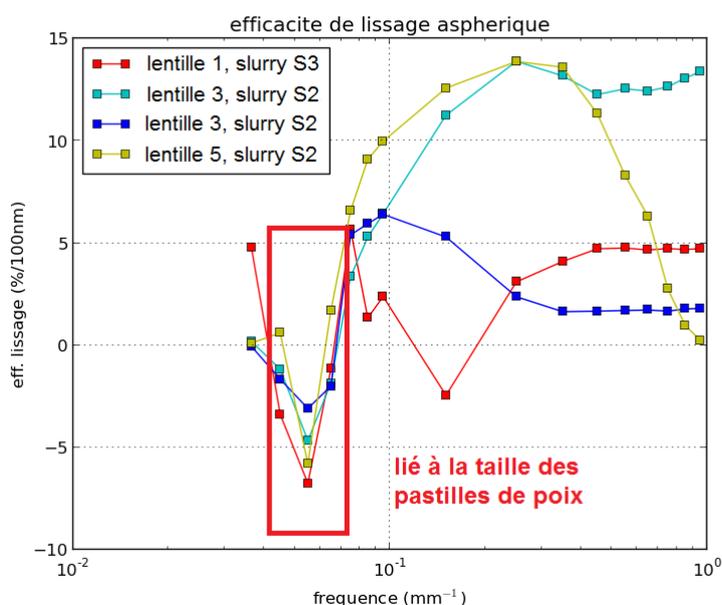


FIGURE 4.15 – Efficacité de lissage sur les lentilles asphériques.

La fréquence de coupe à partir de laquelle l'efficacité est stabilisée est environ 0.3 mm^{-1} (comprise entre 0.2 et 0.4 mm^{-1}).

⇒ Dans le cas des lentilles asphériques, les paramètres géométriques liés à la taille des pastilles de poix ont tendance à perturber la visualisa-

tion de l'efficacité de lissage. On retrouve cependant le même ordre de grandeur de fréquence de coupure que pour les lentilles sphériques.

Synthèse

Pour les lentilles sphériques, la forme générale des courbes d'efficacité évolue peu lorsqu'on fait varier la lentille ou le fluide de polissage. Malgré les perturbations induites par les paramètres géométriques des outils de lissage asphérique, on observe le même comportement général sur les lentilles asphériques.

De plus, la fréquence de coupure f_c pour laquelle le maximum d'efficacité est atteint est constante sur tous les essais $0.2 < f_c < 0.3 \text{mm}^{-1}$. La période de défauts en dessous de laquelle l'efficacité de lissage est maximale est donc 3-5 mm.

⇒ Toutes ces observations montrent qu'on a mis en évidence le comportement dynamique de la poix et qu'il est prédominant lors du lissage des défauts de période millimétrique.

Si le comportement de la poix est prépondérant, on doit pouvoir retrouver les résultats expérimentaux avec des modèles de lissage prenant en compte le comportement dynamique de la poix.

4.3.3 Simulation du lissage – poix synthétique

Au cours du lissage, l'outil se déplace sur des défauts de surfaces et son action combinée au mouvement du fluide de polissage génère de l'enlèvement matière. Que ce soit dans l'aspect mécanique ou chimique, la pression de contact a un effet important sur l'enlèvement matière [36]. La connaissance de la pression dynamique à l'interface outil – pièce est cruciale.

La taille submicrométrique des abrasifs est par exemple largement inférieure à la période millimétrique des défauts considérés, son impact est donc négligeable dans la capacité des outils à corriger ou non ce type de défauts. On peut supposer que son importance devient prépondérante pour des défauts de période de l'ordre de quelques microns.

⇒ Dans le cadre de cette étude, les défauts problématiques sont de période millimétrique. Les aspects liés au fluide de polissage sont dans un premier temps négligés. Le but est d'optimiser les outils en fonction des défauts à corriger, indépendamment du fluide de polissage utilisé.

Expériences numériques de lissage

Pour modéliser l'action de lissage due à la poix, un outil poix est déplacé à vitesse constante sur une surface présentant des défauts et des capteurs numériques permettent de calculer la pression sur chaque élément discret constituant la surface. Les surfaces à lisser sont des défauts sinusoïdaux d'amplitudes et de fréquences spatiales différentes.

Numériquement, un lissage est séparé en deux parties. Tout d'abord, un outil viscoélastique est appliqué sur la surface sans déplacement latéral. L'objectif de cette phase est de garantir un contact initial complet sous toute la surface de l'outil. C'est une phase purement numérique permettant d'obtenir un état initial similaire pour chaque cas. Ensuite, l'outil est déplacé à vitesse constante sur les défauts et la pression de contact résultante permet de définir une efficacité de lissage.

Création des surfaces. Les surfaces sont constituées d'éléments discrets très interpénétrés tel que décrit dans [104] (Fig. 4.16). Plus le pas d'échantillonnage est petit, plus le RMS équivalent de la surface de sphères interpénétrées se rapproche du RMS théorique de la carte "parfaitement lisse".

Des fichiers de points sont obtenus à partir de l'échantillonnage de cartes de surfaces et des éléments discrets sont positionnés au niveau de chacun des points, donnant ainsi une carte de surface tridimensionnelle. Une surface est caractérisée par une amplitude et une fréquence de défauts.



FIGURE 4.16 – Création de cartes de surfaces avec des échantillonnages différents.

⇒ Le pas d'échantillonnage et la taille des éléments déterminent la précision avec laquelle la surface est modélisée. Le pas d'échantillonnage choisi est de 100 éléments pour une période de défauts, et un rayon de l'ordre de 10 mm.

Mise en pression de l'outil. L'outil est un domaine discret compact adapté aux matériaux amorphes et garantissant l'isotropie des propriétés mécaniques [97]. On place d'abord l'outil le plus près possible de la surface sans qu'il y ait contact. Pour cela on détermine quelle est l'altitude minimale du centre de gravité de l'outil de façon à ce que la distance minimale entre deux éléments en vis-à-vis tende vers 0 (strictement supérieure à 0).

Pour chaque élément de la face inférieure de l'outil, on balaye la surface de la pièce et on détermine quels éléments (de la surface) sont susceptibles d'entrer en contact avec l'élément (de l'outil) lors d'une mise en pression verticale. On calcule alors la distance minimale nécessaire entre ces éléments pour que le contact outil – pièce n'ait lieu qu'en un unique point (Fig. 4.17). Le balayage des éléments de la face inférieure de l'outil permet de déterminer la valeur minimum de cette distance et de fixer la position du centre de gravité de l'outil de manière à minimiser le temps d'approche de l'outil sur la pièce.

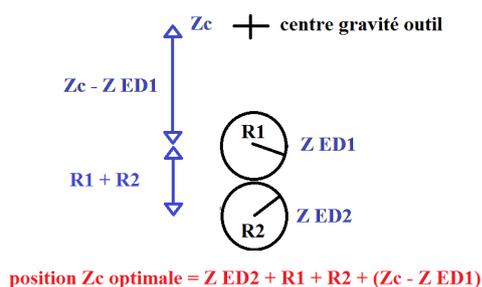


FIGURE 4.17 – Calcul de l'altitude minimale du centre de gravité de l'outil permettant le contact en un seul point sur la surface, avec interpénétration nulle. ED_1 appartient à l'outil et ED_2 à la surface.

Une force verticale constante égale à la force appliquée sur une pastille de poix d'un outil pleine taille est ensuite appliquée à la surface de l'outil qui vient alors petit à petit au contact de la surface par fluage (Fig. 4.18).

Lorsque tous les éléments de la couche inférieure de l'outil sont en contact avec la surface, la simulation est stoppée (Fig. 4.19).

Cette opération est réalisée pour chaque surface différente. L'état final ainsi obtenu sert d'état initial pour la phase de lissage à vitesse

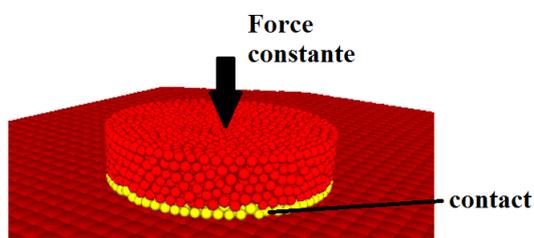


FIGURE 4.18 – Mise en pression d'un outil sur une surface. Le "maillage" de la surface est volontairement lâche pour montrer les éléments interpénétrés.

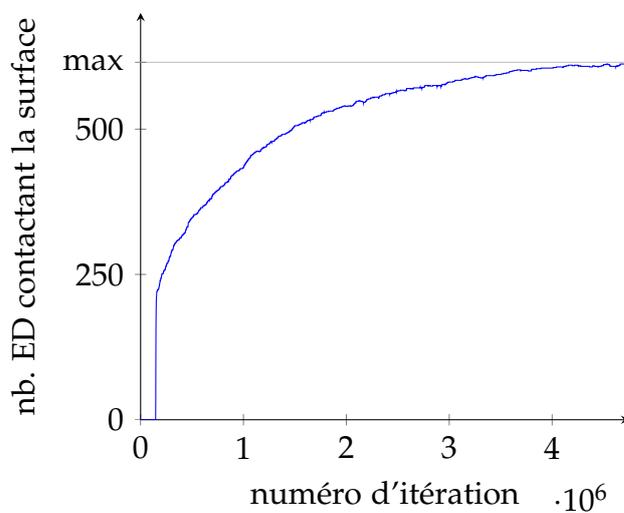


FIGURE 4.19 – Principe de mise en contact de l'outil sur la surface. L'étape est stoppée quand tous les éléments de la face inférieure de l'outil sont en contact avec la surface (ici, 615 éléments pour un outil constitué de 2000 éléments).

constante.

Déplacement à vitesse constante. Dans cette phase, l'altitude de l'outil est fixée, empêchant ainsi tout mouvement vertical de l'extrémité supérieure de l'outil poix. On n'a donc plus le contrôle de la pression appliquée, cependant ceci est nécessaire pour assurer un contact permanent entre l'outil et la pièce. Sans un maintien fort de la face supérieure de l'outil, on observe des décollements d'outil lors des simulations.

Un mouvement latéral unidirectionnel à vitesse constante est appliqué à l'outil pendant que la surface reste fixe. Le but est de faire varier la fréquence temporelle d'excitation de la poix pour observer les changements dans son comportement. Cette fréquence temporelle est liée à la vitesse de déplacement de l'outil et la fréquence spatiale des défauts par la relation :

$$f_{temporelle} = f_{spatiale} V_{outil} \quad (4.5)$$

⇒ Toutes choses égales par ailleurs, la fréquence temporelle d'excitation varie linéairement avec la fréquence spatiale des défauts, ainsi qu'avec la vitesse de l'outil.

De façon à limiter le nombre d'étapes de mise en pression, une seule fréquence spatiale de défaut est nécessaire et seule la vitesse d'outil varie. On n'effectue donc de mise en pression que pour chaque amplitude différente de défauts.

⇒ La fréquence temporelle d'excitation est la variable physique du phénomène de lissage, la fréquence spatiale des défauts est la variable industrielle et la vitesse de l'outil est la variable numérique.

Il y a un écart important entre le pas de temps numérique, fixé par le schéma d'intégration explicite de la méthode et dépendant des paramètres de simulation (environ 10 ns), et le pas de temps physique lié aux phénomènes de lissage (environ 1 ms). Des cartes de pression instantanées "physiques" peuvent être obtenues en moyennant des cartes instantanées "numériques" sur de nombreux pas de temps numériques. Ces cartes de pression instantanée physique permettent alors de calculer l'efficacité de lissage. Il est aussi possible, en additionnant les cartes de pression instantanée à chaque pas de temps physique et, en considérant dans une première approche que l'enlèvement de matière est proportionnel à la pression, de créer une carte d'enlèvement matière local.

Calcul d'efficacité de lissage

Expérimentalement, on rappelle que l'efficacité de lissage EL est définie par :

$$EL_{\text{experimentale}} = \frac{RMS_{\text{init}} - RMS_{\text{final}}}{RMS_{\text{init}} EM_{\text{nominal}}} \quad (4.6)$$

Numériquement, les pressions permettent de définir un critère d'efficacité légèrement différent :

$$EL_{\text{numerique}} = \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{P_{\text{moy}}} \quad (4.7)$$

On peut relier ce critère numérique au critère expérimental, si on considère en première approximation que l'enlèvement matière est proportionnel à la pression. Si on multiplie l'expression par la vitesse de l'outil, on fait ainsi apparaître l'enlèvement de matière au sens de la loi de Preston – Archard :

$$EL_{\text{numerique}} = \frac{P_{\text{max}} V_{\text{outil}} - P_{\text{min}} V_{\text{outil}}}{P_{\text{moy}} V_{\text{outil}}} = \frac{EM_{\text{max}} - EM_{\text{min}}}{EM_{\text{moy}}} \quad (4.8)$$

Le dénominateur fait alors directement apparaître l'enlèvement matière nominal $EM_{\text{moy}} = EM_{\text{nominal}}$. Le numérateur correspond lui au gain réalisé sur l'amplitude des défauts et on a donc :

$$EM_{\text{max}} - EM_{\text{min}} = PTV_{\text{initial}} - PTV_{\text{final}} \quad (4.9)$$

En effet le PTV_{final} peut s'écrire en fonction des hauteurs initiales H_{max} et H_{min} du défaut comme :

$$PTV_{\text{final}} = H_{\text{max}} - EM_{\text{max}} - (H_{\text{min}} - EM_{\text{min}}) \quad (4.10)$$

où $H_{\text{max}} - H_{\text{min}} = PTV_{\text{initial}}$.

Si on divise le critère d'efficacité numérique par le PTV initial du défaut, on retrouve le même critère qu'expérimentalement à la différence que le critère expérimental considère les variations RMS des défauts et le critère numérique les variations PTV. Dans le cadre d'une approximation de défaut sinusoïdal (l'analyse de Fourier décompose la surface en une somme de défauts sinusoïdaux), les valeurs PTV et RMS sont reliées par la formule suivante :

$$RMS = \frac{PTV}{2\sqrt{2}} \quad (4.11)$$

On peut alors comparer directement les deux critères d'efficacité.

Résultats. Une pastille de poix synthétique S1 de diamètre 12 mm et épaisseur 3 mm est déplacée à vitesse constante sur une surface présentant des défauts sinusoïdaux d'amplitude 10 nm et de période 3 mm. La variation de vitesse de la pastille permet de réaliser la variation de fréquence sur cette unique carte.

On cherche ici à étudier le comportement fréquentiel de la poix en s'affranchissant de l'impact de la géométrie circulaire. On travaille donc uniquement le long du diamètre de cette pastille, que l'on peut alors modéliser par un parallélépipède de longueur 12 mm, largeur 3.5 mm et épaisseur 3 mm.

A chaque pas de temps, la pression minimale est obtenue en moyennant la valeur de la pression obtenue sur chaque creux des défauts. La pression maximale est obtenue de la même manière sur les crêtes des défauts. Ces pressions sont obtenues à chaque pas de temps et sont ensuite moyennées sur l'ensemble du déplacement afin de calculer l'efficacité de lissage.

Efficacité de lissage. Onze différents calculs sont effectués afin de couvrir le spectre fréquentiel au cours duquel la poix synthétique S1 voit son comportement évoluer de manière importante. Pour chaque fréquence d'étude, deux calculs avec deux outils de même dimension sont effectués afin d'étudier la répétabilité du lissage numérique, soit au total vingt-deux calculs pour reconstruire une courbe de lissage.

En considérant la vitesse de référence moyenne de 20 mm/s résultant du battement de l'outil sur la pièce, les fréquences spatiales couvertes sont 0.005 à 0.05 mm⁻¹. On cherche à corréler l'efficacité de lissage obtenue sur les défauts de période millimétrique avec l'évolution des paramètres mécaniques de la poix.

La courbe d'efficacité obtenue par sollicitation multi-axiale d'une pastille de poix se déplaçant sur une surface présente la même forme que la courbe de module déterminée par un essai dynamique de torsion (Fig. 4.20). On peut estimer la fréquence de coupure à partir de laquelle l'efficacité n'augmente plus à 0.05 mm⁻¹.

Amplitude des défauts. On se place maintenant dans la zone où l'efficacité atteint son maximum, à une fréquence de 1 mm⁻¹. Le calcul de lissage est alors effectué avec des défauts d'amplitude variable, de 10 à 100 nm. Comme pour les essais précédents, pour chaque amplitude

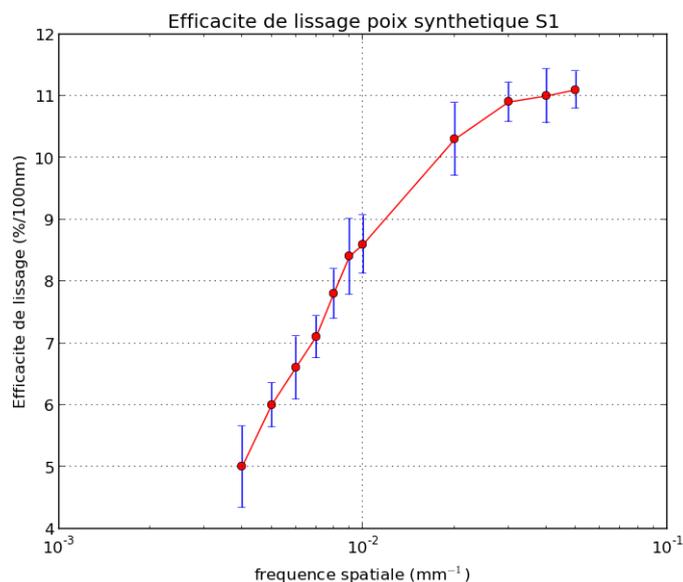


FIGURE 4.20 – Efficacité de lissage numérique en fonction de la fréquence spatiale des défauts obtenue pour une poix synthétique S1.

on réalise deux calculs afin d’observer la répétabilité, soit 8 calculs au total. On observe que l’efficacité évolue linéairement avec l’amplitude initiale (Fig. 4.21), ce qui confirme les observations expérimentales faites dans [76] montrant que l’efficacité de lissage évolue linéairement avec l’amplitude PTV initiale des défauts.

⇒ Le modèle DEM permet de retrouver l’évolution expérimentale mise en évidence par [76].

