

Simulation des milieux granulaires et tribofinition : vers une maîtrise prédictive des procédés de parachèvement

Le parachèvement de surface est une étape finale que l'on évoque peu et que l'on modélise encore moins, alors qu'elle impacte la fonction et la performance de la pièce. La tribofinition, largement employée pour polir ou ébavurer des pièces de toutes formes et de tous matériaux, reste un procédé à la mise au point presque exclusivement empirique, fondé sur l'expérience opérateur et sur une logique d'essais-erreurs. L'essor de la fabrication additive métallique, générant des surfaces brutes rugueuses sur des géométries complexes, a fait de sa maîtrise un verrou technologique de premier plan.

Baptiste Fedi,
Kevin Marchais,
Hivelix-Elsyca

Nous détaillons ici ce que la simulation numérique des milieux granulaires peut apporter à la tribofinition : non pas se substituer au savoir-faire du metteur au point, mais lui donner accès à la physique fine du contact entre médias et pièce, qui lui échappait jusqu'ici, et réduire les cycles de mise au point des gammes industrielles.

I. LA TRIBOFINITION, PROCÉDÉ CLÉ DU PARACHÈVEMENT DE SURFACE

1. Un principe simple, une physique complexe

La tribofinition désigne une famille de procédés d'usinage par abrasion dans lesquels les pièces à traiter sont immergées dans un *media*, un ensemble de particules abrasives céramiques, plastiques ou métalliques mises en mouvement. Le frottement répété des médias contre la surface, éventuellement assisté d'un liquide, produit un enlèvement de matière micrométrique dont l'accumulation, sur des durées de quelques minutes à plusieurs heures, arase les aspérités, adoucit les arêtes et abaisse la rugosité.

La singularité du procédé tient à sa nature statistique. Contrairement au fraisage, où un outil suit une trajectoire maîtrisée, la tribofinition met en jeu une multitude de médias dont chacun n'enlève qu'une quantité infinitésimale de matière : seul le comportement collectif, aléatoire et dépendant des paramètres (média, forme de pièce ou cinématique), détermine le résultat, ce qui en rend la compréhension et la prédiction complexes. On classe usuellement ces procédés selon la cinématique imposée au milieu granulaire ou à la pièce, car elle gouverne l'écoulement des médias et donc la distribution des contacts. Le procédé **vibratoire**, le plus répandu, communique au lit un mouvement de brassage par vibration de la cuve. Les procédés **centrifuges** font tourner le fond de la cuve par rapport à la paroi, créant un écoulement en torsade très énergétique qui réduit les durées d'un ordre de grandeur. La **smuritropie** inverse la logique : le lit demeure quasi statique tandis

que les pièces, fixées sur un carrousel, traversent le bain selon un mouvement planétaire, offrant un contrôle fin de l'exposition des faces, précieux pour les composants complexes ou à forte valeur ajoutée^[1].

Les objectifs technologiques eux-mêmes ne se confondent pas. Le polissage vise l'abaissement de la rugosité et, au-delà de l'esthétique, la résistance à la corrosion et la tenue en fatigue. L'ébavurage élimine les bavures, le rayonnage arrondit les arêtes vives, et le brillantage recherche un fini miroir au moyen de médias très fins. Dans la pratique, ces objectifs s'enchaînent au sein d'une même gamme, de l'ébavurage à la finition, ce qui explique la présence de la tribofinition partout où l'état de surface conditionne la fonction, la durabilité ou la conformité pour des applications en horlogerie, aéronautique, automobile, électronique ou encore médical.

2. Le cas critique de la fabrication additive métallique

S'il est un domaine où la tribofinition est passée du statut d'opération de finition à celui de maillon critique, c'est la fabrication additive métallique. Les pièces issues de fusion laser sur lit de poudre (LPBF/SLM) présentent à l'état brut une rugosité élevée, due à l'adhérence de particules partiellement fondues, aux surfaces downskin dégradées ou aux traces de retrait des supports. Cette rugosité n'est pas qu'un défaut esthétique ; elle peut impacter la tenue en fatigue, compromettre l'étanchéité ou dégrader les propriétés tribologiques^[2].

