

Prospectives S.mart Feuille de route 2018

1. Fabrication avancée

Cette partie reprend les éléments présentés dans le livre blanc de la mécanique et les perspectives proposées par le groupe « Manufacturing 21 ».

1.1. *Positionnement thématique, objectifs, verrous scientifiques et technologiques*

Les nouveaux procédés

Ils se positionnent dans la cadre des objectifs d'amélioration des performances et de variabilité des produits, de diminution des intervalles de tolérances des pièces produites, de réduction des temps et des coûts de fabrication et ceci en réponse :

- aux enjeux écologiques de nouveaux procédés,
- à l'évolution des matériaux
- à la maîtrise des phénomènes mis en jeu,
- aux capacités des moyens de production et des outillages.

L'approfondissement des études sur nouveaux procédés est à mis en œuvre d'une part et d'autre part les procédés plus classiques doivent être améliorés et plus performants.

Les procédés de mise en forme par grandes déformations irréversibles (plastiques, viscoplastiques, ...) permettent d'obtenir une forme finale plus ou moins complexe à partir d'une forme simple qui peut être une tôle (formage de structures minces, formage incrémental, découpage adiabatique), un tube (hydroformage), un lopin massif (forgeage near net shape (près des cotes) ou net shape (aux cotes), ...), une pièce massive à partir de poudres (compactage à grande vitesse, fabrication additive), de métal en fusion (fonderie) ou en état semi-solide (thixoformage) mais également d'assemblage par tous les procédés(soudage, fixations, rivetage, collage...). Pour les matériaux non métalliques cela peut concerner l'obtention de pièces complexes à partir d'ingrédients comme des fibres, des étoffes ... noyés dans une matrice semi-solide.

Les *procédés d'usinage* à grande vitesse ou de super finition (rodage, polissage, rectification, galetage, ...) assurent la réalisation de produits de haute précision, de surfaces fonctionnelles de haute qualité (fatigue, usure), à haute valeur ajoutée et à haut niveau de fiabilité (aéronautique, nucléaire, énergie, médical, etc...).

La *fabrication hybride* simultanée ou sérielle par l'utilisation cohérente de ces procédés avec une vision multi-procédés constitue une source importante d'innovation dans la fabrication de produits. Il est toutefois essentiel d'avoir une vision précise de l'imbrication de ces procédés afin d'avoir une analyse complète du cycle de fabrication. Les verrous sur cet item sont :

- D'être en mesure de quantifier l'impact des différents procédés les uns par rapport aux autres et de déterminer le meilleur procédé de fabrication en fonction du produit à obtenir ;
- De proposer un système d'information et de communication cohérent entre les procédés ;
- D'associer une chaîne numérique globale et commune à ces différents procédés afin de ne pas avoir de rupture d'information.

La *fabrication additive* permet de concevoir différemment (formes « libres » et complexes, formes optimisées mécaniquement, pièces à gradient de matériaux ou à propriétés mécaniques évolutives) et de fabriquer des produits avec une vitesse significative, le temps de réalisation étant directement lié aux fonctionnalités à obtenir et à la qualité des produits. Il est désormais possible de réaliser des pièces fonctionnelles unitaires ou en petite série dans des matériaux à forte valeur ajoutée moyennant une ou plusieurs étapes de parachèvement ou bien en mettant en oeuvre des processus hybrides intégrant élaboration du brut et finition des surfaces/formes fonctionnelles.

Les procédés laser de forte puissance concentrée sur une surface d'interaction réduite (typiquement de 10 µm à 1 mm), permettent de transformer la matière sous différentes formes : soudage, découpe, traitements de surface à l'état solide (trempe), matériau à l'état liquide (glaçage-refusion de surface) ou ablatif (choc-laser), en passant par les techniques de fabrication additive de pièces complexes par interaction laser poudre, macro ou micro-usinage permettant de prototyper une structure par un enlèvement de matière contrôlé.

