

LA REVUE

# forge et fonderie

JUIN | 2019

N°18

## Au sommaire

- 13** Le polissage par martelage - Applications sur les outillages de Forge
- 18** Thermo-Calc®, un outil de métallurgie numérique
- 26** Régulation thermique des outils
- 31** Les jumeaux numériques dans l'industrie
- 37** Visite des BTS fonderie du Lycee Loritz de Nancy dans des entreprises

# Siif

and your casting fits

## LE PROCESS DE FINITION SUR-MESURE POUR VOTRE FONDERIE

### NOUVELLE CELLULE MULTI-CAMPAGNES !



REFROIDISSEMENT



DESSABLAGE



ÉBAVURAGE ROBOTISÉ



ÉBAVURAGE DÉTOUREUSE



VISION, CONTRÔLE ET INSPECTION



SCIAGE ET PRÉ-USINAGE



**GIFA**  
MEET US  
RETROUVEZ-NOUS  
Hall 15 Stand H30  
DÜSSELDORF/GERMANY  
25-29 JUNE 2019



**Siif S.A.S.**  
130 rue Léonard de Vinci  
56850 Caudan - FRANCE  
info@siif.fr - +33(0)2 97 81 04 30

[www.siif.fr](http://www.siif.fr)

**FOUNDRY –  
A PASSION FROM  
OUR HEART.**

**BENNY DANIELS, DIRECTEUR DES SERVICES TECHNIQUES**

**“NOUS VIVONS  
POUR LA FONDERIE”**

**Rendez vous à la GIFA:  
Hall 12, Booth A22**

**Pour des solutions optimales.**

Avec ASK Chemicals vous êtes bien préparés pour le futur. Notre équipe du Service Technique vous fournit l'assurance et la confiance pour surmonter tous les obstacles de production. Réduisez vos coûts et augmentez votre productivité dès aujourd'hui!

[www.gifa.ask-chemicals.com](http://www.gifa.ask-chemicals.com)

**ASKCHEMICALS**  
We advance your casting



# Sommaire

N° 18/2019



## EDITORIAL

- 5** Mobilisation Générale

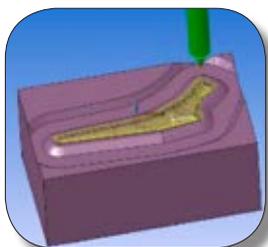
## BREVES

- 8** Réunion Territoire chez Ferry-Capitain le 19 mars 2019
- 8** Mise en place du taux réduit « Fonctions supports » pour les accidents du travail et maladies professionnelles
- 9** Réunion Territoire chez Le bélier à Vérac



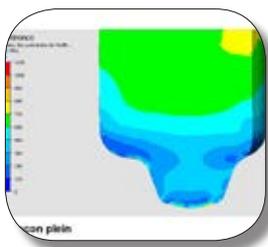
## TECHNIQUE

- 13** Le polissage par martelage  
Applications sur les outillages de Forge
- 18** Thermo-Calc®, un outil de métallurgie numérique.  
Principes et applications.
- 26** Régulation thermique des outils
- 31** Les jumeaux numériques dans l'industrie
- 37** Mise au point d'un procédé nouvellement breveté pour accélérer le durcissement des noyaux de sable inorganique



## FORMATION

- 40** Visite des BTS fonderie du Lycee Loritz de Nancy dans des entreprises
- 42** Les compagnons du devoir





## VIE DE LA PROFESSION

- 44** Voyage du GFO à Séville, du 4 au 7 avril 2019
- 46** Un nouveau responsable de l'animation adhérents et des groupements



## AGENDA

- 47** Les rendez-vous de la profession



# LA REVUE forge et fonderie

Revue professionnelle trimestrielle  
éditée par CIFORGE.

### CIFORGE

45 rue Louis-Blanc  
92400 Courbevoie  
Tél. : 01 43 34 76 17  
Fax : 01 43 34 76 31  
E-mail : [contact@forgefonderie.org](mailto:contact@forgefonderie.org)

### Directeur de la publication

Nicolas Grosdidier

### Rédacteur en chef

Wilfrid Boyault

### Comité de rédaction

Wilfrid Boyault, P. Lubineau,  
C. Macke-Bart, O. Revel,  
P.-H. Renard

### Rédaction

Heidi Palzer  
Tél. : 01 43 34 76 68  
[h.palzer@forgefonderie.org](mailto:h.palzer@forgefonderie.org)

### Abonnement

4 numéros : 95,34 € TTC

### ISSN 2493-5824

### Publicité

Régie Publicitaire F.F.E. (Française de  
Financement et d'Édition)  
15 rue des Sablons - 75116 Paris  
Responsable de publicité :  
Isabelle de la Redonda  
Tél. : 01 53 36 20 42, [i.redonda@ffe.fr](mailto:i.redonda@ffe.fr)  
Responsable technique :  
Laura Méchineau  
Tél. : 01.43.51.91.76, [laura.mechineau@ffe.fr](mailto:laura.mechineau@ffe.fr)

Les publicités paraissent sous la seule  
responsabilité de leurs annonceurs.  
Les articles sont rédigés sous la respon-  
sabilité de l'auteur, leur contenu (textes  
et visuels) n'engage pas la revue.

Toute reproduction, même partielle,  
d'articles ou d'illustrations nécessite  
l'autorisation préalable de la rédaction.

Tirage : 3 000 exemplaires

### Impression

Printcorp



Imprimé sur papier recyclé et encres  
100 % végétales

### Photo de couverture

Collecteur

### Photographe

Dominique Sarraute



Pour la prévention des dommages aux installations, des explosions de four et des fuites de métal



### SAVEWAY® un système de mesure de l'état des garnitures réfractaires

- ✓ le seul système de mesure du monde pour la détermination continue de l'épaisseur résiduelle des garnitures réfractaires
- ✓ réduction des pertes de production et des coûts de maintenance
- ✓ la durée de vie des garnitures réfractaires et des composants sera optimisée
- ✓ plus de sécurité pour les opérateurs de production et l'équipement



Visitez notre stand à GIFA!  
Halle 10 Stand D/60



## PRODUITS FORGÉS

TRAVAIL À CHAUD DES

## ACIERS SPÉCIAUX

POUR DES APPLICATIONS CRITIQUES



ALTIFORT  
SMFI

- › 150 ans d'expérience
- › Concepteur de solutions sur-mesure
- › Performance et Excellence Opérationnelle
- › Gestion de projet



📍 13 avenue des Tilleuls - 65000 Tarbes  
☎ 06 30 12 80 73  
✉ sales@altifort-smfi.com  
🌐 www.altifort-smfi.com



# Mobilisation Générale

Tels sont les termes de Bruno Le Maire, Ministre de l'Economie et des Finances, lorsqu'il réunissait, le 11 mars dernier, constructeurs, équipementiers, régions, syndicats et organisations professionnelles pour travailler à l'accompagnement des évolutions de la filière automobile, c'est-à-dire, de fait, essentiellement, à l'amortissement des conséquences de la chute des parts de marché de la motorisation diesel.

En effet, les chiffres paraissent être sans appel.

Alors que la motorisation diesel représentait 72 % des immatriculations en France en 2012, cette part de marché est tombée à 47 % en 2017, 40 % en 2018 et même 34 % en janvier 2019. En Europe, elle est passée de 55 % à 36 % entre 2012 et 2018 et certaines études avancent les chiffres de 25 % en 2020 et même 5% en 2030.

Or cette chute impacte une partie de la filière automobile française qui occupe environ 38 000 salariés et pourrait, selon l'Observatoire de la Métallurgie (UIMM), conduire à la disparition à court terme de quelques 15 000 emplois. Un autre chiffre en dit long sur l'exposition particulière des entreprises concernées : elles consacrent toutes, quelle que soit leur taille, PME, ETI ou grands groupes, de 50 à 100 % de leur activité au diesel.

C'est dans ce contexte que les professions de la forge et de la fonderie ont été, dès l'automne 2018, parmi les premières à vivre les conséquences concrètes de la réalisation de ce qui, en quelques mois, est devenu une sorte de « risque » diesel. Le sort des fonderies jumelles d'Ingrandes-sur-Vienne, fonderies automobiles emblématiques, autrefois créées par Renault, employant près de 800 salariés, a, ainsi, très rapidement symbolisé, notamment pour les pouvoirs publics et les media, ce à quoi cette mutation diesel confronte, très concrètement, la filière.

D'où, au-delà de l'attention portée à ce dossier particulier, la mise en place, dès ce moment, d'une première série de mesures d'accompagnement du secteur se donnant pour but de favoriser une prise en charge et un traitement préventif, en amont des difficultés.

Outre un accompagnement, par des conseils externes, d'acteurs identifiés comme particulièrement dépendants du diesel, à l'initiative de la DIRECCTE, on peut citer, porté par BPI France, l'appel à projets PIAVE visant à soutenir des projets innovants et ambitieux, portés par des PME ou des ETI, en vue de mener à bien la diversification et la transition de leurs activités diesel vers d'autres secteurs industriels. Ou encore, de façon moins immédiatement liée à la problématique diesel mais l'intégrant néanmoins assurément, l'accélérateur PME ETI automobile également porté par BPI France et dont font partie un certain nombre d'entreprises des professions de la forge et de la fonderie.

Mais ces premières initiatives et la solution qui vient d'être entérinée par le tribunal de commerce pour les fonderies d'Ingrandes ne doivent pas conduire à la conclusion que la tempête serait derrière nous et que la mobilisation pourrait marquer le pas.

C'est même précisément l'inverse que Bruno Le Maire et la Secrétaire d'Etat en charge de l'industrie, Agnès Pannier-Runacher, ont souhaité signifier, le 11 mars dernier, en initiant ce qui peut apparaître comme la phase 2 du plan d'action pour accompagner la filière.

Ce plan entend désormais travailler également sur le marché lui-même puisque a été annoncé le lancement d'une étude scientifique indépendante portant sur les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), d'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>) et de particules, en conditions réelles, des véhicules récents, tant diesel qu'essence.

Il s'agit d'évaluer le bien-fondé de la demande de la filière, fondée sur le principe de la neutralité technologique, de voir traiter diesel et essence sur un pied d'égalité, en considération des seuls résultats obtenus par chaque technologique, pour l'attribution de la vignette Crit'Air 1 dont on sait qu'elle est le futur sésame d'accès à un certain nombre de centres urbains et est aujourd'hui réservée à des véhicules essence récents ou hybrides rechargeables.

Mais cette approche demeure couplée avec la volonté renforcée, semble-t-il, de rester en alerte, au plus près des entreprises. Sur la base d'une cartographie précise des sites industriels potentiellement menacés, les ressources de la Direction Générale des Entreprises et leurs relais dans les territoires paraissent ainsi particulièrement mobilisés pour être prêts à faire face à toute évolution de la situation.

C'est en tout cas, clairement le message passé par les services à votre organisation professionnelle lors de tous ses contacts récents.

Alors n'hésitons surtout pas à faire tout l'usage utile de cette mobilisation.



Wilfrid BOYAULT  
Rédacteur en chef

## Réunion Territoire chez Ferry-Capitain



Le 19 mars dernier Ferry-Capitain a accueilli une réunion d'information territoire à laquelle ont participé une quinzaine d'industriels.

Outre les sujets d'actualité, de la fédération et des entreprises, Nicolas Créon a présenté un point d'avancement sur la révision des BREFs et sur la régénération thermique des sables, Laurent Parin et Sergio Da Rocha ont pour leur part fait un point sur la formation : formations mutualisées, dispositifs POEC, CARED, réforme de la formation professionnelle et financement.

Cette riche journée de travail et d'échanges s'est terminée avec la visite du site de Vecqueville et des ateliers de production, un grand merci à Christian Fontaine et à ses équipes pour l'accueil !

## Mise en place du taux réduit « Fonctions supports » pour les accidents du travail et maladies professionnelles

Un employeur a la possibilité de bénéficier d'un taux Accidents du travail et maladies professionnelles (AT/MP) réduit pour ses salariés qu'il déclare comme non exposés au risque principal de l'établissement.

Les conditions d'octroi de ce taux réduit, appelé taux « Bureau », étaient particulièrement complexes. Ce système a été réformé et remplacé, depuis le 2 mars 2017, par un taux « Fonctions supports » qui peut être appliqué à tous les salariés exerçant une fonction support de nature administrative : secrétariat, accueil, comptabilité, ressources humaines, ...

Le taux « Fonctions supports » est attribué selon trois critères :

- la taille de l'entreprise,
- la fonction exercée par le salarié,
- la non-exposition au risque du local de travail.

Le salarié est désormais considéré comme non exposé au risque princi-

pal de l'établissement s'il travaille dans un local fermé, même si celui-ci est situé dans un atelier. La condition de sédentarité et les conditions d'accès du salarié à son local de travail ont été supprimées.

Les entreprises en taux collectif (moins de 20 salariés) et en taux mixte (de 20 à 149 salariés) peuvent solliciter l'attribution du taux « Fonctions supports » auprès de leur caisse régionale (Carsat, Cramif ou CGSS). Pour cela, le formulaire de demande (disponible sur [ameli.fr/entreprise](http://ameli.fr/entreprise)) doit être accompagné de la liste des salariés éligibles, de l'intitulé de leur poste et d'un plan de l'entreprise identifiant le local occupé par ces salariés.

Les deux dispositifs coexistent jusqu'au 31 décembre 2019. Les nouvelles demandes de taux réduits sont instruites selon les règles du nouveau dispositif.



## PARTENAIRE DES FORGES



**CADDY 80**  
Cisaille mécanique à froid pour billettes



**S 50**  
Scie à disque "grande vitesse" pour billettes



**HF**  
Presse hydraulique



**DD**  
Presse à vis à moteur linéaire rotatif avec robot manipulateur

### Ficép France SAS

Z.I Les Platanes, FR 33360 Camblanes  
Tel. +33 (0) 556 201555  
Fax +33 (0) 556 201556

[www.ficép-france.fr](http://www.ficép-france.fr)

## Réunion Territoire chez Le bélier à Vérac



Le 6 février 2019 Le Bélier, où sont situés le siège du groupe et la récente fonderie, a accueilli les membres de la Fédération Forge Fonderie pour une réunion et une visite du site. Divers sujets ont été abordés au cours de la réunion, notamment l'actualité de la fédération et des industriels présents, ainsi qu'une présentation des services de la FIM ... Cette journée a été l'occasion de partager un moment amical ensemble pendant le déjeuner.

Les nouveaux équipements de la nouvelle fonderie sable sont dédiés à l'aéronautique et au prototypage automobile, le site qui a réalisé 14 M€ de CA en 2018 compte aujourd'hui 130 collaborateurs.

Merci à Daniel Cabrol, Philippe de Tonnac et Cyrille Pointeau pour leur accueil et pour la riche visite de leur outil de production.

### FORMING THE FUTURE



### MSE LA PRESSE À EXCENTRIQUE AVEC ENTRAÎNEMENT SERVO DE SCHULER.

#### FIABLES ET FLEXIBLES – LES PRESSES À EXCENTRIQUE EN FORGE.

Les servopresses Schuler à entraînement excentrique sont principalement utilisées dans le formage à mi-chaud. Les presses de la série MSE ont été optimisées en termes de temps de changement de fabrication et de rendement net et se distinguent par la qualité exceptionnelle des composants, ce qui leur permet de relever les défis les plus exigeants.

#### Vos avantages :

- Vitesse de production élevée
- Qualité optimale
- Large gamme de pièces
- Temps de contact sous l'effort réduit au minimum
- Laissant plus de temps pour le refroidissement de l'outil
- Longue durée de vie
- Grand espace d'installation pour les outils (laboratoire outils)
- Faibles tolérances et qualité élevée des pièces produites



[www.schulergroup.com/  
forging\\_fr](http://www.schulergroup.com/forging_fr)



**SCHULER**   
Member of the ANDRITZ GROUP

# TRANSVALOR : ACTEUR DE LA TRANSFORMATION DIGITALE CHEZ LES FORGERONS ET LES FONDEURS

Transvalor propose aux entreprises des solutions de simulation pour les procédés de mise en forme et nous informe sur les toutes dernières nouveautés appliquées au secteur de la forge et de la fonderie. Éclairage avec Stéphane Andrietti, Directeur Marketing & Communications au sein de **Transvalor**.



Stéphane ANDRIETTI

## **Pouvez-vous nous présenter Transvalor, son positionnement et son cœur de métier ?**

Transvalor propose des solutions de simulation pour les procédés de mise en forme destinée à l'industrie manufacturière (forgeage, frappe à froid, fonderie, soudage). Nous offrons également des solutions de simulation liées à la prédiction de microstructure et au traitement thermique.

Depuis plus de 30 ans, nous nous positionnons en tant qu'acteur clé de la simulation numérique et éditeur de logiciels performants. Nous avons su pérenniser un positionnement de référence sur ce secteur tout en maintenant une véritable qualité de prestation.

Actuellement, nous cherchons à diversifier nos activités pour élargir notre champ d'intervention et inclure de nouveaux procédés à simuler.

## **Plus particulièrement, qu'en est-il de votre accompagnement des forgerons et des fondeurs ? Quels sont les offres et les services que vous leur proposez concrètement ?**

Au-delà de la proposition standard pour des licences de nos logiciels de simulation, nous adaptons une démarche de plus en plus impliquée. Nous avons fait le choix d'offrir des services en ingénierie pour réaliser les calculs à la demande. Il s'agit essentiellement de prestations qui vont s'adresser entre autres aux PME et aux entreprises à taille humaine n'ayant pas nécessairement la possibilité d'acquérir le logiciel faute de moyens humains ou matériels.

Concrètement, nous leur offrons une prestation de service sur-mesure en nous appuyant sur nos experts en simulation pour accompagner leur développement et les aider à optimiser leurs procédés.

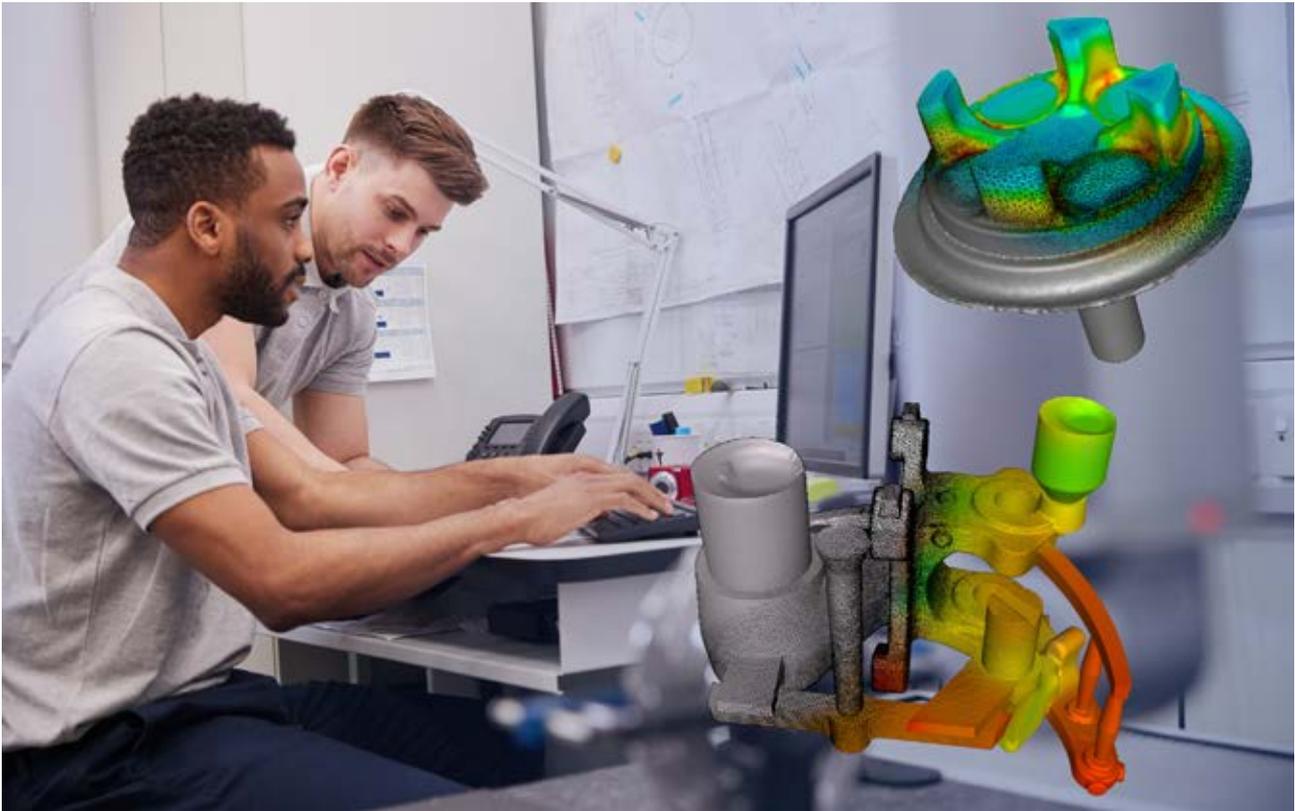
Cette offre de service est aussi valable pour les sociétés à taille plus importante qui, face à des problématiques complexes ou des pics de charge, font appel à l'expertise de Transvalor. Notre ambition est de faire valoir notre savoir-faire pour délivrer une expertise métier qui va au-delà de la simple fourniture du logiciel.

## **En quoi l'offre Transvalor représente-t-elle un outil stratégique pour l'industrie ? Comment définissez-vous la plus-value de vos solutions ?**

La simulation a pour objectif d'obtenir des pièces de haute qualité au meilleur prix. Cela permet de répondre à l'exigence de productivité des industriels : produire plus vite, au meilleur coût, avec plus de fiabilité et d'innovation.

