

Introduction au post-traitement et enjeux

26/11/2025

Mathieu MEGEMONT (Systèmes de production intégrés)

Sommaire

1. Les enjeux de la finition de surface pour la FA
2. Les technologies standards de finition de surface et leurs évolutions
3. Combinaison et hybridation des procédés
4. Focus sur la reprise en usinage de pièces issues de WAAM
5. Les enjeux futurs
6. Les moyens CETIM
7. Questions

1

Les enjeux de la finition de surface pour la FA

Les enjeux de la finition de surface pour la FA

Les enjeux actuels

➤ Côté produits

- Demande croissante des industriels pour la reprise et la finition de pièces issues de fabrication additive métallique
 - Problématiques d'accessibilité (Géométries complexes)
 - Etats de surface de départ élevés et parfois hétérogènes (Effet Upskin / Downskin)
 - Pièces parfois produites à l'unité ou en petite série
- Des exigences de plus en plus élevées sur les caractéristiques mécaniques et sur l'état de surface
 - Prise en compte de critères de rugosité poussés (R_p , R_{sk} , critères de portances etc...)
 - L'aspect final de la pièce au cœur des exigences
- Tous les secteurs de la mécanique sont concernés (Médical, Luxe, Nucléaire etc...)



➤ Côté process

- Nécessité de prendre en compte les étapes de finition dès la conception
- Impact majeur sur les coûts, les délais et la qualité de la pièce
 - Environ 30% du coût des pièces de FA est lié au post-traitement



2

Les procédés standards de finition de surface et leurs évolutions

Les procédés standards de finition de surface et leurs évolutions

➤ Les procédés de parachèvement peuvent être répartis en 7 grandes catégories de procédés :

Usinage

Fraisage, tournage...



Procédés par abrasion « rigide »

Meulage, Rodage, Rectification...



Procédés par abrasion « libre »

Tribofinition, abrasive flow machining, sablage...



Procédés par déformation plastique

Grenailage, Microbillage, Galetage...



Procédés chimiques

Usinage chimique, Polissage chimique...



Procédés électrochimiques

Electropolissage, Plasma polishing...



Procédés thermiques

Ebavurage cryogénique, Grenailage laser...



Les procédés standards de finition de surface et leurs évolutions

➤ Quelques exemples :

Tribofinition



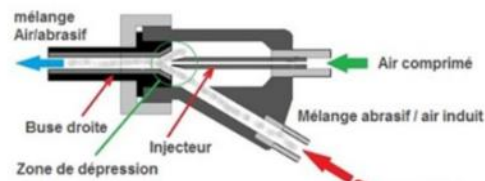
Principe de la technologie :

- Procédé mécanique / abrasif
- Mouvement relatif pièces / médias par vibration

Intérêts de la technologie :

- Possibilité de travailler en voie sèche, voie humide
- Typologies de médias principalement utilisés
 - Traitement par voie humide avec médias céramiques (alumine) ou polyamide
 - Traitement par voie sèche avec médias végétaux

Sablage



Principe de la technologie :

- Procédé mécanique
- Projection de particules abrasives sous pression

Intérêts de la technologie :

- Possibilités d'agir sur des pièces présentant des zones difficiles d'accès
- Procédé intéressant de préparation de surface
 - Suppression des traces d'usinage
 - Atténuation des porosités

Polissage chimique / électrochimique



Principe de la technologie :

- Enlèvement matière piloté et reproduit de manière précise par dissolution de la pièce
- Vitesse déterminée par la concentration de produits chimiques dans le bain, et par la température du bain

Intérêts de la technologie :

- Travaille sur l'intégralité de l'enveloppe de la pièce intérieur/extérieur
- Mise en propreté de la pièce intégré au cycle

Les procédés standards de finition de surface et leurs évolutions

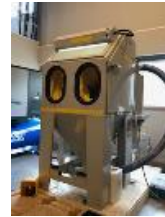
➤ Inconvénients de ces procédés standards:

Tribofinition



- Temps de cycle longs si rugosité de départ élevée
- Difficultés à atteindre les zones difficiles d'accès

Sablage



- Procédé le plus souvent manuel
- Difficultés à atteindre des états de surface très fins

Polissage chimique / électrochimique



- Aspect HSE très important
- Installations lourdes à mettre en oeuvre

Tous ces inconvénients nécessitent donc des optimisations des procédés « standards » afin de s'adapter aux nouveaux enjeux du secteur mécanique !

Les procédés standards de finition de surface et leurs évolutions

- Evolution de ces procédés standards:

Tribofinition



**Polissage chimique /
électrochimique**



Les procédés standards de finition de surface et leurs évolutions

➤ Evolution du procédé de tribofinition (Tribofinition à haute énergie)

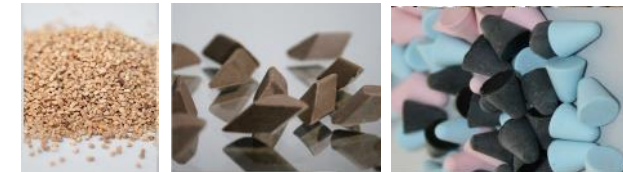
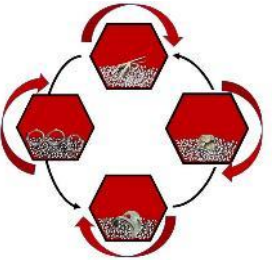
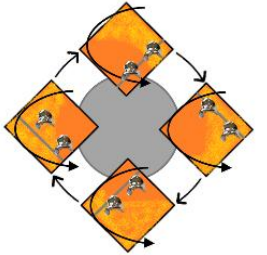
Procédé par force centrifuge haute vitesse

Principe de la technologie :

- Procédé mécanique/abrasif
- Mouvement relatif pièces / médias par déplacement satellitaire

Intérêts de la technologie :

- Réduction du temps de cycle
- Possibilité de travailler avec des petits médias abrasifs grâce à l'énergie



► Intérêts de cette technologie

- Procédé à forte énergie => Temps de cycles courts (entre 1 et 2 heures généralement)
- Possibilité d'atteindre des états de surface poli-miroirs en plusieurs étapes
- Traitement voie humide pour la préparation de surface (ébauche)
- Traitement voie sèche coques de noix + pâte abrasive pour l'obtention d'état de surface très fins
- 4 pots = 4 étapes réalisables en un seul cycle

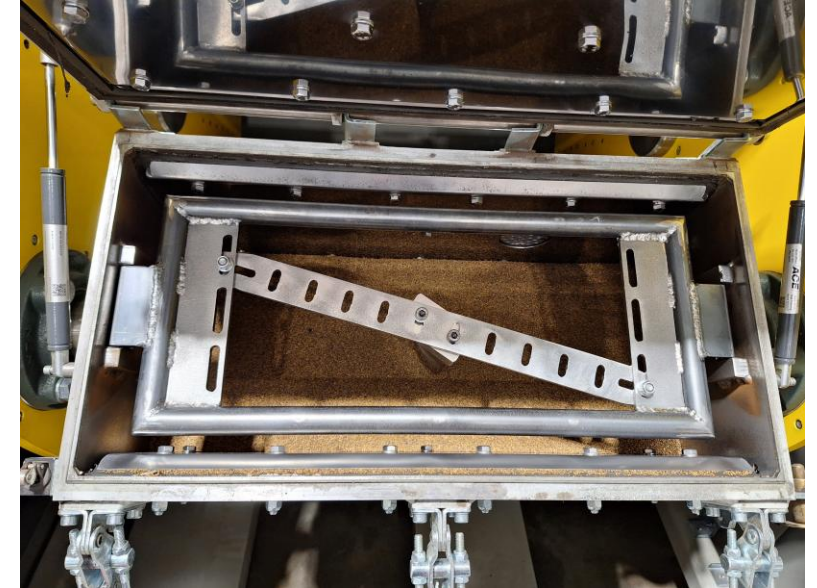
► Inconvénients de cette technologie

- Forte énergie => Risque de déformation des détails fins
- Consommation plus élevée en abrasifs
- Masse des pièces limitée