La micro-fabrication couvre les différentes techniques associées à la réalisation de composants microtechniques (pièces de liaison, de structure et d'outillage en petites dimensions). Ces techniques peuvent être classées en 2 catégories : les techniques de « salle blanche » (procédés principalement chimiques issus de la micro-électronique) et de « salle grise » (procédés plus conventionnels à échelle réduite). Trois axes principaux émergent: le µ-usinage, la µ-réplication et le µ-assemblage

L'optimisation des structures dans les différents secteurs industriels (automobile, naval, ferroviaire, aéronautique et spatial) conduit à une utilisation accrue des *assemblages multi-matériaux* et permet ainsi de répondre à des contraintes nouvelles en termes de performance mécanique, d'allègement des structures, d'intégration de fonctions.

Efficacité énergétique

Les procédés de fabrication classiques industriels (fonderie, mise en forme, usinage..), ont un impact environnemental non négligeable, dû en particulier à leur consommation d'énergie et de matière, ainsi qu'aux effluents et déchets générés. Selon l'agence internationale de l'énergie, la consommation d'énergie dans l'industrie s'élevait, en 2008, à 27,8% de la consommation totale d'énergie dans le monde. Un rapport de l'OCDE mettait en évidence dès 1999 qu'il était nécessaire de devenir au moins 10 fois plus efficace en termes de matières et d'énergies utilisées par les processus de fabrication d'ici 2050. La recherche de l'efficacité énergétique est d'autant plus

importante qu'elle fait appel aux objectifs des pouvoirs publics de diminuer les émissions de gaz à effet de serre et doit tenir compte des coûts croissants de l'énergie. Il est donc indispensable que l'ensemble des procédés de fabrication (traditionnels comme innovants), soient analysés de ce point de vue et atteignent cet objectif de minimisation de la consommation énergétique.

Quatre stratégies principales sont envisageables afin d'optimiser les performances énergétiques des procédés de fabrication :

- Conserver le procédé de fabrication existant en intégrant des contraintes liées à la réduction des consommations énergétiques du système de production, par exemple au niveau du produit et de ses composants (nombre, morphologie, matériau..) ou du processus de fabrication (équipements, conditions opératoires...),
- Développer un procédé innovant à partir d'un procédé « traditionnel » basé sur l'enlèvement ou la déformation de matière : suppression de la lubrification et de post-traitement de la pièce et des déchets, découpage et formage net-shape, assemblage multi-matériaux...
- Utiliser des procédés de fabrication alternatifs à ceux traditionnellement employés dans le système de production, et répondant aux objectifs de développement durable (rendement énergétique, consommables, recyclage partiel du matériau non consommé, etc...)

Reconcevoir la pièce en tenant compte de la gestion globale du cycle de vie, ou mettant en œuvre par exemple les possibilités de la fabrication additive (contrôle de la juste matière au juste endroit, allègement des pièces, raccourcissement du processus de fabrication).

Le pilotage intelligent des procédés (commande adaptative)

Dans un contexte industriel actuel il est économiquement envisageable de personnaliser le traitement effectué par la commande numérique pour améliorer la qualité et la productivité pour une pièce ou une famille de pièces. Le traitement effectué en temps réel doit associer la préparation et l'exécution en temps réel. La préparation de l'exécution de la trajectoire aurait pour rôle de faire le lien entre la trajectoire d'usinage à calculer en CFAO et des caractéristiques a priori du moyen de fabrication ; l'exécution temps réel adapte l'exécution de la fabrication (contrôle des paramètres opératoires ou des collisions potentielles entre l'outil et son environnement, ...) directement en fonction du comportement physique mesuré en temps réel. Ces deux activités permettraient ainsi d'assurer un meilleur échange et une meilleure intégration de diverses caractéristiques géométriques et physiques dans la chaîne numérique pour optimiser le processus global. La difficulté consiste à pouvoir intégrer ces informations lors du calcul des trajectoires sans pour autant devoir résoudre des problèmes d'optimisation complexes dont l'intégration industrielle est délicate.