4.3.4 Simulation du lissage – poix naturelle

Méthode

Le modèle DEM développé ne permettant pour l’instant pas une détermination précise du module de conservation et du module de perte de la poix naturelle, on utilise un modèle analytique [75, 76] mais en intégrant la variation dynamique des paramètres mécaniques de la poix en fonction de la fréquence. Ce modèle est aussi utilisé pour la poix synthétique S1 afin de comparer les résultats du modèle DEM et les résultats analytiques.

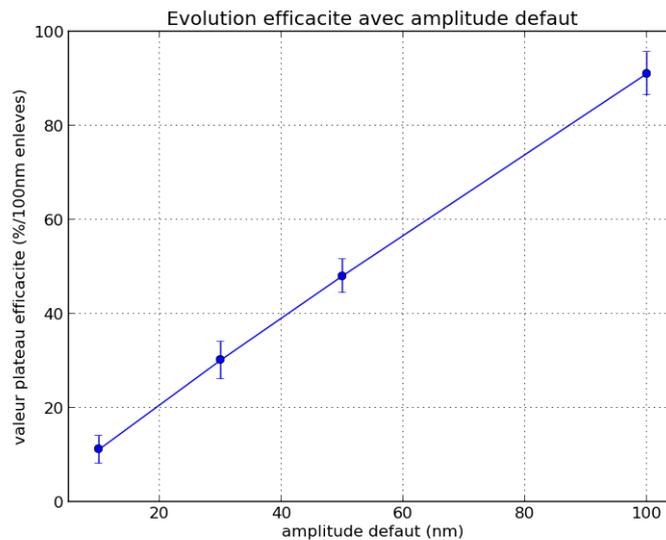


FIGURE 4.21 – Évolution de l’efficacité maximale en fonction de l’amplitude des défauts.

On définit tout d’abord une surface en fixant la période de son défaut $s(x)$ et son amplitude. Ensuite on définit les paramètres de l’outil (épaisseur, courbure, diamètre...) qui dépendent de la lentille qu’on souhaite étudier. On considère que l’outil, aux fréquences testées, est dans la zone dominée par la compression. On peut alors simplement écrire la pression sur un défaut comme :

$$P_{\text{défaut}} = P_{\text{nominale}} + K_{\text{poix}}(\omega) s(x) \quad (4.12)$$

avec K_{poix} raideur de la poix et ω la pulsation d’excitation associée à la période spatiale du défaut. P_{nominale} est la pression de contact sous l’outil pour une surface plane. $K_{\text{poix}}(\omega)$ est calculée en fonction de la géométrie de la poix et des valeurs de module mesurées expérimentalement en DMA.

Résultats et analyse

Impact du type de poix utilisé. On peut tout d’abord étudier l’impact sur l’efficacité de lissage du type de poix utilisé. La Fig. 4.22 présente le résultat obtenu pour la lentille asphérique n°1. Sur les défauts HF, les 3 poix les plus dures (mélange N1-N2, poix N2, poix S1) tendent

TABLE 4.3 – Fréquences de coupure déterminées par le modèle analytique.

type de poix	fréquence de coupure (mm^{-1})
poix N1	0.5
mélange N1-N2	0.25
poix N2	0.16
poix S1	0.09

à être équivalentes car la poix entre déjà dans sa zone à module de conservation constant. Les efficacités tendent donc vers la même valeur d'une diminution de défaut de 16% par 100 nm d'épaisseur enlevés. On constate que la fréquence de coupure à laquelle l'efficacité n'augmente plus est différente pour chaque poix et diminue avec la dureté de la poix (Table 4.3).

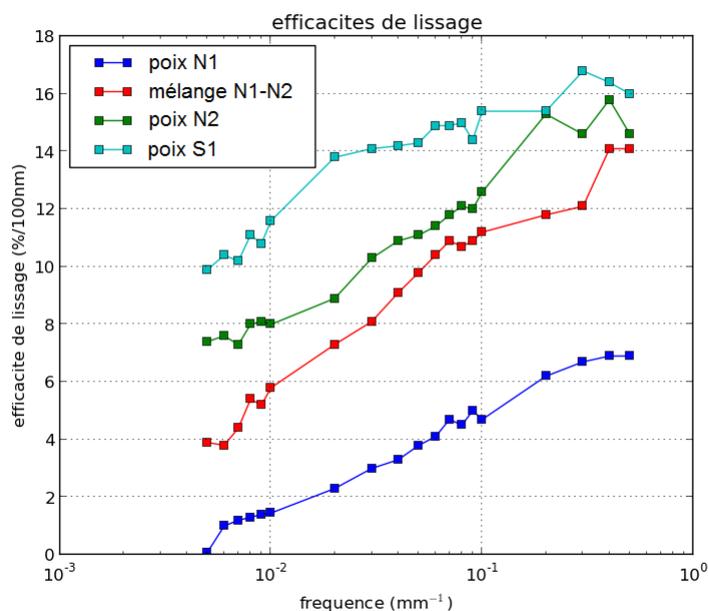


FIGURE 4.22 – Efficacités théoriques obtenues sur la lentille 1.

Impact de l'amplitude des défauts. On voit clairement apparaître dans l'équation 4.12 une linéarité de la pression vis-à-vis de l'amplitude des

4. MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLES DU LISSAGE

défauts. Le calcul confirme l'évolution linéaire de l'efficacité en fonction de l'amplitude des défauts (Fig. 4.23, pour un mélange de poix N1-N2).

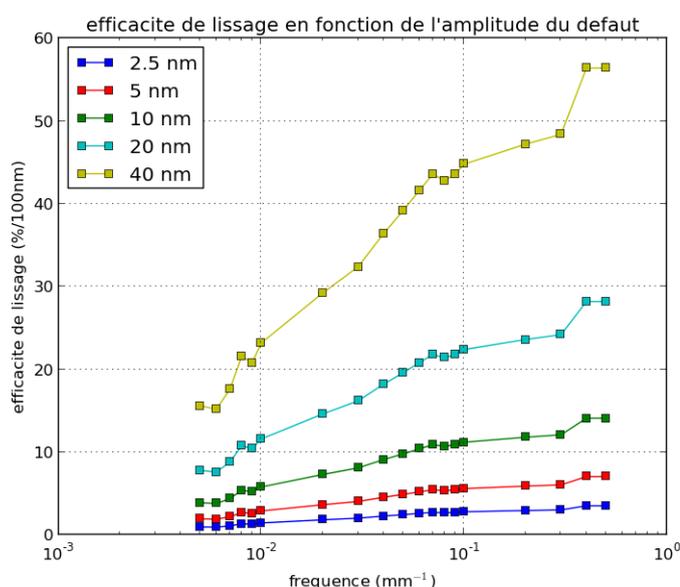


FIGURE 4.23 – Évolution de l'efficacité de lissage pour plusieurs amplitudes de défauts, avec un mélange de poix N1-N2.