La fabrication additive apporte toutefois sa propre difficulté. En libérant le concepteur des contraintes des procédés soustractifs, elle autorise des géométries inédites (canaux internes, treillis, parois minces, forme organique) difficiles à parachever de manière homogène. En effet, les zones confinées, peu accessibles aux médias, restent sous-traitées tandis que les surfaces dégagées risquent le surtraitement et la perte de cote.

II. MAÎTRISER ET ANTICIPER : LA COMPLEXITÉ DU PROCÉDÉ

La difficulté principale de la tribofinition réside dans la conjonction d'un espace de paramètres de grande dimension et d'une physique difficilement observable à l'intérieur d'une cuve de médias. Afin de fixer une gamme, l'ingénieur agit simultanément sur trois familles de variables fortement couplées que sont les paramètres **machine**, **pièce** et **média**, auxquels s'ajoutent les propriétés physiques des matériaux en présence (**tableau 1**).

Famille	Paramètres à optimiser
Machine	Type et cinématique, design de la cuve, amplitude et fréquence de vibration, vitesses de rotation des axes, durée du cycle
Pièce	Forme, matériau, cinématique propre imposée (orientation, rotation, trajectoire)
Médias	Forme, matériau, taille, pouvoir abrasif, composition du mélange
Propriétés matériaux	Module d'Young, masse volumique, coefficient de frottement, énergie d'adhésion, distribution granulométrique

Ces paramètres n'agissent pas de façon indépendante. Réduire la taille des médias accroît le nombre de contacts mais diminue l'énergie de chacun, améliorant l'accès aux cavités fines au prix d'un enlèvement plus lent sur les surfaces ouvertes. L'optimum se situe à l'intersection de contraintes antagonistes, dans un espace combinatoire dont l'exploration exhaustive est hors de portée. L'industrie procède encore très majoritairement par empirisme, par itérations successives ou en transposant un savoir-faire acquis sur des références similaires. Mais chaque itération consomme du temps machine, des médias, de l'énergie et des pièces, et ce savoir-faire tacite perd en robustesse dès que l'on s'écarte des cas connus. À cela s'ajoute une opacité intrinsèque car une fois le traitement engagé, la circulation des médias autour des pièces, la répartition des zones sollicitées, l'orientation des contacts ou l'intensité des pressions locales échappent à l'observation. On ne dispose, in fine, que d'un résultat global final, alors que c'est à l'échelle locale que se définit le compromis du procédé en cherchant à maximiser l'abattement de rugosité tout en minimisant la déformation de forme. Une surface dégagée et une cavité confinée n'atteignent pas leur optimum au même instant du cycle de traitement et trouver le point de fonctionnement qui les concilie relève, de l'intuition sans outil de prédiction.

III. L'APPORT DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE

Le problème que pose la tribofinition (lois physiques connues, vaste espace de paramètres, optimum locaux concurrents, phénomènes internes inobservables) est celui que la simulation numérique a appris à traiter dans les autres disciplines de l'ingénierie, du calcul de structures à la mécanique des fluides. L'apport décisif n'y a pas été la seule réduction du nombre d'essais, mais l'accès au champ complet des grandeurs physiques, là où l'expérimentation ne livre que quelques mesures ponctuelles. Son premier apport est de rendre observable ce qui ne l'était pas. En reconstituant explicitement la dynamique du lit de médias, le calcul donne, en tout point de la surface de la pièce, le nombre de contacts cumulé, l'angle

sous lequel ils se produisent et la pression de chaque collision. Cette cartographie de la sollicitation tribologique révèle immédiatement les hétérogénéités de traitement, les zones confinées sous-sollicitées et les surfaces exposées au surtraitement, et met en évidence des phénomènes difficilement observables expérimentalement, telle la ségrégation granulométrique au sein d'un mélange de médias.

