

LA REVUE

forge et fonderie

OCT | 2019

N°19

Au sommaire

- 10** Influence des ségrégations sur la déformation des pièces forgées
- 14** Thermo-Calc®, un outil de métallurgie numérique.
- 19** Des aspects importants de la sécurité aux fours à induction, employés pour l'élaboration des alliages ferreux
- 31** GIFA 2019 – Une édition à nouveau réussie !
- 52** Concours Général Fonderie 2019

Siif

and your casting fits

LE PROCESS DE FINITION SUR-MESURE POUR VOTRE FONDERIE

NOUVEAU ! SYSTEME DE VISION 3D

INNOVATION

Siif

REFROIDISSEMENT



DESSABLAGE



ÉBAVURAGE ROBOTISÉ



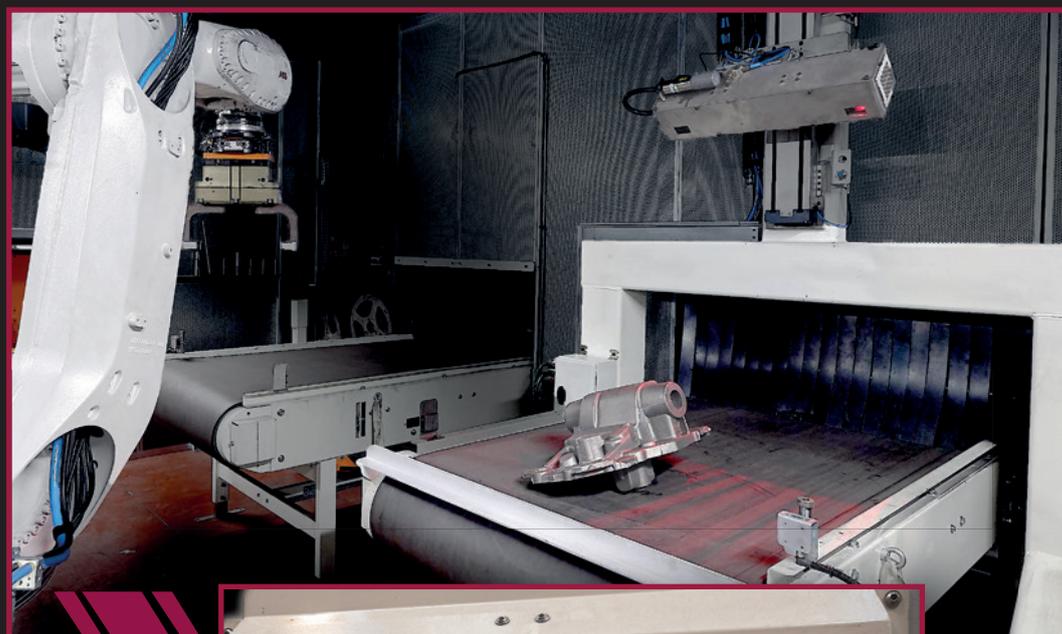
ÉBAVURAGE DÉTOUREUSE



VISION, CONTRÔLE ET INSPECTION



SCIAGE ET PRÉ-USINAGE



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

Sommaire

N° 19/2019



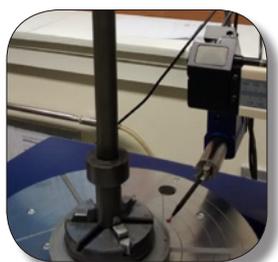
EDITORIAL

- 5** L'ambition d'une fusion



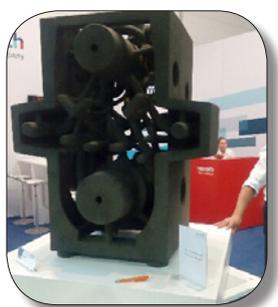
BREVES

- 6** Réunion Territoires, FMGC Chateaubriant
- 6** Les adhérents de la Fédération mobilisés au Bourgets
- 7** Publication du guide sur l'utilisation des sables de fonderie en technique routière
- 8** Signature d'une nouvelle Convention nationale d'objectifs
- 9** Réunion organisée par la Fédération Forge Fonderie au Lycée d'Armentières et à l'Usine de Vossloh Outreau Technologies les 19 et 20 novembre 2019



TECHNIQUE

- 10** Influence des ségrégations sur la déformation des pièces forgées
- 14** Thermo-Calc®, un outil de métallurgie numérique.
- 19** Des aspects importants de la sécurité aux fours à induction, employés pour l'élaboration des alliages ferreux
- 31** GIFA 2019 - Une édition à nouveau réussie !



FORMATION

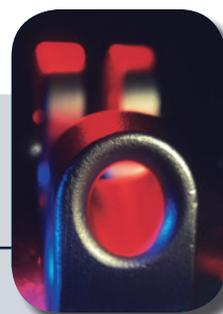
- 52** Concours Général Fonderie 2019
- 53** La promotion ESFF 2020 en séminaires



AGENDA

- 57** 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

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

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
Responsable technique :
Laura Méchineau
Tél. : 01.43.51.91.76, 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

Photographe
Dominique Sarraute

INDEX DES ANNONCEURS

ADIAL	18
AREF	04
ASK CHEMICALS	4^e de couv
DG WELD SRL	30
FICEP FRANCE	55
FOSECO SAS	08
GNR FRANCE	30
LASCO	3^e de couv
SCHULER PRESSEN GMBH	09
SIIF	2^e de couv
TRANSVALOR SA	03
VACCARI SPA	13

TRANSVALOR CLOUD COMPUTING

La flexibilité et la performance du Cloud Computing au service de votre industrie

Disponible pour **FORGE®** & **THERCAST®***

- Configurations **6, 12 ou 24 cœurs**
- **10** jours de service minimum
- **90** jours de stockage des données
- **Arrêt & Reprise** à la demande
- **Extension** de durée de service possible
- Premier territoire éligible **Europe**

* Disponible pour **FORGE®** NxT 3.0, **FORGE®** NxT 2.1 SP1 et **THERCAST®** NxT 1.0.

Transvalor Cloud Computing is a service of Transvalor S.A. - non-contractual document

Configurations	CPU / GPU	RAM	Stockage de données	Tarification**
6 cœurs	Intel® Xeon® E5-2690 v3 2.6 GHz - 30 MB cache M60 GPU	56 GB	256 GB	219€/jour
12 cœurs	Intel® Xeon® E5-2690 v3 2.6 GHz - 30 MB cache M60 GPU	112 GB	512 GB	363€/jour
24 cœurs	Intel® Xeon® E5-2690 v4 2.6 GHz - 35 MB cache M60 GPU	448 GB	1024 GB	668€/jour

** La tarification est valable jusqu'au 31/12/2019 et comprend le coût de la licence, du hardware et du support technique. Le coût de la formation n'est pas inclus.

4 bonnes raisons d'adopter Transvalor Cloud Computing

1 - Flexibilité

- Fonction Arrêt et Reprise à la demande
- Plusieurs utilisateurs peuvent accéder à la même instance
- Accédez aux données de simulation où que vous soyez, à tout moment

3 - Sécurité optimale

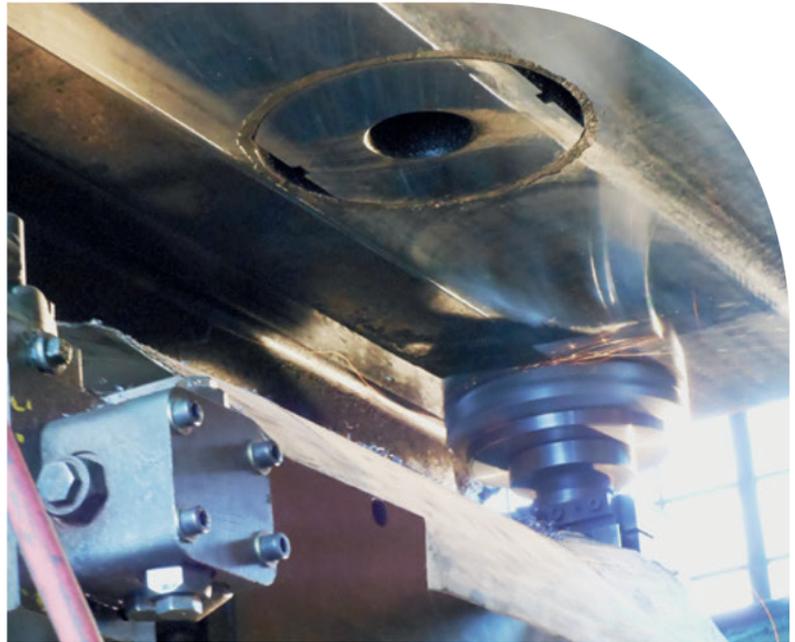
- Normes de sécurité les plus strictes
- Protection des données par chiffrement
- Accès par chiffrement AES 256 bits pour SSL