Impact de l'épaisseur de poix. De même que la variation de l'efficacité en fonction de l'amplitude des défauts, l'impact de l'épaisseur de poix peut facilement être déterminé grâce à l'équation 4.12. L'efficacité de lissage évolue comme l'inverse de l'épaisseur de la couche de poix (Fig. 4.24), si on considère toujours que la poix travaille dans une zone dominée par la compression et non la flexion.

On voit que l'épaisseur de poix est un paramètre assez sensible. Cependant, les limites pratiques de durée de vie d'outil (fluage, notamment) réduisent la marge de manœuvre sur ce paramètre. On doit avoir initialement une épaisseur suffisante pour garantir une durée de vie de plusieurs cycles de lissage.

⇒ Il est intéressant de noter que selon ce modèle, l'efficacité de lissage augmente donc au cours d'un cycle de lissage lorsque l'épaisseur de la couche de poix diminue par fluage.

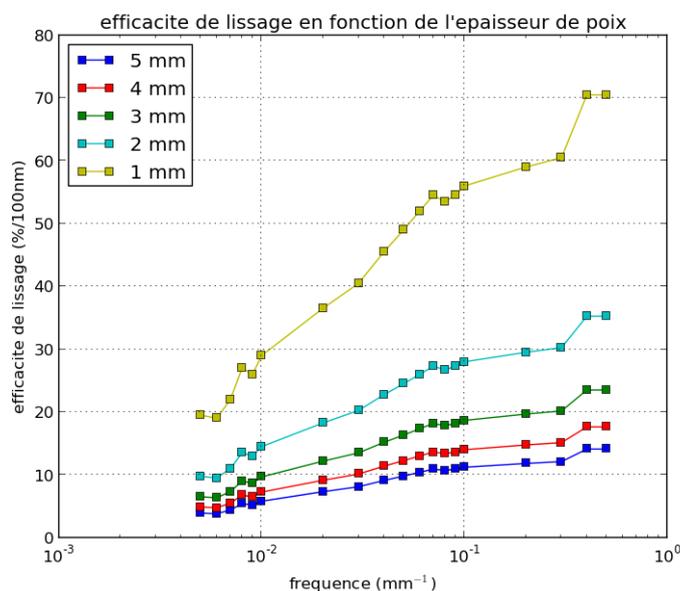


FIGURE 4.24 – Évolution de l'efficacité de lissage pour plusieurs épaisseurs de poix, avec un mélange de poix N1-N2.

Comparaison avec un calcul analytique. En utilisant la méthode présentée au paragraphe précédent pour les poix naturelles, il est possible pour la poix synthétique S1 d'obtenir une courbe d'efficacité analytique et de la comparer avec la courbe DEM (Fig. 4.25). Cette comparaison fait apparaître des fréquences de coupure équivalentes. De plus, la valeur de pente BF est identique entre le calcul DEM et le calcul analytique. Cependant, la valeur brute d'efficacité diffère, les valeurs analytiques étant supérieures de 2 à 4 points par rapport aux valeurs obtenues par calcul de lissage DEM. Le calcul DEM permet une meilleure prise en compte du comportement de la poix (solicitation multi-axiale) mais il est cependant difficile de contrôler précisément la force appliquée en pratique sur l'outil lorsqu'on fixe l'altitude de l'outil pour le déplacement à vitesse constante. On ne travaille plus à force constante mais à altitude constante. Ceci est nécessaire afin d'éviter que l'outil rebondisse sur la pièce à cause de forces de contact localement trop importantes pour permettre un maintien de l'outil avec une simple force verticale telle que celle appliquée en polissage. Les valeurs brutes d'efficacités par cal-

4. MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLES DU LISSAGE

cul DEM ne sont donc probablement pas directement comparables aux valeurs analytique, d'où l'écart observé.

⇒ Les courbes DEM et analytique sont qualitativement en tout point équivalentes.

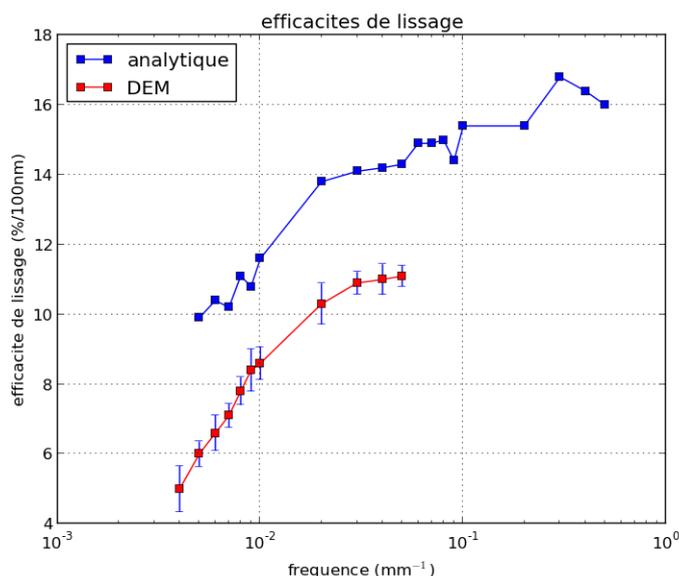


FIGURE 4.25 – Comparaison entre efficacité analytique et calculée par la méthode DEM pour une poix synthétique S1.

Comparaison numérique - expérimental. Une comparaison entre résultats analytiques et expérimentaux est présentée Fig. 4.26. On remarque que la pente et la fréquence de coupure expérimentales sont bien représentées par le modèle analytique. Un écart α subsiste cependant entre la valeur réelle et la valeur analytique. Cet écart peut être considéré au premier ordre comme constant. La poix utilisée dans la simulation DEM étant différente des autres, la fréquence de coupure trouvée est bien évidemment différente. On retrouve cependant un écart proche des valeurs attendues si on considère les résultats de caractérisations DMA obtenus au chapitre 2. En effet, le rapport entre la fréquence de coupure expérimentale (mélange N1-N2) et la fréquence de coupure DEM (poix S1) est d'environ 6.7, pour 8 attendus si on considère les valeurs du chapitre 2 pour la poix seule. La valeur DEM semble donc cohérente avec

les valeurs qui pourraient être obtenues expérimentalement avec un poix synthétique S1. Là encore, un facteur de proportionnalité devrait permettre de se rapprocher de la valeur réelle d'efficacité de lissage.

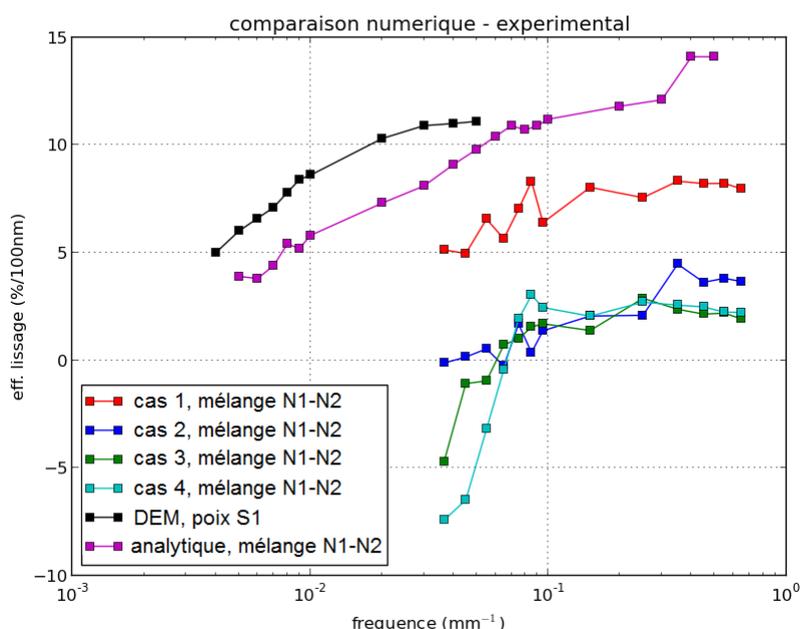


FIGURE 4.26 – Comparaison entre efficacité expérimentale et numérique (DEM et analytique).

⇒ L'efficacité expérimentale semble proportionnelle à l'efficacité numérique.

Un paramètre d'ajustement permet donc de superposer les courbes numériques et expérimentales. Ce paramètre est à déterminer pour chaque poix. Cependant, il contient de nombreuses variables liées aux phénomènes de lissage et risque d'évoluer de manière significative pour un même type de poix en fonction du fluide de polissage, des caractéristiques géométriques de la lentille, de certains paramètres opératoires...

⇒ Il est donc nécessaire d'utiliser un modèle d'usure plus complet afin de rendre le modèle numérique réellement prédictif. D'autres paramètres que la pression sont à prendre en compte dans les modèles DEM et analytiques. Les modèles présentés ici sont donc une première approche

qualitative, voire semi-quantitative, qui nécessite d'être complétée :
- soit par le choix d'un modèle d'usure plus complet (prise en compte d'autres paramètres dans le calcul de l'efficacité de lissage) - soit par la simulation directe en DEM de l'enlèvement de matière. Cela requiert cependant un changement d'échelle de travail car avec les moyens de calcul actuels, l'usure n'est pour l'instant pas envisageable sur des échelles spatiales millimétriques et temporelles de l'ordre de la seconde. Les résultats de ce modèle étant en bon accord avec l'expérience, ils peuvent toutefois être utilisés pour le dimensionnement de la couche de poix des outils de lissage. C'est le cas par exemple pour la détermination des paramètres nécessaires à une bonne mise en pression initiale des outils avant lissage.

Mise en pression des outils. En plus du lissage se pose la question des conditions de mise en pression des outils de polissage. On a vu au chapitre 2 que la mise en pression est fondamentale. En effet, si elle n'est pas effectuée correctement, il y a une période pendant laquelle l'outil dégrade fortement la pièce avant d'être correctement conditionné. Il est donc important de savoir quelles sont les capacités de fluage des différentes poix, ainsi que leur évolution en fonction de la pression appliquée, de la durée de mise en pression, de la température et de l'épaisseur de poix.

On peut optimiser la mise en pression des outils sur les optiques afin de réduire la durée effective d'un cycle de lissage. En fonction des paramètres choisis – durée de mise en pression, type et épaisseur de poix, géométrie d'outil et de fractionnement de poix, température – on calcule la déformation possible de la couche de poix et on vérifie si elle est compatible de l'écart de forme initial outil – pièce (amplitude max des défauts + imperfections dans la forme de l'outil). Il est alors possible de choisir les paramètres les plus adaptés à une durée fixée, ou bien au contraire prédire la durée de mise en pression nécessaire en fonction de paramètres imposés.

On se fixe une lentille de diamètre 220 mm et de rayon de courbure 300 mm. On fait varier la durée de mise en pression, les autres paramètres restant constants : l'épaisseur de poix est de 4 mm, la charge est de 10 kg et la température est de 22°C. Les résultats sont présentés Fig. 4.27.

De la même manière, on fait varier la température (Fig. 4.28, durée 1h, épaisseur 4 mm et charge 10 kg), l'épaisseur de poix (Fig. 4.29, durée

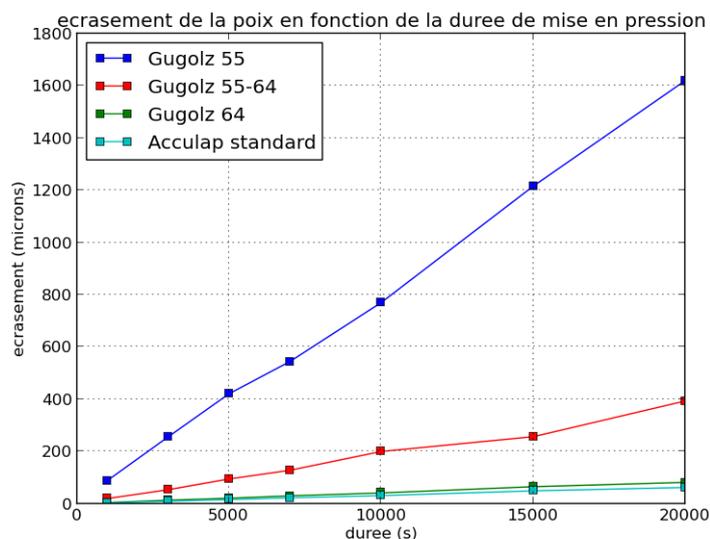


FIGURE 4.27 – Évolution de l'écrasement en fonction de la durée de mise en pression.

1h, charge 10 kg et température 22°C) et la charge appliquée (Fig. 4.30, durée 1h, épaisseur 4 mm et température 22°C)

⇒ On a ainsi accès aux diverses variations de l'écrasement en fonction des paramètres fondamentaux d'une mise en pression d'outil. Il est alors possible d'optimiser la mise en pression au cas par cas en fonction des lentilles, des besoins et/ou limites pratiques de l'atelier de fabrication. La principale difficulté réside dans l'estimation de l'écrasement nécessaire. L'amplitude PTV des défauts sur la pièce est connue, mais la qualité de la surface de poix est inconnue et fluctue en fonction de chaque outil.

4.4 SYNTHÈSE

Le lissage de défauts HF a été étudié par une approche multi-échelles en deux étapes :

- une étude à l'échelle de l'outil complet afin de déterminer une méthodologie de dimensionnement de l'épaisseur souple et du chargement à appliquer pour assurer le meilleur suivi de forme possible
- une étude à l'échelle d'une pastille de poix afin de déterminer l'effica-

4. MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLES DU LISSAGE

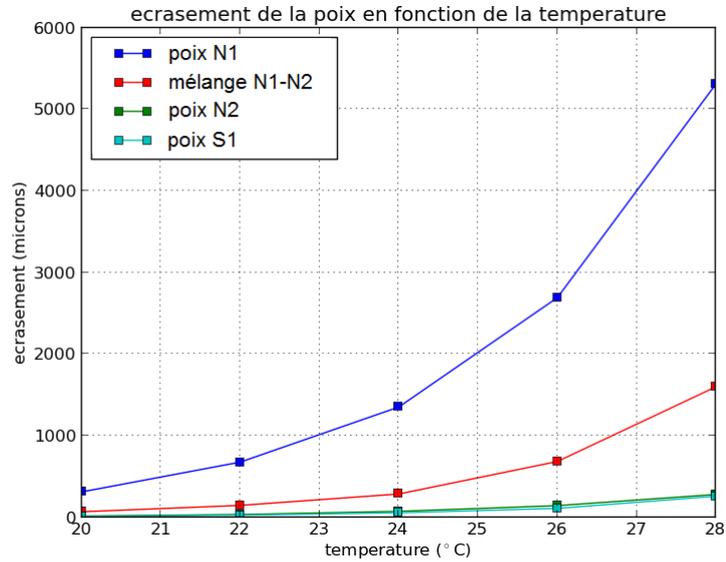


FIGURE 4.28 – Évolution de l'écrasement en fonction de la température.

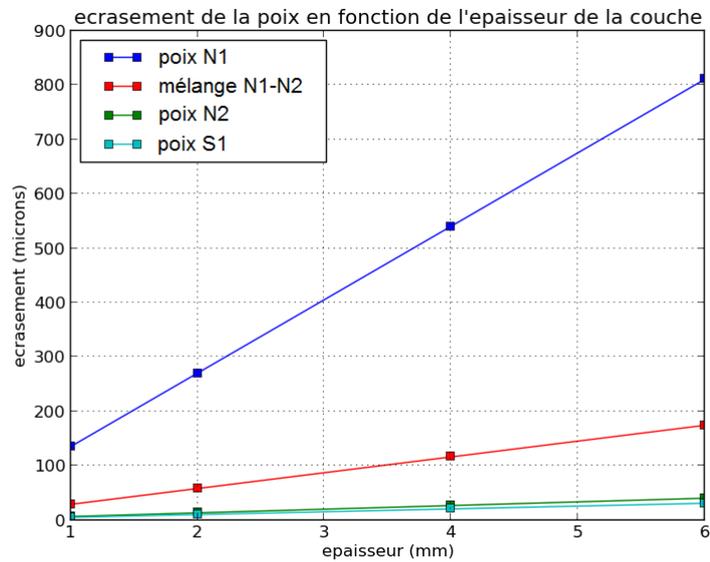


FIGURE 4.29 – Évolution de l'écrasement en fonction de l'épaisseur de la couche de poix.

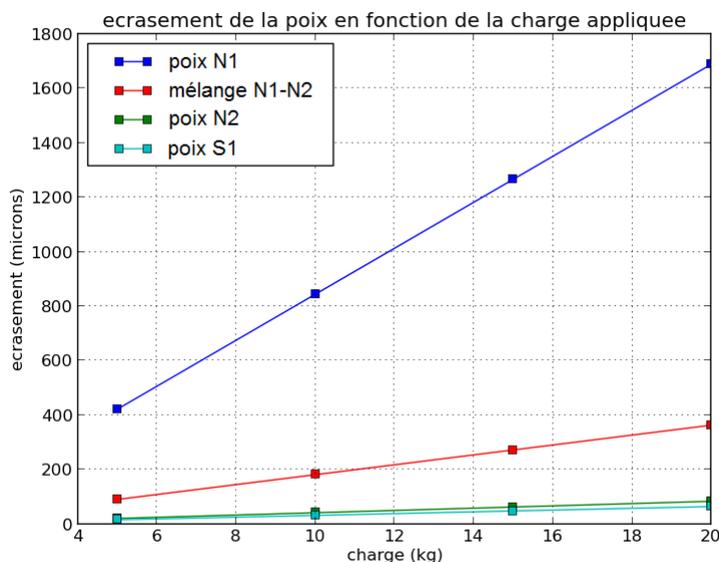


FIGURE 4.30 – Évolution de l'écrasement en fonction de la charge appliquée.

cité de lissage de chaque type de poix ainsi que les paramètres pouvant l'influencer.

Le tout doit constituer une méthodologie globale de dimensionnement des différentes couches d'un outil de lissage applicable de manière générale chez Reosc.

4.4.1 Suivi de forme

Les lois d'évolution de la pression de contact en fonction de divers paramètres ont pu être mises en évidence, et le dimensionnement a été mis en œuvre sur 5 lentilles à fabriquer chez Reosc, permettant la réalisation d'outils optimisés pour chaque surface asphérique différente.

4.4.2 Lissage

Tout d'abord, un critère d'efficacité de lissage a été proposé afin d'analyser les résultats expérimentaux. Un comportement récurrent a pu être mis en évidence. Ce comportement, caractéristique de la poix, a mis en évidence la prépondérance du comportement dynamique de la poix dans la détermination des capacités de lissage des outils.

On a ensuite cherché à retrouver les observations expérimentales avec deux modèles : un modèle DEM pour la poix synthétique S1 et un modèle analytique pour l'ensemble des quatre types de poix. Ainsi le modèle DEM s'est montré capable de modéliser l'évolution de l'efficacité de lissage avec la fréquence et une loi expérimentale de variation d'efficacité en fonction de l'amplitude des défauts a pu être retrouvée. On a donc montré que la méthode DEM était apte à traiter les problèmes de contact avec matériau viscoélastique.

Le modèle analytique présenté peut être utilisé pour réaliser le dimensionnement de la couche de poix car il fournit des outils de d'estimation d'efficacité ou encore d'optimisation de la durée de mise en pression d'outils sur surfaces asphériques, et ceci pour les quatre types de poix testés. Dans le cas d'une optimisation de mise en pression, il n'est pas nécessaire d'effectuer une simulation DEM : le travail de l'outil uniquement en compression (1D) se prête particulièrement bien à des modélisations analytiques et une simulation DEM, bien que plus précise, n'apporterait pas de réelle plus-value. Son intérêt se situe essentiellement dans le calcul d'efficacité de lissage pour lequel des développements pourraient permettre un modèle prédictif.

4.4.3 Synoptique de choix d'outil de lissage

Les deux approches, globale et locale, ont permis d'obtenir des outils de dimensionnement qui ont été intégrés dans un synoptique de choix d'outil de lissage. Ce synoptique donne la démarche à suivre pour déterminer l'outil le plus efficace (sous-pupille et/ou pleine taille), en fonction d'une géométrie de pièce et d'une gamme de fréquences à lisser, tout en prenant en compte les connaissances empiriques présentes chez Reosc.

4.5 PERSPECTIVES

4.5.1 Suivi de forme

La méthodologie développée permet d'optimiser le suivi de forme des outils. Cependant, en pratique, des couronnes concentriques apparaissent sur la pièce en cours de lissage. Il faudrait déterminer si cela provient d'un comportement lié au suivi de forme ou bien lié au comportement de la poix. Dans le cas où la cause serait lié au suivi de forme, il faudrait modifier le modèle en conséquence. Ces couronnes ne sont

pas réellement problématiques en terme de performances puisqu'elles peuvent être corrigées, mais elles génèrent des itérations qu'on souhaite éviter.

Une des voies d'amélioration est de rendre le modèle statique dynamique. En effet, le modèle de suivi de forme est pour l'instant statique. Cependant, le polissage est un procédé dynamique et il faudrait prendre en compte la dynamique des matériaux présents, notamment celle de l'épaisseur souple, et inclure le fluage de la poix pour un meilleur calcul des pressions de contact. Ainsi, les surpressions qui génèrent expérimentalement les couronnes concentriques pourraient dans un premier temps être mises en évidence puis prédites par un modèle.

4.5.2 Lissage

Le travail présenté est une première approche sur l'utilisation de la méthode DEM pour traiter le lissage. Un travail important reste à faire, autant expérimentalement que numériquement.

Tout d'abord, la recherche de critères pertinents d'analyse de polissage est encore un domaine très ouvert. Le critère proposé permet de prendre en compte certaines données, mais il existe certainement d'autres indicateurs à tester, plus universels ou au contraire plus adaptés aux problématiques spécifiques de Reosc.

La première amélioration à apporter serait de compléter la base de donnée de matériaux de polissage modélisable en DEM. L'expérience numérique étant maintenant en place, il suffit de calibrer un modèle pour les autres poix – voire d'autres matériaux – pour confirmer les premiers résultats obtenus avec la poix synthétique.

Ensuite, afin de pouvoir comparer facilement les résultats expérimentaux, analytiques et numériques DEM, il serait nécessaire de trouver un moyen de simuler le lissage en DEM en conservant une force constante appliquée sur l'outil, afin de bien maîtriser la charge appliquée sur l'outil qui intervient dans le calcul de l'efficacité. Ainsi les résultats pourraient être comparés directement sans aucune ambiguïté.

L'analyse DEM ne porte ici que sur un contact entre une poix viscoélastique et une pièce infiniment rigide. Si les résultats trouvés sont plutôt encourageants, la poix viscoélastique n'est qu'une partie de l'outil. Il reste encore à écrire un modèle de lissage prenant en compte l'empilement complet des différentes couches, et notamment la couche souple, elle aussi viscoélastique, si on souhaite avoir un modèle réellement pré-

dictif. Une calibration des matériaux souples devrait alors être effectuée, sur le même modèle que celle réalisée au chapitre précédent, avec des liaisons probablement dérivées du modèle de Zener qui introduit de l'hyperélasticité caoutchoutique dans le comportement.

La prise en compte des aspects liés au fluide est aussi essentielle en vue d'obtenir un modèle plus complet. Cette modélisation du fluide est actuellement à l'étude à l'I2M.

L'échelle d'étude (dimensions millimétriques) ne permet pas de réaliser d'enlèvement de matière, mais un travail à une échelle plus petite pourrait compléter idéalement l'approche "macroscopique" développée ici. Cela permettrait alors d'avoir une modélisation à toutes les échelles du polissage : suivi de forme BF-MF (période > 10 mm), lissage MF-HF (période 100 microns - 10 mm), lissage microrugosité (période < 100 microns).