Une autre approche se base sur le formalisme Step-NC conçu pour améliorer la communication entre les systèmes de CFAO et les commande numérique, allant même jusqu'à les faire utiliser des bases de données communes. Dans cette approche, l'étape de FAO se résumé à la déclaration des entités d'usinage et à la description de la

gamme de fabrication. L'enrichissement des trajectoires à l'aide de contraintes provenant de la machine ou de l'outil est effectué directement dans la commande numérique. Dans cette approche, l'optimisation est effectuée au plus près du procédé, mais les capacités de calculs des commandes numériques ne permettent pas encore de résoudre des problèmes complexes.

Verrous scientifiques

L'objectif est de disposer de modèles interopérables et d'outils de formage virtuel complets, prédictifs et conviviaux permettant, dans une même analyse adaptative et en fonction de l'état d'avancement du processus de fabrication de :

- simuler itérativement un procédé de fabrication jusqu'à l'obtention du procédé optimal validé expérimentalement,
- optimiser le procédé de fabrication par référence à de nombreux critères : obtenir une forme idéale (sans défauts), minimiser la quantité de matière utilisée, minimiser le nombre de passes (donc le nombre d'outillages) nécessaires à l'obtention de la pièce voulue, maximiser la durée de vie des outillages de fabrication. Tout cela contribue à la recherche d'une gamme de fabrication à faible coût (coût de revient, coût carbone, ...),
- maximiser la durée de vie en service des pièces fabriquées, en fonction des champs mécaniques résiduels dans la pièce en fin du procédé de fabrication. Cela revient à tenir compte de l'histoire des procédés de fabrication des pièces et son incidence sur leurs tenues en service,
- utiliser des méthodologies et outils de formage virtuel couplant plusieurs logiciels performants pour traiter des problèmes multi-physiques qui peuvent être d'une grande utilité industrielle,
- créer des plateformes de formage virtuel à utilisation industrielle conviviales, multi-physiques.

En particulier un des principaux verrous associé à la maîtrise des procédés de fabrication porte sur l'étude thermodynamique multi-échelle.

Au niveau scientifique, différents axes de modélisation doivent être enrichis en parallèle en vue d'améliorer la pertinence et l'efficacité des simulations :

- Comportement des matériaux à grande vitesse de déformation
- Comportement des matériaux à l'échelle microscopique
- Comportement des matériaux multicouches ou chargés
- Modélisation thermomécanique des processus de déformation de la matière
- Modélisation des changements de phase des matériaux usinés sous sollicitations thermiques intenses
- Modélisation de la nano-structuration des surfaces fortement déformées
- Lois de frottement et d'échange thermique aux interfaces en conditions extrêmes
- Algorithmes de calcul, de sélection et d'identification
- Séparation de la matière dans les méthodes numériques
- Couplage de différentes approches et de différentes méthodes numériques.

Au niveau technique, les méthodes de mesure de différentes grandeurs caractéristiques doivent être améliorées pour affiner et valider les modèles :

- Mesure à haute fréquence de sollicitation mécanique et d'échantillonnage,
- Mesure de micro-efforts et de micro-déplacements,
- Mesure de température au plus près des zones les plus sollicitées,
- Caractérisation des matériaux à grandes vitesses de déformation,
- Caractérisation des matériaux à l'échelle microscopique,
- Caractérisation du frottement, des coefficients de partage et de la résistance thermique de contact à grande vitesse de glissement en milieu tribologique ouvert,
- Mesure fine et reconstruction 3D des pièces et outillages.

Au niveau des moyens, le calcul scientifique associé peut nécessiter des clusters de calcul parallèle puissants et les logiciels de simulation adaptés à ces structures parallélisées. L'amortissement des coûts engendrés et l'accès à ces différents moyens seront grandement facilités par un travail en réseau (compétences, ressources, pérennisation des modèles).

Les moyens expérimentaux nécessaires aux caractérisations et aux validations peuvent être très lourds et très variés (fabrication, qualification in-situ et hors ligne), qui sont à mutualiser et constituent des supports de projets collaboratifs.