Dans ce cadre, Transvalor se focalise sur l'optimisation des pièces et des procédés de ses clients avec des solutions offrant de nombreux avantages :

- La qualité-sécurité, nous proposons des solutions de simulation précises et prédictives pour augmenter la sécurité et leur permettre de produire des pièces avec zéro défaut : un élément clé pour les industries à risque notamment l'aéronautique et le nucléaire ;
- L'optimisation des procédés de fabrication c'est-à-dire respecter les critères de coût avec un focus sur le gain de matière et l'augmentation de la durée de vie des outils de fabrication (matrice, moule...)
- L'innovation, la simulation permet de tester virtuellement des solutions novatrices et d'imaginer des concepts plus radicaux sans passer par le prototypage. Cela permet d'avoir une forte liberté d'action et d'élargir le champ des possibles ;



- L'orientation métier de nos solutions, nous nous attachons à proposer un environnement logiciel qui reflète les terminologies et les données propres au métier des utilisateurs.

#### Quels sont les temps forts de l'année 2019 ?

La mise à disposition de la dernière version de notre logiciel FORGE NxT® a marqué le début de l'année 2019. Cette version a été mise à disposition au mois de mars et elle contient toute une série de nouveautés dont : le traitement thermique pour les alliages d'aluminium, les courbes limite de formage et la simulation de l'électro-refoulage.

Nous nous focalisons actuellement sur l'organisation de la deuxième édition des Transvalor International Simulation Days (du 15 au 17 octobre). Cet événement majeur rassemble l'ensemble de notre clientèle autour de nos solutions. À cette occasion, nous allons accueillir à Sophia-Antipolis plus de 150 participants pour échanger autour de nos solutions et exposer les dernières nouveautés de nos logiciels et services.

#### Pour conclure, quels sont vos perspectives et les principaux axes de développement sur lesquels vous vous focalisez actuellement ?

Nous poursuivons le développement de notre produit THERCAST® qui est au cœur de notre proposition de valeur. Initialement destiné à la coulée de lingot et à la coulée continue, nous ciblons désormais aussi très clairement l'ensemble des technologies en fonderie (moulage sable, coulée gravitaire, coulée sous pression, coulée centrifuge, moulage à modèle perdu...) et pour tout type de matériau (acier, fonte, métaux non-ferreux...).

Fort de notre expertise et du soutien de nos partenaires de recherche, nous avons en effet la capacité de gagner d'importantes parts de marché.

Au-delà des aspects purement liés à la mise en forme, nous mettons également un accent très fort sur la métallurgie en vue d'apporter des réponses optimales à des problématiques complexes comme la prédiction de taille de grain ou la trempe par induction.

Soucieux d'apporter toujours plus de valeur ajoutée à nos clients, nous misons sur la promotion de l'interopérabilité entre nos différents logiciels. Techniquement, nous proposons déjà une relation entre la partie coulée de métal et la partie forgeage. Demain d'autres connexions seront disponibles en particulier pour simuler le traitement thermique des pièces brutes de coulée et ainsi optimiser leurs caractéristiques mécaniques. Notre objectif est de pouvoir assurer une communication simple, rapide et efficace entre nos logiciels mais aussi avec d'autres logiciels CAE afin de simuler *in fine* la chaîne complète de fabrication. ■

#### Chiffres clés

- Plus de 65 collaborateurs ;
- 500 clients à l'international ;
- Créée en 1984 ;
- Leader en simulation des procédés ;
- Plus de 20 projets de R&D en cours.

[www.transvalor.com](http://www.transvalor.com)



## DIFFRACTION & SPECTROMETRIE

Stress X



Mesure de stress /  
contrainte par diffraction  
de Rayon X

AreX L



Analyseur d'Austénite  
résiduelle

Metal Lab Plus S7



Spectromètre à émission  
optique  
pour l'analyse des alliages  
métalliques

Atlantis S9



Spectromètre à émission  
optique  
pour l'analyse des alliages  
métalliques

**UNE GAMME COMPLETE A VOTRE DISPOSITION DEPUIS 1993 EN FRANCE !**

**VENTE - INSTALLATION - FORMATION - MAINTENANCE - ETALONS -ACCESSOIRES**

Site Web : [www.gnrfrance.com](http://www.gnrfrance.com) / Tél : +33 (0)381 590 909 / Mail : [doc@gnrfrance.com](mailto:doc@gnrfrance.com)



**screw presses  
for forging**

steel

brass

special alloy

titanium

copper

aluminium





Stéphane GUERIN  
Ingénieur Procédés  
Cetim

# Le polissage par martelage

## Applications sur les outillages de Forge

Les sociétés de la profession Forge qui réalisent leurs outillages cherchent à réduire leur coût et leur délai de fabrication tout en améliorant la qualité et augmenter la durée de vie de ces derniers.

Le polissage des outillages avec le procédé de polissage par martelage peut apporter des réponses à ces attentes en complément des solutions de fabrication actuellement utilisées.

### Polissage par martelage des outillages

La technologie de martelage consiste à placer l'outillage sous un outil activé de façon pneumatique ou électromagnétique (marteau) qui produit des vibrations mécaniques et des impacts avec une fréquence pouvant aller jusqu'à 500 Hz.



Image marteau Pokolm

Le marteau est monté dans un porte-outil ou fait partie intégrante du porte-outil, lui-même monté dans la broche d'une machine-outil ou d'un robot.

La bille en carbure à l'extrémité du marteau doit être positionnée normale à la surface.

Elle est pilotée via une CN avec un parcours généré par un système de programmation FAO 3 à 5 axes.

L'outillage est positionné sur le centre d'usinage.

L'impact sur la surface est effectué par la pression pneumatique exercé alternativement sur la bille.

Des tensions résiduelles de compression sont créés sur la surface, amenant ainsi une augmentation de la dureté superficielle et une réduction de la rugosité.



Image bille carbure Pokolm

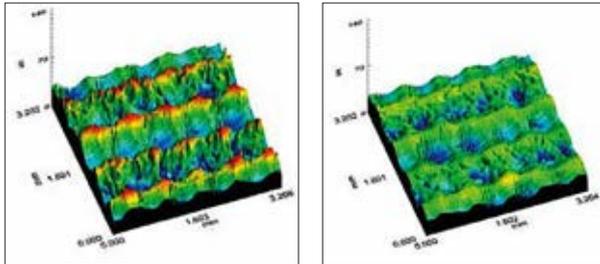


Image topographie de surface 3D avant et après martelage

Le procédé est adapté aux formes complexes.

## Moyens utilisés pour la réalisation des essais

Le martelage a été réalisé sur un Centre d'usinage 5 axes Hermle de la plate-forme du Cetim à St-Etienne.

Désignation	HERMLE C250	
Courses X-Y-Z (mm)	600/550/450	
Vitesse de rotation (tr/min)	18000	
Attachement	HSK A63	
Dimension table (mm)	450x360	
Pivotement	+/- 115°	
Magasin d'outils	30	
CNC	HEIDENHAIN TNC640	
Lubrification	Centre broche 40 bars	
Autres	Air pulsé centre broche	

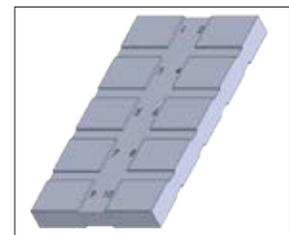
Le marteau qui a été utilisé est un modèle FORGEfix de 500N (195mm de long, diamètre 40mm) du fabricant Pokolm. La course de frappe est ajustable de 0 à 2mm. L'arrivée de l'air comprimé se fait par l'extérieur du marteau.

Les diamètres des billes en carbure disponibles sont le D10, D12, D16, D20 mm et tige D3, D4, D6 et D8 mm.

La programmation 5 axes des parcours de martelage été faite avec le logiciel WorkNC de la société Hexagon.

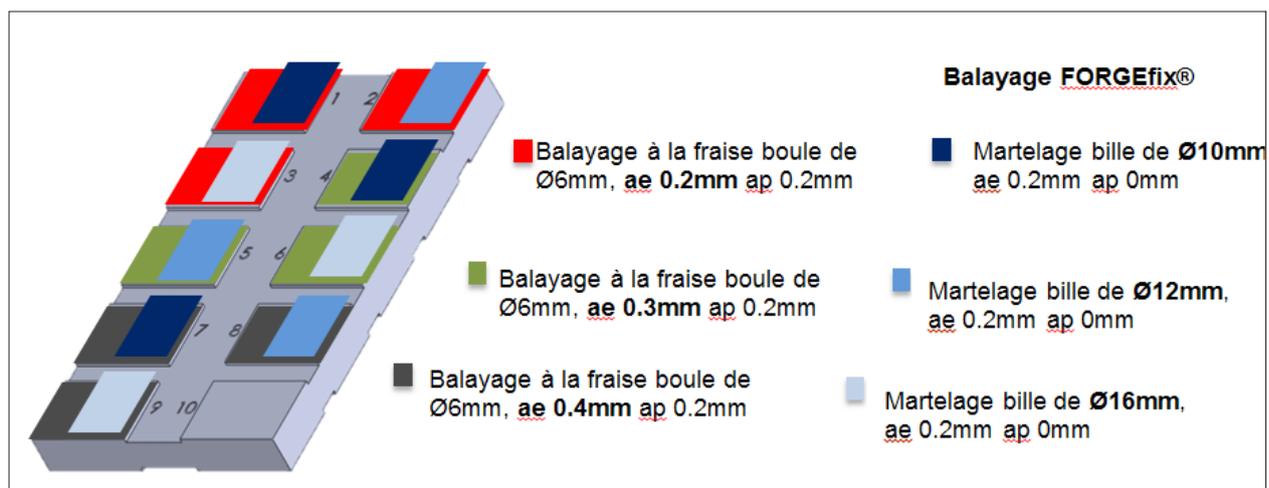
## Mise en œuvre, caractérisations et essais

### Caractérisation : essai sur pièce 2D



Plaquette en X38CrMoV5 traitée à 52 Hrc avec différents tronçons pour caractériser les différents paramètres de martelage :

- Variation du pas de balayage (de la fraise boule)
- Variation du diamètre de bille (du marteau)



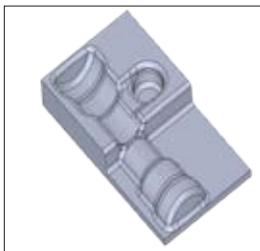
En moyenne l'état de surface (Ra et Rz) a été divisé par 2 après l'opération de martelage.

Avec le Pas de 0,4mm et la bille de Ø12mm (Test 8), le Ra et le Rz ont été divisés par 4.



Avec un Pas de départ trop fin les résultats sont dégradés.

Sur le test 17 (Avec le Pas de départ de 0,3 mm et la bille de Ø4 mm avec un pas de 0,1mm le Ra et le Rz ont été divisés par 5.



**Caractérisation :  
essai sur pièce 3D**

Forme 3D en X38CrMoV5 traité à 52 Hrc finie à la fraise boule D4mm avec un pas de balayage de 0.3mm  
Rugosité : Ra 1.4 µm et Rz 7 µm

Martelage avec une bille Ø4mm et un pas de balayage de 0.1mm

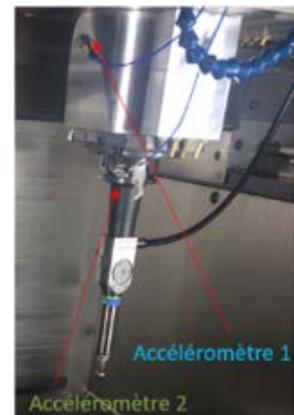


La rugosité obtenue après martelage est un Ra de 0.3 µm et Rz de 1.3 µm. Le Ra a été divisé par 4,7 et le Rz par 5,4.

La dureté en surface obtenu a été de 55 Hrc soit une augmentation de la dureté superficielle de 3Hrc.

**Evaluation de  
l'impact des  
vibrations générées  
par le marteau sur  
la broche**

Afin d'évaluer l'impact des vibrations générées par le process de martelage sur la broche du centre d'usinage, une instrumentation de cette dernière a été réalisée.

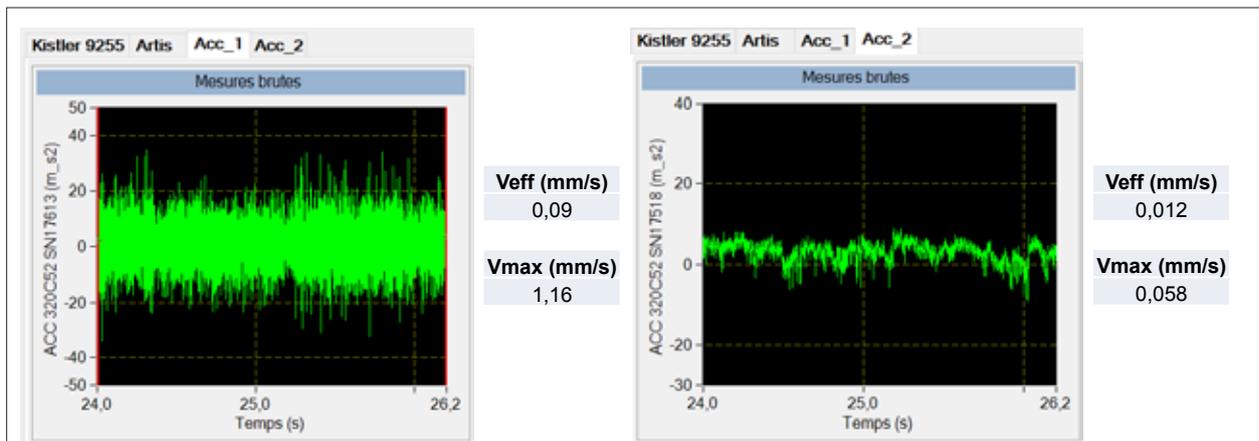


2 accéléromètres ont été placés autour de la broche : 1 proche du palier et l'autre éloigné.

Pour les mesures effectuées loin du palier, elles ont été réalisées suivant la norme ISO/TR17243-1 pour une vitesse efficace devant être inférieure à 0.7mm/s. La mesure obtenue est de 0.09 mm/s.

Pour les mesures effectuées proche du palier, elles ont été réalisées suivant la norme ISO 10816-3 pour une vitesse efficace devant être inférieure à 1.4 mm/s. La mesure obtenue est de 0.012 mm/s.

Zone boundary	Unit	Spindle classification			
		Rated power ≤5kW ball bearing (point contact)	Rated power >5kW ball bearing (point contact)	Rated power ≤5kW roller bearing (line contact)	Rated power >5kW roller bearing (line contact)
a	mm/s rms	0,7	0,7	0,7	0,7
b	mm/s rms	1,1	1,4	1,1	1,4
c	mm/s rms	1,8	2,8	1,8	2,8
i	m/s <sup>2</sup> rms	6	6	8	8
ii	m/s <sup>2</sup> rms	10	10	13	13
iii	m/s <sup>2</sup> rms	15	15	20	20
iv	m/s <sup>2</sup> rms	20	20	26	26
v	m/s <sup>2</sup> rms	25	25	32	32
vi	m/s <sup>2</sup> rms	30	30	39	39
vii	m/s <sup>2</sup> rms	40	40	52	52
viii	m/s <sup>2</sup> rms	50	50	65	65



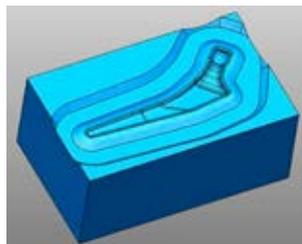
Les valeurs mesurées, relativement faible, montrent donc que les vibrations générées par le process de martelage ont une influence négligeable sur la broche.

- Temps de finition par usinage + polissage manuel pour la gravure inférieure et supérieure : 1h + 1h
- Etat de surface obtenu : Ra autour de 1µm et Rz autour de 5µm
- Dureté : 52 HRc

## Mise en œuvre sur un jeu de matrice de forge

Objectif : rechercher des solutions pour optimiser l'état de surface des gravures afin d'augmenter la durée de vie en forge.

Jeu de matrices de prothèse de hanche supérieur et inférieur



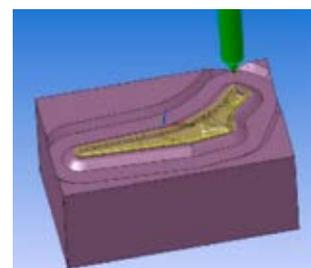
- Caractéristiques :
  - Matériau : acier à outil X50Cr-MoV5-3 à 52 HRc
  - Dimensions de la gravure : 230 x 140 x 100mm
  - Profondeur maxi de 8mm
  - Rayon mini de 2mm

### Mise en œuvre :

Le polissage par martelage a été réalisé avec le marteau Pokolm de 500 N.

Les trajectoires du marteau en 5 axes ont été calculées avec le logiciel WorkNc.

Une bille de diamètre 4mm a été utilisée avec un pas de balayage de 0.1mm et une avance Vf de 1500mm/min.



**Résultat :**

Le temps de finition par usinage ajouté au temps de polissage par martelage a été de 28min + 3h12min pour la gravure inférieure et supérieure.

Des mesures d'état de surface après l'opération de polissage par martelage ont été réalisées :  $R_a=0.1\mu\text{m}$  et  $R_z=0.55\mu\text{m}$ .



Une mesure de dureté a également été réalisée : autour de 55 Hrc.

Le temps de finition a donc été quasiment doublé. Cependant l'état de surface **a été fortement amélioré et divisé par 10**. La dureté superficielle a quant à elle été **augmentée autour de 3Hrc**.

**Synthèse****Sur la mise en œuvre**

La technologie est relativement simple et rapide à mettre en œuvre sur de la forme 3D mais nécessite une programmation et une machine 5 axes.

Les mesures réalisées avec les accéléromètres ont montré que la solution de martelage Pokolm générant des vibrations n'avait pas d'impact sur la broche.

**Sur les temps de finition**

Les temps avec le procédé de polissage par martelage sont globalement doublés mais l'opération est réalisée de façon automatique

**Sur les avantages de la technologie**

Le procédé permet de réaliser des améliorations tant au niveau de l'état de surface des gravures (dans un rapport de 5 à 10) que de l'augmentation de leur dureté superficielle (de l'ordre de 3 Hrc).

Cela devrait permettre d'augmenter la durée de vie des outillages en forge.

**Sur les limites du procédé**

Les rayons minimums des gravures ne doivent pas être inférieurs à 1.5mm et doivent être accessibles pour pouvoir travailler de façon à être normal à la bille.



Emmanuel CINI  
Expert Métallurgie Aciers  
CTIF

# Thermo-Calc<sup>®</sup>, un outil de métallurgie numérique. Principes et applications.

## Introduction

On connaît depuis longtemps les différents logiciels de simulations numériques qui permettent aujourd'hui une amélioration continue des opérations de mise en forme des matériaux, tant pour les opérations de forgeage que de fonderie.

Mais au-delà des logiciels, il ne faut pas oublier que la fiabilité de ces simulations repose avant tout sur la bonne description du comportement thermo-mécanique des matériaux concernés. Or ce comportement est lui-même conditionné par la microstructure de ces matériaux, et son évolution dans le temps.

Il est par conséquent logique de remonter plus en amont dans les procédés de mise en forme, jusqu'à s'intéresser à la genèse de ces microstructures, qui dépend pour une grande part de la thermo-dynamique et de la thermo-cinétique opérant dans les matériaux.

Ainsi, dans un contexte de « digitalisation » généralisée, il apparaît utile de faire un point sur les derniers développements relatifs à la « thermodynamique numérique », notamment dans le domaine des matériaux métalliques.

Dans cette optique, CTIF a intégré en 2018 l'outil Thermo-Calc<sup>®</sup>, qui depuis sa création en 1997, est devenu le logiciel de référence pour la thermodynamique numérique et a vu son emploi largement se répandre, aussi bien chez les universitaires et institutionnels que les industriels. Ses bases de données sont continuellement enrichies et fiabilisées, et il permet de « démocratiser » les calculs thermodynamiques, tout en développant une polyvalence via des modules qui appréhendent directement les problématiques de diffusion et de cinétique d'évolution des microstructures.

C'est donc en *utilisateur averti des problématiques industrielles* que CTIF a participé au séminaire Thermo-Calc<sup>®</sup> qui s'est tenu le 30 octobre 2018 à Sophia-Antipolis dans les locaux du Centre de Mise En Forme des matériaux (CEMEF) de Mines ParisTech. Nous en proposons ici une synthèse, retenant les principaux développements présentés à cette occasion et menés à l'aide de la suite numérique Thermo-Calc<sup>®</sup>.

## Thermodynamique numérique

En guise d'introduction, on peut préciser quelques éléments fondamentaux de cette discipline de la science des matériaux qui vise, en première instance, à déterminer quelles phases se forment en conditions d'équilibre thermodynamique au sein des matériaux.

## Méthode CALPHAD

Correspondant à l'acronyme anglais « CALculation of PHase Diagrams », cette méthode vise effectivement à calculer les diagrammes de phases, c'est-à-dire les différents domaines de température, composition et pression où un matériau est entièrement homogène, physiquement et chimiquement. Pour ce faire, on cherche les minima du potentiel thermodynamique ad hoc, qui lorsqu'on travaille à température et pression imposées, correspond à l'énergie de Gibbs.

Celle-ci se décompose habituellement en un terme « idéal » et un terme d'« excès ». C'est le formalisme mathématique adopté pour ce dernier, développement en polynômes de Redlich-Kister, qui permet d'explicitement l'influence de chacun des constituants d'une phase. En faisant ensuite dépendre les coefficients des polynômes de la température et de la pression, il devient possible de modéliser de façon fiable l'énergie de Gibbs de chaque phase d'un matériau. Plus précisément, on ajuste ces coefficients pour représenter le plus fidèlement possible les données tangibles dont on dispose.

Dès lors, calculer un diagramme de phases revient à déterminer les quantités ou fractions de phases qui minimisent l'énergie de Gibbs totale du système (sous des conditions de température, composition et pression données).

La puissance de la méthode réside dans sa capacité à extrapoler et ainsi prédire les stabilités de systèmes complexes à partir de systèmes plus simples. Ainsi, l'exploitation et la modélisation des données relatives aux systèmes unaires, binaires et ternaires permettent de calculer les propriétés thermodynamiques de

systèmes à multi-composants, tels que ceux rencontrés dans les problématiques industrielles.

