

Vague D

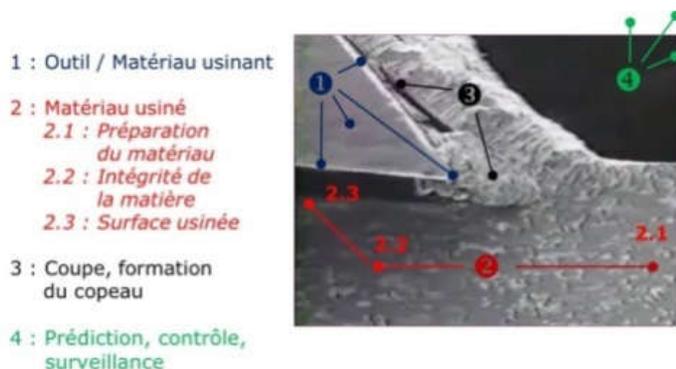
Extrait de la campagne d'évaluation 2017 – 2018

De manière générale, les travaux de recherche menés au LaBoMaP s'inscrivent dans un cercle vertueux (Figure 4) permettant d'appliquer les procédés étudiés, sur des matériaux parfaitement caractérisés en amont, afin d'obtenir les exigences fonctionnelles attendues sur les produits.

Afin de consolider l'interaction entre les chercheurs du LaBoMaP et la complémentarité de ses approches scientifiques, trois thèmes de recherche sont proposés, auxquels participent tous les personnels à différents taux d'implication selon leurs expertises.

- ❑ Thème 1 : Traitements et caractérisations des matériaux avant procédé
- ❑ Thème 2 : Expérimentation, simulation et modélisation de la physique du procédé
- ❑ Thème 3 : Exigences fonctionnelles des produits

La Figure 4 montrant un outil de coupe en situation résume parfaitement la démarche envisagée par le laboratoire pour son futur projet. A courts termes (5 ans), il s'agit d'établir des liens bijectifs entre conditions opératoires et intégrité de surface, et fort de cette connaissance, faire de même entre intégrité de surface et tenue en service.