Les enjeux industriels et sociétaux

Au niveau des procédés avancés, ces enjeux portent principalement sur les points suivants :

- La mise en forme par emboutissage trouve principalement son champ d'application dans les productions en grandes séries, le formage incrémental constitue une alternative pertinente pour les pièces unitaires ou de petite série, le découpage adiabatique permet de son côté d'obtenir une qualité proche du découpage fin avec une cadence plus élevée.
- Le forgeage net shape apporte une réponse à un raccourcissement significatif de la gamme de fabrication d'un produit et lui permet également de limiter sa trace carbone.
- Le compactage à grande vitesse est également une voie qui permet de fabriquer des pièces à gradients de propriétés avec un outillage simple.
- La fabrication additive constitue une réelle opportunité pour les pièces en petites séries, de formes complexes, qui permet en outre de mixer différents matériaux pour obtenir des pièces à gradients de propriétés dans un délai très court du fait qu'elle ne nécessite pas d'outillage.
- Les enjeux sociétaux de la micro-fabrication concernent la miniaturisation des produits et la diffusion de produits intelligents capables d'adapter leurs performances à leurs conditions d'utilisation. Les objectifs sont donc la compacité et l'adaptabilité des produits, la limitation des consommations de matières premières et d'énergie, et enfin le développement de produits à très forte valeur ajoutée pour les domaines de pointe technologiquement et économiquement.

(transport terrestre, aérien et spatial, médical, luxe, télécommunication, compétition sportive, loisirs électroniques, etc.).

1.2. Etat des lieux national et international versus des expertises du réseau

Procédés avancés

La fabrication additive est un procédé jeune (milieu des années 1980) qui s'est principalement développé en Allemagne, aux USA, en Angleterre, et en France. Ces deux premiers pays ont surtout une avance industrielle et commerciale par le rachat successif de sociétés qui font maintenant partie des deux principaux groupes mondiaux.

Dans le domaine de la recherche, trois pôles se détachent : les USA, l'Europe et l'Asie. L'Europe se distingue principalement par ses travaux de recherche sur les poudres métalliques. La France a largement contribué à la dynamique mondiale dans le domaine par le biais de l'AFPR (Association Française de Prototypage Rapide) et des sociétés françaises créées puis rachetées en particulier par 3D Systems (Optoform, Phenix Systems). La synergie entre acteurs a permis une forte croissance de la maturité nationale dans le domaine. De plus, depuis une vingtaine d'années, plusieurs laboratoires Français ont investi cette thématique avec une complémentarité qui devrait être, si une structuration est mise en place, un point fort dans la décennie à venir.

En micro-fabrication, la concurrence internationale est surtout japonaise, américaine et danoise, de plus récemment chinoise. FEMTO-ST possède et développe une plateforme alliant salle blanche et salle grise unique en Europe. La communauté française est depuis peu bien positionnée dans les réseaux I2M2 (USA / Japon) et 4M (Europe).

Pour ce qui est des constructeurs de lasers de puissance, et en particulier des lasers continus, l'Allemagne fait actuellement figure de leader (Haas-Trumpf, Rofin-Sinar), même si la France est assez bien positionnée sur des marchés de niche (cas des lasers impulsions nanoseconde : Thalès Optronique, Quantel, Amplitude). Les procédés laser connaissent une progression régulière sur le territoire français depuis une vingtaine d'années, qui évolue au gré des innovations technologiques et des demandes industrielles. Toutefois, et même si les thématiques sont riches et les enjeux industriels réels, le nombre de personnels concernés, le volume des études-recherches menées sur le sujet est loin d'atteindre celui de nos voisins allemands, en particulier à travers le support des Instituts Fraunhofer, et des constructeurs de sources laser.

Efficacité énergétique

Des travaux de recherche sont actuellement menés par le groupe de travail du CIRP "Energy and Resource Efficiency & Effectiveness" qui regroupe 25 partenaires universitaires et industriels dans le monde, afin de proposer une base de données.

1.3. Analyse SWOT sur la thématique concernée

Points forts

Culture interdisciplinaire des acteurs

Expérience de contrats en partenariats avec le monde industriel

Force du réseau sur les domaines du prototypage et de la fabrication additive
Bonne intégration des méthodes dans nos formations
Plateformes technologiques

Points faibles

Difficulté de valoriser les activités et compétences au dessus d'un TRL 3

Opportunités

L'industrie du futur devient un thème porteur au niveau régional, national et européen

Les soutiens institutionnels aux activités de R&D

Menaces

Cout des équipements nécessaires pour l'expérimentation

1.4. Synthèse et conclusion

Il est nécessaire :

- de favoriser une véritable transversalité des recherches en renforçant les collaborations entre les communautés des sciences des matériaux, de mécanique des matériaux, de mécanique des solides et des structures, de mathématiques appliquées, de CAO... indispensable moteur à l'innovation scientifique et technologique,
- de chercher le bon équilibre entre développements scientifiques fondamentaux et développement applicatifs en favorisant le transfert des technologies innovantes au profit des industriels,
- d'encourager la communauté industrielle à utiliser des méthodologies innovantes de fabrication formage virtuelle en mettant à sa disposition des plateformes intégrant les tous derniers développements scientifiques,
- de donner les moyens humains (ingénieurs, enseignants- chercheurs) et matériels (matériels de fabrication, moyens de contrôle, automatisation, moyens de qualification in-situ) afin de renforcer les compétences et ressources existantes,
- d'entretenir et renforcer la présence de la communauté française sur la scène internationale par une participation accrue dans des comités et consortium européens et internationaux.

1.5. Liste des contributeurs et remerciement aux acteurs mobilisés

G-SCOP (Grenoble), IRCCyN (Nantes), LURPA (ENS Cachan), Institut Pascal (Clermont Ferrand), LSIS (Arts et Métiers Aix), LCFC (Arts et Métiers Metz), M3M (UTBM-Belfort), LEM3 (Arts et Métiers Metz / Univ.Lorraine), LaMCoS (Lyon), LTDS (Saint Etienne), LaBoMaP (Arts et Métiers Cluny / ECAM), SYMME (Annecy), FEMTO (Besançon), Lampa (Arts et Métiers Angers), Institut Clément Ader (Toulouse), I2M (Bordeaux), LMR (Tours), LGP/ENIT (Tarbes), PIMM (Arts et Métiers Paris), Centre des Matériaux (Mines Paris), DIPI (Saint-Etienne), CETIM, Institut de Soudure, PEP, CIRTES (Saint Dié), IRPHE (Marseille), IREPA-Laser (Illkirch), ICB-LTM (Le Creusot), Les 16 laboratoires français impliqués sur le procédé d'usinage dans ces enjeux sont structurés au sein du consortium Manufacturing 21.

1.6. Bibliographie et références

Procédés net shape

Dean, T. A., "The net-shape forming of gears," *Materials & Design*, vol. 21, pp. 271-278, 2000.

[Bigot, R., Becker, E., Langlois, L., "Some approaches on industrialization of steel thixoforging processes," *Solid State Phenomena*, vol. 192-193, pp. 521-526, 2013.

[Hirt, G., Khizhnakova, L., Baadjou, R., Knauf, F., Kopp, R., "Semi-solid forging aluminium and steel, Introduction and overview.," in *Thixoforming: Semi-solid Metal Processing*, Ed. by G. Hirt and R. Kopp. Published by Wiley, 2009, pp. 1-27.

Fabrication additive

Vayre, B., Vignat F., Villeneuve F., « Metallic additive manufacturing : state of the art review and prospects, *Mechanics and Industry* 13, pp.89-96, 2012

Procédés laser

Handbook of Laser Welding Technologies, Edited by S. Katayama, *Woodhead Publishing Limited* (2013)

Advances in Laser Materials Processing. Technology, research and applications, Edited by J. Lawrence, J. Pou, D.K. Low, E. Toyserkani, *Woodhead Publishing Limited, CRC Press* (2010)

Site web du Club Lasers et Procédés en ligne: <http://www.laserenligne.fr/>

Efficacité énergétique

<http://www.iea.org/stats/index.asp>

Energy, the Next Fifty Years, OECD, 1999

Gutowski, Dahmus, Thiriez, Electrical energy requirements for manufacturing processes, 13th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering, Lueven, May 31st – June 2nd, 2006.