2 - Simplicité d'utilisation

- Instantanément opérationnel avec le logiciel installé
- Interface et fonctionnalités identiques
- Effectuez toutes les actions de pre/post traitement et de calcul

4 - Performance

- Lancez plusieurs simulations simultanées
- Matériel de dernière génération
- Ne payez que pour les ressources et les heures utilisées



**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
www.actemium.fr - www.aref.fr

L'ambition d'une fusion



Lors de l'assemblée générale, de d. à g. : Emmanuel Viellard, président de l'Association Française de Forge, Nicolas Grosdidier, président de la Fédération Forge Fonderie, Jean-Baptiste Dechaumont, président des Fondateurs de France et Wilfrid Boyault, directeur général de la Fédération Forge Fonderie.

Une fois n'est pas coutume, le propos introductif de cette revue, commune à la fonderie et à la forge, est consacré à leur organisation professionnelle.

La longue marche entamée voilà plus de 12 ans a, en effet, atteint sa destination le 6 juin dernier.

Lorsqu'en 2007, après des années de réflexion et d'interrogations, dont la principale était de savoir si les deux métiers étaient concurrents ou, plutôt, complémentaires et confrontés aux mêmes problématiques, les deux professions ont décidé de tenter d'imaginer une vie commune, c'est la politique des petits pas qui a d'abord prévalu. Il s'est alors agi de location de quelques bureaux par l'Association Française de Forge et de mise en commun du directeur général fraîchement arrivé aux Fondateurs de France.

Il a ensuite fallu un lustre pour que ces premières expériences amènent les deux professions à réfléchir aux modalités d'un rapprochement plus étroit et organisationnel. C'est ainsi qu'est née, en novembre 2012, la Fédération Forge Fonderie. Souhaitant faire bénéficier les fonderies et forges adhérentes de l'ensemble de leurs moyens et activités, les deux syndicats, Fondateurs de France et Association Française de Forge, ont ainsi créé une structure de tête, en charge de l'opérationnel à compter du 1er janvier 2013, tout en conservant chacun son patrimoine et une possibilité de retour, pour le cas où l'expérience ne s'avérerait pas concluante.

Mais c'est précisément parce que le constat a été inverse, que l'un des volets de la restructuration entreprise par la Fédération Forge Fonderie et ses deux membres, à partir de janvier 2018, a été de progresser dans cette voie du rapprochement et le cap fixé par les instances des trois organisations, celui de la réunion en une seule et même structure de ces trois entités.

C'est désormais chose faite puisque, depuis le 6 juin 2019, les Fondateurs de France et l'Association Française de Forge ont été absorbés par la Fédération Forge Fonderie et que

les adhérents des deux syndicats membres de la fédération, ainsi dissous de plein droit, sont devenus adhérents de la Fédération Forge Fonderie, l'ensemble de l'opération prenant effet rétroactivement au 1er janvier 2019.

Much ado about nothing¹, direz-vous ?

C'est au contraire une réelle ambition que porte cette évolution.

En effet, les conséquences de la fusion des entités ne se résument pas à des gains de gestion des structures du fait de la réduction de leur nombre.