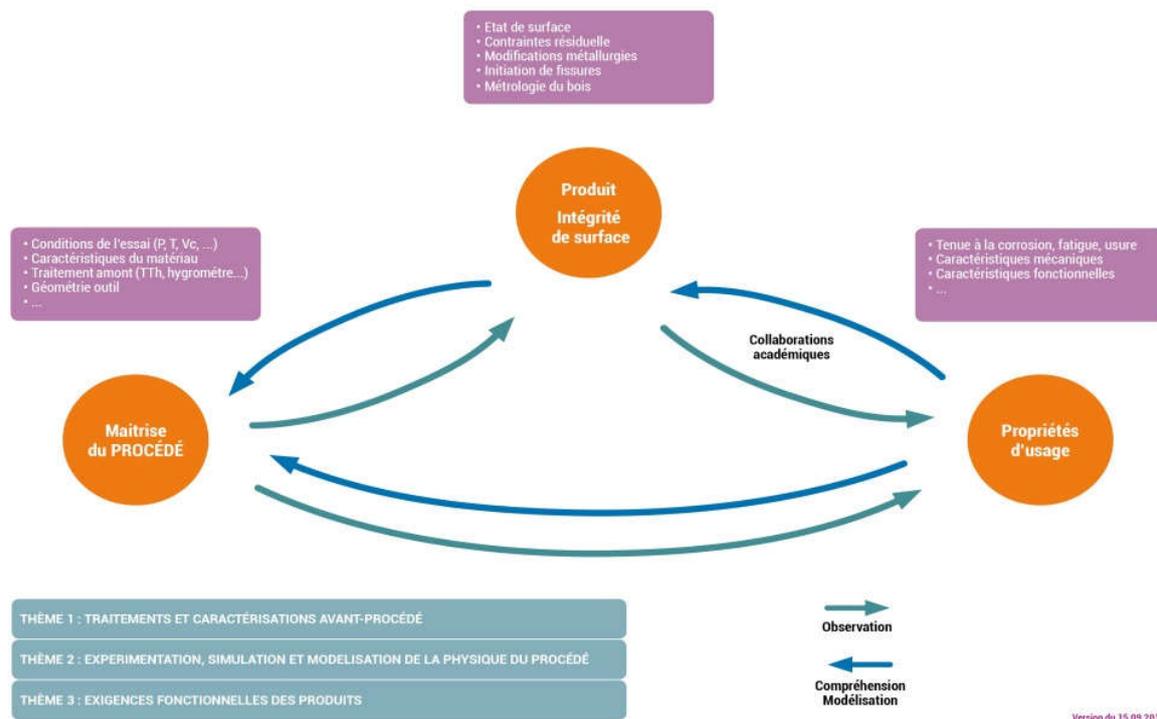


Figure 4 : Synopsis des orientations scientifiques du LaBoMaP

Cette illustration situe les zones d'intérêt que nous nous proposons d'approfondir et qui sont devenus le fil rouge des trois équipes du LaBoMaP. Jusqu'ici, les activités du LaBoMaP liées à la coupe relevaient plutôt d'une démarche d'optimisation assez classique : quels paramètres de coupe, quels matériaux usinant pour obtenir des fonctionnalités de surface données ? Au fil des ans, les situations d'usinage étudiées (tournage, fraisage, perçage, taraudage, déroulage, défonçage, sciage) ont été nombreuses tant au niveau des matériaux usinés (métaux ; multi-matériaux ; composites ; bois verts ; bois secs) que des applications (automobile, aéronautique, construction...). Le concept d'inversion de cette image consiste à engager une démarche ouvrant la porte à une expertise originale : la prédiction, la modélisation de l'intégrité de la matière usinée - tant en surface que dans son corps - par l'emploi d'un matériau usinant, de paramètres du procédé et d'une géométrie donnée.

Les thèmes du laboratoire portent en particulier sur les procédés (ci-après dénommés PROCÉDÉ) de traitements de surface, de transformation de matériaux massifs et reconstitués, de classement et de caractérisation mécanique de produits d'ingénierie bois, et d'enlèvement de matière à l'outil coupant. Les matériaux principalement étudiés sont des alliages métalliques, des essences de bois, des céramiques, des composites, ainsi que des empilements multi-matériaux.

Le premier thème sur les études pré-procédé a pour finalité de caractériser l'état de la matière, de modéliser son comportement mécanique et les paramètres fondamentaux impactant *in-fine* la physique du procédé ou les propriétés de son produit.

Dans le second thème, l'analyse des phénomènes mis en jeu lors des procédés est complexe et nous conduit donc à développer des approches hybrides, associant à la fois expérimentation et modélisation, afin de comprendre la physique de ces procédés et de les maîtriser. Pour appréhender l'ensemble des verrous scientifiques inhérents à ces procédés complexes, des modélisations multi-échelles, ainsi que des outils numériques associés au développement de manipulations expérimentales instrumentées sont mis en place. Aussi, afin d'améliorer et/ou d'alimenter des modèles prédictifs pour la caractérisation fine de ces procédés, des capteurs de signaux multi-physiques sont implantés *in-situ* constituant ainsi une originalité forte du laboratoire. Réciproquement, les modèles existants permettent d'interpréter et d'optimiser ces procédés.

Le troisième thème traite des propriétés d'usage des produits élaborés. Le LaBoMaP attache une attention particulière aux propriétés du matériau et à l'intégrité de surface obtenues. L'un de nos objectifs vise à obtenir les exigences de surface ou de sous surface selon les fonctionnalités recherchées grâce à une maîtrise globale du procédé (avant-procédé et au cours du procédé). L'étude de la tenue en service des pièces se prolongera par des collaborations externes avec d'autres laboratoires pour combiner nos expertises et nos moyens de caractérisations afin d'aborder le problème dans sa globalité.