Les procédés standards de finition de surface et leurs évolutions

- Evolution du procédé de tribofinition (Tribofinition à haute énergie)

Procédé par force centrifuge haute vitesse



Les procédés standards de finition de surface et leurs évolutions

➤ Evolution du procédé de tribofinition

Autres évolutions de la tribofinition



**Centrifugeuse
à disque**



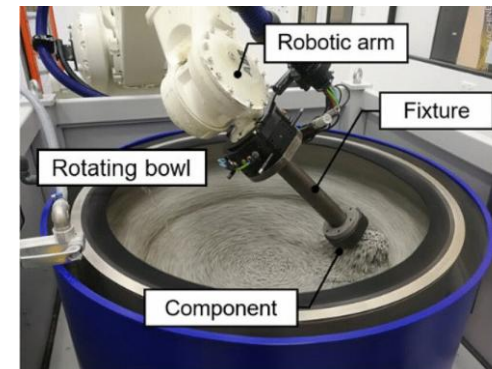
**Trovalisation
magnétique**



Tunnelage



Smuritropie



Stream finishing

Les procédés standards de finition de surface et leurs évolutions

- Evolution de ces procédés standards:

Tribofinition



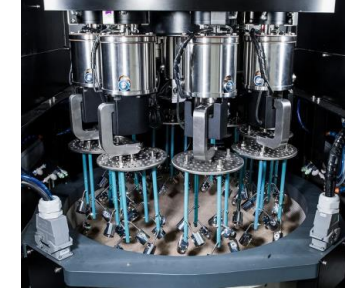
Polissage chimique / électrochimique



Les procédés standards de finition de surface et leurs évolutions

➤ Evolution des procédés chimiques et électrochimiques

Electropolissage à sec Drylite

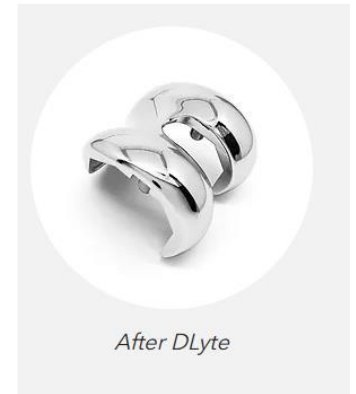
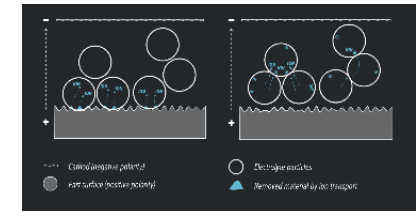


Principe de la technologie :

- Mouvement relatif pièces/médias électrolyte par mouvement épicycloïdal
- Bain d'électro-polissage solide particule en résine poreuse

Intérêts de la technologie :

- Apporte beaucoup de brillance aux pièces
- Gestion améliorée des électrolytes



► Intérêts de cette technologie

- Procédé de super finition permettant l'obtention d'états de surface poli-miroir
- Gestion simplifiée de l'électrolyte
- Grande variété de matériaux pouvant être traités
- Existence de machines toutes dimensions
- Installation moins contraignante qu'un procédé d'électropolissage classique

► Inconvénients de cette technologie

- Coût élevé des électrolytes
- Mise en œuvre nécessitant de maintenir les pièces dans un outillage spécifique
- Temps de cycle longs si état de surface de départ trop élevé

Les procédés standards de finition de surface et leurs évolutions

➤ Evolution des procédés chimiques / électrochimiques

Plasma Electro Polishing (PEP)

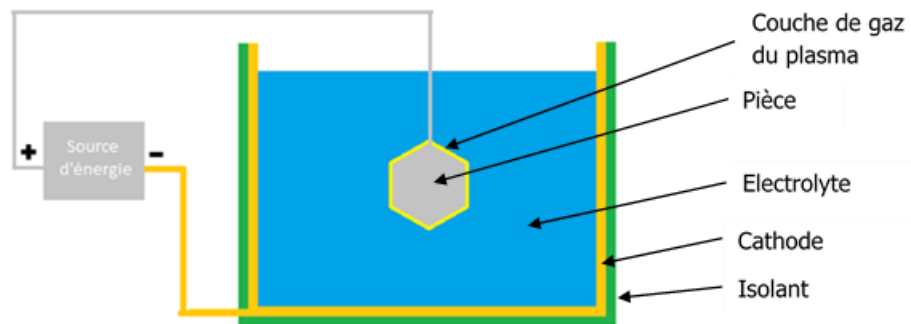


Principe de la technologie :

- Evolution de l'électropolissage où l'électrolyte consiste en une solution aqueuse composée d'environ 98 % d'eau et 2% de sel
- Un plasma se développe tout autour de la pièce permettant ainsi de générer l'enlèvement de matière (8 à 10 μm par minute)

Intérêts de la technologie :

- Apport important de brillance aux pièces
- Possibilité de traiter toutes les zones (même les moins accessibles)
- Pas d'utilisation de substances nocives (électrolyte salin)



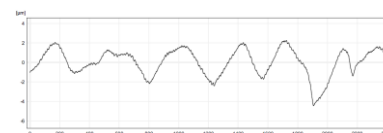
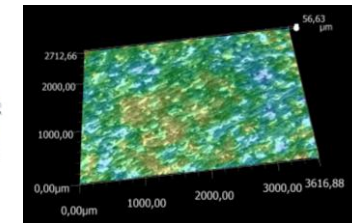
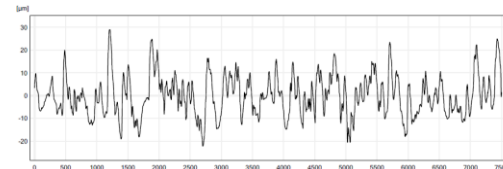
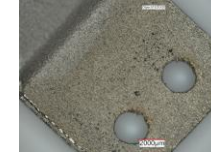
Les procédés standards de finition de surface et leurs évolutions

➤ Evolution des procédés chimiques / électrochimiques

Exemple d'application Plasma Electro Polishing (PEP)

- Acier inoxydable 316L issue de MBJ
 - Dimensions : 52*12 mm
 - Epaisseur : 1,5 mm
- Mesure du profil de Fabrication additive
 - Ra : autour de 7 μ m
 - Rz : autour de 45 μ m
- Paramètres
 - Tension : 375 V
 - Intensité : 100 A
 - Temps : 5 min
- Mesure du profil après PeP
 - Ra : autour de 1 μ m
 - Rz : autour de 5 μ m

➔ Après 5 min



3

Combinaison et hybridation des procédés

Combinaison et hybridation des procédés

Intérêt

- Les essais sur pièces de caractérisation réalisés au CETIM ont permis l'obtention de diagrammes de répartition des impacts de différents procédés :

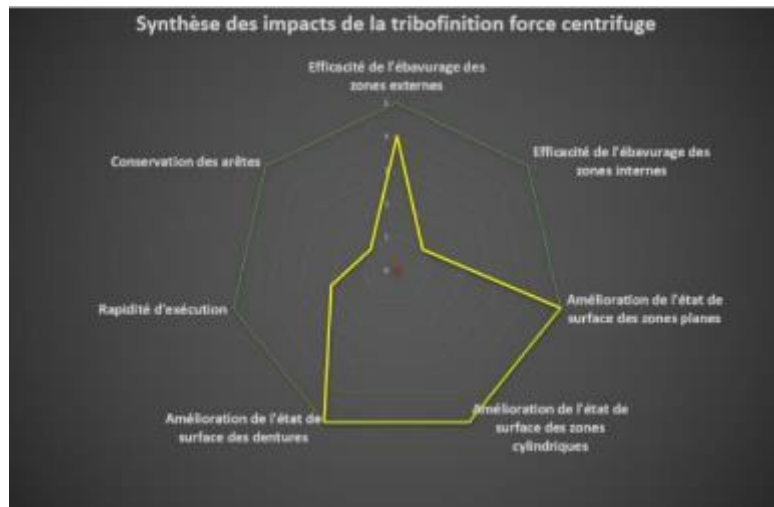
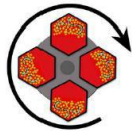


Diagramme force centrifuge haute vitesse



Diagramme tribosablage

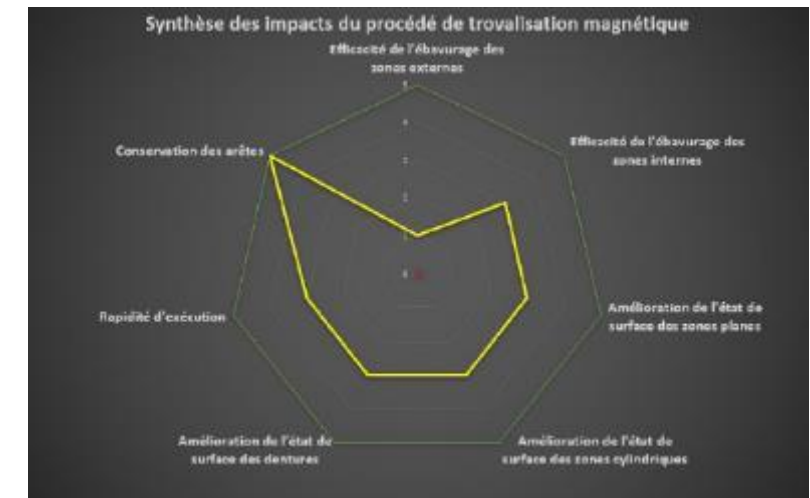
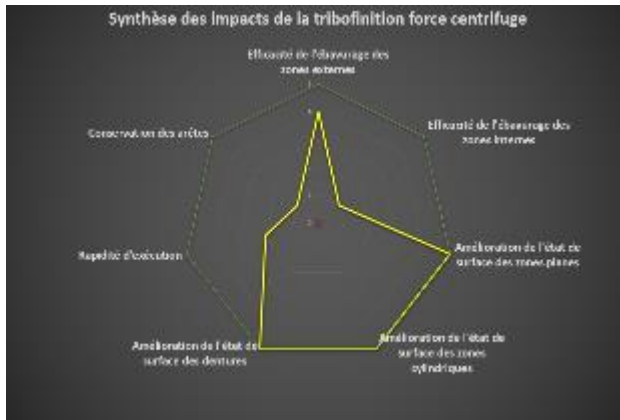


Diagramme trovalisation magnétique

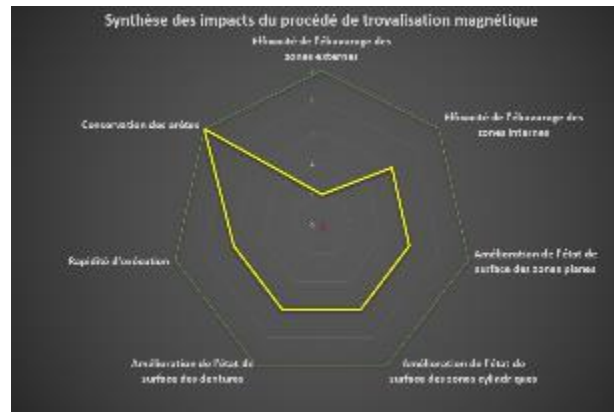
Combinaison et hybridation des procédés

Intérêt des gammes combinatoires

- Présentation d'une gamme multi-procédés
 - Choix, séquençage et paramétrages des technologies



+



= ?

- Exploiter les avantages de chaque technologie en limitant leurs inconvénients
 - Avec la possibilité de réduire les temps de cycle
- De multiples combinaisons de procédés possibles
 - Sablage + Tribofinition FCHV
 - Chimique + Electrochimique
 - Tonnelage + Tribofinition FCHV
 - Trovalisation magnétique + Fond tournant + Tribofinition FCHV
 - ...
- En fonction des objectifs recherchés



+



+



+



+

+

Combinaison et hybridation des procédés

Exemple d'une étude sur une bague issue de MBJ

- **Bague en acier inoxydable issue de fabrication additive**

- **Matière** : Acier inoxydable 316L
- **Procédé de fabrication** : Metal Binder Jetting (MBJ)
- **Etat de surface de départ** : $R_a \approx 10 \mu\text{m}$



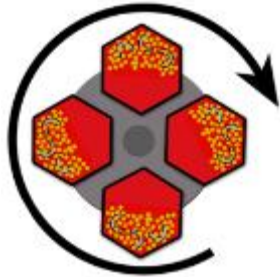
Présence de motifs
intérieurs

Combinaison et hybridation des procédés

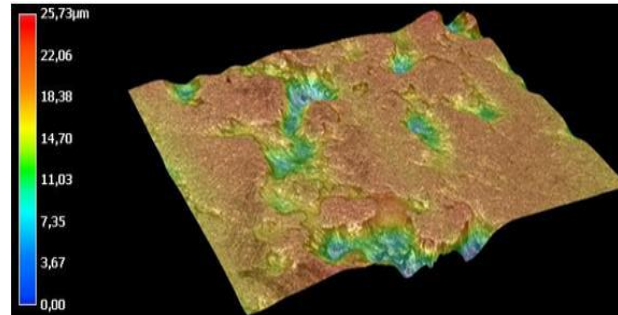
Exemple d'une étude sur une bague issue de MBJ

- Présentation d'une gamme mono-procédé

Technologie utilisée



Polissage par force centrifuge haute vitesse



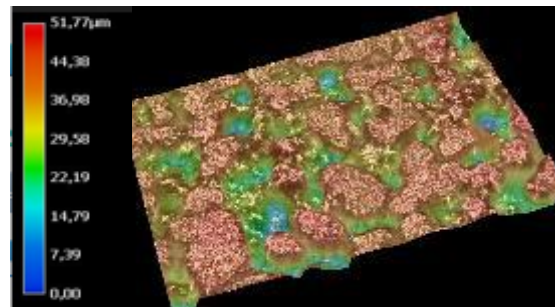
Etat de surface motifs extérieur

Gamme appliquée

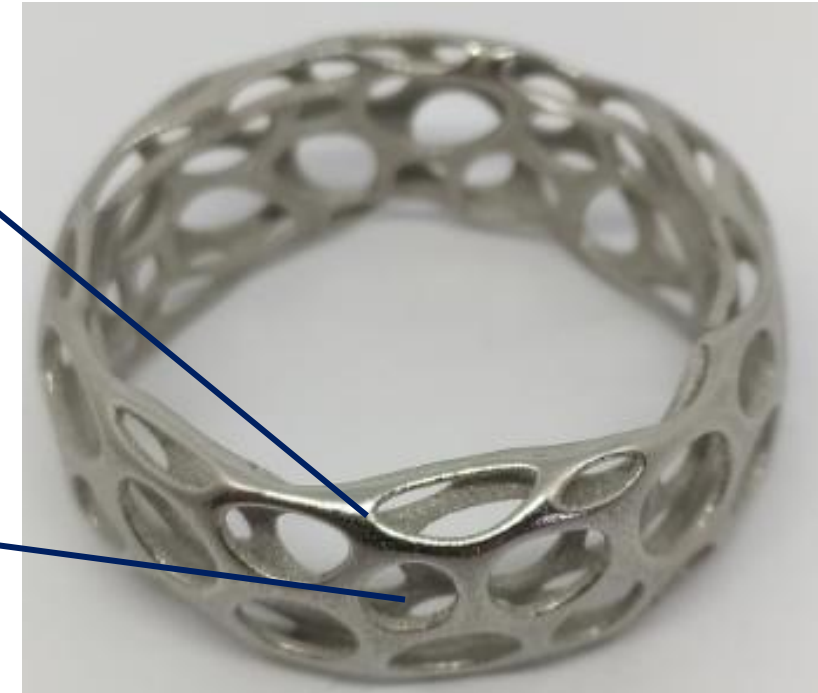


*2h voie humide
médias alumine haute
densité*

*4h voie sèche coques
de noix + pâte
abrasive*



Etat de surface motifs intérieurs

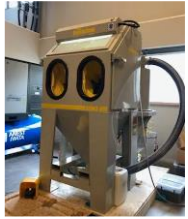


Combinaison et hybridation des procédés

Exemple d'une étude sur une bague issue de MBJ

- Présentation d'une gamme multi-procédés

Technologies utilisées



Sablage pression



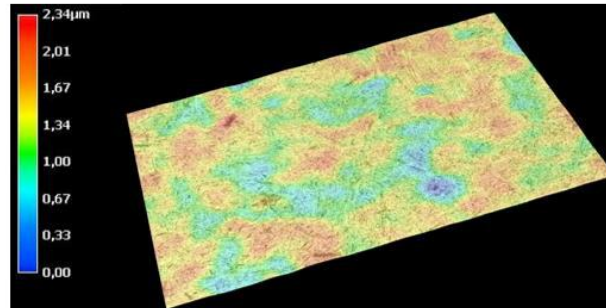
*Trovalisation
magnétique*



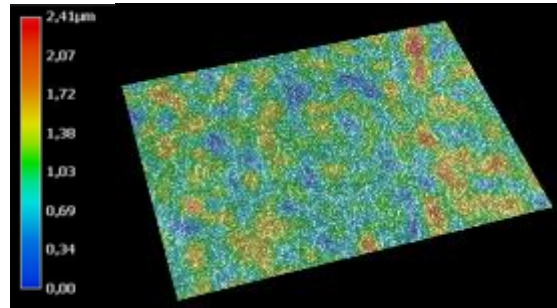
*Polissage par
force centrifuge
haute vitesse*



*Temps de cycle
total
7 heures*



Etat de surface motifs extérieur



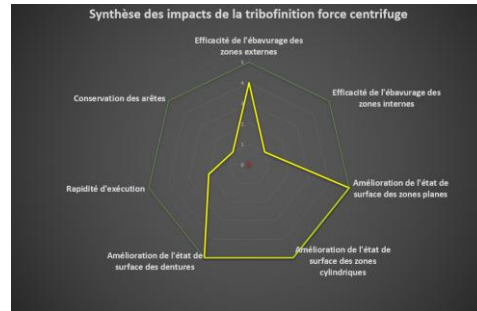
Etat de surface motifs intérieurs



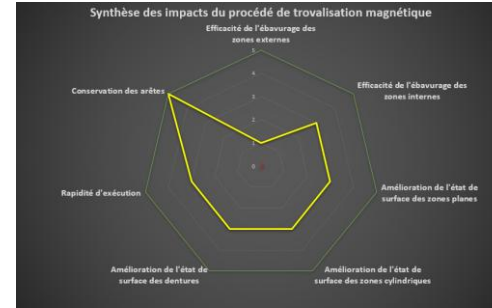
Combinaison et hybridation des procédés

- Intérêts des technologies hybridées

- Effets combinés et synergie des procédés



+



= 1 ?

➡ Pour bénéficier des effets démultipliés des procédés combinés

- Exemples d'hybridation

- Couplage sablage et Tribofinition ➡ Solution Tribosablage Rollwasch
- Couplage sablage et chimie ➡ Solution DECI Duo Post Process
- Couplage Tribofinition et chimie ➡ Solution REM ISF Process



- Développement de nouvelles hybridations au Cetim

- Couplage électro-polissage liquide, tribofinition et chimie ➡ Solution PEMEC
- Couplage électropolissage voie sèche et tribofinition ➡ Solution DLyte Hybrid



Combinaison et hybridation des procédés

Présentation du procédé PEMEC (Polissage électro-mécano-chimique)

Machine de Smuritropie



AVANTAGES:

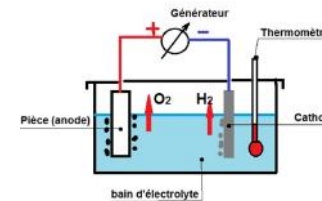
- Action mécanique importante
- Orientation flux médias

INCONVENIENTS:

- Temps de cycle
- Modifie la géométrie



Electropolissage



AVANTAGES:

- Brillance et Etat de surface
- Impacte la microrugosité
- Temps de cycle

INCONVENIENTS:

- Ne réduit pas l'ondulation



Cellule PEMEC

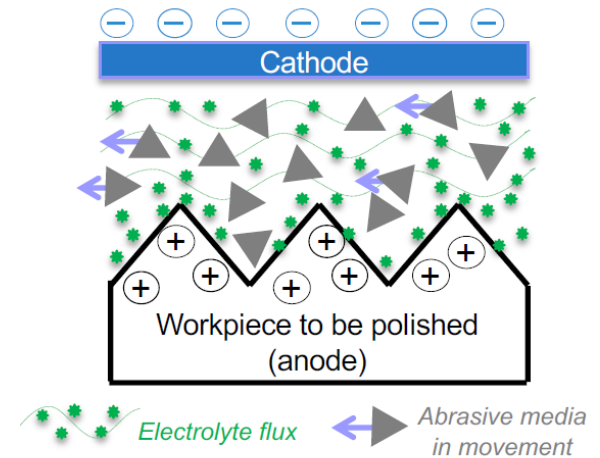


AVANTAGES:

- Brillance et Etat de surface
- Impact l'Ondulation, la Rugosité et la microrugosité
- Conservation des arrêtes
- Temps de cycle courts

INCONVENIENTS:

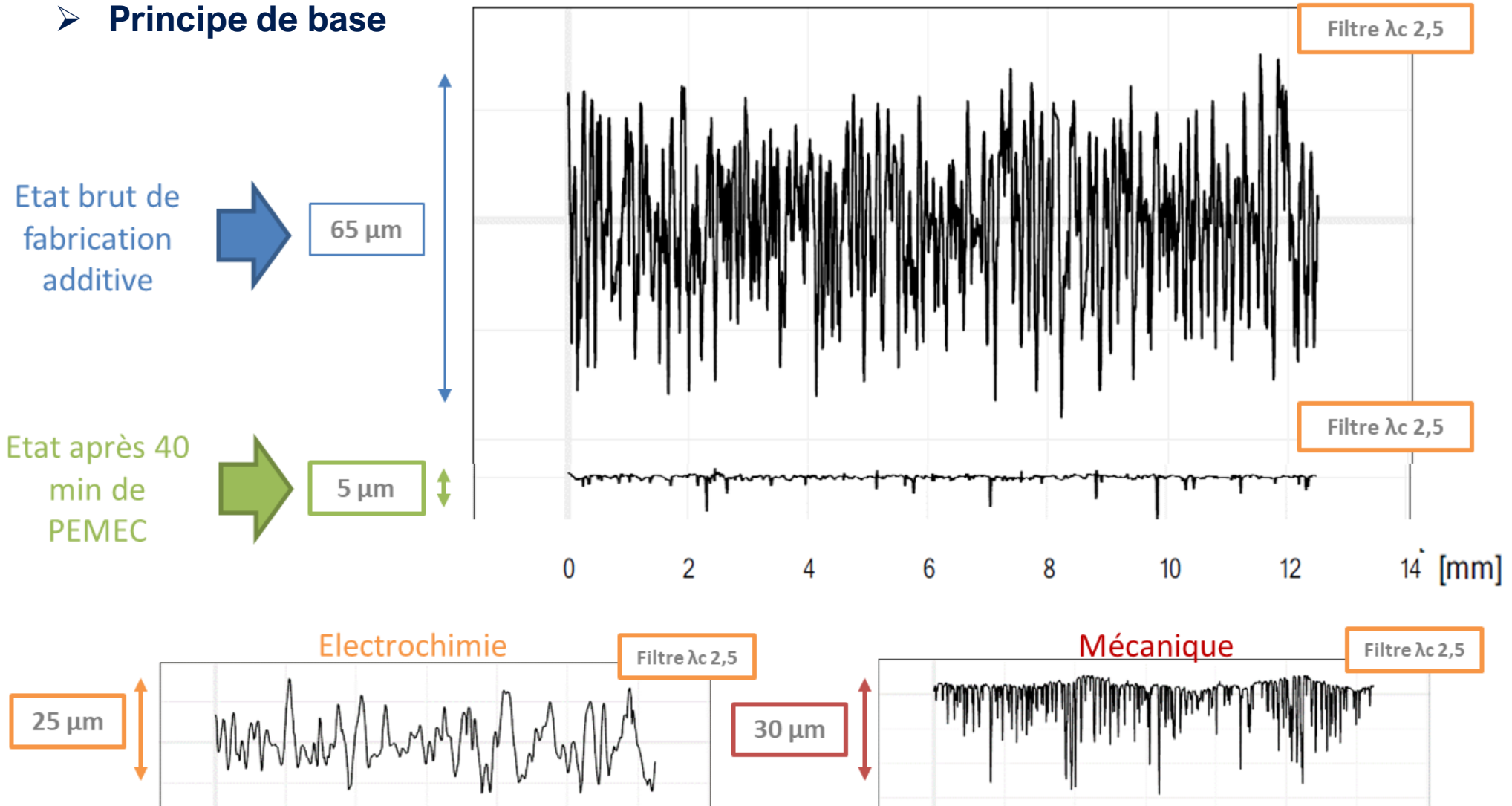
- Gestion environnement mécano-chimique



Combinaison et hybridation des procédés

Présentation du procédé PEMEC (Polissage électro-mécano-chimique)

➤ Principe de base



Combinaison et hybridation des procédés

➤ Exemple de cas d'étude

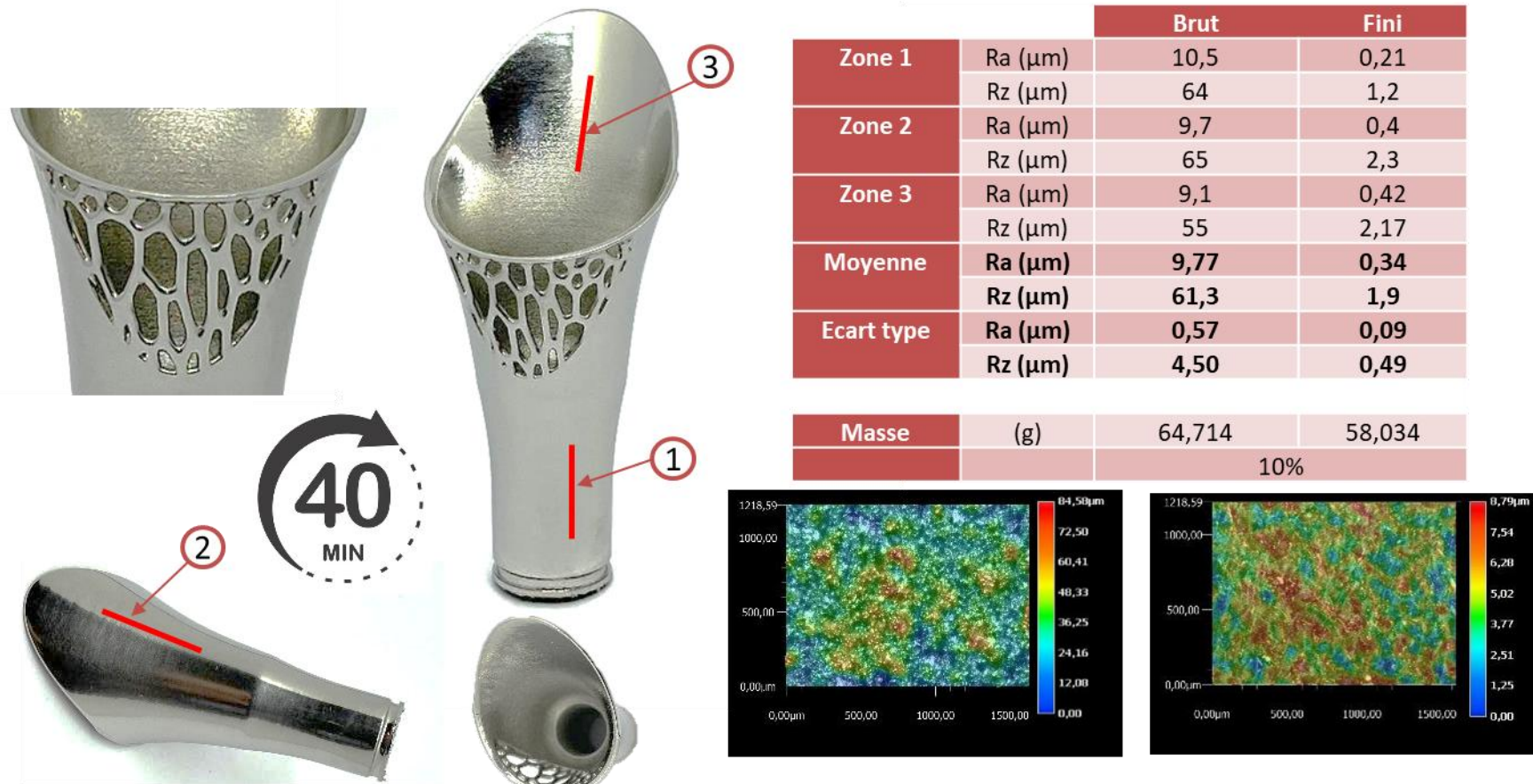
▶ Essais sur pièces inox représentatives des applications FA