Cette ultime étape du rapprochement a, bien plus largement, été conçue comme l'occasion d'impulser une nouvelle dynamique à l'organisation professionnelle, dynamique entièrement orientée par le souci de la satisfaction accrue des entreprises du secteur.

Dans ce cadre, pour compléter la restructuration d'ores et déjà intervenue des services et de leur activité, l'idée essentielle a été de parvenir à un nouveau système de cotisation.

Désormais unique, là où en existaient auparavant deux, un pour chacune des professions, aux règles, bases de calcul et poids pour les entreprises différents, le nouveau système de cotisation vise la simplicité, la réalisation d'économies pour le plus grand nombre des entreprises adhérentes et l'attractivité pour celles non-adhérentes.

Fondé sur l'application d'un montant fixe par salarié à l'effectif de l'entreprise, il permet un calcul simple, sans retraitement, prévoit un pallier de dégressivité à partir de 300 salariés et retient le principe d'une cotisation groupe, toutes règles nouvelles et dont les instances des trois organisations ont jugé qu'elles seraient de nature à susciter l'intérêt des entreprises du secteur.

C'est donc un véritable pari que vient ainsi de se lancer la Fédération Forge Fonderie : celui de donner au maximum d'entreprises de fonderie et de forge l'envie et les raisons économiques de la rejoindre afin de participer et de bénéficier de ses actions, actions qui n'en seront alors que plus efficaces et déterminantes.

Mais ce pari ne saurait être gagné sans la participation de tous, fondeurs et forgerons, à ce nouvel élan.



Alors, rejoignez vite la « nouvelle » Fédération Forge Fonderie !

Wilfrid BOYAULT
Rédacteur en chef
Directeur Général
de la Fédération Forge Fonderie

¹ : Beaucoup de bruit pour rien

Réunion Territoires, FMGC Chateaubriant

La FMGC a accueilli le 17 mai dernier la réunion Territoire OUEST où étaient réunis une vingtaine de Fondateurs.

En marge de l'actualité des entreprises et des échanges sur les perspectives d'activité sur la deuxième partie de l'année, Nicolas Créon a présenté un point sur l'avancement des BREFs, sur la régénération thermique des sables et a également fait un rappel sur la réglementation applicable aux fonderies soumises à déclaration.

Sergio Da Rocha a, quant à lui, fait un tour d'horizon sur la réforme de la formation,

un point sur l'offre CQPM Fonderie et sur l'offre de formation diplômante.

La première partie de l'après-midi a été consacrée à la récupération de chaleur fatale, avec Pascal Isambert de chez ECO-TECH CERAM qui nous a présenté l'ECO-STOCK, solution de stockage de chaleur dont le premier démonstrateur vient d'être mis en service. Présentation qui a permis de faire le point sur le Business modèle de ces solutions et sur les programmes de subventions destinés à l'investissement sur les installations de valorisation de chaleurs fatales.



La journée s'est terminée avec une visite de la FMGC, que nous remercions vivement pour l'accueil, avec un salut tout particulier à Gérard Thuét qui, à l'heure à laquelle nous écrivons ces quelques mots, a fait valoir ses droits de départ à la retraite. Nous lui souhaitons le meilleur dans ses nouvelles activités !

Le 19 septembre 2019, AB Fonderie a fêté ses 20 ans



Elle a convié ses clients, fournisseurs, partenaires, des membres de la mairie de ST Genis Laval et le maire Roland CRI-MIER pour célébrer l'événement, autour de l'ensemble de ses salariés.

Tous ont répondu présents. Au cours d'un apéritif déjeunatoire, accompagnés par un groupe de 5 musiciens, la cinquantaine d'invités a profité une visite de l'usine.

Spécialisée en fonderie coquille, les plus courageux ont pu tester ce que représente « couler des pièces en aluminium ».



Les adhérents de la Fédération mobilisés au Bourget



La 53^e édition du Salon international de l'aéronautique et de l'espace (SIAE) s'est tenue, du 17 au 23 juin 2019, au Parc des Expositions du Bourget.

Pendant une semaine, professionnels et grand public ont parcouru les allées du plus grand événement mondial dédié au secteur aérospatial.