Notre ambition est de poursuivre d'une part les développements dans le domaine de nos approches expérimentales/numériques afin de caractériser précisément les procédés étudiés et l'impact des conditions opératoires sur l'intégrité matière. D'autre part, les résultats probants réalisés depuis 2012 ont permis de renforcer de nombreuses collaborations scientifiques existantes (cf. bilan Annexe 4), mais aussi d'ouvrir de nouveaux partenariats académiques et industriels à dimension nationale, européenne et mondiale (cf. projet détaillé).

Ces trois thèmes présentés succinctement sont détaillés ci-dessous à l'échelle du laboratoire en mettant en avant les points communs relatifs aux spécificités des trois équipes.

THEME 1 : TRAITEMENTS ET CARACTERISATIONS AVANT-PROCEDE

Objectifs scientifiques : comprendre et maîtriser les paramètres en amont du procédé.

Avant tout procédé d'usinage ou de transformation de la matière, il est nécessaire de maîtriser et de comprendre l'état initial du matériau. C'est pourquoi le LaBoMaP se propose de focaliser ses futurs travaux sur la mesure et l'intégration des propriétés du matériau par des critères quantitatifs.

- **Caractérisation de l'état structural multi-échelles de la matière**

L'influence de la microstructure et des caractéristiques physico-chimiques, mécaniques du matériau (métallique et bois) impacte considérablement le PROCEDE et les propriétés des produits. Dans le cas des matériaux métalliques cela se traduit par la description quantitative et qualitative des phases, de la composition chimique, de la taille des grains, des défauts cristallins, de la rugosité de surface, etc. Le bois est un matériau hétérogène issu du vivant ce qui lui confère une grande variabilité à de multiples échelles. Selon la nature du procédé mis en jeu, l'intégration de données locales sera nécessaire (nature et composition chimique, angle des microfibrilles de cellulose, densité locale, répartition de l'eau, état de contrainte initial, pente de fil...).

- **Définition de l'état de contraintes de la matière**

La connaissance de l'état de contraintes internes du matériau issu du procédé d'élaboration amont, qu'il soit naturel ou non, permet d'anticiper la relaxation de celles-ci et dans le cas des traitements de surface leur interaction avec les contraintes mises en jeu lors du procédé. La prédiction des déformations résultantes pendant et après les procédés de transformation étudiés au laboratoire fait partie de nos orientations scientifiques.

La caractérisation de l'état de contraintes passe par des approches numériques et expérimentales existantes (*Forge, Abaqus*) ou en développement interne et collaboratif (*Sysweld, Computree*).

- **Identification et modélisation du comportement thermo-mécanique du matériau**

Des lois constitutives des matériaux étudiés seront identifiées par des moyens standards et/ou expérimentaux originaux (DIC¹) sur de larges plages de températures (-196 °C à 1600 °C) dans le but d'établir des modèles numériques dédiés à la simulation du PROCEDE. Les matériaux bois et composite (CFRP²) à comportement hétérogène anisotrope comportent des analogies partagées entre les équipes MUB et UGV.

¹ DIC : Digital Image Correlation

² CFRP : Carbon Fiber Reinforced Polymer

THEME 2 : EXPERIMENTATION, SIMULATION ET MODELISATION DE LA PHYSIQUE DU PROCEDE

Objectifs scientifiques : comprendre, modéliser, prédire et surveiller.

Le cœur des activités scientifiques du LaBoMaP porte sur la maîtrise du PROCEDE. Historiquement focalisé sur une approche expérimentale dédiée au produit, le LaBoMaP enrichit son activité depuis le précédent contrat quinquennal par le développement de dispositifs instrumentés originaux couplés à des outils numériques de simulation et de modélisation de la physique du PROCEDE. Cette approche hybride expérimentale/numérique permet de mettre en place *in fine* des outils de surveillance en adéquation avec les besoins de Industrie du futur.