## Bases de données

Les résultats expérimentaux issus des caractérisations métallurgiques traditionnelles ont constitué une première source de données pour la méthode CALPHAD.

Plus récemment, les techniques de calculs « Ab Initio » issues de la physique quantique, sont devenues matures et produisent désormais des résultats théoriques que la méthode CALPHAD prend également en compte.

Le travail de cette dernière consiste alors à convertir ces données (mixtes) d'entrée en données de sortie, sous la forme de jeux de coefficients numériques qui permettent de calculer les propriétés thermodynamiques des différentes phases constitutives des matériaux.

L'identification de ces coefficients se fait par ajustements et optimisations successifs jusqu'à ce que la description des phases en question soit

jugée suffisamment fidèle et cohérente avec les données d'entrée. Les valeurs numériques atteintes par les coefficients au terme de ce processus de modélisation constituent alors une « base de données ».

La qualité de ces bases de données est donc fondamentale pour la bonne prédiction des grandeurs thermodynamiques.

## Modules de calcul

### THERMO-CALC®

C'est le premier module commercialisé (Thermo-Calc® software) qui traite spécifiquement des équilibres thermodynamiques, voir Figure 1. Plus exactement, il minimise l'énergie de Gibbs totale d'un système, en prenant en compte toutes les phases qui peuvent théoriquement se former (sous réserve qu'elles aient été prises en compte dans la base de données). Il fait ainsi abstraction du temps car il ignore les cinétiques de formation de ces mêmes phases. Dit autrement, l'équilibre ainsi calculé donne la microstructure du matériau au bout d'un temps infini.

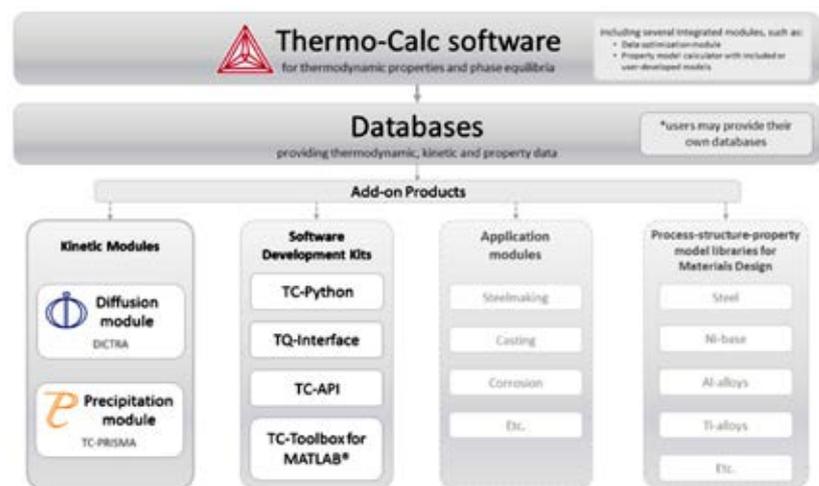


Figure 1: Architecture de la suite logicielle Thermo-Calc® (Octobre 2018). Source : Thermo-Calc®.

On peut palier cette hypothèse de calcul restrictive en excluant délibérément certaines phases, quand l'« expérience » démontre qu'elles se forment difficilement. On considère alors des équilibres méta-stables.

Cela constitue une approche grossière des évolutions microstructurales.

Un autre écart à l'équilibre peut être simulé avec Thermo-Calc® quand on s'intéresse à la solidification. On fait cette fois l'hypothèse d'un équilibre local, uniquement à l'interface solide/liquide, mais pas de diffusion dans le solide et liquide homogène (analyse de Scheil-Gulliver). On maximise alors les ségrégations et rejets de solutés dans le solide ce qui permet d'estimer des températures de brûlures.

Deux autres modules prennent en compte les problématiques de diffusion de manière plus précise mais à des échelles différentes.

### DICTRA (DIFFUSION MODULE)

La cinétique de formation des phases dépend au premier chef de la diffusion de leurs éléments constitutifs.

Aussi, partant d'un profil de concentration, le module Dictra résout numériquement les lois de diffusion (lois de Fick) dans des configurations géométriques 1D.

Il permet par exemple de suivre un front de cémentation, la croissance d'un précipité de forme sphérique ou cuboïdale, l'évolution des micro-ségrégations en cours de solidification ou au contraire durant un traitement thermique d'homogénéisation (...)

A l'instar des bases de données thermodynamiques, de bonnes bases de données « mobilités » sont indispensables pour des prédictions de qualité.

Dictra permet ainsi de prendre rigoureusement en compte la diffusion à l'échelle locale.

### TC-PRISMA (PRECIPITATION MODULE)

Il est également important de pouvoir calculer l'impact des cinétiques à l'échelle globale d'un matériau.

Pour ce faire, il faut introduire des hypothèses simplificatrices dites de « champs moyen » ; on ne considère plus de profil de concentration mais une matrice et des phases secondaires homogènes avec des interfaces abruptes.

On impose la conservation des masses globales des constituants et l'on raisonne sur les flux de matière. Etant hors d'équilibre, ces derniers sont supposés régis par la thermodynamique des processus irréversibles (qui se base sur le principe de maximum de production d'entropie).

En ajoutant une description quantitative de la microstructure du matériau (taille de grains, géométrie des phases en présence, densité de dislocations...) et une histoire thermique, on peut calculer sa cinétique d'évolution.

Concrètement, TC-Prisma permet de simuler la précipitation et la croissance/dissolution de phases secondaires en fonction des traitements thermiques imposés à un matériau.

### Interfaces & Couplages

Pour récupérer et exploiter les résultats des différents modules et ainsi coupler Thermo-Calc® à d'autres logiciels, différentes solutions sont proposées, voir Figure 1 :

- langage de programmation TC-Python,
- interface de programmation « en dur » TQ-Interface,
- librairie de fonctions pré-programmées TC-API,
- interface de programmation avec MatLab.

### Nouveautés

Il y a désormais deux mises à jour annuelles pour Thermo-Calc®, en juin et décembre.

Pour les dernières livraisons, on peut retenir en particulier pour les différents modules :

- Thermo-Calc® :
  - nouvelles bases de données thermodynamiques et « mobilités », détaillées à la Figure 2,
  - calcul automatique de dispersion de propriété en fonction de la composition,
  - intégration de fonctions utilisateurs (user defined),
- Dictra :
  - mode graphique disponible (plus simple à utiliser que le mode commande),
- TC-Prisma :
  - calcul de diagrammes TRC (*Continuous Cooling Transformations, CCT en anglais*),
  - possibilité de lancer des simulations avec une distribution de précipités pré-définie.

Fe	TCFE9, MOBFE4
Ni	TCNi8.1
Al	TCAL5.0, TCAL5.1, MOBAL4
Mg	TCMG5
Ti	TCTi1, MOBTi2
Cu	TCCU2, MOBUCU2
Precious Metal	TCNOBL1
High Entropy Alloy	TCHEA2, TCHEA3, MOBHEA1
Soldering Alloy	TCSLD3.2, MOBSLD1
Oxides	TCOX7, TCOX8
Nuclear	MEPH15, NUCL15
Substance	SSUB6

Figure 2 : Mises à jour et nouvelles bases de données thermodynamiques (préfixe TC) et « mobilités » (préfixe MOB) éditées par Thermo-Calc® entre 2016 et 2018. Source : Thermo-Calc®.

## Présentations

Un panel de neuf (9) cas d'application a été présenté, que l'on peut résumer et structurer comme suit.

### Calculs numériques « massifs » pour « métallurgie combinatoire »

- *Alloy design for turbine blade application, Safran*

Il s'agit d'un travail conjoint avec Polytech Nantes (cf. Figure 3) qui vise à identifier de nouvelles compositions d'alliages pour aubes de turbine.

Plusieurs critères sont pris en compte pour caractériser la « performance » d'un matériau: tenue à l'oxydation/compatibilité avec revêtements de barrière thermique (TBC), résistance au fluage, mais aussi facilité de fabrication, masse volumique, coût...

L'approche combine différentes techniques pour corrélérer ces critères à la composition chimique :

- Thermodynamique numérique fournie par Thermo-Calc® (via TC-API et Matlab) pour, entre autres, les proportions de phases constitutives aux températures d'intérêt,
- Intelligence Artificielle pour la fouille de données (« processus gaussiens ») afin d'extraire de bases de la littérature les caractéristiques mécaniques en service.

Un algorithme génétique permet ensuite l'optimisation multi-critères de la composition chimique.

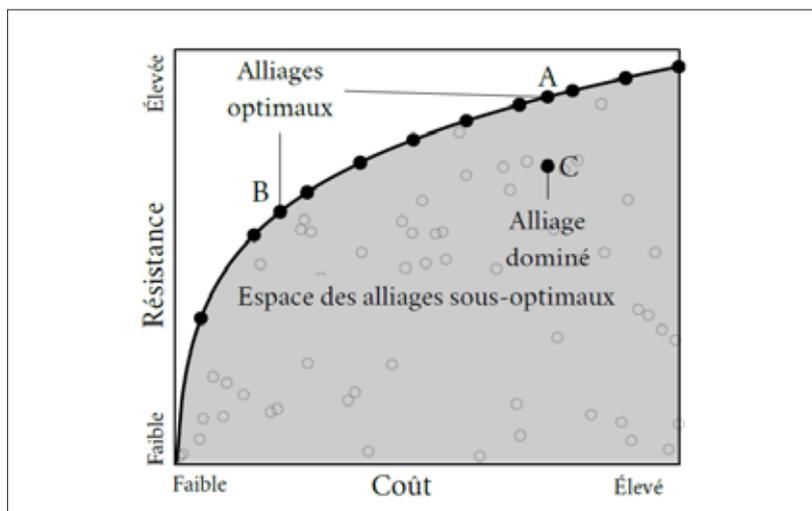


Figure 3: Pareto-optimalité. A coût imposé, les alliages A et B présentent les meilleures résistances (mécaniques) atteignables sans dégrader les autres critères de sélection. L'alliage C n'est pas aussi performant et est dit « dominé » ou « sous-optimal » par rapport à A. Source : Thèse de Edern Menou « Conception d'alliages par optimisation combinatoire multi-objectifs : thermodynamique prédictive, fouille de données, algorithmes génétiques et analyse décisionnelle », octobre 2016, Université de Nantes.

Partant d'un espace de recherche proprement gigantesque de par sa taille, cette « méthode d'exploration intelligente » met en évidence un ensemble d'alliages présentant de bons compromis entre les critères considérés via la notion de Pareto-optimalité, voir Figure 3.

S'agissant de superalliages à base Nickel, l'étude présentée fait état d'une réduction drastique du nombre de candidats potentiels, de 300 millions<sup>1</sup> (!) à 325 alliages jugés pertinents et finalement une short list de 25 compositions. Certaines sont en cours de caractérisation, conformément à l'analyse décisionnelle qui revient à

l'utilisateur final (versions monocristallines privilégiées).

Pour les caractéristiques thermochimiques, une comparaison a été faite entre les bases de données TCNi8 (Thermo-Calc®) et TTNi8 (développée par Thermo-tech), avec des écarts rapportés de l'ordre de 10 à 20 % (...)

- *Massive Calphad calculations of High Entropy Alloys [...], ICMPE*  
Les alliages à haute entropie (High Entropy Alloys, HEA en Anglais) base Cr-Fe-Ni notamment, présentent un très bon compromis résistance mécanique/ductilité, voir Figure 4, page suivante.

<sup>1</sup> : Tout espace compositionnel, en tant que continuum, correspond rigoureusement à une infinité de compositions possibles. Ce n'est que le pas de discrétisation en composition choisi pour mailler ce continuum qui fixe en réalité le nombre d'alliages à considérer initialement ; l'un et l'autre sont donc arbitraires.

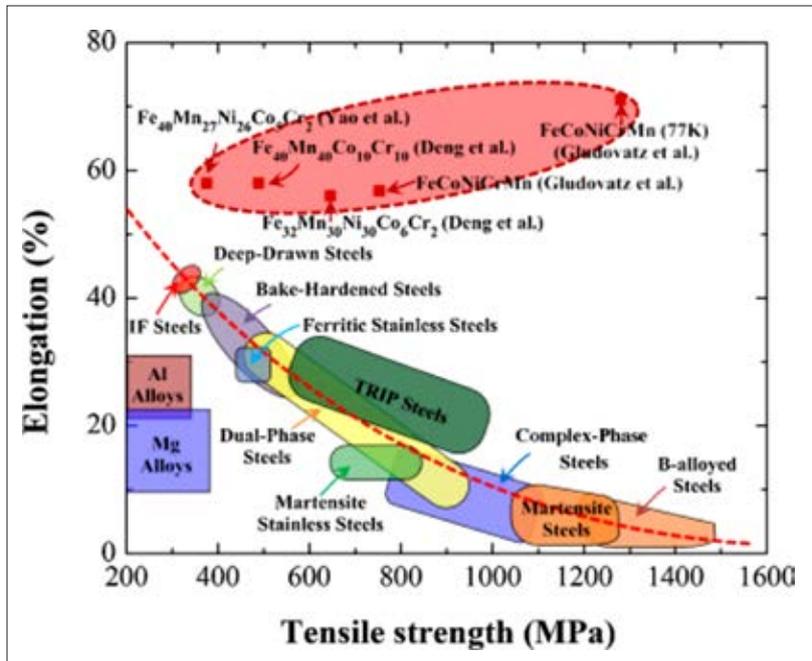


Figure 4: Comparaison des caractéristiques mécaniques des alliages HEA en regard de celles des alliages légers et aciers. Source : MaterialsToday, juillet-août 2016.

La stratégie de recherche des meilleures caractéristiques mécaniques adoptée dans l'étude repose sur une analogie avec les alliages base Nickel, où le durcissement est obtenu par précipitation des phases  $\gamma/\gamma'$ . En l'occurrence, il est recherché une matrice fcc monophasée pouvant être durcie par des précipités  $L1_2$  type  $Ni_3Al$  ou  $Co_3Ti$ .

Les systèmes Cr-Fe-Ni-Co-Mn et Cr-Fe-Ni-Co-Al-Ti sont considérés à cette fin.

Dans un premier temps, un domaine monophasé fcc est confirmé expérimentalement pour Cr-Fe-Ni-Co-Mn. Ses limites de stabilité sont ensuite recherchées numériquement avec Thermo-Calc® en utilisant la base de données TCHEA1. Un balayage complet en composition est réalisé de façon automatique en couplant Excel et Thermo-Calc®

via des macros Visual-Basic pour la mise en données et le dépouillement des résultats. A noter une sous-estimation possible de la phase Sigma- $\sigma$  par TCHEA1.

Dans un second temps, le domaine bi-phasé fcc + précipités  $L1_2$  est investigué pour Cr-Fe-Ni-Co-Al-Ti. Cependant, même en maintenant Al et Ti en dessous de 20 % massiques, le nombre de calculs dépasse les 12 millions pour 2 températures et des incréments de composition de 2.5 à 5 % !

Cela génère de réelles difficultés quant à la représentation et l'exploitation des résultats. En l'occurrence, MatLab est utilisé afin de stocker les résultats au sein d'une matrice ad hoc, mais la (di)gestion de ces « Big data » constitue une étape délicate dans ce type d'étude et requiert en conséquence des compétences spécifiques.

## Etudes métallurgiques

### ECHELLE MICRO

- KINE : a module of Physalurgy for computation of eutectic growth kinetics with thermodynamic databases, CEMEF;

Illustration des développements menés par le CEMEF pour l'intégration des bases de données thermodynamiques de Thermo-Calc® dans la simulation numérique des procédés industriels.

En l'occurrence, un modèle numérique de croissance eutectique a été mis au point et comparé aux modèles analytiques de la littérature (Jackson & Hunt notamment). Non soumis aux hypothèses simplificatrices de ces derniers, il est plus précis et permet d'étudier en détails les corrélations entre vitesse et espacement lamellaire dans les différents régimes de solidification.

Il constitue ainsi un nouveau module pour la bibliothèque numérique Physalurgy du CEMEF. Celle-ci couple « en dur » Thermo-Calc® à des simulations multi-échelles par champs de phase (micro) / Cellular Automaton-Finite Element, CAFE (meso) / champs moyens (macro).

- [...] Nitrogen effect on oxidation behaviour of Ti6242S alloy, CIRI-MAT

Etude de l'oxydation à 650°C d'un alliage de Titane sous différentes atmosphères azotées (air synthétique vs mélange Ar-20%O<sub>2</sub>). L'objectif est de préciser la répartition de l'oxygène entre oxyde superficiel et dissolution dans la matrice sous-jacente. Comparaison des simulations numériques réalisées avec la base de données TCNi1 et mesures expérimentales à la sonde atomique tomographique.

- *Kinetic modelling of the austenite formation in Fe-Mn-Al-C steels, SIMAP*

Afin de développer des aciers de 3<sup>ème</sup> génération (Advanced High Strength Steels, AHSS) pour l'industrie automobile, on cherche à optimiser la microstructure de duplex base Fe-Mn-Al-C.

Celle-ci est conditionnée par les traitements thermiques appliqués dont la dernière étape est un recuit intercritique.

On vise alors à modéliser la genèse de la microstructure finale en prenant en compte les différentes phases impliquées ; ferrite, martensite et austénite ainsi que les carbures Kappa-k et cémentite.

Deux (2) scénarii sont testés pour la formation de l'austénite dont la cinétique est calculée à l'aide du module Dictra et de la base de données MOB2, amendée pour la diffusion du Manganèse dans l'austénite. L'ensemble des résultats est finalement confronté à des mesures expérimentales, voir Figure 5.

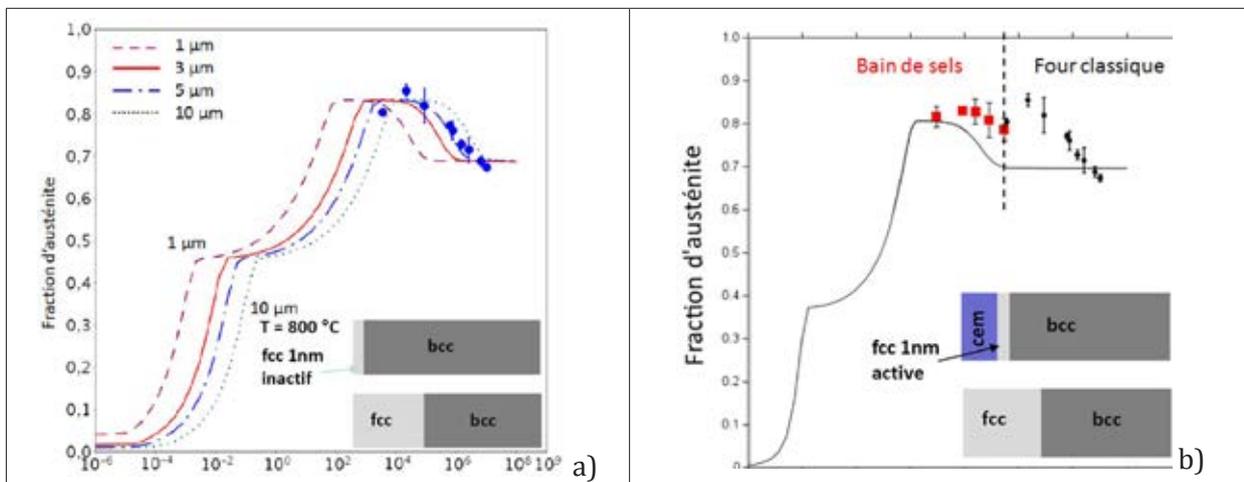


Figure 5: Cinétiques de conversion de martensite en austénite lors d'un recuit intercritique. Résultats de simulations Dictra, configuration plane, Temps en secondes en abscisse. Cellule élémentaire = latte de martensite, a) espace entre bâtonnets de cémentite b). Source : Grenoble INP, dans le cadre du projet MeMnAl Steels ID :ANR-I3-RMNP-0002

Une difficulté récurrente dans les simulations thermodynamiques et cinétiques concerne toutefois la martensite.

Etant méta-stable, elle n'existe pas en tant que « phase » dans les bases de données, mais est assimilée à la ferrite (sursaturée en Carbone). Ses propriétés de diffusion ne sont donc pas clairement définies, dépendant notamment de la densité de dislocations qu'elle contient (...)

- *Thermodynamics and kinetics studies related to Aerospace metallic materials, ONERA*

Présentation de résultats de simulations Dictra et Thermo-Calc<sup>®</sup> respectivement sur des alliages:

- base Nickel - diffusion de l'Alu-

minium entre « bond coat » et matrice (TCNi8),

- Ti-Al-W - forte ségrégation à la solidification, réaction péritectique (TCTi1),
- base Niobium - précipités orthorhombiques dans matrice B<sub>2</sub>

**ECHELLE MACRO**

- *The use of Thermo-Calc<sup>®</sup> to improve the production of ferro-manganese and silico-manganese alloys, Eramet*

Aide au pilotage d'installations industrielles par l'identification de points de fonctionnement optimums pour différentes réactions de conversion.

Faute d'une base de données spé-

cifique aux alliages de Manganèse, les équilibres métal/gaz/laitier sont calculés sous Thermo-Calc<sup>®</sup> avec les bases Slag3 + TCFE7.

Pour les silico-Manganèse, même démarche sur l'équilibre graphite/SiC, afin d'identifier le point de fonctionnement le plus avantageux d'un point de vue économique.

- *Thermodynamic modelling of the Mo-Pd-Rh-Ru-Tc system, CEA*

Les métaux de transition Mo-Pd-Rh-Ru-Tc sont produits au cours des réactions de fission. Ils peuvent alors interagir avec le combustible nucléaire ainsi qu'avec la gaine de ce dernier et causer des ruptures prématurées. Pour mieux comprendre et pré-

venir ces dysfonctionnements, il a été décidé de modéliser le système quinaire complet. Celui-ci est progressivement calculé via la méthode CALPHAD, en recourant à la littérature aussi bien qu'aux méthodes « Ab Initio ».

Ce travail ne constitue qu'une partie d'un très gros programme de recherche, « TAF-ID », qui vise à constituer une base thermodynamique internationale sur l'ensemble des matériaux du cycle nucléaire.

## APPROCHE MULTI-ÉCHELLES

- *Demonstration of ICME-based materials design, QuesTek Europe AB*

Présentation de QuesTek Europe AB qui est depuis 2016 une co-entreprise (joint-venture) entre Thermo-Calc® Software AB, éditrice du logiciel Thermo-Calc®, et QuesTek Innovation LLC, pionnière américaine dans la « conception et l'ingénierie de matériaux par méthodes numériques intégrées », Integrated Computational Materials Engineering<sup>2</sup> (ICME) en Anglais. Cette société promeut une méthodologie illustrée par la Figure 6.

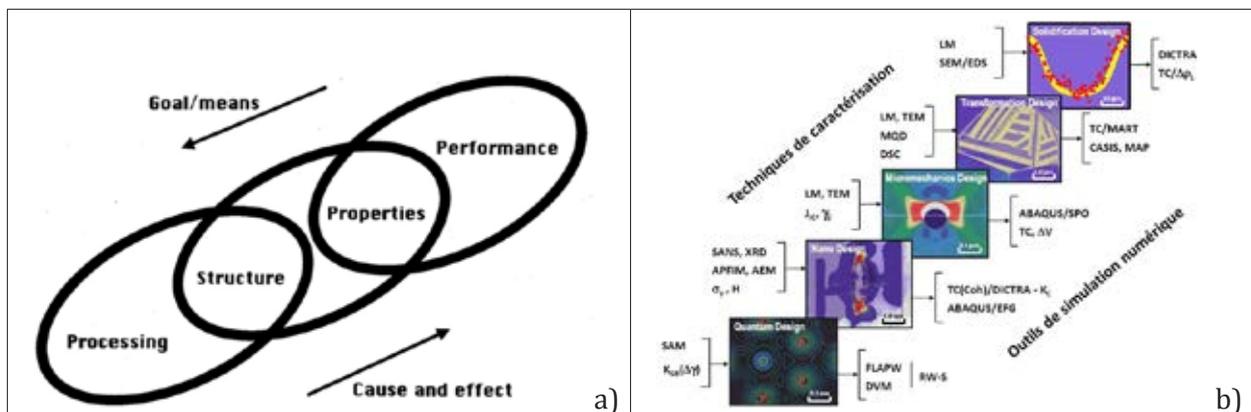


Figure 6 : Principe, a) et « Boîte à outils », b) pour la conception numérique des matériaux via une approche multi-échelles.

Source : QuesTek

Son principe logique et rationnel peut se résumer à l'argumentaire suivant:

- la microstructure est centrale car
- elle résulte de la composition chimique ainsi que des traitements thermo-mécaniques et thermo-chimiques appliqués,
- elle conditionne le comportement en service des matériaux,
- il est donc fondamental de pouvoir la modéliser.

Cette approche causale conduit à privilégier des modèles analytiques ou à base physique en priorité pour prédire les caractéris-

tiques mécaniques et chimiques des matériaux.

En pratique, elle combine une série d'outils et méthodes numériques pour estimer, par étapes successives depuis les échelles nano-, micro-, méso- et macro-scopique, les propriétés et performances d'un matériau.

Elle transpose ainsi aux problématiques industrielles une approche habituellement supportée par les milieux académiques. On retrouve là l'ADN de QuesTek Innovation LLC puisque c'est une spin-off de l'Université Northwestern, située près de Chicago aux Etats-Unis.

L'application présentée touche aux outils en carbures de Tungstène dont les liants contiennent du Cobalt. Pour des raisons à la fois sanitaires, économiques et géopolitiques, une interdiction potentielle des poudres de Cobalt est anticipée, ce qui amène à chercher un liant de remplacement.

Une analyse de conception s'appuyant sur une méthodologie de calculs est détaillée.

En l'occurrence, les duretés devant être très élevées, l'étude s'oriente vers une base Fer à transformation martensitique.

<sup>2</sup> : Cet acronyme est associé à une tendance R&D plus large qui se décline également sous les appellations « Computational Materials Design » et « Alloys by Design », très active aux Etats-Unis, notamment depuis l'initiative « Materials Genome » de Barack Obama en 2011 qui l'a rendue officielle.

## Bilan

A côté des utilisations « traditionnelles » de Thermo-Calc® comme support à l'étude détaillée de matériaux et/ou de processus métallurgiques, il faut noter le développement de « calculs massifs ».

Dans cette pratique « brute », on exploite directement les bases de données thermodynamiques à des fins de prospection dans les espaces compositionnels où l'on cherche de nouveaux alliages.

Ces espaces peuvent cependant rapidement atteindre des tailles gigantesques. De sorte que la gestion de la masse de résultats devient en elle-même une difficulté, celle de la maîtrise des techniques du « Big Data ».

En réponse, on peut mobiliser l'« Intelligence Artificielle » ou plus précisément des techniques de fouille de données (Data mining en Anglais). C'est ce qu'a fait Safran dans le cadre d'une collaboration avec Polytech Nantes. Cette approche hybride semble avoir identifié quelques bons candidats potentiels pour de futurs alliages industriels.

S'il est ainsi possible d'exploiter des données pré-existantes en établissant des corrélations inédites, on court néanmoins le risque d'en rester prisonnier et de ne pouvoir découvrir des matériaux véritablement nouveaux.

L'inter-opérabilité de Thermo-Calc® avec d'autres logiciels devient alors cruciale. C'est dans ce sens que sont

proposées différentes interfaces de communication, allant de fonctions utilisateurs à la programmation en environnement Python ou l'utilisation directe de lignes de commandes.

Il faut donc au final souligner le développement d'une intégration croissante de la modélisation thermodynamique et cinétique dans les outils de simulation, depuis la conception jusqu'au comportement en service des matériaux.

## Perspectives

La maîtrise des liens entre microstructure(s) et propriété(s) est fondamentale pour l'amélioration des performances des matériaux.

Cette maîtrise ne pourra être approchée qu'en hybridant un ensemble de techniques (évoquées ci-dessus).

Cette hybridation, parce qu'elle requiert des compétences multi-disciplinaires, invite de facto à des collaborations et partenariats multiples.

De ce point de vue, le récent rapprochement entre Thermo-Calc® AB et QuesTek Innovation LLC (depuis 2016) est emblématique<sup>3</sup>.

Il vise en l'occurrence à proposer au marché industriel européen une offre de services déjà éprouvée aux Etats-Unis.

Reste à voir avec quelle cinétique elle répondra aux besoins et demandes de l'industrie du Vieux continent, mais cela peut aller très vite !

Au niveau purement thermodynamique il sera intéressant de regarder les progrès fait dans la description de la martensite et sa gestion dans les bases de données.

Dans les domaines de la Fonderie et de la Forge, CTIF continue de contribuer résolument au déploiement de la thermodynamique numérique. Concrètement, la version 2018a de Thermo-Calc® a été implantée au CTIF avec les bases TCFE9 (aciers et ferro-alliages), TCNI8 (alliages base nickel) et TCOX7 (oxydes et laitiers).

Performant tant pour l'appréhension des diagrammes de phases, que pour la prédiction des composés à l'équilibre ou hors équilibre (ségrégations type Scheil-Gulliver entre autres), Thermo-Calc® permet des gains de temps substantiels pour la compréhension des observations (métallographies, propriétés mécaniques...), le choix de données pour les simulations process appliquées à des cas industriels, l'étude des effets de la composition. Il permet ainsi des approches diversifiées et très concrètes, allant par exemple de la conception de laitiers, sur mesure, à la mise en place de plans d'expériences numériques (influence d'éléments d'alliages ou impuretés). Différents couplages sont enfin possibles avec Matlab/Excel notamment, en direct ou via des modules de programmation.

En savoir plus :

Emmanuel CINI, CTIF [cini@ctif.com](mailto:cini@ctif.com)  
Michel STUCKY, CTIF [stucky\\_mi@ctif.com](mailto:stucky_mi@ctif.com)

<sup>3</sup> : Rapprochement amorcé dès 2010 par le développement conjoint d'un nouveau logiciel de simulation de la précipitation, issu du programme PrecipiCalc® de QuesTek et qui est devenu le module TC-Prisma, aujourd'hui intégré à la suite Thermo-Calc®.



Pierre KRUMPIPE  
Responsable projets forge  
CETIM - St. Etienne



Xavier LEDOUX  
Chargé d'affaire - Métallurgiste  
CETIM GRAND EST

# Régulation thermique des outils

## Introduction

Ces travaux ont été menés dans le cadre de la commission Forge du CETIM.

La maîtrise de la thermique des outillages de forge est un facteur déterminant dans la progression vers l'amélioration de leur durée de vie. En effet, un outillage peut être fragilisé par une température trop basse et une température trop élevée peut entraîner une baisse significative des caractéristiques mécaniques et une usure prématurée de l'acier à outil.

La régulation de la thermique des outillages de forge, quelle que soit la température de forgeage est également déterminante dans la qualité des pièces obtenues. En effet, la température de l'outillage et donc sa dilatation a, d'une part, un impact direct sur le dimensionnel des pièces et, d'autre part, un impact sur l'efficacité du lubrifiant utilisé et ainsi sur l'écoulement de la matière dans l'outillage.

Il y a donc deux cas à distinguer :

- L'accroissement de la température des outils : ce cas a, déjà été présenté dans un précédent article sous le titre « forgeage isotherme » (voir *la revue forge et fonderie* N°16) ;
- La diminution de la température des outils qui est le cas traité dans cet article.

Des moyens de refroidissement sont parfois utilisés chez les industriels mais, selon les cas, ils ne permettent pas d'assurer une véritable régulation de la température. Il s'agit souvent de moyens simples qui font office de refroidisseurs lors du forgeage des pièces : lubrification, soufflage d'air ou pulvérisation d'eau. Ces moyens qui ne permettent pas une véritable régulation sont jugés peu efficaces par les forgerons, mais sont tout de même indispensables dans certaines conditions difficiles.

Le problème est difficile à aborder de façon collective car les besoins sont multiples et chaque cas demande des solutions particulières. Nous vous présentons ici deux cas industriels qui ont servis de support à cette étude. Le premier cas est un outil de matriçage d'un alliage de titane qui a permis la validation de la modélisation thermique et le second cas est un outil de type poinçon « tulipe ».

Une première partie de l'étude a consisté à définir la méthodologie et les moyens les plus adaptés pour modéliser la thermique des outillages. En effet, seule une bonne connaissance du cycle thermique d'un outillage permet de définir et dimensionner les solutions de régulation thermique à mettre en œuvre.

La seconde partie de l'étude a consisté à concevoir et réaliser un circuit de refroidissement nécessaire à la régulation thermique d'un poinçon tulipe.

La troisième partie est donc la réalisation d'essais en conditions industrielles sur des poinçons thermorégulés.

## Modélisation thermique

La préétude de modélisation thermique en forge concerne un outil de matriçage constitué de deux inserts coniques bloqués dans des portes-inserts rectangulaires par des clavettes (figure 1).

La première étape de modélisation a été réalisée avec le logiciel Forge NxT® afin de simuler la séquence de déformation du lopin. L'objectif de ce calcul est de disposer des données d'entrée nécessaires à l'alimentation du logiciel de modélisation thermique IDEAS TMG®. Les résultats exploités pour ces calculs sont l'animation du forgeage qui permet de définir l'évolution dans le temps des contacts entre la pièce forgée et l'outil, la puissance dissipée et la pression normale selon les zones de l'outil.

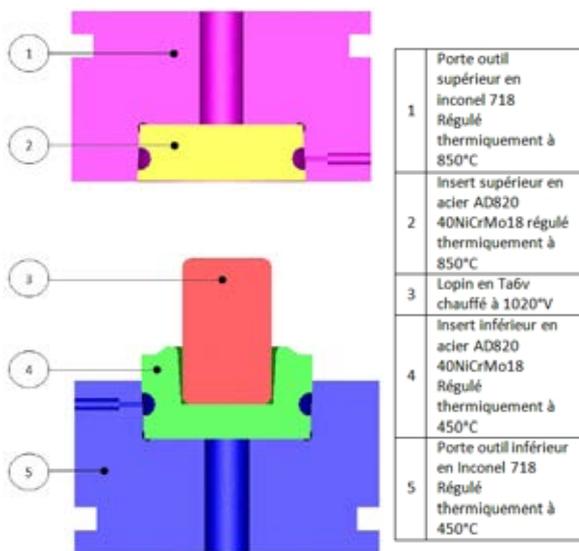


Figure 1 : Outillage de matriçage

La thermique a ensuite été simulée. Afin de simplifier le calcul et puisque la géométrie au niveau de la zone sensible le permet, le modèle a été simplifié à une représentation 2D axisymétrique.

La séquence de forgeage et celle d'attente d'une pièce forgée dans la matrice ont été étudiées séparément.

Sur la séquence de forgeage, les travaux ont consisté à adapter au mieux les coefficients d'échanges, à jouer sur les propriétés thermophysiques de l'acier de l'insert (conductivité et capacité thermique) et à appréhender les calculs des échanges dans différentes zones de la surface de contact pièce/outil.

Après 36 itérations, le modèle a été considéré en accord avec les résultats expérimentaux. La comparaison entre les mesures et les calculs est présentée par la figure 2.

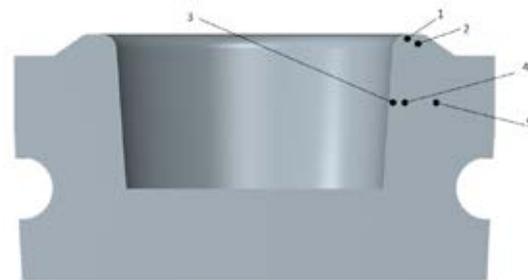
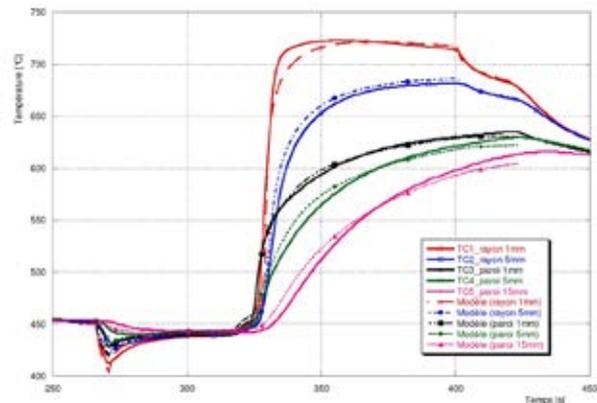


Figure 2 : Comparaison entre mesures et résultats des calculs pour l'étape de forgeage (position des thermocouples sur la figure en bas)

Ces travaux nous ont montré l'importance du contact et notamment la différence de contact entre les différentes zones de la gravure de l'outil. Ce contact est faible sur les parties proches de la verticale (dépouilles) et bien plus élevé sur les parties horizontales.

Le deuxième enseignement est la nécessité de connaître convenablement les propriétés thermophysiques des matériaux concernés.

## Conception du circuit de refroidissement

Pour concevoir le circuit de refroidissement, une première approche générique a consisté à évaluer l'impact de l'ajout de canaux sur la résistance du poinçon en fonction :

- Du diamètre de canal choisi ;
- De sa distance par rapport à la peau de l'outillage.

Sur ces 2 paramètres, les aspects mécanique et thermique sont antagonistes. Pour améliorer la thermique, il faut chercher à maximiser la surface d'échange du canal (son diamètre) et le rapprocher au maximum de la surface à refroidir. Or, plus on rapproche le canal de la surface, et plus le diamètre du canal est grand, plus le poinçon est fragilisé et sa résistance mécanique amoindrie.

Un certain nombre de calculs par éléments finis ont donc été conduits afin de dimensionner en première approche des canaux de refroidissement en fonction d'une pression normale appliquée sur une surface (Figure 3).

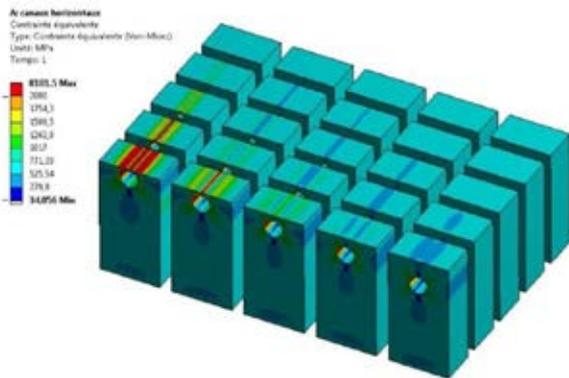


Figure 3 : Calculs réalisés pour dimensionner les canaux de refroidissement

Ensuite, différents designs de canaux de refroidissement ont été pensés pour le poinçon (figure 4). Pour chacun de ces designs, des calculs ont été conduits pour trouver le meilleur compromis entre la tenue mécanique et les performances thermiques (figure 5). Finalement, c'est le design présenté à la figure 6 qui a été retenu.

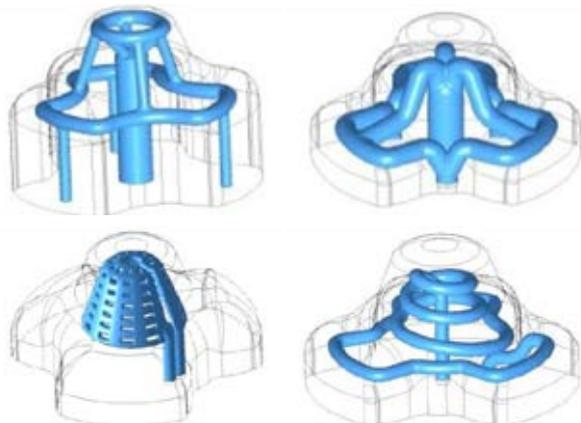


Figure 4 : Différents designs de circuits de refroidissement simulés

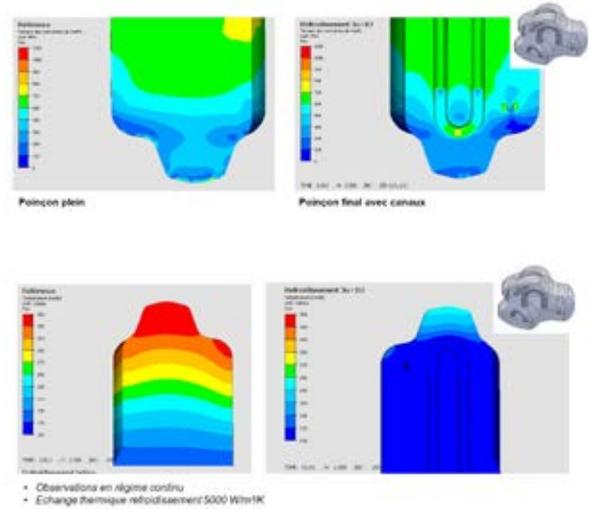


Figure 5 : Comparaison de la résistance mécanique (en haut) et de la performances thermique (en bas) par des calculs Forge®

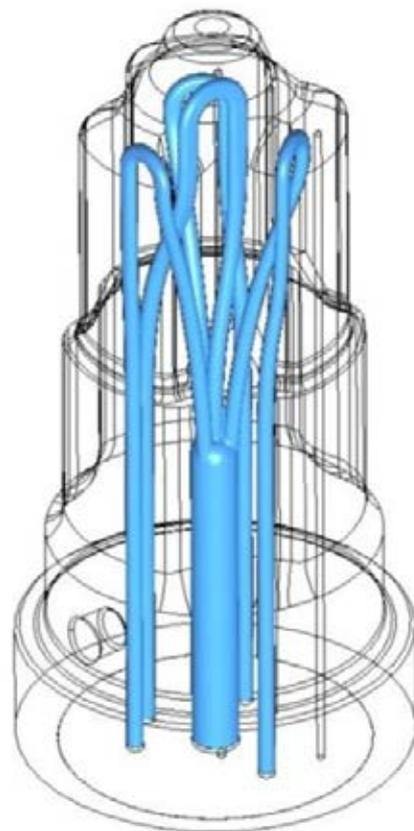


Figure 6 : Solution de canaux de refroidissement choisie pour le poinçon tulipe

## Fabrication de l'outil thermorégulé

Deux procédés de fabrication ont été considérés pour réaliser le poinçon thermorégulé. Celle qui est apparue la plus adaptée est la fabrication additive car elle permet de mettre en œuvre le design choisi sans contrainte.

La technologie de fabrication additive qui a été choisie est la fusion laser sur lit de poudre, appelée aussi LBM (Lase Beam Melting). Elle consiste à venir déposer sur une plaque support un lit de poudre d'épaisseur de quelques dizaines de micromètres, puis à fondre cette poudre selon les paramètres géométriques définis à partir du fichier CAO.

L'inconvénient actuellement avec cette technologie est qu'elle nécessite que le matériau sous la forme de poudre et sa paramétrie soient disponibles. Or, les nuances d'aciers à outil ne sont généralement pas disponibles sous cette forme. Sur un choix restreint, l'acier utilisé a donc été le Maraging 300 (Figure 7).



Figure 7 : Poinçons réalisés par fusion laser

La deuxième solution est l'usinage des canaux suivi d'un assemblage par soudage (figure 8). Les techniques de soudage testés sont :

- le soudage-diffusion ;
- le brasage-diffusion ;
- la compression isostatique à chaud (CIC).

L'intérêt est de pouvoir utiliser l'acier à outil adapté qui est le 30CrMoV12-28. Cependant, le recours à l'usinage pour réaliser les canaux oblige à simplifier la géométrie et donc à faire une concession sur la performance thermique. Dans le cas de la CIC, il faut même ajouter des tubes en acier pour assurer l'étanchéité et la résistance à la déformation du circuit de refroidissement durant la compression.

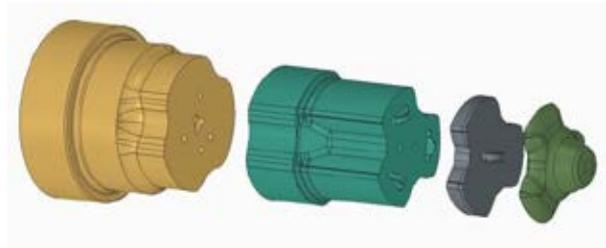


Figure 8 : Vue éclatée du poinçon réalisé par usinage et soudage

Le point critique de cette solution est la tenue mécanique des joints soudés donc des essais de soudage sur éprouvettes ont été réalisés préalablement à la fabrication des poinçons. Les résultats ont montré que le soudage-diffusion et la compression isostatique à chaud apportaient les meilleures résistances mécaniques avec des valeurs de résistance à la traction respectivement de 1414 MPa et 1730 MPa contre 572 MPa pour le joint brasé-diffusé.

D'un point de vue microstructural, les joints sont satisfaisants (figure 9) avec peu de porosités et une recristallisation constatée dans les cas du soudage-diffusion et de la CIC.



Figure 9 : Micrographies des joints brasé-diffusé (a), soudé-diffusé (b) et réalisés par CIC (c)

## Premiers essais industriels

Les essais des poinçons ont été effectués en conditions réelles de forgeage chez un industriel (figure 10). Ces essais avaient autant pour objectif des mesures thermiques (poinçons instrumentés) que le test mécanique des poinçons issus des différents procédés.



Figure 10 : Test du poinçon en Maraging 300

Les premiers résultats ont conduit aux conclusions suivantes :

- Le test sur des poinçons Maraging a conduit à un grippage pièce/outil dû à une incompatibilité du matériau avec le traitement de surface par nitruration. Les essais ont confirmé néanmoins des potentialités sur la performance thermique.
- Le test sur les poinçons brasés et soudés-diffusés ont rapidement rompu au niveau des joints soudés. L'expertise réalisée sur le poinçon soudé-diffusé rompu a montré des défauts de soudage. Ainsi, la qualité de soudure constatée sur les éprouvettes n'est pas répétable sur les poinçons.

## Conclusion et perspectives

L'étude avait débuté par la modélisation du processus de forgeage d'un point de vue thermique à l'aide d'un logiciel spécialisé (IDEAS TMG®). Ces résultats nous ont apporté une meilleure appréhension de la thermique lors du forgeage à chaud et nous ont permis de capitaliser des données afin de traiter des cas réels.

Nous avons ensuite travaillé sur la conception d'un circuit de refroidissement pour un poinçon tulipe et sélectionné, grâce à la simulation, un design qui est apparu comme le meilleur compromis entre l'efficacité thermique et le maintien de la résistance mécanique de l'outil.

La fabrication du poinçon thermorégulé a été réalisée par deux voies distinctes : la fabrication additive et l'usinage des canaux suivi d'un assemblage par soudage.

Pour le moment, les essais industriels n'ont pas pu montrer tout le potentiel de la thermorégulation sur la durée de vie des outils car le poinçon issu de la fabrication additive n'a pas été réalisé dans un matériau adéquat à l'application et la résistance mécanique de l'assemblage par soudage-diffusion et brasage-diffusion est insuffisante.

Dans cette étude, il reste à tester l'assemblage par CIC en conditions industrielles. De plus, les aciers à outils sous forme de poudre et leur paramétrie commençant à être disponibles pour la fabrication additive, de nouveaux essais pourraient être envisagés.



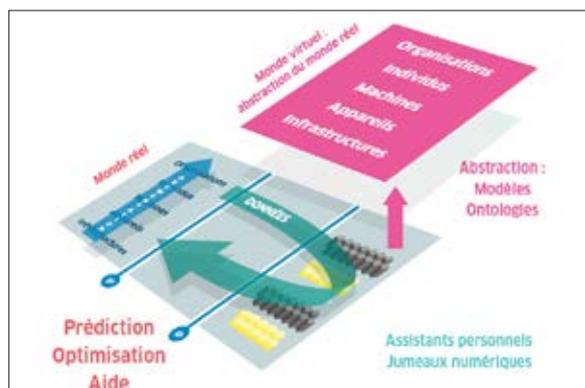
Patrick HAIRY,  
Responsable Pôle de  
Développement Métallurgie et  
Procédé CTIF

## Les jumeaux numériques dans l'industrie

Le concept de jumeaux numériques (ou *Digital Twins*) est relativement récent (2002) et si on en parle beaucoup, le nombre de développements réels et opérationnels semble encore assez faible à ce jour, bien que de nombreux POC (*Proof Of Concept*) aient été développés. Les jumeaux numériques supposent le développement d'une modélisation en général multi-physique d'un objet ou d'un système complexe et l'intégration de capteurs sur l'objet réel afin de réaliser (dans certains cas) un suivi en temps réel. Les applications les plus citées concernent des infrastructures de production (usine, réseau ferroviaire), des machines-outils (usinage ou autre), des systèmes robotisés, des produits complexes (moteurs, organes...). Si les développements sont initiés plutôt par des grands donneurs d'ordre (GE, ABB, SNCF, Siemens, Latécoère, ...), des ETI (Heller, Baud Industries, Rittal) s'impliquent aussi.

### Le potentiel des jumeaux numériques

Le concept de jumeau numérique a été formalisé [3] par le Dr. Michael Grieves en 2002. Le cabinet d'analyse américain Gartner [1] résume le jumeau numérique ou digital twin par « une **copie digitale mise à jour en temps réel** ». Il le place d'ailleurs dans son Top 10 des technologies clés en 2017. Il estime que dans les trois à cinq prochaines années, sur les quelques milliards d'**objets connectés** qui existeront sur la planète, sans doute 100 à 200 millions auront un digital twin... « Mise à jour en temps réel » implique par ailleurs [1] un lien entre la copie digitale et le produit réel. Un JN (Jumeau Numérique) ne peut donc que s'adresser à un **produit existant, équipé de capteurs** et de moyens de **communication sans fil** pour renseigner son double digital sur son « état de santé ».



Les doublures numériques, abstraction du monde réel [5]

Tout produit manufacturé [1] peut bénéficier de son double digital. Cela peut être une simple vanne, un ascenseur, un avion de ligne, ou encore une machine-outil. Le JN peut ainsi être déployé à l'échelle d'un process complet : tous les équipements d'un complexe industriel, ou plusieurs machines au sein d'une ligne de production, jusqu'à l'usine complète. Et à l'échelle supérieure, pourquoi ne pas envisager le jumeau numérique d'une ville complète. On estime que d'ici 10 ans [1], la moitié des systèmes de surveillance des infrastructures de production bénéficieront des technologies du jumeau numérique d'après Yohann Mesmin, Directeur Technique et Développement chez Siemens.

## Les différents types de jumeaux numériques

Le terme « jumeau numérique » recouvre en fait différents types d'outils et de développement et différents objectifs. Il n'existe probablement pas de terminologie précise qui distingue les différents outils.

On peut cependant distinguer :

- **Le jumeau virtuel sans couplage avec la réalité** (usine virtuelle, machine virtuelle) qui permet d'optimiser en amont le développement d'un sous ensemble (usine, machine) et d'étudier différents scénarii d'utilisation (marche normale, marche dégradée, impact de paramètres de fonctionnement, ...). On est alors probablement sur un jumeau numérique de plus bas niveau que les deux autres jumeaux. L'innovation réelle et l'enjeu technique consistent à faire tourner le jumeau en temps réel avec de la simulation multi-physiques (MOR) ;
- **Le jumeau numérique couplé avec de la réalité augmentée**, qui permet de tester l'intervention humaine sur une machine ou une pièce complexe (montage, maintenance, soudabilité, ...). Ce type d'application met en œuvre un sous-ensemble virtuel et un process virtuel de réalité augmentée ;
- **Le « close loop digital twins » avec un couplage réel entre jumeau numérique et jumeau réel.** On est alors sur un jumeau numérique de « haut niveau ». Dans ce cas, des capteurs sur le jumeau réel permettent de transmettre en « temps réel » des informations (température, pression, mouvement), vers le jumeau numérique qui peut alors simuler le comportement (également en temps réel) et interagir en retour vers le jumeau réel pour modifier son fonctionnement. On a alors un fonctionnement en « boucle fermée » (close loop) entre le modèle virtuel et le modèle réel.



Jumeau numérique avec réalité augmentée (Chinese electronics company Bozhon)

La technologie est encore assez nouvelle et cette classification est sans doute réductrice. Il existe probablement des cas de jumeaux numériques intermédiaires où une partie de l'objet est en mode « close loop » (car facilement instrumentable) et où d'autres parties de l'objet ne sont pas reliées au modèle virtuel.

## Les vidéos sur les Digital Twins

Des vidéos (Youtube et autres) sur la technologie des Digital Twins permettent de mieux appréhender leur principe et leurs intérêts :

- Introduction to digital twins  
<https://www.youtube.com/watch?v=RaOejcczPas>
- Continuous engineering with digital twins  
<https://www.youtube.com/watch?v=Ri0TD7kYsIQ>
- Industrie 4.0 – the digital twins concept  
[https://www.youtube.com/watch?v=LQAgBW\\_9EUc](https://www.youtube.com/watch?v=LQAgBW_9EUc)
- Jumeau d'une centrale (EDF)  
<https://www.youtube.com/watch?v=O7bRiIPvuCU>
- Jumeau numérique, levier incontournable de l'industrie du futur  
<https://www.youtube.com/watch?v=4BeP5Ee1KLU>
- Creating a digital twin with ANSYS  
<https://www.youtube.com/watch?v=cxoHx7kitzk>
- Creo Insight – le digital twin de demain  
[https://www.youtube.com/watch?v=IIRDL\\_qVWV4](https://www.youtube.com/watch?v=IIRDL_qVWV4)
- SAP's view on network of digital twins  
<https://www.youtube.com/watch?v=lx86YtzuoyE>

## La technologie “Model Order Reduction”

Les calculs de simulation numérique (thermique, fluide, mécanique, ...) ont des **temps de calculs** souvent très importants (quelques heures) incompatibles avec la notion de temps réel développé dans le concept du jumeau numérique. Afin de tirer parti de la simulation numérique en temps réel, on utilise assez classiquement la réduction de modèle ou MOR (« **Model Order Reduction** »). Cette technologie [10], qui semble être une technologie clef pour le développement des jumeaux numériques [11], consiste tout d'abord à identifier les jeux de **paramètres majoritairement utilisés**, ensuite à faire tourner un ensemble de **simulations représentatives des différents états** d'un système réel, et enfin à utiliser les résultats de calcul dans des **modèles réduits** (mais néanmoins précis) qui sans être exhaustifs, s'appliquent dans le périmètre du système à simuler. Ces modèles sont alors capables de donner des réponses en temps réel. On cite ainsi en exemple la mécanique des fluides autour d'un avion de combat F16 où la technologie MOR a permis de réduire le modèle de 2 millions de degrés de liberté à un modèle à 90 degrés de liberté.

## Les acteurs dans la technologie des jumeaux numériques

Les principaux acteurs industriels dans les jumeaux numériques et les outils logiciels développés que l'on peut citer sans être exhaustif, sont :

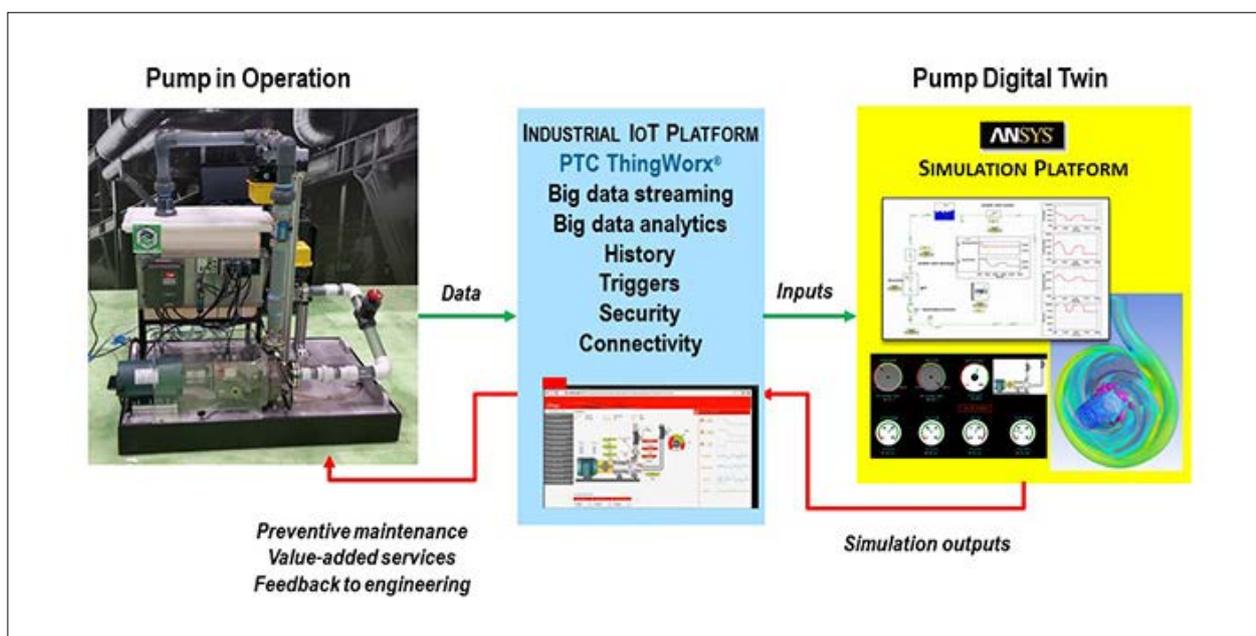
- Predix Platform, outil de GE Digital (General Electrics) <https://www.ge.com/digital/iiot-platform>
- Digital Enterprise Suite de Siemens <https://new.siemens.com/global/en/company/topic-areas/future-of-manufacturing/digital-enterprise.html>
- ANSYS Twin bluilder <https://www.ansys.com/fr-fr/products/systems/digital-twin> et <https://www.ansys.com/fr-fr/products/systems/ansys-twin-builder>
- SAP Digital Twin Software – par SAP, le distributeur d'ERP leader <https://www.sap.com/products/digital-supply-chain/digital-twin.html>
- Seebo digital twin software <https://www.seebo.com/digital-twin-software/>
- ESI Group avec la partie simulation numérique et des compétences en MOR, technologie clef pour le développement de jumeaux numériques
- THE MODEL ORDER REDUCTION PLUGIN (This plugin of SOFA will allow to reduce dramatically computation time thanks to model reduction) -<https://project.inria.fr/modelorderreduction/>
- Alliance Dassault System et ABB pour offrir une solution logicielle permettant de créer des jumeaux numériques (mais pas que) avec les plateforme 3DEXPERIENCES et ABB Ability <https://www.zonebourse.com/actualite-bourse/ABB-et-Dassault-Systemes-signent-un-partenariat-mondial-pour-la-fourniture-de-logiciels-aux-industri--28083028/>

Si certains acteurs majeurs du logiciel ne proposent pas à l'heure actuelle de solutions dans ce domaine, au vue des enjeux annoncés, on peut penser que tous les grands éditeurs de softwares orientés vers l'industrie offriront à court terme une solution permettant de créer un jumeau numérique.

## Applications des jumeaux numériques

L'objectif d'un jumeau numérique [1] est de récupérer les données de fonctionnement opérationnel des produits, pour obtenir un monitoring en temps réel de leurs performances, de leur vieillissement, de leur maintenance, et ceci en exploitant leur modèle numérique comportemental.

Les applications sont nombreuses. Mais la jeunesse du concept, sa relative complexité et la discrétion des acteurs les plus avancés sur le sujet font qu'il y a encore peu d'exemples opérationnels et publics [1] ... **Même si de plus en plus de POC (Proof of Concept) et de projets sont en cours.**



Digital twins d'une pompe Flowserve.

## Exemple d'application N°1 : Pompe Flowserve

Un jumeau digital d'une pompe [13] Flowserve a été développé.

Le jumeau numérique d'une pompe Flowserve (développé par ANSYS) illustre le système multi-physique mis en place, incluant les aspects fluides, électromécaniques, électromagnétiques et thermiques. L'objectif de ce développement est de déterminer, surveiller et maintenir la température optimale à laquelle doit fonctionner le moteur et ses composants. L'enjeu est de taille. En effet, chaque augmentation de 10°C de la température de fonctionnement du moteur, et des composants au-dessus de leurs températures optimales, diminue de moitié la durée de vie du moteur. Le débit et la pression ont une incidence sur le fonctionnement du moteur et sur la température à laquelle il fonctionne. La pompe physique est connectée au moteur entraîné par le contrôleur électrique. Avec le jumeau numérique, seules deux entrées de deux capteurs indiquant la position d'ouverture des deux vannes de débit contrôlant le débit à travers la pompe sont nécessaires pour simuler l'ensemble du système, ce qui permet de mieux comprendre les conditions de fonctionnement de la pompe et du moteur. En utilisant des capteurs virtuels intégrés dans des modèles de simulation, le besoin de capteurs physiques peut être considérablement réduit. Avec le jumeau numérique et les informations des deux capteurs de la pompe, on est en mesure de déterminer les températures du moteur en plus du courant, du débit et de la pression à différents endroits et à tout moment.

Cela nécessite tout d'abord une simulation électromagnétique des composants du moteur pour calculer les sources de chaleur au sein du moteur lui-même. Ensuite, ces résultats sont transmis à une simulation CFD pour déterminer les aspects de refroidissement. Deux MOR (Model Order Reduction) ont été créées, la première pour l'électromagnétisme du moteur et la seconde pour le refroidissement. Ces deux MOR permettent des prévisions rapides des températures transitoires et permanentes des composants du moteur. L'état futur des températures des composants du moteur ne peut pas être déterminé sans l'utilisation d'un jumeau numérique. En raison de l'inertie thermique des composants du moteur ou d'un environnement extérieur soumis à une température ambiante élevée et variable, il est quasiment impossible pour un opérateur de prédire des pics anormaux de température. En pouvant prédire les résultats de certains changements de la température ambiante, de la pompe, du fluide ou du débit et leur effet immédiat sur la température du moteur et de ses composants, l'opérateur peut prendre des mesures correctives à un stade précoce, contribuant ainsi à préserver la durée de vie du moteur et de ses composants.

Comme l'explique Eric Bantegnie, Président d'Ansys France, « cela permet par exemple de prédire la durée de vie effective d'un produit, en simulant virtuellement les paramètres qui la conditionnent, et qu'il est parfois impossible de contrôler sur place. Exemple : la longévité d'une pompe [1] est déterminée par le pourcentage du temps où elle va caviter. Or, on ne peut pas mettre un capteur au milieu de la pompe pour mesurer cette information. Mais on sait calculer cette cavitation par simulation 3D. On peut aussi créer des capteurs virtuels pertinents à partir de capteurs réels disponibles. Cela ouvre une extension de la simulation avec un facteur d'échelle considérable puisqu'elle sera exploitée sur la durée de vie des produits. Pour les concepteurs, c'est également la possibilité de récupérer des données d'exploitation de chaque produit commercialisé. Donc la possibilité de les améliorer en continu par exemple en mettant à jour les logiciels embarqués. »

## Exemple d'application N°2 : Climatiseurs professionnels

Le fabricant Rittal, par exemple, travaille sur des climatisations professionnelles [1] dont le JN surveille en permanence la température, le voltage et différents indicateurs pour passer d'une maintenance préventive à une maintenance prédictive. Une démarche qui lui permet de vendre non plus un climatiseur, mais une température selon des conditions de service et de durée définies avec son client.

## Exemple d'application N°3 : Machines-outils

Heller, [1] constructeur de machines-outils, développe un JN de ses machines-outils, assurant un monitoring temps réel de ces dernières.

Dans le même registre, l'usinage de haute précision doit répondre à un défi de taille : proposer des pièces de plus en plus complexes et précises tout en maintenant des prix les plus bas possibles. Pour répondre à ce défi Baud Industries s'est doté d'une cellule d'usinage intelligente [6] qui s'autocorrige en temps réel. La cellule embarque également un jumeau numérique permettant de réaliser des préséries virtuelles sans immobiliser la machine.

## Exemple d'application N°4 : Le jumeau numérique ABB

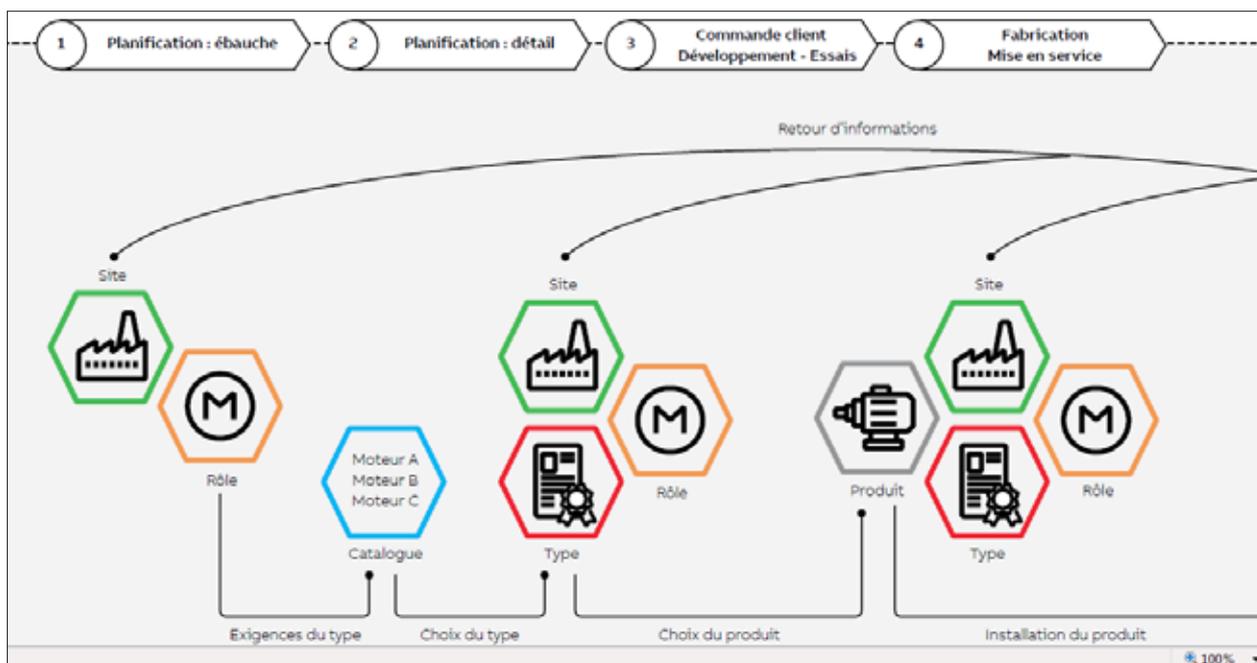
À l'heure actuelle, il est impossible d'échanger des informations entre entreprises de manière continue et transparente. A titre d'exemple, ABB [2] n'a pas accès aux données sur le comportement en service de ses produits, sauf si le client demande une intervention sous garantie, partage les rapports d'intervention établis par son service maintenance, ou encore fait explicitement remonter l'information au fournisseur, par l'intermédiaire d'un échange avec le commercial notamment. Or, toutes ces sources étant incomplètes et parfois inexacts, le concepteur ne dispose que d'informations

fragmentées et incertaines pour élaborer les nouvelles générations de produits. Le jumeau numérique se veut ici la plaque tournante des échanges interentreprises ; il permet, par exemple, de gérer une sélection d'informations d'exploitation et de maintenance sur un actif et de les partager avec des tiers de manière appropriée. Les données du procédé et les modèles fournis par le jumeau numérique, de même que les résultats des simulations temps réel, aident à prédire les exigences des prochaines générations d'actifs et à en optimiser la conception. L'analyse prédictive permet aux fabricants d'évaluer en confiance les futurs défis. Le jumeau numérique

promet ici une amélioration continue de la conception produit, à partir de données réelles. Compte tenu de son importance dans l'Industrie 4.0, le jumeau numérique et ses différents aspects font l'objet de plusieurs études ABB. Le projet BaSys 4.0 [7], par exemple, mené en concertation avec le ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche (BMBF), rassemble 15 partenaires industriels et universitaires avec pour objectif de développer une plate-forme de référence ouverte, centrée sur le jumeau numérique, pour accroître la flexibilité de la production manufacturière ou continue.

**Exemple d'application N°5 : Le prêt à produire dans une usine**

Là où il ne fallait pas moins d'une dizaine de minutes pour configurer et mettre en service un appareil de terrain, quelques fractions de seconde suffisent. Le jumeau numérique [2] s'en inspire pour bâtir ici un scénario de « prêt-à-produire ». En incorporant d'autres référentiels de l'informatique, de la communication et de l'automatisation industrielles, en particulier les recommandations d'associations d'utilisateurs comme NAMUR, le jumeau numérique fédère et uniformise toutes les données nécessaires au développement, à la mise en service, à l'exploitation et au remplacement des appareils de terrain. Le lien établi entre le jumeau numérique et son pendant physique permet aux opérateurs de télécharger automatiquement les paramètres dans les appareils et de les mettre en route. Si un remplacement physique nécessite encore un personnel qualifié, le jumeau numérique autorise une reconfiguration immédiate, sans expertise du matériel ou du procédé. Concrètement, là où il ne fallait pas moins d'une dizaine de minutes (à condition de ne rencontrer aucun problème) pour configurer et mettre en service un appareil de terrain, quelques fractions de seconde suffisent avec le jumeau numérique. Pour une unité de production de taille moyenne comptant 10 000 entrées/sorties, ce ne sont plus que quelques minutes de travail... au lieu d'une semaine !



Jumeau numérique d'une chaîne de production [2].

## Exemple d'application N°6 : le jumeau numérique d'une usine

Le jumeau numérique d'une usine [7] peut avoir plusieurs finalités qui déterminent la complexité du projet de simulation :

- **La simulation d'implantation** : il s'agit de simuler l'implantation d'une usine ou d'une chaîne de production. Dans le cadre de la construction d'une nouvelle usine ou l'implantation de nouvelles machines ou chaînes de production, la réalisation préalable d'un jumeau digital permet de valider les plans et d'identifier d'éventuelles collisions avec le bâtiment, de tester des scénarii d'installation de machines, ou encore de communiquer plus visuellement sur le projet.
- **La simulation d'équipement** : l'objectif est ici de simuler les équipements de l'usine ou de la chaîne de production plus en détail en incluant la cinématique. Il devient possible de valider les conditions de travail des opérateurs ou encore, de faire fonctionner les automates en condition réelle et de détecter par exemple des interférences.
- **La simulation de flux** : avec la simulation des flux de production, il devient possible de tester plusieurs options d'organisation, de calculer les taux d'occupation des ressources ou de déterminer la cadence optimale. Le jumeau numérique devient un véritable outil d'aide à la décision.
- **Le virtual commissioning** : le jumeau numérique de l'usine permet de réaliser des tests ou des modifications sur les programmes automates tandis que l'équipement réel continue de travailler sur la chaîne de production sans aucun impact.
- **La réalité virtuelle** : avec cette option, il devient possible de se projeter à l'intérieur du jumeau numérique de l'usine et d'inspecter le bâtiment, les chaînes de production, les ressources, jusqu'aux flux de production. La réalité virtuelle appliquée au Digital Twin devient un outil pour tous les acteurs de la production.

## Exemple d'application N°7 : le jumeau numérique Latécoère [7]

Société historique et centenaire de l'aéronautique toulousaine, la société Latécoère détient en son ADN les aspects pionnier et innovation. A la suite d'une réflexion sur un plan stratégique de refonte de ses outils industriels et pour rendre Latécoère attractif et compétitif d'ici 2020, l'entreprise a décidé de mettre en place le projet d'une nouvelle usine sur le secteur toulousain. Dans le cadre de ce projet, Latécoère a utilisé pleinement le potentiel du jumeau numérique de l'usine. Ont été simulés selon 3 axes :

l'implantation des moyens à l'intérieur du bâtiment, les flux de production et les aspects charge de capacité des différentes lignes de production comme le précise Jean-Michel Tremoulet, Directeur de l'innovation chez Latécoère.

## Exemple d'application N°8 : logiciel de simulation d'usines SOSI [8]

Avec plus de 800 brevets à son actif, SOLYSTIC a le souci permanent de l'innovation. "Nos axes de R&D vont de l'amélioration des performances/fonctionnalités des équipements existants à la création de nouvelles solutions, dans un objectif d'optimisation et de réduction des coûts chez nos clients", souligne Éric Daymier. L'innovation touche aussi aux méthodes de travail : « Nous avons ainsi développé SOSI™, un système de 'jumeaux numériques' qui permet de démontrer par la simulation la faisabilité d'un concept, de le tester numériquement tout au long de son développement, et de l'intégrer de façon optimisée. Développé en interne par nos experts en jeux vidéo, SOSI™ permet de simuler en 3D tous les aspects du fonctionnement d'une solution, en faisant varier un maximum de paramètres ». Le processus est extrêmement rapide (un cycle de production de 14 heures se simule en une heure), ouvrant la voie à l'étude de situations impossibles à tester autrement.

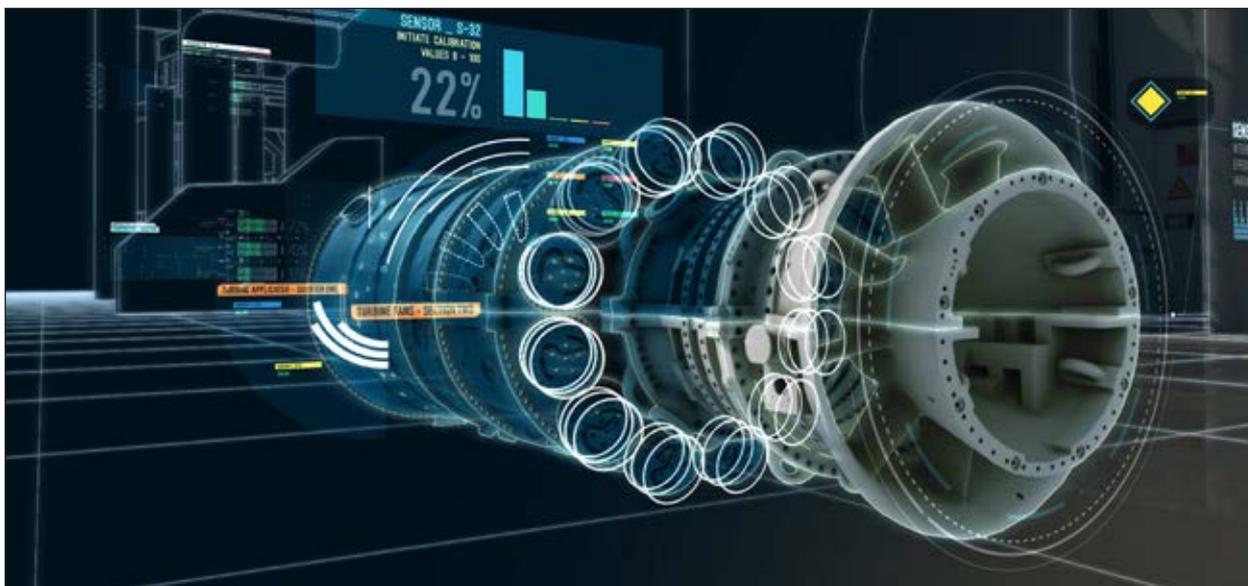
## Exemple d'application N°9 : jumeau numérique de système et d'infrastructure ferroviaire [9]

«Le jumeau numérique nous donne une description physique du réseau, une description de l'état de ses composants, et une descriptive de la manière dont il fonctionne» note Claude Solard, Directeur général délégué Sécurité, Innovation & Performance industrielle (SNCF). « Cela permet d'aller vers la maintenance prédictive en lieu et place de la maintenance curative, mais aussi de faire de la simulation, ou encore de former les personnels sur des procédures et des cas rares ».

## Autres exemples d'applications :

### Motorisation aéronautique [3]

Les cas d'usage industriels listés [3] sont potentiellement nombreux : modélisation et simulation de systèmes complexes (intégration de la modélisation multi-physique), amélioration de la performance globale des systèmes complexes, accroissement de la fiabilité, meilleure appréhension de la complexité des systèmes (aide à la décision), gain de temps de conception par prototypage virtuel, amélioration de la coopération des équipes projet multidisciplinaires ou encore la surveillance et analyse de systèmes complexes.



Motivisation et turbines industrielles GE Electric

### Phase de conception d'un produit

Pendant la phase de conception d'un nouveau produit [5], le jumeau numérique d'une chaîne de fabrication permettra aussi de s'assurer par simulation de la « bonne fabricabilité » d'un nouveau produit et de préparer son introduction en production.

### Intégration pédagogique

Pour ce qui est de la pédagogie [4], l'enjeu est double pour les ingénieurs : savoir développer et savoir exploiter les jumeaux numériques, c'est-à-dire modéliser et simuler des systèmes complexes. Sur ce point, le parallèle sera fait avec l'apparition des logiciels de CAO qui ont progressivement remplacé les planches à dessin industriel. Ainsi, les établissements d'enseignement supérieur devront mettre en œuvre les modules et formations adaptés à l'acquisition des compétences de développement des jumeaux numériques. Tout comme cela a été nécessaire dans l'enseignement pour l'intégration des logiciels de CAO. Evidemment, cela sera particulièrement pertinent pour les enseignements en conception de produits industriels. De plus, l'utilisation des jumeaux numériques va permettre de dupliquer des équipements de formation. Ainsi, un simulateur de ligne de production installé physiquement à un endroit pourra voir son jumeau numérique exploité sur un autre centre.

### Des perspectives pour les métiers du métal

On l'aura compris, les métiers de la forge, de la fonderie, de la fabrication additive, et plus largement de la mise en forme des matériaux métalliques, ont toutes les qualités requises pour être au rang des premiers utilisateurs qui

pourront tirer un avantage rapide de l'utilisation des jumeaux numériques sur leurs procédés industriels.

Quatre aspects font des métiers de la métallurgie de parfaits clients pour une exploitation rapide, efficace et diversifiée du JN :

- la **multiplicité** des paramètres mis en œuvre (mécaniques, thermiques, fluidiques, électromagnétiques, dimensionnels...),
- la **complexité** des phénomènes multiphysiques en jeu (et l'avantage que tout ou partie soit aujourd'hui modélisé ou modélisable),
- l'importance de la **maîtrise** des variations des paramètres en cours de process (avec aujourd'hui d'ores et déjà beaucoup de captation de données de production en temps réel), en lien avec les risques associés (qualité produit, fiabilité process, maintenance, sécurité, ...)
- la dimension « **multi-échelle** », de l'unité de production à l'usine complète, de la production unitaire à la production grande série, des tests sur échantillons aux productions grande échelle, de la mise au point process à la maîtrise en production
- la capacité de nos métiers à associer **numérique et physique réelle** dès que nécessaire pour réduire les temps et coûts des différentes phases du développement process (en conception, en mise au point, en production ... jusqu'à la GMAO)

Plusieurs projets sont à l'étude, et les POC devraient se multiplier dans les mois à venir. CTIF s'inscrit dans cette dynamique, avec différents projets en cours ou en montage, associant partenaires académiques, éditeurs de logiciel, développeurs process, et partenaires industriels, respectivement sur les domaines du CND, de la Fabrications Additive, de l'Instrumentation process.

Que ce soit en réalité augmentée, en surveillance de process, en prédiction (de qualité, de comportement ou de durée de vie), en auto correction (des dérives ou des incidents), en contrôle de production (CND, autres), en Plan d'Expérience Numérique (réduction des temps et efforts

de développement), l'association de la modélisation de systèmes complexes, à l'instrumentation et mesure en temps réel en fonderie, forge et fabrication additive, devrait permettre de nouveaux progrès majeures en compréhension, maîtrise et amélioration des technologies mises en œuvre. Ce sont donc des produits et procédés connectés et « jumelés » qui vont contribuer à doper le progrès de nos industries du futur (pas si lointain !).

En savoir plus : hairy@ctif.com

Sources : Isabelle LACOSTE,  
service veille et diffusion de CTIF

## Principe

- [1] [http://www.cad-magazine.com/sites/default/files/cad202\\_38-39.pdf](http://www.cad-magazine.com/sites/default/files/cad202_38-39.pdf)
- [2] <http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=%20%20%209AKK107046A8849%20&LanguageCode=fr&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [3] <http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107046A3114&LanguageCode=fr&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [4] <https://www.institutreindus.fr/wp-content/uploads/2018/12/Ch%C3%A2pitre-2-Briques-technologiques-et-cas-dusages.pdf> (notamment p.31-32)
- [5] [http://www.anrt.asso.fr/sites/default/files/politique-industrielle-numerique\\_futuris-anrt-web.pdf](http://www.anrt.asso.fr/sites/default/files/politique-industrielle-numerique_futuris-anrt-web.pdf) (notamment p.25-26)

## Quelques applications industrielles

- [6] [http://www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2018/03/2018\\_03\\_16\\_AIF\\_EtudeVitrines\\_%C3%A9dition-f%C3%A9vrier-2018.pdf](http://www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2018/03/2018_03_16_AIF_EtudeVitrines_%C3%A9dition-f%C3%A9vrier-2018.pdf)
- [7] [https://www.visiativ-industry.fr/le-digital-manufacturing/le-jumeau-numerique-de-lusine/?gclid=CjwKCAiA767jBRBqEiwAGdAOr73tnH9Lfm--rCHp8bjbkv4j4cl8Kl-Z6G2HIYeObcqz3dKKXQotMRoCU5IQAvD\\_BwE](https://www.visiativ-industry.fr/le-digital-manufacturing/le-jumeau-numerique-de-lusine/?gclid=CjwKCAiA767jBRBqEiwAGdAOr73tnH9Lfm--rCHp8bjbkv4j4cl8Kl-Z6G2HIYeObcqz3dKKXQotMRoCU5IQAvD_BwE)
- [8] [https://www.solystic.com/data/medias/498/style/default/Lusinenouvelle\\_Logistique\\_SOLYSTIC\\_SOSi.pdf](https://www.solystic.com/data/medias/498/style/default/Lusinenouvelle_Logistique_SOLYSTIC_SOSi.pdf)
- [9] <http://www.ecoter.org/emailing/LIDARSNCF.pdf>
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/Model\\_order\\_reduction](https://en.wikipedia.org/wiki/Model_order_reduction)
- [11] Model Order Reduction A key technology for Digital Twins, Dirk Hartmann, Matthias Herz, Utz Wever Siemens AG, Corporate Technology, D-80200 Munich, Germany November 17, 2017
- [12] <https://www.siemens.com/customer-magazine/en/home/industry/digitalization-in-machine-building/the-digital-twin.html>
- [13] <https://www.ansys.com/fr-fr/about-ansys/advantage-magazine/volume-xi-issue-1-2017/creating-a-digital-twin-for-a-pump>






**Alliages d'Aluminium Primaires**  
*(sur demande, alliages bas Fe - bas Si)*

**Alliages mères d'Aluminium**  
*(Base Aluminium 99,7% : Magnésium, Strontium, Strontium-Calcium, Silicium...)*

**Transformation d'alliages spéciaux avec remise au titre**  
*Pour toute demande spécifique, nous consulter.*

ADIAL ■ Route de Moulismes ■ 86430 ADRIERS  
Tél: 33 (0)5 49 48 01 00 ■ Fax: 33 (0)5 49 48 13 10  
E-mail : [adial@adial-alu.com](mailto:adial@adial-alu.com) ■ site : [www.adial.fr](http://www.adial.fr)



## Mise au point d'un nouveau procédé breveté pour accélérer le durcissement des noyaux de sable inorganique

Les noyaux de sable sont le cœur des produits des fonderies modernes et permettent les formes les plus complexes. Un procédé récemment breveté améliore le processus de durcissement du noyau de sable inorganique jusqu'à 33 %.

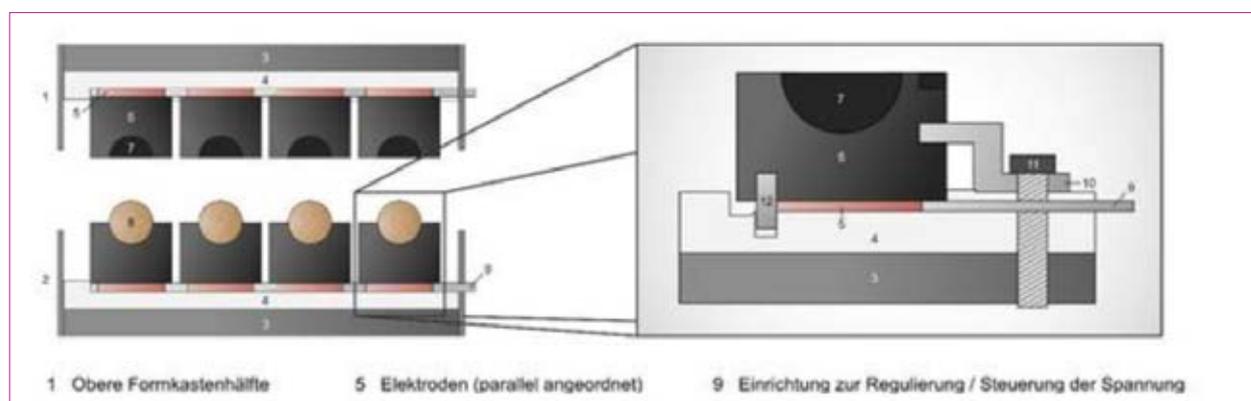


Figure 1: Schéma de la conception de la boîte à noyau (à gauche) avec une illustration détaillée de la fixation du matériau de moulage dans la boîte à mouler (à droite)

Les processus et l'industrie qui sous-tendent la fabrication des noyaux de sable évoluent constamment pour proposer des solutions plus respectueuses de l'environnement tout en réduisant les coûts et les temps de cycle. Diverses sociétés bien connues sont spécialisées dans l'offre de solutions pour les fonderies modernes : préparation du sable, carottage, durcissement et retrait du noyau.

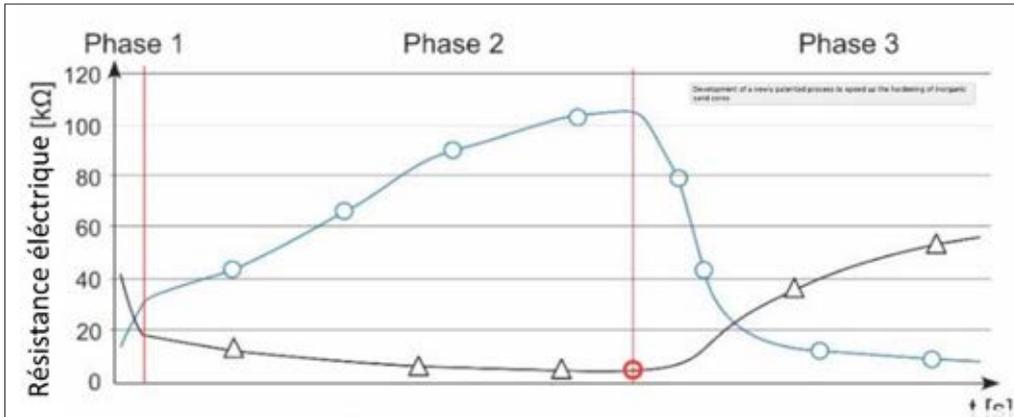
Pour le prototypage et les petites séries, la fabrication additive, appelée impression 3D, montre la voie. Pour les grandes séries, le processus de la boîte froide et la fabrication des noyaux inorganiques évoluent, alors que les procédés inorganiques gagnent constamment des parts de marché en raison du renforcement des normes environnementales dans le monde entier.