La visualisation de ces données permet une démarche d'optimisation. Connaissant, avant tout essai, la répar-

tition des contacts induite par une cinématique donnée, on recherche la configuration la plus favorable, non pour maximiser le nombre brut de contacts, mais pour en uniformiser la distribution et en orienter favorablement l'incidence. L'exploration paramétrique, qui exigerait des dizaines d'essais physiques, se mène par itération numérique rapide.

La prédiction de l'abattement de rugosité, variable mesurable expérimentalement, en est le prolongement car dès lors qu'un modèle relie la sollicitation locale à l'enlèvement de matière, on peut estimer l'évolution de l'état de surface au cours du procédé et dimensionner la durée du cycle en conséquence. **Le bénéfice est double : moins d'essais physiques, et un savoir-faire capitalisé sous une forme explicite et réutilisable, en soutien et non en substitution de l'expertise métier.**

Représenter fidèlement un procédé industriel impose toutefois de modéliser des milliers à plusieurs millions de particules, leurs contacts et les forces résultantes, à des incréments temporels très courts, les contacts étant brefs et raides. Diminuer le nombre de particules ou idéaliser la géométrie allège le calcul mais retire à la simulation sa valeur prédictive : c'est ce verrou que nos développements ciblent.

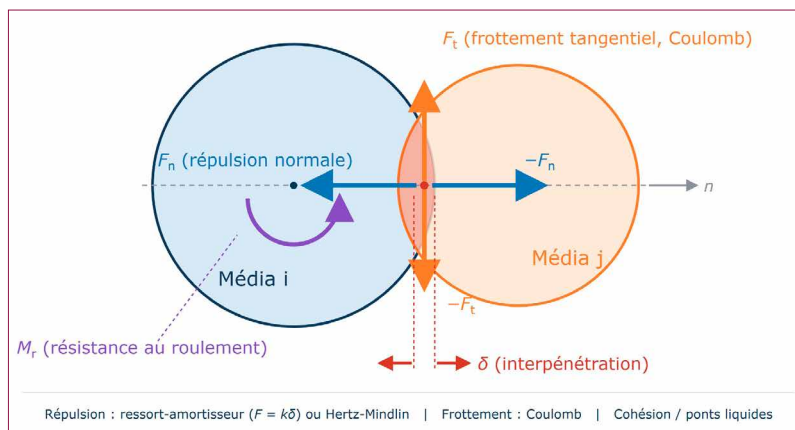
IV. LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS DISCRETS ET SON PASSAGE À L'ÉCHELLE SUR GPU

La méthode des éléments discrets (DEM, Discrete Element Method) représente chaque média comme un corps physique distinct dont on intègre le mouvement individuellement^[3]. Le cycle de calcul répète, à chaque pas de temps, trois opérations :

- La **détection des collisions** identifie les couples de particules en interpénétration.
- Le **calcul des forces et des moments** s'applique ensuite à chaque particule : poids, forces de collision et frottements.
- L'**intégration temporelle** déduit des forces les vitesses et les positions à l'incrément suivant, via un schéma de type Velocity Verlet, apprécié pour sa stabilité.

Tableau 1.

Principales familles de paramètres gouvernant un procédé de tribofinition.

**Figure 1.**

Modèle de contact en méthode des éléments discrets : interpénétration δ , répulsion normale (ressort-amortisseur ou Hertz-Mindlin), frottement tangentiel de Coulomb et résistance au roulement.

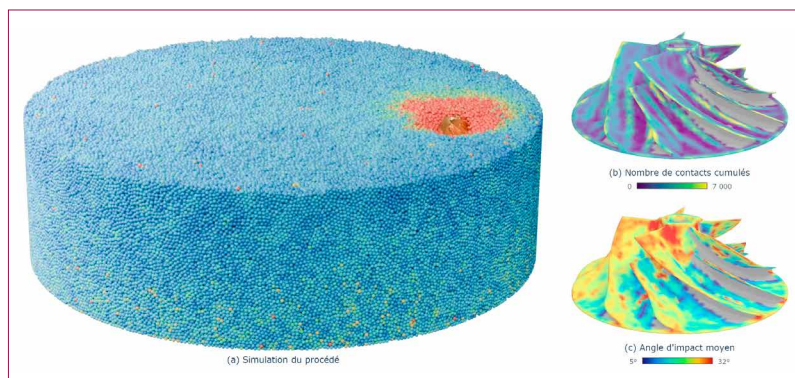
Le cœur physique réside dans les lois de contact, qui relient la force d'interaction à l'interpénétration δ (figure 1). La répulsion normale se modélise par un ressort-amortisseur linéaire ($F=k\delta$) ou par une loi de Hertz-Mindlin, issue de la mécanique du contact élastique, où la force croît en $\delta^{3/2}$ avec le module d'Young équivalent et le rayon des corps en contact. S'y ajoutent le frottement tangentiel de Coulomb, une résistance au roulement, déterminante pour le comportement collectif d'un assemblage de sphères, et, lorsque le procédé l'exige, des termes de cohésion ou de ponts liquides. Le parti pris est celui de la fidélité physique, sans simplification qui amputerait la valeur prédictive du modèle.

Le suivi individuel de plusieurs millions de particules, contraint par un pas de temps de l'ordre de la microseconde fixé par la raideur du contact, représente une charge considérable. Sur processeur central (CPU), le calcul devient long et coûteux dès que l'on vise des configurations représentatives de la réalité industrielle, ce qui a longtemps cantonné la simulation granulaire à des cas académiques.

La structure même de la DEM offre une issue car à chaque pas de temps, les mêmes opérations s'appliquent à un très grand nombre de particules largement indépendantes, exactement le schéma que l'architecture massivement parallèle d'un processeur graphique (GPU) sait exécuter efficacement. Le solveur granulaire que nous développons distribue le traitement des particules sur les milliers de cœurs d'une carte graphique de gamme courante tout en maintenant la fidélité physique. C'est ce double caractère, fidèle et économiquement abordable, qui fait passer la simulation granulaire du statut d'objet de recherche à celui d'outil d'ingénierie.

Figure 2.

Smuritropie à mouvement planétaire (médias de 9 mm) : (a) simulation du procédé, lit de médias colorés par la vitesse ; cartographies relevées sur la pièce en fin de cycle, (b) nombre de contacts cumulés et (c) angle d'impact moyen.



V. CAS D'APPLICATION ET PRÉDICTION DE L'ÉTAT DE SURFACE

1. Finition par Smuritropie

La finition par smuritropie illustre bien ce que la simulation autorise sur une configuration directement transposable en atelier^[4]. La pièce est entraînée dans un bain de médias selon trois axes de rotation, un rayon principal (R1), un rayon secondaire (R2) et la rotation propre de la pièce (R3), dont la combinaison définit une cinématique complexe. La simulation permet d'observer directement via des cartographies, le nombre et de l'angle de contact ainsi que la manière dont l'exposition des différentes faces s'établit (figure 2). Dans cet exemple, représentatif d'une cuve industrielle, un million de particules de 9 mm, pour dix secondes de procédé simulé, se calculent en quelques dizaines de minutes. L'applicateur dispose ainsi, avant le moindre essai, d'un diagnostic complet de l'homogénéité du traitement et d'un levier rationnel pour ajuster la cinématique.

2. Bol vibrant sur géométrie de fabrication additive

Le second cas, représentatif d'une pièce complexe issue de la fabrication additive, met en œuvre un bol vibrant sollicité selon un, deux ou trois axes (typiquement 1 mm d'amplitude à 10 Hz). La comparaison entre médias de 6 et de 4 mm y est explicite ; les plus gros laissent inaccessibles certaines zones que les plus petits atteignent. La simulation distingue nettement le comportement des surfaces arrondies, des surfaces planes et des zones de jonction, toujours délicates à atteindre (figure 3). Avec des temps de calcul de l'ordre de la demi-heure pour plusieurs centaines de milliers de particules, ce type d'analyse s'insère facilement dans un cycle de mise au point industriel.

3. Médias non-sphériques

Les exemples précédents supposent des médias sphériques. Or, dans de nombreux procédés de tribofinition, les médias ne le sont pas : cônes, cylindres, tétraèdres ou prismes de céramique ou de porcelaine. Cette forme gouverne la compacité du lit, la manière dont les médias s'imbriquent et s'orientent contre les surfaces, la nature même des contacts (pointe, arête ou face) et, in fine, l'agressivité du couple média/pièce. L'approximation sphérique atteint ses limites dès que la forme du média participe directement au résultat.

Pour traiter ces procédés, le moteur de calcul a été étendu à une approche dite level-set DEM, où chaque média est décrit par un champ de distance signée (Signed Distance Field) échantillonné sur une grille attachée à la particule, et par un ensemble de nœuds répartis sur sa surface (figure 4a). Le contact se détecte en évaluant le champ de la particule voisine aux nœuds de surface où une valeur négative signale une interpénétration, où sa magnitude donne la profondeur de pénétration et son gradient la normale de contact. Contrairement aux agrégats de sphères, cette formulation représente la géométrie exacte du média, sans rugosité artificielle. Toute forme numérisable, du cône céramique au média

usé numérisé par scan, se traite par le même algorithme. Le surcoût par contact est réel, mais la structure du problème demeure inchangée et se prête à la même parallélisation massive sur GPU. Les premières simulations de lits de pyramides arrondies en tambour tournant (figure 4b) reproduisent des comportements hors de portée des sphères via des imbrication mutuelle des médias, écoulement plus lent du lit, orientations préférentielles le long des parois. Les développements en cours portent sur le passage à l'échelle : plusieurs dizaines de milliers de particules non sphériques peuvent aujourd'hui être simulées, avec l'objectif de rejoindre les volumes du cas sphérique pour couvrir des configurations industrielles complètes.

4. De la cinématique à l'abattement de rugosité

Cartographier les contacts constitue déjà un acquis considérable. L'étape décisive consiste à en déduire l'évolution de l'état de surface.

La combinaison de l'angle d'impact et de la force locale ne détermine pas seulement l'intensité de l'interaction, mais sa nature même. Un contact rasant favorise la micro-coupe et l'abrasion, responsables de l'abaissement de la rugosité alors qu'un contact frontal sollicite la surface en indentation et produit une déformation plastique localisée, subie ou recherchée lorsqu'elle induit, à la manière d'un grenailage, un écrouissage superficiel et des contraintes résiduelles de compression bénéfiques à la tenue en fatigue. Disposer en tout point de l'angle et de la force de contact permet donc d'anticiper la quantité de matière enlevée et le type d'interaction subi par la surface. En intégrant ces champs au fil de la résolution, on estime un abattement de rugosité local, produit de trois termes : un indice de pouvoir abrasif propre au couple matériau/média, un facteur d'efficacité dépendant de l'angle d'impact et un terme d'intensité de collision lié à la pression. On peut l'écrire schématiquement par une fonction qui dépend de l'indice d'abrasivité des particules, de l'effet de l'angle d'impact, de la pression et de l'énergie de collision :

$$\Delta R = f(I_a, E_{\text{angle}}, E_{\text{pression}}, E_{\text{énergie}})$$

Intégrée dans le temps et sur la surface, cette relation transforme une cartographie de sollicitation en une prédiction d'abattement de rugosité, point par point. On anticipe alors non seulement où la pièce sera correctement traitée, mais à quel niveau et au terme de quelle durée.

En environnement industriel, les retombées sont immédiates via la pré-sélection des cinématiques et médias en amont de tout essai, réduire les itérations physiques et la consommation de pièces, diagnostiquer les zones à risque d'une géométrie complexe avant traitement, et transmettre un réglage sous la forme d'un modèle plutôt que d'un savoir tacite. La portée est aussi économique et environnementale avec moins de pièces sacrifiées, une dépense énergétique moindre, des délais raccourcis. C'est un outil dont applicateurs, sous-traitants de finition et bureaux d'études peuvent se saisir pour gagner en rapidité, en répétabilité et en confiance.

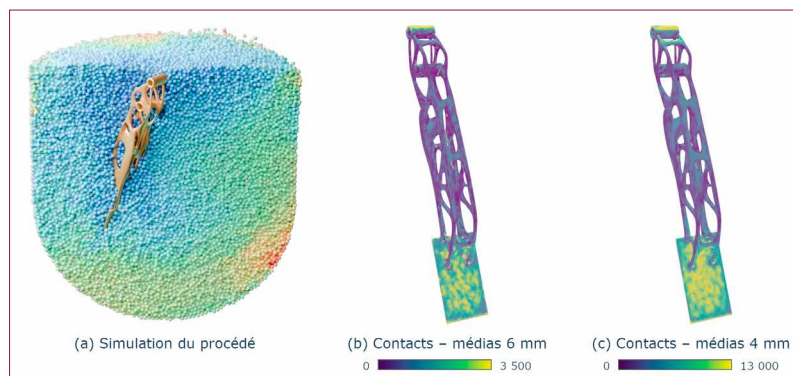


Figure 3.

Bol vibrant sur pièce complexe de fabrication additive : (a) simulation du procédé, lit de médias colorés par la vitesse ; nombre de contacts cumulés sur la pièce avec des médias de (b) 6 mm et (c) 4 mm — les médias plus fins accèdent aux zones de jonction de la structure lattice.

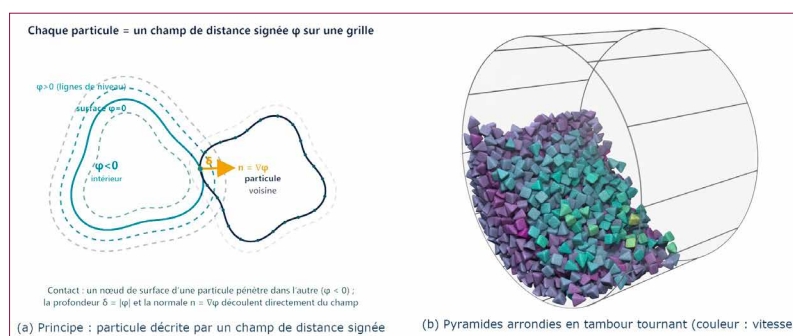


Figure 4.

Médias non-sphériques par level-set DEM : (a) principe, chaque particule est décrite par un champ de distance signée dont découlent directement la profondeur et la normale de contact ; (b) lit de pyramides arrondies simulé dans un tambour tournant (couleur : vitesse).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La tribofinition conservera longtemps une part de savoir-faire, mais la simulation en est désormais un complément indispensable qui permet visualiser ce qui se déroule au sein de la cuve et d'anticiper le résultat sur toute typologie de pièce avant tout essai et à l'échelle réelle des procédés.

Les gains en productivité et en qualité concernent de nombreux secteurs industriels, de l'aéronautique au luxe et à l'automobile. Ces travaux s'orientent vers un véritable jumeau numérique du procédé, un logiciel métier dédié à la tribofinition actuellement en développement, cohérent avec une vision de l'outil numérique comme support de la décision et de l'expertise industrielles. ■

RÉFÉRENCES

1. I. Malkorra *et al.*, « The influence of the process parameters of drag finishing on the surface topography of aluminium samples », CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020.
2. A. Gillioz, « Post-traitement des pièces métalliques fabriquées par SLM par tribofinition », rapport de diplôme bachelor, HES-SO, 2021.
3. K. Marchais, « Modélisation par la méthode des éléments discrets de milieux granulaires », thèse de doctorat, 2021.
4. B. Fedi, K. Marchais, « Optimisation des procédés de parachèvement par tribofinition via la simulation numérique : vers des méthodes granulaires applicables à l'échelle industrielle », A3TS Parachèvement, Lyon, 2025.