- **Maîtrise expérimentale du PROCEDE**

- Par enlèvement de matière (soustractif)

La maîtrise du procédé de coupe par enlèvement de matière se focalise principalement sur les matériaux à usinabilité difficile tels que le bois (vert ou non), les composites à fibres de carbone, les alliages réfractaires et inoxydables, les aciers et le bois traités thermiquement, les matériaux ductiles (Cu-c2, Ta, AMF³) jusqu'aux matériaux pyrophoriques. Pour l'ensemble des matériaux cités précédemment sont mises en œuvre et développées au LaBoMaP des méthodologies expérimentales appropriées permettant une avancée sur la maîtrise des techniques d'usinage de matériaux métalliques (fraisage, tournage, perçage) et non métalliques (fraisage, déroulage et sciage). Les problématiques de l'instabilité de coupe (vibrations) et de déformations des pièces (sous efforts de coupe, par libération de contraintes internes ou suite à des traitements thermochimiques) font et feront l'objet d'études scientifiques dans le cadre du projet du laboratoire.

- Par dépôts PVD (additif) et traitements de surface

En se basant sur près de vingt ans d'expérience en dépôts PVD et en traitements thermochimiques basse pression, le LaBoMaP souhaite approfondir la maîtrise de ces procédés et se propose donc pour le prochain quinquennat d'élaborer des matériaux avancés soit par dépôt PVD (super-réseaux, nanocomposites, etc.) ou par traitements thermochimiques basse pression (cémentation de matériaux réfractaires) ; soit par combinaison de ces traitements.

- **Modélisation et simulation numériques du PROCEDE**

Le LaBoMaP développe la simulation de croissance de couches minces par dépôt PVD à structures orientées par méthode Monte-Carlo permettant ainsi la maîtrise globale du procédé de pulvérisation, la compréhension de l'influence des paramètres de dépôt et la prédiction de certaines propriétés des couches obtenues (angle des colonnes, épaisseur, densité, etc.). Dans le cas des traitements thermochimiques, la garantie des propriétés mécaniques ou métallurgiques finales attendues passe par la prédiction numérique des séquences d'enrichissement/diffusion de cycles de cémentation ou de nitruration.

Dans le cas des procédés de coupe par enlèvement de matière, les modélisations que ce soit par éléments finis (métaux) ou par éléments discrets (bois et composites) sont largement mises en œuvre dans la compréhension du chargement thermomécanique et d'éventuelles modifications structurales.

Les performances mécaniques des produits massifs et d'ingénierie bois reconstitués (seconde transformation) sont établies à partir de modélisations depuis l'échelle locale (nodosité, pente de fil, densité) vers l'échelle globale par des techniques d'homogénéisation. Ces évaluations mécaniques sont essentielles dans la classification et la valorisation des produits bois en bio-matériaux pour la construction conformément aux Eurocodes. L'ensemble des modélisations proposées par le LaBoMaP a aussi pour but d'élaborer des méthodologies de surveillance sur la base de modèles physiques et de proposer des solutions pour l'Industrie du futur.

- **Techniques pour la surveillance du PROCEDE**

Le LaBoMaP est fortement impliqué dans le développement d'outils de mesure et de surveillance des procédés. Ces développements se traduisent par la mise en place de techniques complexes à mettre en œuvre telles que la corrélation d'images et l'imagerie rapide dans le but d'observer et de quantifier les phénomènes au voisinage de l'arête de coupe. L'optimisation des paramètres opératoires du PROCEDE passe par le développement de techniques de mesures en ligne (laser point ou ligne, accéléromètre, signaux sonores) et constitue un axe prioritaire de recherche du laboratoire. La mesure du chargement thermomécanique durant le processus de coupe reste un verrou scientifique et technologique que le laboratoire se propose de lever par l'intermédiaire de dispositifs *in-situ* capables de fournir une information en temps réel. D'autre part, la surveillance des

³ AMF : Alliage à Mémoire de Forme

traitements thermochimiques est assurée par la maîtrise directe des activités des atmosphères durant les procédés de cémentation ou de nitruration.