Avec les liants inorganiques, c'est la chaleur qui permet le durcissement des noyaux de sable. Le transfert de chaleur de la boîte à noyaux aux noyaux de sable repose sur une bonne conductibilité thermique de l'aluminium au sable. Malheureusement, les sables et les liants employés ont une conductivité thermique limitée. La chaleur est appliquée par l'extérieur et transférée aussi près que possible des noyaux de sable via des boîtes à noyaux potentiellement complexes. La faible conductivité thermique du sable provoque la formation de coques pendant le processus de durcissement, car la chaleur ne peut pas être transférée

suffisamment rapidement de l'extérieur vers l'intérieur du noyau de sable. Les aspects financiers ne justifient pas toujours un durcissement à 100% des noyaux de sable en raison des délais requis.

Le projet «**ACS - Advanced Core Solutions**», développé par Soplain GmbH, se concentre sur la génération de chaleur directement dans les noyaux de sable par l'application de courants électriques. Le principe de la génération de chaleur due à la résistance électrique d'un matériau est bien connu et est maintenant appliqué aux processus de fabrication de noyaux de sable. Les avantages sont non seulement un durcissement plus rapide du noyau de sable mais également une meilleure efficacité énergétique, car l'apport de chaleur externe via la boîte à noyau pourrait être supprimé et une maintenance réduite.

Le concept de production de chaleur par électricité n'est pas nouveau. Les premiers brevets ont été déposés en 1970 mais ils n'ont jamais été industrialisés. La raison principale était que les boîtes à noyaux sont généralement construites en aluminium ou en acier et que toute application d'électricité présente donc un risque de court-circuit une fois l'électricité appliquée. Les nouveaux procédés brevetés résolvent ce problème en ajustant la résistance du matériau de la boîte à noyau sur la résistance électrique du mélange liant-sable.



La photo 2 montre la courbe typique qui peut être mesurée.

Ainsi, la résistance électrique entre deux électrodes est presque identique en tout point, ce qui garantit un flux de courant électrique homogène à travers la boîte à noyau et le noyau en sable. L'effet positif est que la chaleur est directement générée à l'intérieur du noyau de sable et que chaque partie est chauffée de manière égale. Il en résulte un durcissement homogène et la possibilité d'utiliser immédiatement les noyaux produits.

L'équipe du projet ACS - Advanced Core Solutions a validé le procédé à l'échelle du laboratoire et prépare actuellement des tests sur des équipements industriels..

## 1. Approche expérimentale

Des dizaines de mélanges sable-liants inorganiques ont été testés pour mesurer l'évolution de la température par rapport à la résistance électrique. Un échantillon de chaque mélange a été chauffé de manière constante en appliquant un courant électrique et en mesurant la conductivité électrique et la température. Avec cette approche, la résistance électrique optimale a été identifiée pour appliquer le niveau d'énergie maximal à l'échantillon.

**Lors de l'application d'un courant électrique sur des mélanges sable-liant, il existe généralement 3 phases principales :**

**Phase 1:** résistance initiale. Après avoir appliqué le courant électrique, la résistance initiale doit être surmontée. Dès que le mélange sable-liant chauffe, la résistance diminue, car avec l'augmentation de la température davantage de porteurs de charge électrique sont disponibles.

**Phase 2:** Réduction constante de la résistance électrique jusqu'à ce que le mélange sable-liant atteigne environ 100 °C et que les porteurs de charge électrique s'évaporent. À la fin de cette phase, l'énergie maximale peut être appliquée aux échantillons. La conductivité électrique dans

cette phase définit également la conductivité idéale (point rouge sur l'image ci-dessus) du matériau de la boîte à noyau afin de garantir une résistance presque identique entre le mélange liant sable et le matériau de la boîte à noyau.

**Phase 3 :** La résistance commence à augmenter lorsque les porteurs de charge électriques ont disparu du noyau.

La température (fonction de la pression) est maintenant supérieure à 110 °C et la résistance augmente constamment avec la température.

Au cours des tests, le liant inorganique utilisé nécessitait, avec les systèmes de boîtes à noyaux classiques, environ 150-180 °C. Cette température est généralement fixée de manière à ne pas endommager les liants du fait d'une surchauffe, tandis que la température est choisie aussi élevée que possible pour assurer le meilleur transfert de chaleur possible vers les noyaux. Avec le nouveau procédé breveté, ces températures de travail pourraient être réduites car la chaleur est directement obtenue à l'intérieur des noyaux de sable.

La conductivité électrique du matériau de la boîte à noyau est basée sur la courbe de résistance à la température du mélange sable-liant. Si le matériau du boîtier de résistance électrique diffère énormément du mélange sable-liant-liant, le courant électrique ne circulera que dans le boîtier ou par le chemin le plus court traversant le noyau de sable. Dans les deux cas, le noyau de sable ne sera pas chauffé de manière homogène, comme le montre la photo 3.

**2. Avantages du procédé nouvellement breveté :** Différents avantages ont été identifiés lors des essais en laboratoire et lors de la préparation du projet pilote.

Les principaux avantages sont attendus pour les grands noyaux de sable avec un volume annuel de production élevé. C'est en effet dans ces conditions que l'homogénéité obtenue à la prise devrait permettre les gains de qualité et d'efficacité les plus élevés. Cela devrait aussi faciliter la production des noyaux de sable plus grands sans formation d'une coquille externe et pouvant être utilisés immédiatement après la phase de durcissement.

En outre, ce processus peut également être appliqué à des boîtes produisant un plus grand nombre de noyaux simultanément, car chaque cavité à noyau peut être équipée d'une paire d'électrodes individuelle et donc contrôlée en fonction de l'épaisseur du noyau de sable. Toute génération de chaleur externe peut être éliminée, ce qui réduit la consommation d'énergie par cœur, mais également les exigences en matière de maintenance, d'espace et d'investissement.

Les freins pour l'application dans les fonderies ont été considérablement réduits, car les compositions de liant inorganique existantes peuvent être utilisées sans aucune reformulation. Les machines existantes peuvent également être adaptées à cette nouvelle technologie et à l'unité de contrôle qui l'accompagne. Au total, une réduction des coûts et du temps passé pouvant aller jusqu'à 33% est envisagée par rapport aux procédés de durcissement traditionnels. Ceci est principalement lié à 3 aspects : consommation d'énergie, temps de cycle et coût de maintenance. Tous les avantages sont actuellement explorés lors des essais en laboratoire et seront vérifiés prochainement au cours de projets spécifiques.

## Perspectives

Pour le moment, la nouvelle technologie promet d'améliorer considérablement l'efficacité de la fabrication de noyaux de sable tout en réduisant la consommation d'énergie.

Les études de faisabilité préliminaires et les essais en laboratoire sont presque terminés. À l'heure actuelle, les préparatifs pour des essais à l'échelle industrielle sont en cours avec nos partenaires afin de démontrer les bénéfices sur un process de fabrication entièrement automatisé. D'autres résultats seront partagés dans un avenir proche.

Nous recherchons en permanence des partenaires intéressés pour mettre en œuvre cette technologie et en quantifier les avantages dans un environnement de production continu. Contactez-nous pour évaluer en quoi cette technologie peut améliorer votre production.

Contact@advanced-core-solutions.com

Source : foundry-planet.com

Publié avec leur aimable autorisation

Traduction Heidi Palzer et Nicolas Créon

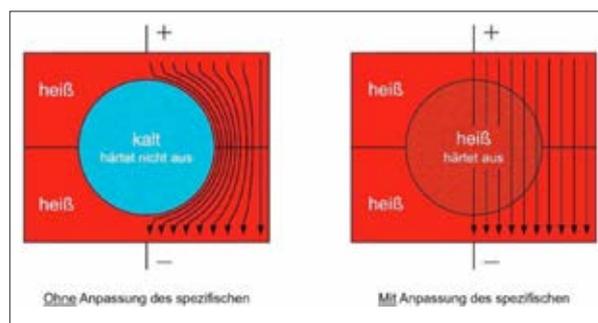


Figure 3: Effects of electrical properties of mold and molding material-binder mixture on the curing process



## Foseco investit pour augmenter la capacité de production des filtres STELEX ZR pour répondre à la demande grandissante

Foseco Japan Limited a récemment beaucoup investi dans la production des filtres pour acier pour augmenter la capacité de leur usine à Toyokawa au Japon.

Cet investissement a été nécessaire vu la demande de plus en plus importante pour la fabrication de pièces de très haute qualité en acier depuis plus de 3 ans.

Eivu Tei, directeur commercial de Foseco Japon, a dit: Cet investissement permet d'augmenter

la capacité de 50 % et était essentiel pour continuer à fournir ce marché en forte expansion.

Nick Child, chef de produits international pour les produits de filtration, a ajouté : Les spécifications demandées des pièces sont de plus en plus serrées et obligent le fondeur à améliorer la qualité, avoir de meilleures propriétés mécaniques et réduire le taux de rebuts.

La gamme de filtres Foseco, STELEX ZR à base de zircon, et STELEX PrO à base de carbone,

permettent d'atteindre ces objectifs en éliminant les inclusions non-métalliques du métal et en réduisant les défauts de réoxydation provoqués par un remplissage turbulent.



Gamme des filtres STELEX ZR de Foseco



Catherine BRUCIAMACCHIE  
Professeur d'anglais  
de la section fonderie  
Lycée Henri Loritz, Nancy

## Visite des BTS fonderie du Lycee Loritz de Nancy dans des entreprises



Afin de parfaire leur connaissance du milieu professionnel et de la langue anglaise, 47 étudiants de la section fonderie du Lycée Henri Loritz de Nancy (54) et leurs enseignants sont allés visiter l'usine de TELFORD

(PAM) dans la région de Birmingham en Angleterre pour observer les différentes étapes de fabrication des pièces, de la conception jusqu'à la pièce finie.

Ce voyage – autour de la fonderie – les a emmenés sur le site d'Ironbridge berceau de la révolution industrielle avec les premiers hauts fourneaux d'ABRAHAM DARBY de 1708 et le premier pont tout en fonte de 1775. S'en est suivi une visite du site du Black Country living museum pour y voir toutes les professions liées à la révolution industrielle.



Ils ont également visité OXFORD – cité universitaire, Stratford-Upon-Avon – ville de Shakespeare, Les *Cotswolds* (chaîne de collines et de petits villages comme dans les contes de fées), pour finir avec une visite très documentée de 3 heures sur le Londres industriel.

Sur le chemin de Telford, ils ont été accueillis à PITRES chez MANOIR INDUSTRIES (région de ROUEN)

Pour visiter la fonderie et la partie CND ( Contrôles Non Destructifs) puisqu'une partie d'entre eux pourra faire une licence CND au sein du lycée en partenariat avec l' EIGM.

Tous ont vraiment apprécié ces visites et surtout les discussions enrichissantes avec le personnel qui nous a reçu et a fait tout son possible pour que cet échange soit le plus bénéfique.

Un grand merci à MANOIR INDUSTRIES et TELFORD (PAM) pour l'investissement de leur personnel ainsi qu'aux entreprises SCHLUMBERGER (GUEBWILLER 68) et PAM SAINT GOBAIN de PONT A MOUSSON (54) sans oublier l'Union Régionale des Fondateurs de l'EST pour leur contribution financière.





Steven JEANDONNET-SAVY  
Compagnon Fondateur

Chargé de mission «Formation & Recrutement» pour l'association ouvrière des compagnons du devoirs et du tour de France

## Les compagnons du devoir

L'association ouvrière des Compagnons du Devoir et du Tour de France (AOCDTF) est une association de la loi 1901 reconnue d'utilité publique. Elle réunit des femmes et des hommes de m étier mobilisés autour d'un même idéal : permettre à chacun de s'épanouir dans et par son métier, dans un esprit d'ouverture et de partage. En tant qu'organisme de formation initiale et continue, elle vise à transmettre aussi bien des savoirs et savoir-faire – par l'apprentissage d'un métier – que des savoirs-être – par le partage de valeurs, telles que la solidarité, la fraternité et la générosité. Au-delà de la formation, le compagnonnage est une expérience professionnelle, humaine et culturelle.

### Des formations adaptées au projet professionnel de chacun

Les Compagnons du Devoir incarnent une école adaptée au profil et à la volonté de tous. Spécialiste de l'alternance et de la mobilité, les Compagnons du Devoir proposent ainsi 3 parcours de formation garantissant un emploi, une rémunération et des diplômes de formation supérieure, jusqu'à la licence professionnelle.

L'excellence de sa formation, ses expériences multiples en entreprises et son étape internationale obligatoire ont permis à l'association d'intégrer la Conférence des grandes écoles en 2014.

Les compétences techniques clés d'un métier : *la gestion et le management.*

Les Compagnons du Devoir sont l'un des premiers organismes de formation à être certifié ISO 9001.

**7500 salariés d'entreprises formées chaque année (1,3 million d'heures de formation) et 27 500 entreprises partenaires, sur l'ensemble du territoire.**

1 <sup>ère</sup> année	2 <sup>ème</sup> année	3 <sup>ème</sup> année	4 <sup>ème</sup> année	5 <sup>ème</sup> année	6 <sup>ème</sup> année
Prépa métier					
	Aspirant				
		Compagnon			



### Pour qui, pour quel avenir ?

La formation des Compagnons du Devoir et du Tour de France est reconnue par tous, en France comme à l'étranger. Cette qualification constitue un atout indéniable auprès des employeurs, permettant aux jeunes d'accéder sans difficulté à des postes à responsabilité dans les entreprises, mais aussi à se lancer dans la création ou la reprise d'entreprises.

## Le tour de France au cœur de la formation

Mobilité, découverte, professionnalisation, solidarité... : les valeurs historiques du Tour de France restent en phase avec l'évolution de la société d'aujourd'hui.

### Le tour de France : qu'est-ce que c'est ?

Depuis des siècles, les Compagnons du Devoir et du Tour de France ont toujours eu pour ambition de mettre la mobilité des "hommes de métiers" au service de la transmission des savoirs : le Tour de France leur permet de se perfectionner et, plus largement, de s'entraider. Cette tradition ne s'est jamais démentie au fil des siècles et perdure aujourd'hui : pour obtenir le titre de Compagnon, les Aspirants doivent accomplir un Tour de France (qui dépasse aujourd'hui les frontières hexagonales) de plusieurs années, balisé par la réalisation de travaux et la transmission des savoirs, de maison en maison.

Depuis l'ouverture de ses centres de formation, l'Association ouvrière des Compagnons du Devoir et du Tour de France a toujours pour mission principale de former des jeunes puis de leur proposer un Tour de France.

## UN PARCOURS EN 4 ÉTAPES

### Le départ

Pour entreprendre son Tour de France et devenir "itinérant", il faut déjà avoir une première formation dans un métier du compagnonnage, avoir envie de voyager et d'apprendre.

Au début de leur Tour de France, les jeunes vivent une période de quelques mois au cours de laquelle ils découvrent le principe de mobilité professionnelle et la vie en communauté dans les maisons des Compagnons du Devoir et du Tour de France qu'ils ont choisies comme étapes.

Celles-ci accueillent en leur sein tous les itinérants (tous métiers confondus) et leur proposent hébergement, restauration, formations complémentaires et accompagnement personnalisé. Ces multiples échanges sont l'opportunité pour les jeunes de trouver entraide et complicité à chaque étape de leur Tour de France. Les itinérants sont salariés d'entreprises à plein temps et se perfectionnent au sein des maisons.

### L'Adoption

Après quelques mois d'adaptation, les Compagnons du Devoir demandent au jeune de réaliser un travail démontrant ses capacités professionnelles et son engagement personnel. Une fois leur approbation obtenue, le jeune est alors "adopté". Devenu "Aspirant", le jeune deviendra Compagnon du Devoir pendant son Tour de France.

Outre sa formation en entreprise, le jeune bénéficie des enseignements des Compagnons du Devoir de son métier et il approfondit avec ses camarades itinérants ses connaissances professionnelles en cours du soir et le samedi. La transmission étant une composante essentielle du compagnonnage, l'Aspirant est amené à transmettre lui-même son savoir aux apprentis qu'il côtoie à la maison des Compagnons du Devoir.

### La Réception

Lorsque l'Aspirant a acquis un certain niveau de compétences, il présente un travail "de réception" aux Compagnons du Devoir de son métier, attestant de ses capacités. Il est alors reconnu Compagnon du Devoir. Ce nouveau statut n'implique pas la fin du Tour de France : le jeune voyage encore quelques années pour se perfectionner en France comme à l'étranger. En outre, dans le cadre de son Tour de France, un Compagnon du Devoir peut être amené à occuper des fonctions d'encadrement, comme maître de stage (formateur) ou prévôt (responsable des jeunes formés dans une maison des Compagnons du Devoir).

### La sédentarisation

Lorsque le jeune souhaite cesser de voyager, il prévient son corps de métier de son intention. Il quitte alors la communauté constituée par les itinérants de la maison des Compagnons du Devoir, pour s'installer dans la ville de son choix et pratiquer son métier : il devient "sédentaire". Quel que soit son âge, il reste un "ancien" du Tour de France. Le fait d'être un Compagnon du Devoir sédentaire sous-entend néanmoins une implication régulière dans les activités de la maison des Compagnons du Devoir la plus proche. Cette implication peut prendre plusieurs formes : aider à l'organisation des portes ouvertes annuelles, transmettre ses connaissances lors des cours du soir des itinérants, ... L'important est de transmettre ce que l'on sait, ce que l'on est.

Et après ?



Devenir Compagnon ne signifie pas forcément que le Tour de France est terminé : il est possible de continuer son voyage, pour se perfectionner en-core, en France ou à l'étranger. Car transmettre ses connaissances, chez les Compagnons du Devoir et du Tour de France, reste un devoir permanent, comme se former tout au long de la vie.

On est Compagnon du Devoir toute sa vie ; le Compagnon du Devoir a donc "le devoir" de transmettre ses connaissances, de respecter les valeurs compagnonniques de solidarité et de générosité. Cet idéal le conduit à se dépasser pour devenir un homme ou une femme de métier estimable, mais aussi une personne bien.

Au terme de 4 à 5 ans, l'itinérant a finalisé son projet professionnel : salarié ou chef d'entreprise, toutes les options sont possibles au vu de ses compétences recherchées.

En grande majorité, les Compagnons du Devoir deviennent artisans, chefs d'entreprise ou encore cadres. Ils peuvent également s'orienter vers des carrières d'ouvrier haute-

ment qualifié, architecte, décorateur, ingénieur ou enseignant. La formation permet ainsi à chaque profil de s'exprimer dans son domaine de prédilection, en offrant un panel de débouchés variés et adaptés.

### Les compagnons du devoir et du tour de france

*L'ambition historique du compagnonnage : permettre à chacun de s'épanouir, dans et par son métier, dans un esprit d'ouverture et de partage*

Les historiens s'accordent à penser que le compagnonnage est né en Europe occidentale et s'est développé au fil des siècles avec les grands chantiers de construction, à partir des XI<sup>e</sup> et XII<sup>e</sup> siècles. Les compétences des Compagnons devenant nécessaires en de nombreux lieux, ils ont alors été amenés à se déplacer dans une grande partie de l'Europe. C'est donc au XIII<sup>e</sup> siècle que l'on note les premières expériences de "voyage" à travers la France pour les ouvriers, sous le nom de "Devoir".

À l'initiative du Compagnon tailleur de pierre Jean Bernard, dit "La Fidélité d'Argenteuil" et d'une petite équipe, l'Association ouvrière des Compagnons du Devoir et du Tour de France (AOCDTF) est fondée en 1941. Constituée selon la loi de 1901, elle est reconnue d'utilité publique dès 1943.

### *Le compagnonnage aujourd'hui : un réseau de transmission des savoirs et des identités par le métier*

Le système français du compagnonnage est un moyen unique de transmettre des savoirs et des savoir-faire liés aux métiers de la pierre, du bois, du métal, du cuir et des textiles ainsi qu'aux métiers de bouche.

Son originalité tient à la synthèse des méthodes et procédés de transmission des savoirs extrêmement variés : itinérance éducatives à l'échelle nationale (période dite du "Tour de France") voire internationale, enseignement scolaire, apprentissage technique.

Après environ huit siècles d'existence, le compagnonnage demeure une référence pour l'excellence de ses formations et la transmission des savoirs. En novembre 2010, il a été reconnu patrimoine culturel immatériel par l'UNESCO.

Les valeurs du compagnonnage :

- Accueil et accompagnement ;
- Partage ;
- Transmission des compétences professionnelles ; - Écoute.

Les Compagnons privilégient la vie communautaire, le voyage et la formation tout au long de la vie, offrant ainsi de formidables opportunités d'expériences humaines.

Plus qu'une simple formation, les Compagnons du Devoir et du Tour de France visent à l'épanouissement de chacun, sa réalisation "dans et par son métier, dans un esprit d'ouverture et de partage".

- **Plus de 3 500 itinérants sur le Tour de France**
- **Plus de 6 000 apprentis en formation**
- La durée moyenne du Tour de France est de **5 ans**
- **27 500 entreprises** sont partenaires des Compagnons du devoir et du Tour de France sur l'ensemble du territoire, pour accueillir les jeunes itinérants.
- A l'étranger, **66 pays** sur les six continents sont aujourd'hui accessibles, en plus des DOM-TOM.

Et voilà désormais 8 ans que l'Association Ouvrière des Compagnons de Devoir a accueilli le métier de la fonderie dans ses rangs.

Steven Jeandonnet-Savy, deuxième Compagnons fondeurs a accepté de nous faire part de son expérience et décrire combien cette aventure humaine lui a plu.

### *Il fond pour son métier !*

« C'est à l'âge de 15 ans, alors qu'il est en préapprentissage, que le jeune Steven effectue son premier stage dans une fonderie d'art parisienne renommée. Mais son attirance pour le mobilier, « principalement les pièces uniques, de qualité et sur mesure », l'incite à tenter une expérience, chez un ébéniste. Et de raconter, encore étonné de son revirement : « J'ai ressenti un manque. Celui du travail de la matière à chaud, de la beauté du métal en fusion. J'étais, en quelques mois, tombé amoureux de la fonderie et de ses étapes de reproduction. Je savais dorénavant quel métier je voulais faire. »

Fort de cette certitude, il entame un BAC pro de fonderie, mais s'ennuie : « J'avais besoin de travailler avec mes mains, de faire du concret pas de retourner à l'école avec une seule

journée d'atelier par semaine. » Il se décide alors pour un CAP fonderie d'art dans le Var puis intègre les Compagnons du Devoir à 18 ans. « Le compagnonnage m'a permis de m'épanouir pleinement, de prendre confiance en développant mes expériences dans le métier », prêche-t-il. Dès lors, Steven enchaîne les CDD, en fonderie d'art, de mobilier et décoration puis ensuite dans la fonderie de pièce mécanique ou il décide d'avoir « réappris le métier différemment ». D'abord dans toute la France, puis en 2015, à New York, où il vit « l'expérience, personnelle comme professionnelle, la plus marquante ».

C'est à son retour des USA en arrivant à Lyon qu'il entame son travail de réception pour devenir Compagnon du Devoir.

Si le côté créatif du métier le comble, les difficultés techniques sont loin de le rebuter ! « Ce qui me fait aller de l'avant, c'est que je considère chaque pièce à produire comme un challenge et que, à chaque fois, je veux m'améliorer, faire mieux que la fois précédente. »

Aujourd'hui il exerce quotidiennement et passionnément son métier dans une fonderie de pièce mécanique en alliage de cuivre et d'aluminium et a décidé de finaliser son Tour de France en passant une licence de Métallurgie et Fonderie.

Il témoigne : « Le compagnonnage m'a permis de vivre des aventures de voyage et l'occasion de beaucoup de rencontre. Je n'aurais pas osé faire tant de chose si je n'avais pas pu bénéficier de cette structure. Grâce à ces diverses expériences et ma soif d'apprendre j'ai pu bénéficier d'une formation sublime » J'espère dorénavant pouvoir consacrer du temps à retransmettre mes quelques acquis à de plus jeunes désireux d'apprendre et de se perfectionner. »

Et voilà que cette année le métier de la fonderie chez les Compagnons du Devoir s'est étoffé avec l'arrivée de 5 nouveaux jeunes fondeurs. Désormais, ils sont 8 et ils sont bien déterminés à doubler leurs effectifs et à grossir leur rang l'an prochain. Le début d'une longue aventure décrit-il. »

### *Rencontrer les Compagnons du Devoir*

Si vous souhaitez en savoir plus sur les Compagnons du Devoir et les informations, venez les rencontrer lors de leurs journées portes ouvertes à travers toute la France les 18,19 et 20 janvier, ainsi que les 8 et 9 mars. Infos et adresses : [www.formezvousautrement.fr](http://www.formezvousautrement.fr)



Damien MILARD  
Responsable de l'animation  
adhérents et des  
groupements  
Fédération Forge Fonderie

## Un nouveau responsable de l'animation adhérents et des groupements

Damien MILARD est le nouveau responsable de l'animation adhérents et des groupements de la Fédération Forge Fonderie depuis le 13 Mars 2019. Il remplace à ce poste Pascale Lepretre.

Diplômé d'une école de commerce international, il a fait ses études à Paris et en Espagne, dans le cadre d'un cursus spécialisé dans la gestion d'entreprise et l'entrepreneuriat, avant de développer une expérience professionnelle de douze années dans le secteur automobile. Il y a d'abord occupé différents postes d'analystes chez des constructeurs automobiles et a ainsi participé notamment à la bonne réalisation de la chaîne logistique de nouveaux modèles, de la sortie d'usine à la livraison en concession, ou à la stratégie de commercialisation des véhicules d'occasion. Il intègre ensuite un groupement de concessionnaires au sein duquel il met en place un outil de pilotage d'indicateurs financiers avant de devenir l'animateur, pendant 10 ans, de l'organisme professionnel représentant les intérêts des concessionnaires d'une marque étrangère à l'échelle française et européenne.

Au sein de la Fédération, il est aujourd'hui en charge, en lien étroit avec Olivier Vas-seur, responsable territoires, de l'organisation et de l'animation des réunions autour de thématiques marchés (automobile, voirie, fonderie d'art...), métiers (maintenance, hygiène sécurité...), actualités (énergie, matières premières...), et de la bonne information de tous les adhérents concernés sur ces rencontres et actions.

Il assure également le travail de veille sur l'évolution des marchés de matières premières, de l'énergie, des marchés clients ou fournisseurs et de leurs attentes et la diffusion des informations correspondantes, ainsi que la mise en place et le suivi d'opérations spéciales, d'actions collectives et autres partenariats (achats groupés d'électricité ou de gaz, comptage de l'énergie...), le cas échéant en lien avec d'autres collaborateurs (notamment Nicolas Créon sur les questions d'énergie).

Dans le cadre de ses fonctions, il a également la charge du traitement et de la bonne diffusion des demandes spécifiques des clients en recherche de fournisseurs, il participe à la bonne collaboration entre les professions, les adhérents et les centres techniques industriels compétents (CETIM, CTIF) et à la représentation des intérêts des professions au plan local, national et européen sur des thèmes divers (énergie, anti-dumping, nomenclature douanière...).

Contact : [d.milard@forgefonderie.org](mailto:d.milard@forgefonderie.org)



Olivier VASSEUR  
Responsable territoires  
Fédération Forge Fonderie

## Voyage du GFO à Séville, du 4 au 7 avril 2019

Cette année le Groupement des Fondeurs de l'Ouest organisait son traditionnel voyage à Séville, avec comme point de chute « métier » la visite de la fonderie LFA Espana, et également celle d'une société de production de systèmes de climatisation.

En marge de ces visites techniques, et comme à l'accoutumé, ce fût l'occasion pour la trentaine de participants de se retrouver et de partager sur trois belles journées (on ne parlera pas ici de la météo...) de beaux moments de convivialité et se plonger dans la culture locale Espagnole.

### Visites techniques



#### HISPACOLD

La société HISPACOLD est spécialisée dans les systèmes de climatisation dans le transport de passagers avec 2 activités distinctes, autobus/ autocars et transport ferroviaire.

Les lignes de production sont dédiées pour chacune de ces activités, avec la fabrication et le montage des différents composants équipant les systèmes de climatisation :

- Compresseurs
- Centrales de chauffage
- Panneaux de commande
- Unités de climatisation conducteur
- Purificateurs d'air.

#### LFA Espana

Le groupe La Fonte Ardennaise, qui compte 5 fonderies, 3 sites d'usinage, 1 site d'assemblage, 1 site de traitement de surface et 1 site de plasturgie, a repris en 2011 cette fonderie construite en 2004 et fermée en 2008.

Le groupe LFA représente une capacité de production de 130000 tonnes, avec 1300 collaborateurs.

En 2018, LFA Espana, 14000m<sup>2</sup> couverts sur une surface de 72000m<sup>2</sup>, une centaine de collaborateurs, a produit 14000 tonnes de pièces en fonte à graphite lamellaire et sphéroïdale, avec un outil de production composé d'une ligne de moulage à joint vertical, et deux fours à induction moyenne fréquence de capacité 12t/h. Un atelier d'usinage jouxté la fonderie et permet un service complet au service des clients.



L'ensemble de l'unité de production est un exemple de flux rectiligne, de la plateforme de fusion, en passant par la ligne de moulage, décochage, grenailage et mise en containers avant les opérations manuelles de parachèvement.

Les principaux marchés sont la Robi-  
netterie et les pompes, les véhicules  
industriels, les transmissions, les  
biens d'équipements et l'automobile.



La cathédrale Notre-Dame du siège de Séville, construite entre 1402 et le XVIème siècle. De style gothique, elle possède un clocher, la Giralda, ancien minaret hispano-mauresque de la grande mosquée almohade qui s'élevait à l'emplacement de l'actuelle cathédrale.

Le quartier de Santa Cruz, inclus dans le périmètre de l'ancienne muraille, il appartient au cœur historique de la cité, et jouxte les monuments les plus célèbres de la capitale andalouse...



Et forcément, quelques bons moments passés autour d'excellentes tables au plus près de la gastronomie Sévillane, quelques fois de ses bars, et une clôture comme il se doit au Tablao El Arenal avec du dîner et spectacle Flamenco !

Merci à Nicolas Grosdidier et à ses équipes pour l'accueil et l'organisation locale, et au GFO pour la programmation et l'organisation de ce voyage.

### Visites culturelles

Italica à Santiponce, première ville romaine fondée en Hispanie (ainsi qu'en dehors de l'Italie), par Scipion l'Africain



L'alcazar et ses jardins, palais fortifié construit à Séville par les Omeyyades d'Espagne et modifié à plusieurs reprises pendant et après la période musulmane. Il est considéré comme l'exemple le plus brillant de l'architecture mudéjar sur la péninsule Ibérique





Intitulé du stage	Réf.	Durée	Tarif	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>Métallurgie des matériaux</b>												
Les principes de la métallurgie appliquée aux alliages métalliques	TM F061	2 j	1 260 €						Nous consult			
Métallurgie, élaboration et traitements thermiques des alliages d'aluminium	AL F002	3 j	1 630 €				18 - 20 Sèvres					
Aciers et fontes : performances et domaines d'utilisation	FE A073	1 j	650 €					4				
Alliages d'aluminium et de magnésium : performances et domaines d'utilisation	AM A076	1 j	650 €						19 Sèvres			
Métallurgie et traitements thermiques des pièces en acier forgé	FG A06	2 j	1 260 €								20-21 Sèvres	
Métallurgie et propriétés des alliages de cuivre	CU F026	3 j	1 630 €					9-11 Sèvres				
Métallurgie, élaboration et traitements thermiques des fontes GS	FT F013	3 j	1 630 €								19-21 Colmar	
Traitements thermiques des aciers et fontes	FE A074	1 j	650 €							3 Sèvres		
Traitements thermiques des alliages d'aluminium et de magnésium	AM A077	1 j	650 €						26 Sèvres			
Tenue à la corrosion des aciers inoxydables	AC A075	1 j	650 €							16 Sèvres		
Traitements de surface des alliages d'aluminium et de magnésium	AM A078	1 j	650 €							17 Sèvres		
Alliages de titane : performances et domaines d'utilisation	SP A079	1 j	650 €								7 Sèvres	
Superalliages : performances et domaines d'utilisation	SP A080	1 j	650 €								14 Sèvres	
<b>Conception de pièces métalliques - Outillages</b>												
Pièces moulées : règles de conception et de tracé	TM F051	3 j	1 630 €				25-27 Sèvres					
Masselottage et remplissage en moulage sable pour tous alliages	TM F008	4 j	1 840 €				4-7 Sèvres					
Outillages coquille gravité : conception, remplissage, thermique, poteyage	AL F005	3 j	1 630 €								5-7 Sèvres	
Moules et modèles de fonderie par fabrication additives	TM F071	2 j	1 260 €								19-20 Sèvres	
Conception d'un moule en fonderie sous pression	NFE F033	3 j	1 630 €								26-28 Sèvres	
Conception et suivi des outillages de forge	FG A11	2 j	1 260 €									10-11 Sèvres
<b>Techniques de forge</b>												
Les bases de la forge à froid	FG A12	2 j	1 260 €				25-26 Sèvres					
Lubrification des outillages de forge	FG A15	1 j	980 €						12 Sèvres			
Forgeage des superalliages et alliages de titane	FG A14	2 j	1 260 €								26-27 Sèvres	
<b>Techniques de fabrication additive</b>												
La fabrication additive métallique par fusion laser	FA A10A	2 j	1 260 €					2-3 Mâcon				
	FA A10B	2 j	1 260 €							8-9 Mâcon		

Intitulé du stage	Réf.	Durée	Tarif	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>Techniques de fonderie</b>												
Apprentissage des bases de la fonderie	TM F015B	4 j	1 930 €					2-5 Creil				
	TM F015C	4 j	1 930 €							22-25 Nancy		
	TM F015D	4 j	1 930 €									3-6 Sèvres
Process et qualité des pièces en fonderie sous pression	NFE F067	3 j	1 630 €						17-19 Lyon			
Sables à vert : préparation et mise en œuvre	TM F017	4 j	1 840 €						24-27 Lorient			
Le moulage de précision à cire perdue	TM F053	3 j	1 630 €						10-12			
Optimisation du parachèvement par la maîtrise des procédés	TM F066	3 j	1 630 €							8-10 Redon		
Moulage haute pression à joint vertical	TM F047	3 j	1 630 €									3-5
<b>Contrôles de pièces - Analyses laboratoire</b>												
Contrôles et analyse de défauts de pièces de fonderie	TM F057	3 j	1 630 €							15-17 Sèvres		
Métallographie des fontes	FT F043	3 j	1 630 €							15-17 Nancy		
Défauts en fonderie d'alliages d'aluminium	AL F022	2,5 j	1 450 €				12-14 Sèvres					
L'analyse chimique par spectrométrie sur produits métalliques	TM F056	2 j	1 260 €				12-13 Sèvres					
Défauts en fonderie de fonte	FT F014	2,5 j	1 450 €				18-20					
Défauts en fonderie d'acier	AC F024	2,5 j	1 450 €						17-19			
Métallographie des alliages d'aluminium	AL F016	3 j	1 630 €							1-3 Sèvres		
Technicien de laboratoire métallurgique des industries de process (CQPM)	TM F072	16 j	Nous consult				Nous consult					
<b>Contrôles Non Destructifs</b>												
Instructions de contrôles Ultrasons et Magnétoscopie	TM F069	2 j	1 260 €				12-13 Sèvres					
Instructions de contrôles Radiographie et Ressuage	TM F070	2 j	1 260 €							9-10 Sèvres		

## LE CENTRE DE FORMATION A3F, UNE EQUIPE A VOTRE DISPOSITION

Directeur : **Laurent PARIN**  
 Téléphone : 01 41 14 63 18  
 Email : parin@a3f-forge-fonderie.fr

Commercial : **Elliott SENAYA**  
 Téléphone : 01 41 14 63 46  
 Email : senaya@a3f-forge-fonderie.fr

Organisation et administration des stages : **Sylvain LE PAGE**  
 Téléphone : 01 41 14 63 59  
 Email : lepage\_s@a3f-forge-fonderie.fr

**44 avenue de la Division Leclerc,  
 92318 SEVRES Cedex**

**[www.a3f-forge-fonderie.fr](http://www.a3f-forge-fonderie.fr)  
[contact@a3f-forge-fonderie.fr](mailto:contact@a3f-forge-fonderie.fr)**

## juin 2019

<b>GIFA</b>	25/06/2019 - 29/06/2019	Düsseldorf (Allemagne)	<a href="http://www.gifa.de">www.gifa.de</a>	Trade fair for casting technology
-------------	-------------------------	------------------------	--	-----------------------------------

## septembre 2019

<b>EUROMAT 2017</b>	01/09/2019 - 05/09/2019	Stockolm (Suède)	<a href="http://euromat2019.com">euromat2019.com</a>	International conference in the field of materials
<b>EMO</b>	16/09/2019 - 21/09/2019	Hannovre (Allemagne)	<a href="http://www.emo-hannover.de">www.emo-hannover.de</a>	Salon de la machine-outil
<b>NON-FERROUS METALS AND MINERALS</b>	16/09/2019 - 20/09/2019	Krasnoyarsk (Russia)	<a href="http://www.nfmsib.ru/en/congress/main-info-en.html">www.nfmsib.ru/en/congress/main-info-en.html</a>	Fonderie
<b>CIM CONGÈS INTERNATIONAL DE MÉTRALOGIE 2019</b>	24/09/2019 - 26/09/2019	Porte de Versailles (Paris)	<a href="http://www.cim2019.com">www.cim2019.com</a>	Congrès international de métrologie
<b>PLI</b>	25/09/2019 - 26/09/2019	Colmar	<a href="http://www.pli-laser.com">www.pli-laser.com</a>	Procédés laser pour industrie du futur
<b>LUXEPACK</b>	30/09/2019 - 02/10/2019	Monaco	<a href="http://www.luxepack.com">www.luxepack.com</a>	

## octobre 2019

<b>NADCA DIE CASTING CONGRESS &amp; TABLETOP 2019</b>	01/10/2019 - 03/10/2019	Cleveland (Ohio, États-Unis)	<a href="http://www.diecasting.org">www.diecasting.org</a>	Die Casting Congress & Tabletop
<b>EXPO FERROVIARIA</b>	01/10/2019 - 03/10/2019	Milan (Italie)	<a href="http://www.expoferroviaria.com">www.expoferroviaria.com</a>	Salon pour la technologie, les produits et systèmes ferroviaires
<b>SEPEM</b>	08/10/2019 - 10/10/2019	Angers	<a href="http://angers.sepem-industries.com">http://angers.sepem-industries.com</a>	Salon de l'industrie
<b>AIRTEC</b>	14/10/2019 - 16/10/2019	Munich (Allemagne)	<a href="http://airtec.aero/">http://airtec.aero/</a>	Salon international des fournisseurs de l'industrie aérospatiale
<b>INTERNATIONAL SIMULATION DAYS !</b>	15/10/2019 - 17/10/2019	Sophia Antipolis	<a href="http://tisd2019.transvalor.com">http://tisd2019.transvalor.com</a>	User Meetings de FORGE®, COLDFORM® & THERCAST®, DIGIMU®, TRANSWELD®, REM3D®
<b>RENDEZ-VOUS CARNOT</b>	16/10/2019 - 17/10/2019	Paris	<a href="http://www.rdv-carnot.com">www.rdv-carnot.com</a>	Rendez-vous de la R&D pour les entreprises
<b>CONGRÈS ARTS ET MÉTIERS</b>	21/10/2019 - 26/10/2019	Shangai (Chine)	<a href="http://congres.art-et-metiers.fr">congres.art-et-metiers.fr</a>	Congrès organisé par Arts et Métiers Alumini
<b>SIANE</b>	22/10/2019 - 24/10/2019	Toulouse	<a href="http://www.salonsiane.com">www.salonsiane.com</a>	Salon de l'Industrie du Futur

# INDEX DES ANNONCEURS

<b>ADIAL</b>	<b>36</b>
<b>ALTIFORT</b>	<b>4</b>
<b>ACTEMIUM</b>	<b>4<sup>e</sup> de couv</b>
<b>ASK CHEMICALS</b>	<b>1</b>
<b>FICEP</b>	<b>6</b>
<b>FOSECO</b>	<b>39</b>
<b>SAVEWAY</b>	<b>4</b>
<b>GNR</b>	<b>10</b>
<b>LASCO</b>	<b>3<sup>e</sup> de couv</b>
<b>SCHULER</b>	<b>7</b>
<b>SIIF</b>	<b>2<sup>e</sup> de couv</b>
<b>VACCARI</b>	<b>10</b>
<b>TRANSVALOR SA (Publi reportage)</b>	<b>9</b>



Je désire m'abonner à **LA REVUE forge et fonderie** pour 4 numéros au tarif de 95,34 € TTC (90,37 € HT)

Veuillez trouver ci-joint mon règlement à l'ordre de CIFORME (Centre d'Information de la Forge)

Veuillez trouver ci-joint copie de mon ordre de virement bancaire

Merci d'indiquer votre numéro de TVA intracommunautaire

.....

#### Domiciliation

Neuflize OBC 3 avenue Hoche 75008 PARIS  
Code banque 30788  
Code guichet 00100  
N° Compte 10283040001  
Clé Rib 75  
Code IBAN FR 7630788001001028304000175  
Code BIC NSMBFRPPXXX

## BULLETIN D'ABONNEMENT

#### Mes coordonnées

Société .....

Service ou fonction .....

Nom ..... Prénom .....

Rue .....

CP ..... Ville ..... Pays .....

Téléphone : ..... Fax ..... mail .....

Date ..... Signature .....



**LA REVUE forge et fonderie** est éditée par  
le Centre d'Information de la FORGE et de la FONDERIE  
45, rue Louis Blanc, 92400 COURBEVOIE  
Tél. : 01 43 34 76 30, Fax : 01 43 34 76 31  
E-mail : [contact@forgefonderie.org](mailto:contact@forgefonderie.org)



Depuis 1863

## L'optimum qualité est notre priorité

Notre gamme de machine pour le formage des métaux et poudres couvre la majorité des besoins de l'industrie. Avec nos **Marteaux et Contre-frappes**, **Presses hydrauliques et Presses à vis** en passant par toutes sortes de **Machines de préformages et de Laminoirs transversaux ou à retour** et jusqu'aux **installations et lignes entièrement automatisés**, nous répondons présent à vos besoins !



### Domaine d'application actuel:

- Industrie automobile
- Technique ferroviaire
- Industrie aéronautique
- Construction navale
- Techniques médicales
- Appareils électroménagers.
- Fabrication d'outillages à main
- Construction de machines
- Construction de machines agricoles
- Energies renouvelables
- Construction de centrales énergétiques
- Industrie de la robinetterie
- Industrie Offshore
- Industrie minière

LASCO propose un large éventail de produits et de services pour ces grands marchés globaux et les multitudes d'application en techniques de formage.

Tel.: +49 (0) 9561 642-0 [www.lasco.com](http://www.lasco.com)





**Votre partenaire  
maintenance et usinage**

## Solutions & Services pour l'Industrie

- Maintenance corrective et préventive
- Fourniture et usinage de pièces de rechange
- Usinage sur site
- Reconstruction et mise en conformité
- Vente de machines neuves et occasion
- Conseil, Accompagnement, Projet



Route de Courpière - F-63920 Peschadoires - France  
T +33 (0)4 73 80 17 68 - F +33 (0)4 73 80 52 14  
E-mail : [ampcf@actemium.com](mailto:ampcf@actemium.com)  
[www.actemium.fr](http://www.actemium.fr) - [www.aref.fr](http://www.aref.fr)