▶ Pièce d'ornement issue de SLM



Combinaison et hybridation des procédés

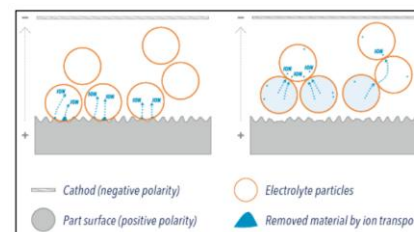
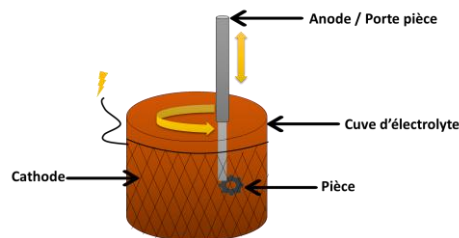
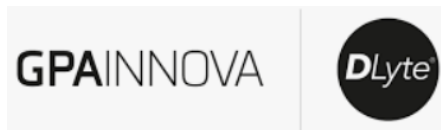
➤ Exemple de cas d'étude



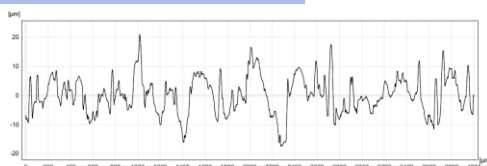
Combinaison et hybridation des procédés

Présentation du moyen Dlyte Hybrid

- **Fournisseur du moyen**
 - Société GPA Innova
 - Barcelone, Espagne
- **Principe de la technologie:**
 - Procédé électrochimique breveté (dissolution ionique de la matière)
 - Electrolyte « sèche » (billes en résine contenant les acides)
 - L'hybridation vient greffer un porteur abrasif au process
 - Mouvement relatif pièces/médias par mouvement elliptique

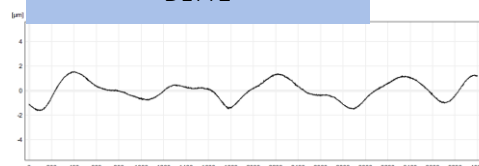


Brut



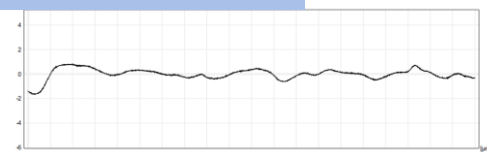
Ra = 7,0683 μm
Rz = 48,9284 μm
t= 0 min

DLYTE



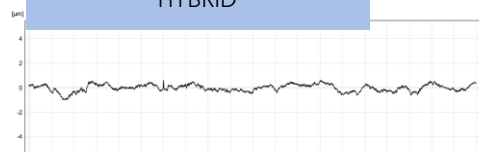
Ra = 0,6599 μm
Rz = 2,3776 μm
t= 7h30

ABRASIVE + DLYTE

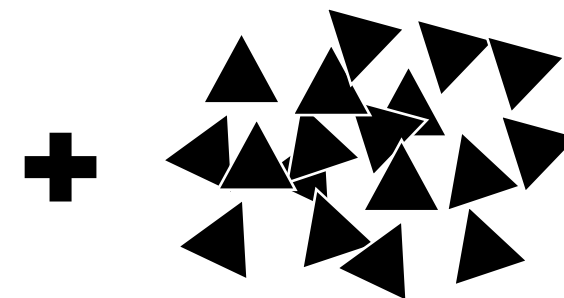


Ra = 0,3040 μm
Rz = 1,2923 μm
t= 3h + 1h

HYBRID



Ra = 0,2326 μm
Rz = 1,1674 μm
t= 1h30 min



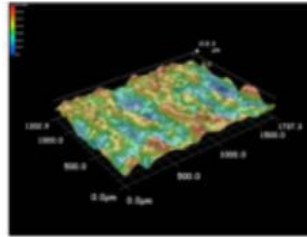
Abrasifs

Combinaison et hybridation des procédés

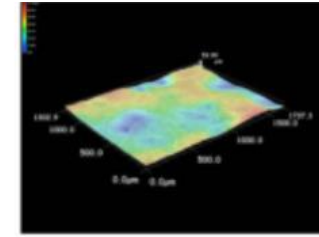
Autres exemples d'hybridation

Tribofinition + polissage chimique

- Procédé de tribofinition accéléré par ajout d'un agent chimique devant permettre la diminution des temps de cycle et la réduction de l'impact sur la géométrie des pièces



As-Built Surface



Extreme ISF® Surface

Sablage + électropolissage à sec

- Procédé reprenant le principe de l'électropolissage à sec Drylite par projection de l'électrolyte directement sur les surfaces à traiter permettant ainsi de se concentrer spécifiquement sur des zones spécifiques des pièces



GPA INNOVA



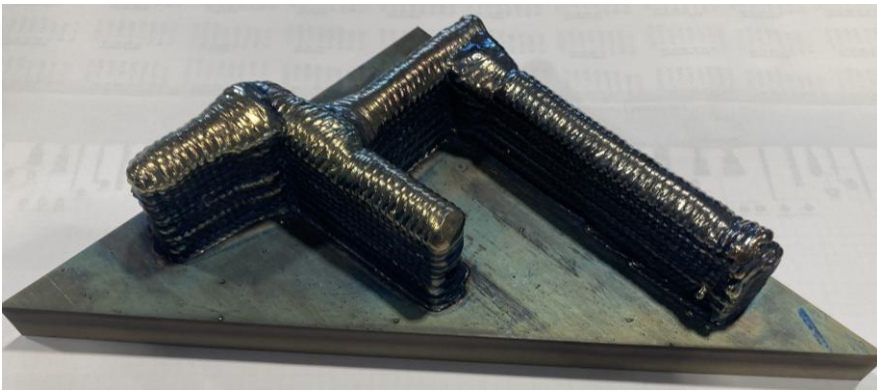
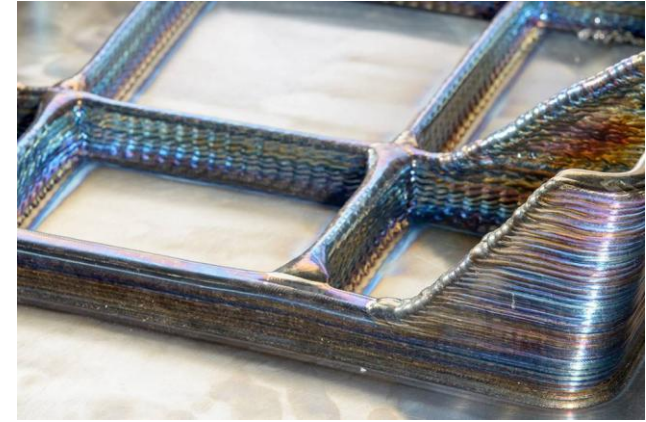
4

**Focus sur la reprise en
usinage de pièces issues
de WAAM**

Focus sur la reprise en usinage de pièces issues de WAAM

Problématiques brut issue de WAAM

- Géométrie et surépaisseurs irrégulières du brut
- Rugosité initiale élevée
- Fortes contraintes internes dans la matière pouvant induire une déformation de la pièce au moment de l'usinage
- Formes pouvant être complexes et présentant des zones difficiles d'accès



Focus sur la reprise en usinage de pièces issues de WAAM

Processus de reprise en usinage pièce issue de WAAM

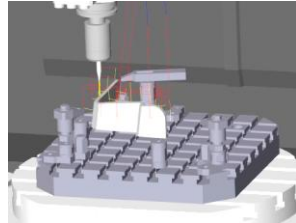
Etape 1: Mise en place et bridage du brut

Quels moyens de bridage ?
Comment assurer l'absence de vibrations ?



Etape 2: Palpage ou scan du brut

Connaître le positionnement et l'orientation réelle de la pièce



Etape 3: Réalisation du best-fit

Faire correspondre le positionnement réel à la programmation

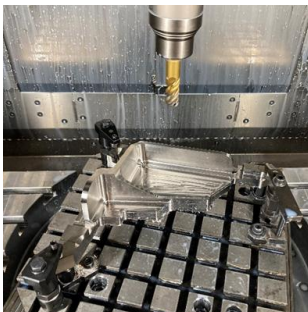
hyperMILL®
BEST FIT ALIGNMENT

Etape 4: Contrôle du best-fit

Valider la bonne réalisation du best-fit



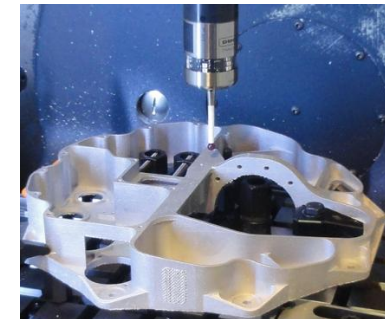
Etape 4: Usinage ébauche



Etape 6: Usinage semi-finition et finition



Etape 7: Contrôle final

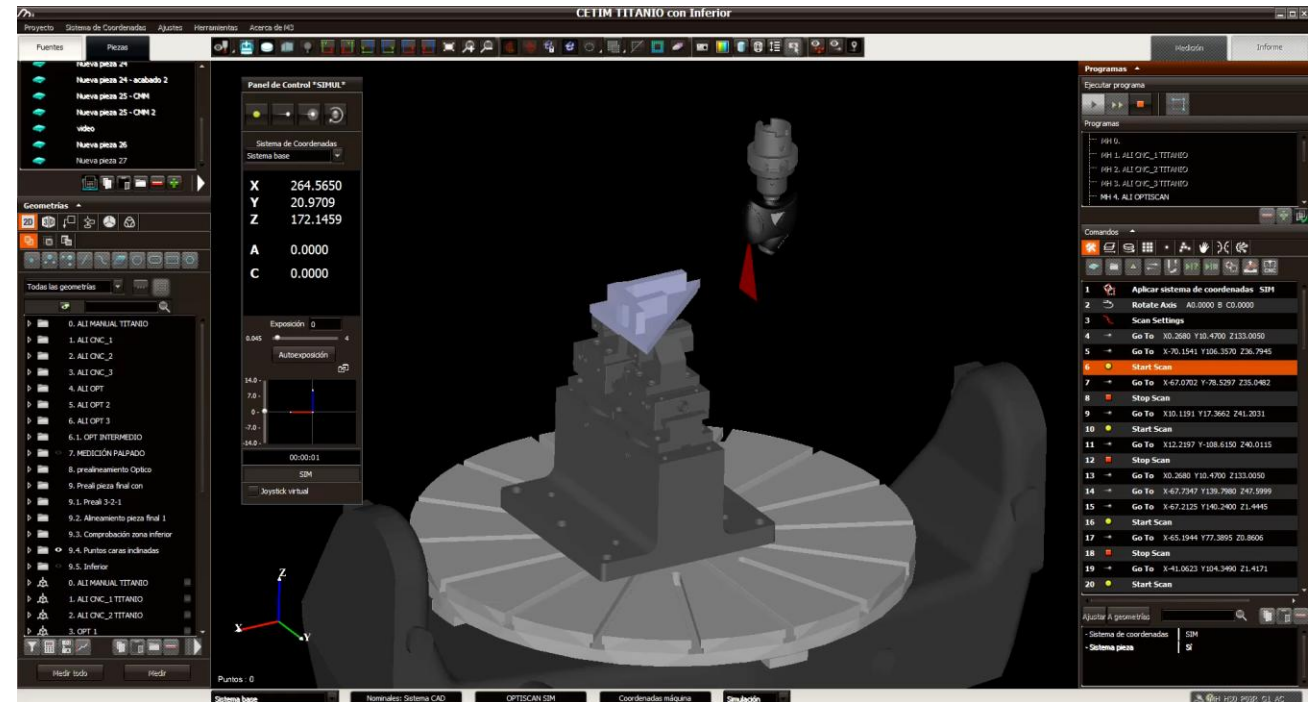
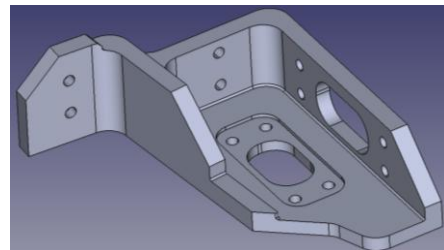
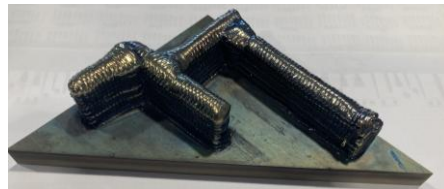
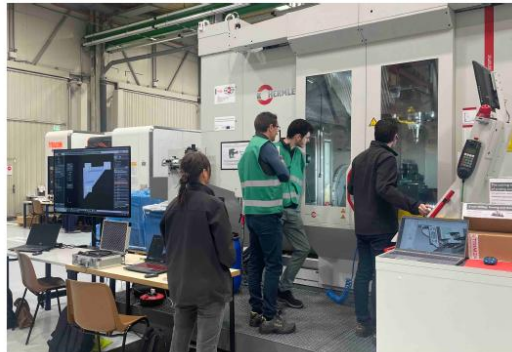