THEME 3 : EXIGENCES FONCTIONNELLES DES SURFACES ET DES PRODUITS

Objectifs scientifiques : prédire et modéliser les caractéristiques des produits.

Après maîtrise, contrôle, prédiction et/ou surveillance du PROCEDE, il est indispensable dans le contexte de l'Industrie du futur de vérifier et garantir les caractéristiques -intrinsèques et en usage- du produit en respect du cahier des charges. Le LaBoMaP se propose dans le cadre de ce troisième thème de travailler sur les sous-thèmes suivants :

- **Qualité et métrologie des surfaces et des sous-surfaces**

La mesure des propriétés physiques intrinsèques fonctions de la microstructure (orientation des fibres, des grains et des colonnes) en sous-couches telles que conductivité thermique, résistance électrique, dureté, coefficients d'échange thermique ainsi que densité pour ne citer qu'elles, sont intimement liées aux performances en service du produit. Concernant le secteur de l'usinage des métaux, la qualité géométrique des surfaces complexes nouvellement créées est un défi pour garantir des pièces à très haute exigence de précision (aéronautique, biomédical, etc.). Quel que soit le procédé considéré, la surface doit être caractérisée pour répondre aux exigences fonctionnelles prévues : état de surface et fissuration pour l'application de couches de finition (colle ou adhésifs, peinture et vernis), super finition de matériaux métalliques (abrasion), réactivité des surfaces (morphologie de surface, mouillabilité, corrosion). Dans ce but, le laboratoire a notamment développé des outils de mesure originaux spécifiques aux produits bois sec et vert (placages et sciages).

- **Intégrité de surface contrôlée**

L'effet de l'intégrité de surface sur les propriétés fonctionnelles du produit face à son environnement (humide, sous vide, cryogénique, corrosif) mais aussi sur sa tenue dans le temps (fatigue, durabilité, etc.) n'est plus à démontrer. L'impact du procédé sur l'intégrité de surface générée par l'instauration de contraintes résiduelles, de modification de la dureté par plastification mais aussi les transformations métallurgiques (changement de phases, structure et orientation cristalline) sont encore aujourd'hui difficilement maîtrisables. Dans ce but, le laboratoire s'est équipé notamment de techniques d'imagerie à grande vitesse couplées à la corrélation d'image afin d'observer et de mesurer la qualité de l'intégrité de surface produite. Dans le cadre de son projet, le LaBoMaP ambitionne de lever le verrou du contrôle de cette intégrité de surface par la maîtrise des paramètres du PROCEDE.

- **Propriétés d'usage et en service**

Le LaBoMaP développe des activités de recherche sur la tenue en service uniquement dans le cas d'essais d'endurance des produits, revêtus ou non, afin de définir des modes de dégradations mécaniques (abrasion, adhésion) et physico-chimiques (diffusion, oxydation) par des essais d'usure et de frottement entre autres.

D'autre part, le LaBoMaP a su aussi développer une expertise originale dans la problématique de l'optimisation des procédés de classement mécanique des bois massifs et d'ingénierie bois pour des emplois en structure, montrant ainsi son engagement dans l'amélioration de l'Eurocode 5. De même pour les matériaux métalliques, une attention toute particulière est portée sur l'obtention de structures contrôlées (tailles de grains, propreté inclusionnaire...) afin de garantir des propriétés mécaniques optimales.

Des collaborations avec d'autres laboratoires de l'ENSAM (PIMM, LAMPA, I2M) ou de l'Université de Bourgogne Franche-Comté (LICB⁴) sur la tenue en service des pièces permettront d'affronter pleinement cette problématique.

⁴ LICB : Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne