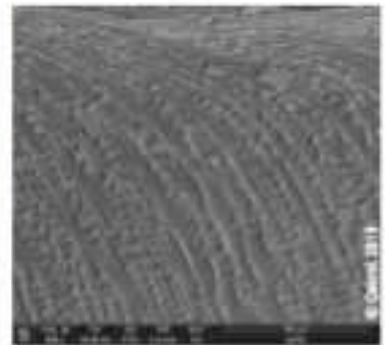
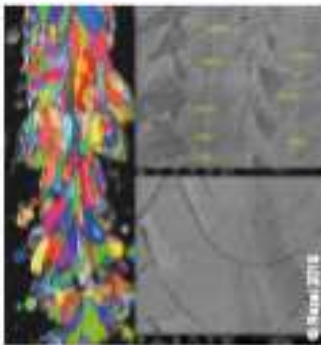


MOULES & OUTILS

10 ET 11 OCTOBRE 2019

ALBI



Les journées « Moules et Outils » organisées conjointement tous les quatre ans depuis 2007 par l'A3TS, le Cercle d'Etudes des Métaux et l'IMT Mines Albi-Carmaux ont pour but de faire un état de l'art sur les nouvelles solutions métallurgiques, les traitements thermiques et de surface, la conception et le design des outils dans le but de fournir aux prescripteurs et aux utilisateurs des critères de choix des solutions optimales sur le plan technico-économique.



Moules et Outils 2019

10-11 octobre 2019, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux

Rubrique évolution des nuances

- **Pierre BLANCHARD (ERASTEEL)** : 50 ans d'amélioration de la qualité et des propriétés des aciers rapides élaborés par métallurgie des poudres ASP®
- **Roxane TREHOREL, Ianis CHARLEUX (Industeel CRMC), Aurélien CHAIZE, Perrine LEVALLEY (Industeel Le Creusot), Lionel COUDREUSE (Industeel Chateauneuf)** : L'acier Superplast® Premium : une qualité proche des aciers refondus ESR
- **Anna FRACZKIEWICZ (Ecole des Mines de Saint Etienne, Centre SMS/LGF UMR 5307)** : Développement de nouvelles nuances d'alliages métalliques concentrés (HEA, High Entropy Alloys et CCA, Compositionally Complex Alloys)
- **Horst ZUNCO (Voestalpine Böhler Edelstahl)** : A novel corrosion resistant, maraging steel powder for additive manufacturing
- **Pere FERRER, Isaac VALLS (ROVALMA)** : Outstanding improvement in cooling time and quality by using HTCS/FASTCOOL high thermal conductivity mold steel
- **Jens BERGSTRÖM (Karlstadt University), Anna MEDVEDEVA (Uddeholms AB)** : AM produced hot work steels

Rubrique simulation numérique et intelligence artificielle

- **Franck TANCRET, Edern MENOUE, Gérard RAMSTEIN (Université de Nantes)** : L'intelligence artificielle pour la conception d'alliages à hautes caractéristiques (thermo)mécaniques
- **Hervé MOTTE (ARRK Shapers France)** : Intégration de technologies innovantes pour le développement de moules optimisés thermiquement
- **Thomas PERET (IRT Jules Verne, Nantes)** : Impact de la montée en température sur l'endommagement des outillages de formage à chaud
- **Patrick HAIRY, Didier LINXE (CTIF Sèvres)** : Apport de la simulation numérique et de l'intelligence artificielle pour les moules métalliques utilisés dans la transformation des métaux
- **JULIEN CHARBONNEAUX, Thierry MENOUE, Nicolas De RIVIERE (ESI France)** : Présentation de la solution ESI PAMSTAMP avec une dominante conception d'outillage / emboutissage à chaud

Rubrique conception et design des outillages

- **Farhad REZAI-ARIA (ICA Albi)** : Fabrication additive d'alliage à mémoire de forme pour outillage pour application médicale
- **Philippe BERTRAND (ENISE), Maxime LIMOUSIN (Schneider Electric Grenoble), Christophe COLIN (Mines ParisTech)** : Mise au point d'un acier haute performance par fusion sélective laser sur lit de poudre (SLM)
- **Jean François VANHUMBEECK (CRM Group Liège)** : Etude de l'applicabilité des procédés d'électropolissage pour la finition de surface des moules d'injection
- **David MULLER (AddUp Clermont Ferrand)** : Une nouvelle offre de déploiement massif du conformal cooling pour dégager de la Valeur Ajoutée à l'ensemble de la Filière
- **Julien BAJOLET (IPC)** : Fabrication additive des moules d'injection
- **Robin BUTTY (Bodycote)** : Optimisation des systèmes de refroidissement des outillages d'injection plastique par le brasage sous vide

Rubrique dégradation des outillages

- **Ousseini MAROU (CRITT-MDTS Charleville Mézières)** : Quelles alternatives pour le choix des matériaux pour moules verriers ?
- **Hans BOUNGOMBA, Mirenxtu DUBAR, Philippe MOREAU, Laurent DUBAR (Université Polytechnique Hauts de France)** : Usure des outillages lors de l'étape d'enroulement des ressorts en acier
- **Jérôme ROCCHI (Liebherr)** : Problématique de formage des tôles minces base nickel, application aux intercalaires d'échangeurs de chaleur
- **Christine BOHER, Luc PENAZZI (ICA-Albi)** : Dégradation des outils de découpe à chaud

Rubrique Traitement thermique et de surface

- **Luc HERRMANN (H&F)** : Traitements thermo-chimiques des outillages de forge, d'extrusion et d'injection
- **Pascal LAMESLE et al (IRT-M2P Metz)** : Remplacement des revêtements de chrome dur hexavalent par des solutions de chrome trivalent pour des applications outillage
- **Hervé DELORME (groupe H&F)** : Revêtements de surface appliqués aux moules d'injection pour la plasturgie et l'aluminium
- **Jean Michel DEBOIS, Eric DAMOND (IHI Ion Bond)** : Traitements de surface sur outils destinés à la coupe
- **Stéphane GUERIN (CETIM Saint Etienne)** : Polissage d'outillage sur centre d'usinage 5 axes
- **Eric THIEFFRY, Caroline CHOUQUET (Oerlikon France)** : Apport des revêtements PVD dans la mise en forme des tôles HLE, THLE et UHLE

SYNTHESE DU CONGRES

Avant-propos

Le colloque Moules et Outils 2019, organisé conjointement par l'A3TS, le CEM et l'ICA sur le site IMT Mines Albi a rassemblé les 10 et 11 octobre 2019 une soixantaine de personnes dont 70% d'industriels. Ce colloque était constitué de cinq sessions sur quatre demi-journées avec 27 présentations et deux tables rondes à la fin de la première journée. Les cinq sessions ont traité des sujets suivants :

- Evolution des nuances
- Simulation numérique et intelligence artificielle
- Conception et design des outillages
- Dégradation des outillages
- Traitement thermique et traitement de surface

Les deux tables rondes ont abordé deux sujets particulièrement à l'ordre du jour, la fabrication additive d'une part, la simulation numérique et l'intelligence artificielle dans le domaine des outillages d'autre part.

Première session : évolution des nuances : Trois thèmes ont été évoqués, l'amélioration de la qualité des aciers et de leur bilan inclusionnaire, les alliages à haute entropie et leur apport potentiel dans le domaine de l'outillage et l'apport de la fabrication additive en termes de nouvelles nuances ayant à la fois de hautes caractéristiques mécaniques et une très bonne conductivité thermique. Cette session a regroupé **six communications**.

Pierre BLANCHARD d'Erasteel a fait le point sur l'évolution de la métallurgie des poudres depuis une cinquantaine d'années. Cette technique, avec un travail sur l'ensemble des procédés d'élaboration, a permis de réduire sensiblement le taux d'inclusions et d'améliorer les caractéristiques de tenue à la fatigue. Avec une modification de la composition chimique comprenant notamment l'addition de vanadium, il a été possible d'obtenir des résultats sensiblement supérieurs à ceux correspondant à l'acier AISI M50 VIM-VAR, d'où des applications dans les roulements pour l'aéronautique, et sur d'autres nuances, l'obtention d'un bon compromis dureté /ténacité pour des niveaux de dureté compris entre 60 et 64HRC.

Roxane TREHOREL d'Industeel CRMC a présenté une gamme d'aciers Superplast Premium obtenus à l'état prétraité par des moyens d'élaboration classique. Une fusion soignée et une coulée sous vide, dont les niveaux de propreté sont comparables à ceux obtenus par refusion sous laitier, n'ont engendré qu'une légère ségrégation de carbone dans la zone centrale des pièces transformées. L'aptitude au polissage de cette gamme d'aciers est toutefois légèrement inférieure à celle des aciers refondus sous laitier.

Anna FRACZKIEWICZ du centre SMS/LGF de l'Ecole des Mines de Saint Etienne, a présenté les alliages à haute entropie, dont la très haute stabilité permet d'envisager des applications industrielles dans les domaines de l'aéronautique, de l'énergie et du nucléaire. De nouvelles compositions sont à l'étude avec des perspectives de substitution aux alliages base nickel dans le domaine de l'outillage à chaud. Toutefois, cette substitution ne peut s'envisager actuellement en raison du faible nombre de résultats concernant la résistance à la fatigue thermomécanique et au fluage.

Horst ZUNCO de Voestalpine Böhler Edelstahl a présenté l'obtention par fabrication additive de pièces dérivées du 13-8Mo avec addition de titane et d'aluminium dont les caractéristiques mécaniques et la résistance à la corrosion sont extrêmement intéressantes, d'où des applications dans l'industrie aéronautique, l'automobile et la plasturgie. Ces résultats sont la conséquence de la finesse de la microstructure et de la forte réduction de la taille des inclusions.

Père FERRER de Rovalma a présenté une nouvelle gamme d'outils Fastcool dont les propriétés mécaniques sont équivalentes à celles des aciers à outils classiques, mais avec une conductivité thermique nettement améliorée. De tels résultats peuvent être obtenus par la fabrication additive et l'optimisation des circuits de refroidissement.

La sixième communication de Jens BERSTRÖM de l'université de Karlstadt a été modifiée par rapport au programme initial. La communication présentée en séance centrée sur les possibilités offertes par la technologie de la fabrication additive en termes de résistance à chaud et de fatigue thermomécanique.

Deuxième session : simulation numérique et intelligence artificielle : Cette session a regroupé **cinq communications** dont deux sur l'apport de l'intelligence artificielle pour la conception d'alliages à hautes caractéristiques thermomécaniques et trois sur l'apport de la simulation numérique pour l'optimisation de moules et outils soumis à de fortes contraintes thermomécaniques.

Franck TANCRET de l'Université de Nantes a fait une présentation d'ensemble de l'Intelligence Artificielle et de ses possibilités en matière de prédiction des propriétés, sélection des meilleurs cas et optimisation multi objective. Cette technique ne peut être utilisée qu'avec certains types de modèles peu consommateurs de temps, comme par exemple Calphad pour le développement d'alliages base nickel économiques. Des projets d'études avec Framatome pour les revêtements, Aperam pour les aciers inoxydables et Aubert et Duval pour les superalliages sont en cours.

Hervé MOTTE d'ARRK Shapers France a présenté ensuite le projet I-tech Mould pour le développement de moules optimisés thermiquement et destinés à la plasturgie, à la coulée de l'aluminium sous pression et à la mise en forme des composites. La méthode consiste à estimer le temps optimal de refroidissement, d'en déduire la géométrie optimale et de prévoir le cycle de refroidissement ainsi que son homogénéité. Des gains de temps de 30% ont été obtenus en plasturgie. I-tech Mould a permis de concevoir une technique de fabrication d'outillage optimisé thermiquement pour la fabrication de petites et grandes pièces en plasturgie et coulée sous pression d'aluminium.

Thomas PERET de l'IRT Jules Verne à Nantes, a présenté le projet SITCOM destiné à optimiser le processus de mise en chauffe des outillages à l'aide d'un couplage thermo- mécanique. L'objectif est d'améliorer le design des outillages dans les zones à risque pour augmenter leur durée de vie.

Patrick HAIRY du CTIF Sèvres a présenté l'apport de la simulation numérique et de l'intelligence artificielle dans le domaine des moules destinés à la transformation des métaux. Des plans d'expériences et des modules d'optimisation en simulation process peuvent permettre l'évaluation d'un grand nombre de configurations de manière automatisée. L'intelligence artificielle avec les systèmes experts, le traitement des données et la prise en compte de géométries complexes constitue une technologie complémentaire de la simulation numérique.

Julien CHARBONNEAUX d'ESI France, a présenté une offre complète pour la mise en forme de tôles avec le chiffrage pièce, la cotation technico-économique, la conception et la mise au point des outillages de travail à froid et à chaud. Des exemples de réalisation de pièces ont été donnés. L'approche actuelle permet de réaliser un couplage mécanique entre la simulation de l'opération d'emboutissage et le calcul de déformations de l'outillage.

Troisième session : conception et design des outillages : Cette session a abordé trois thèmes : la fabrication additive et son apport, aussi bien pour la mise au point de nouvelles nuances optimisées sur le plan microstructural que pour le développement d'outils ayant une très bonne conductivité thermique, l'apport du brasage sous vide pour améliorer les propriétés de conductivité thermique des moules et outils et l'apport de l'électropolissage pour la finition de surface des moules. Cette session a regroupé **six communications**.

Emmanuel NIGITO de l'ICA Mines Albi a présenté un exemple de réalisation de pièces par fabrication additive : les forets endodontiques en alliage Ni-Ti à mémoire de forme. L'optimisation du process laser sur lit de poudre a permis de contrôler à la fois la géométrie et la microstructure. Les pièces réalisées conservent toujours leurs propriétés de superélasticité.

Philippe BERTRAND de l'ENISE a présenté un exemple de réalisation d'un nouveau matériau par fabrication additive d'une nuance d'acier à outil inoxydable du type X40CrMoVN16-2 pour satisfaire le meilleur compromis possible entre caractéristiques thermomécaniques et résistance à la corrosion. Les résultats montrent que si l'on obtient de bons niveaux de dureté avec une conductivité thermique améliorée, la tenue à la fatigue est encore perfectible.

Corentin LIBIOULLE du CRM de Liège a présenté le projet Adept regroupant des industriels belges et allemands, ainsi qu'une université allemande associée au CRM. Son but est d'obtenir sur des pièces de géométrie complexe (moules d'injection) et parfois de grande dimension (jusqu'à 1m) un état de surface optimisé pour faciliter l'éjection des pièces mises en forme. Les conditions d'électropolissage ont été adaptées à des nuances classiques d'aciers à outils sur des pièces modèles présentant des états de surface types de moules à injection.

David MULLER, représentant Addilys, résultat du regroupement des sociétés AddUp et IPC, a présenté tout d'abord dans le cadre de la quatrième communication les deux sociétés : AddUp réalisateur de machines d'impression 3D et IPC, centre technique de la plasturgie et des composites, réalisant ainsi le lien entre la fabrication additive et la connaissance en plasturgie et thermique. Un exemple a été donné au cours de la cinquième communication sur la fabrication additive des moules d'injection : la démarche adoptée permet à la fois une réduction du temps de production et un gain sur la qualité du produit fabriqué.

Robin BUTTY de la société Bodycote a présenté un autre moyen d'optimisation des moules par le brasage sous vide. Cette technique permet de concevoir des empreintes en plusieurs parties avec une optimisation des circuits chauds, un meilleur rendement et surtout une meilleure homogénéité des conditions de refroidissement. La brasure est un alliage base nickel pour les outillages de plasturgie, un traitement post brasage est possible (traitement de surface, revêtement) et un contrôle final de l'étanchéité de l'outil est réalisé à l'hélium.

Quatrième session : dégradation des outillages : Cette session a abordé trois thèmes : l'usure des moules de verrerie, l'usure des outils de découpe et d'emboutissage à chaud ainsi que l'usure par frottement sur l'outil lors de l'étape d'enroulement de ressorts. **Quatre communications** lui ont été consacrées.

Ousseini MAROU, du CRITT MDTs Charleville Mézières a présenté un outil de simulation de la dégradation des moules au contact du verre. Un tribomètre haute température a été utilisé pour caractériser différentes solutions matériaux pour outillages : la fonte FGS et la fonte FGL avec des revêtements Ni-NiG (nickel graphite), ainsi que des revêtements de carbures WC. On note un bon comportement du revêtement Ni-NiG sur fonte FGS et la non adhérence du verre sur les revêtements de carbures WC.

Mirenxtu DUBAR, de l'Université Polytechnique des Hauts de France, a présenté l'usure des outillages lors de l'étape d'enroulement de ressorts en acier. Une simulation du procédé a été réalisée pour déterminer les paramètres du process afin de les reproduire sur un banc d'essais. Il a été constaté une usure par fissuration, conséquence d'un effet de choc, une abrasion avec incrustation d'oxydes et de lubrifiant, ainsi qu'une dégradation par écaillage et rupture. Le banc d'essais a mis en évidence l'influence favorable du troisième corps. L'étude doit se poursuivre avec la prise en compte de l'influence de l'usure sur le coefficient de frottement, pour déterminer un critère prédictif de l'endommagement.

Jérôme ROCCHI, de Liebherr Aerospace a présenté la problématique de formage des tôles minces en superalliages pour réaliser des échangeurs à plaques et à ailettes. Une simulation du formage a été mise en place pour évaluer les paramètres influents de l'outil de mise en forme et assurer une aide au réglage. Le développement d'un outil de mesure en ligne de la bavure à la découpe pourra assurer le suivi de l'usure des outils.

Christine BOHER, de l'ICA-IMT Mines Albi, a présenté la dégradation des lames de découpe à chaud de l'acier 22MnB5 formé à chaud avec un revêtement AluSi. Il s'agit d'un projet mis en place avec ArcelorMittal avec le développement d'un dispositif d'essais qui permette d'étudier l'influence des différents paramètres : température de la tôle et jeu de fonctionnement notamment. Un indicateur d'usure des arêtes de coupe est proposé sur la base des mesures de leur profil d'usure. Les mécanismes principaux d'usure sont le transfert du revêtement Al-Si des tôles sur la surface des lames et la déformation plastique de la surface du tranchant.

Cinquième session : traitement thermique et traitement de surface des outillages : Cette session a abordé six thèmes : les innovations dans les traitements thermochimiques des outils de forge, d'extrusion et d'injection, les revêtements appliqués aux moules d'injection pour la plasturgie et l'aluminium, les revêtements sur outils destinés à la mise en forme des tôles à très hautes caractéristiques mécaniques, les traitements de surface sur outils de coupe, l'apport du polissage des outils et les solutions de remplacement du chrome hexavalent pour les revêtements de chrome dur sur outils. Cette session a regroupé **six communications**.

Luc HERRMANN du groupe HEF a présenté les traitements thermochimiques des outillages de forge, d'extrusion et d'injection au moyen d'une technique de nitrocarburation en milieu liquide ionique dénommée CLIN (Control Liquid Ionic Nitriding) avec un traitement de post oxydation. Cette technologie en milieu liquide satisfaisant les critères de REACH assure une bonne homogénéité de la couche de combinaison de nitrure ϵ , même sur des outillages de forme complexe, avec une réduction du temps de traitement et comme conséquences une réduction des déformations et des risques de rupture des outillages.

Pascal LAMESLE de l'IRT M2P de Metz a présenté les résultats du projet HCTC (High Chromium Trivalent Chromium) en partenariat avec Coventya. L'utilisation de courants pulsés et l'optimisation de la chimie du

bain ont permis de développer un nouveau produit chez Coventya (Duratri 240) et de l'utiliser sur un pilote de 600l. Le carbone libéré lors de la réduction du chrome trivalent entraîne une augmentation de la dureté du dépôt avec la température (à partir de 200°C), avec comme conséquence une incidence néfaste sur la limite de fatigue. Les retours d'expérience sont toutefois positifs pour diverses applications industrielles (tiges d'amortisseurs, filières de pultrusion...). Un nouveau projet centré sur l'aéronautique vise à abaisser le taux de carbone libéré lors de la réduction du chrome trivalent.

Nicolas LE CHAPELAIN du groupe HEF a présenté les revêtements de moules d'injection pour la plasturgie et l'aluminium. Dans le domaine de la plasturgie, l'injection de matières chargées provoquant de l'usure abrasive et de la fatigue thermique est améliorée par un revêtement de TiBN, les problèmes de collage sont fortement réduits par le revêtement de Cr_xN_y pour des températures de contact relativement élevées et le revêtement DLC pour des températures plus basses. Les interactions avec l'aluminium en coulée sous pression sont fortement réduites par l'utilisation de revêtements de TiBN ou TiAlN qui résistent jusqu'à des températures de 800°C. Un nouveau revêtement a été développé en complément au DLC, il s'agit du ta-C dont le niveau de dureté est compris entre 4000 et 6000HV, ce revêtement complète le domaine d'utilisation des DLC.

Eric DAMON d'IHI IonBond France a présenté les traitements de surface sur outils destinés à la coupe. Dans ce domaine, le rôle du revêtement est d'élargir le domaine de coupe en fonction de la vitesse. Quatre solutions ont été présentées, TiAlN, AlCrN, TiSiN et ta-C. Le revêtement TiSiN est utilisé pour l'usinage des aciers de haute dureté, l'AlCrN pour l'usinage à sec des aciers de niveau de dureté inférieur à 45HRC, le TiAlN développé pour l'usinage conventionnel s'adapte très bien à l'UGV en raison de ses bonnes propriétés de tenue aux chocs et aux vibrations, le revêtement ta-C est utilisé pour l'usinage de l'aluminium et des polymères.

Stéphane GUERIN du CETIM a présenté le polissage d'outillages sur centre d'usinage 5 axes avec 3 dispositifs ayant fait l'objet d'investigations : le martelage, le porte outil monté dans la broche machine, l'outil élastomérisé à pellets de diamant monté dans le porte outil. Les essais réalisés sur acier X38CrMoV5 traité pour 52HRC montrent une amélioration de l'état de surface quelle que soit la rugosité initiale avec dans certains cas, une augmentation de la dureté superficielle.

Eric THIEFFRY d'Oerlikon-Balzers a présenté les nouvelles solutions préconisées pour améliorer la durabilité des outillages destinés à l'emboutissage des tôles HLE et THLE, avec une bonne qualité des pièces produites. Après avoir indiqué les principales sollicitations des outils et leurs modes de dégradation, les solutions optimisées ont été présentées avec tout d'abord une très bonne préparation de surface, puis l'utilisation d'un traitement duplex qui renforce le substrat par traitement thermo-chimique et enfin le revêtement type CrAlN qui permet de résoudre les problèmes d'usure par abrasion et adhésion.

Tables rondes : La première journée du colloque s'est terminée par deux tables rondes, la première relative à la fabrication additive, la seconde sur l'intelligence artificielle et la fabrication additive.

La première table ronde consacrée à la fabrication additive, pilotée par Philippe BERTRAND de l'ENISE et Farhad REZAÏ-ARIA de l'ICA Mines Albi, a mis en évidence un certain nombre de points :

- Il est nécessaire d'élaborer de nouveaux matériaux avec de nouvelles compositions chimiques et pour cela d'utiliser les moyens apportés, d'une part par l'intelligence artificielle, et d'autre part par des logiciels comme Thermo-calc pour la recherche d'alliages hors équilibre ;
- La fabrication additive est tout à fait compatible avec une approche multi-matériaux, comme par exemple la fonte et son revêtement base nickel déjà expérimenté chez PSA ;
- L'approche fabrication additive nécessite une adaptation métallurgique et par conséquent une formation du personnel ;
- Il est à signaler le démarrage de la fabrication additive par la technique fusion de fil pour l'élaboration d'outils de dimensions importantes et en particulier de moules.

La seconde table ronde sur la simulation numérique et l'intelligence artificielle, pilotée par Luc PENAZZI de l'ICA Mines Albi, avec l'ensemble des auteurs de la deuxième session du colloque, a montré un certain nombre de points importants :

- La simulation numérique process a acquis une haute maturité, il faut l'adapter à d'autres domaines, par exemple le post traitement, mais cela nécessite un accompagnement des industriels par les centres techniques, car seuls, les grands groupes ont les moyens de suivre les process ;
- L'intelligence artificielle utilise des outils mathématiques qui sont accaparés par les statisticiens, il faut au niveau métallurgique développer des modèles qui prennent en compte les lois de comportement et donc accumuler beaucoup de données ; seuls quelques grands groupes ont démarré cette méthodologie, par exemple Carpenter aux USA, Safran et ArcelorMittal en France ;
- Les industriels ont dans l'ensemble peu de recul vis-à-vis de ces technologies où il faut construire les bases de données. Comment utiliser les modèles et récupérer les données avec les barrières constituées par la complexité de certains logiciels ?
- Un fossé s'est créé entre les grands groupes et les PME avec le développement de ces nouvelles technologies qui sont très éloignées du travail commun, d'où l'intérêt d'une aide des PME par les centres techniques, sous réserve de résoudre les problèmes de confidentialité. Si ces problèmes d'assistance ne sont pas réglés, le fossé risque encore de s'élargir avec la mise en place de l'industrie 4-0.