Focus sur la reprise en usinage de pièces issues de WAAM

Exemple solution Innovalia Metrology

Essais au centre de Fabrication Avancée de l'Aéronautique à Bilbao

- Hermle C62 CN Siemens 840D
- Palpeur contact Renishaw OMP600
- Optiscan D1040MH
- Brut issus du procédé WAAM - TA6V
- CAO proposée par CETIM



5

Les enjeux futurs de la finition de surface

Les enjeux futurs de la finition de surface

➤ Aspects environnementaux

- Le domaine de la finition de surfaces devra faire face dans le futur à de nouveaux enjeux liés à l'environnement (réduction des consommations d'eau, gestion des déchets etc...)
- Pour cela, des premières évolutions apparaissent dans le domaine de la tribofinition:

➤ Tribofinition voie sèche

- Installations spécifiques avec récupération des poussières par aspiration
 - Installations possibles sur presque tous types de machines
 - Réduction des volumes et coût de traitement des déchets
 - Aucun besoin en eau
 - Abrasifs plastiques spécifiques adaptés pour:
 - Ebavurage et réduction des plus hauts niveaux de rugosité
 - Préparation de surface / polissage fin / brillantage



6

Les moyens CETIM

Les moyens en Finition de Surface

St Etienne



Vibrateur linéaire

Force centrifuge haute vitesse

Centrifugeuse à disque

Électro-polissage à sec Dlyte

Trovalisation magnétique

Sablage pression

Tonnelage

Tous les moyens de mesure des états de surface et de profils disponibles.

Abrasion basse énergie

Abrasion haute énergie

Finition par dissolution

Techno. par projection



Senlis



Polissage chimique

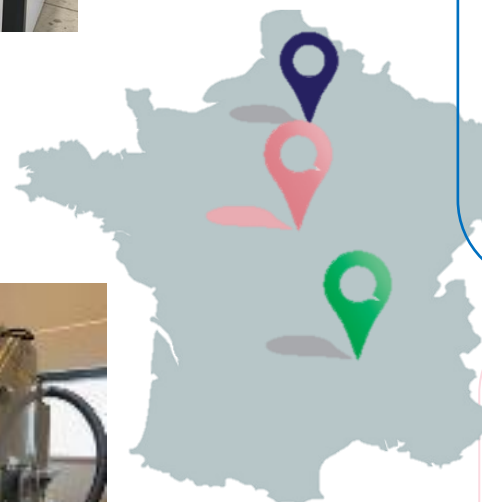
Électro-polissage



Tribosablage



Bourges



Cellules de Parachèvement / Finition robotisées

Senlis

- Tronçonnage, meulage, ébarbage, polissage
- Pièce portée ou posée
- Fonte, acier, alliage d'aluminium, alliage cupro nickel, titane...



Robot ABB IRB6660-205 Foundry

Cluses



Robot Staubli TX2-90

- Chanfreinage, ébavurage, polissage
- Configuration en pièce portée
- 5 électro-broches 60 000 tr/min
- Palpage Renishaw
- Mesure centre outil par LASER

Pau

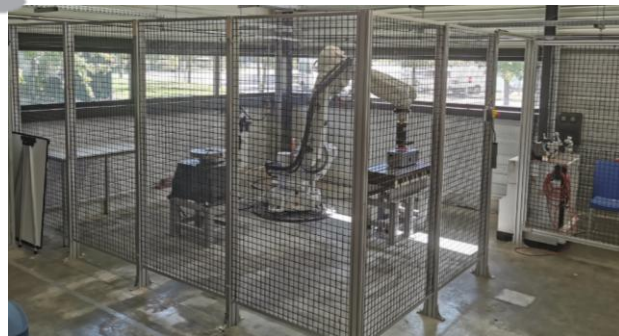


ABB IRB-6620-220-150

- Robot 6 axes
- Positionneur axe vertical
- Broche compliant
- Ponceuse orbitale à compliance active
- Equipement d'inspection Alicona embarqué

St Etienne



Robot Fanuc CRX10iA/L

- Chanfreinage, ébavurage, polissage, satinage, brossage, ...
- Multiposte : Opérations de chargement machine
- Configuration en pièce portée ou fixe
- Panel outil varié
- Programmation : Apprentissage, hors-ligne, mimétisme



CUT OPTIMIZER

Les moyens en Usinage

Senlis



DMU100P Duoblock



GROB G350



METEOR GL XL

Pau



DOOSAN DNM 6700 L

St Etienne



HERMLE C250U

Cluses



Tornos GT26



5 axes



3 axes

Centres d'usinage



Tours bi-broches bi-tourelles



Tours poupée fixe et mobile



Activité Usinage & Finition

Axe 1 : Performance en production

- Résolution de problématiques en fabrication
Expertise, essais, mesures physiques, caractérisation, démarches structurées, CutOptimizer,
- Optimisation de process
Diagnostic de l'existant, positionnement dans un référentiel technique, validations techniques, propositions de gammes
- Automatisation et digitalisation de la production
Automatisation de productions, robotisation, intégration du contrôle, process autonome, chaînage numérique, programmation.



Axe 2 : Conseil à l'industrialisation

- Accompagnement et sécurisation de la conception produit et méthodes
Spécifications techniques du besoin, chiffrage, design to cost, choix des procédés.
- Sécurisation de l'investissement de moyens
Processus complet d'investissement : définition du besoin fonctionnel, CDC, consultation, aide au choix, réception, démarrage de production.



Axe 3 : Compétences et connaissances

- Formations et montée en compétences
Formations catalogue, parcours de formations personnalisés, formations-actions par des experts sur site, formations diplômantes.
- Capitalisation et exploitation des connaissances
Bases de données technologiques, applications web.



Axe 4 : Innovations

- Veille technologique, scientifique et normative
- Recherche & Développement
Preuves de concept, caractérisations de procédés, construction de partenariats, simulation et modélisation de procédés usinage (Contraintes résiduelles et Etat de Surface)
- Développement de technologies innovantes



Des spécialistes pour vous accompagner



Mathieu MEGEMONT
Procédés Spéciaux de finition
Tél : 06 71 75 35 03
Mail : mathieu.megemont@cetim.fr



Antoine GIDON
Procédés Spéciaux de finition
Tél : 06 70 81 58 93
Mail : antoine.gidon@cetim.fr



Stéphane GUERIN
Senior Expert Finition
Tél : 06 74 40 12 03
Mail : stephane.guerin@cetim.fr



Cyrille URVILLE
Polissage / Ebavurage robotisé
Tél : 07 50 66 39 98
Mail : cyrille.urville@cetim.fr



Mikael PERRET
Polissage / Ebavurage sur CU
Tél : 06 71 60 93 66
Mail : mikael.perret@cetim.fr



Mathieu GIRINON
Simulation et balançage de pièces
Tél : 06 08 36 64 44
Mail : mathieu.girinson@cetim.fr

7

Questions ?



Pour un futur industriel
responsable et respectueux
de la planète