Cet événement incontournable du secteur représente une opportunité pour les entreprises innovantes et compétitives

de démontrer leurs savoir-faire et c'est très logiquement que de nombreux adhérents de la Fédération Forge Fonderie ont participé à cette édition 2019 :



- Ferry-Capitain
- Fonderies et ateliers du Bélier
- Constelluim
- Danielson Aircraft Systems
- Précicast
- Volum-E
- Aubert et Duval
- Favi
- Fonderie Barbas et Plailly
- Fonderie de la Varenne
- Lebronze Alloys
- Setforge la Clayette

La formation et le recrutement à l'honneur avec « L'avion des métiers »



Au sein d'un hall de près de 3 000 m², l'Avion des Métiers a proposé un tour d'horizon inédit du secteur et a permis à la fois aux plus jeunes et à leurs parents de s'interroger sur leur orientation, aux étudiants de chercher un stage ou un apprentissage, aux jeunes diplômés de trouver leur premier emploi et aux professionnels confirmés, d'identifier de nouvelles opportunités. Les visiteurs ont pu découvrir :

- un parcours immersif et pédagogique de découverte de 15 métiers de conception, de production et de maintenance aéronautique présentés par une centaine de professionnels du secteur.
- un espace dédié à l'emploi et à la formation pour échanger avec les entreprises de l'industrie aérospatiale, du transport aérien et de la Défense Nationale qui recrutent et les établissements d'enseignement du secteur de l'aérien (avec des formations allant du CAP au diplôme d'ingénieur).
- des conférences sur les métiers, les emplois et les filières de formation animées par les Exposants.



Le SIAE 2019 en quelques chiffres :

- 125 000 m² de surfaces d'exposition dont 52 000 m² de stands
- 316 470 Visiteurs (139 840 Visiteurs Professionnels & 176 630 Visiteurs Grand Public)
- 2 7007 journalistes accrédités issus de 87 pays
- 140 milliards de dollars de contrats signés
- 304 Délégations Officielles ont visité le Salon, en provenance de 98 pays

(Source : GIFAS)

Publication du guide sur l'utilisation des sables de fonderie en technique routière

Le guide élaboré par le CEREMA, la fédération, le CTIF et plusieurs grands acteurs des travaux publics dans le but de favoriser l'emploi des sables de fonderie comme matériaux alternatifs en technique routière a été finalisé et publié cet été.

Ce guide pratique définit les spécifications opérationnelles rendant l'incorporation de ces matériaux alternatifs acceptable d'un point de vue environnemental et précise les

obligations des différents acteurs d'un projet routier en vue d'assurer la traçabilité des chantiers utilisant ces matériaux.

Il rappelle également les obligations des fonderies qui doivent effectuer une analyse physico-chimique complète des sables et fournir ces informations à l'installation de recyclage afin d'obtenir un certificat d'acceptation préalable. L'annexe 2 du guide liste les teneurs maximales

en polluants que peuvent contenir les sables utilisés en technique routière selon le type d'utilisation prévue.

Ce guide s'adresse aux fabricants et utilisateurs de matériaux routiers, aux entreprises de fonderies, aux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre ainsi qu'à l'inspection des installations classées.

Il peut être téléchargé gratuitement sur le site internet du CEREMA ou commandé en version papier.

Signature d'une nouvelle Convention nationale d'objectifs

Comme de nombreux secteurs de la métallurgie, les forges et fonderies disposaient jusqu'en juillet dernier d'une Convention nationale d'objectifs (CNO) signée entre la profession et la Caisse nationale d'assurance maladie.

Arrivant à échéance cet été, cette convention a été remplacée par une CNO unique pour tous les secteurs d'activité de la métallurgie, qui s'intitule *Convention nationale d'objectifs fixant un programme d'actions de prévention spécifique aux activités de la métallurgie*. Cette simplification voulue par la CNAM permet de couvrir toutes les entreprises, y compris celles dont le code-risque n'était jusqu'à présent pas répertorié.

La nouvelle CNO poursuit les mêmes objectifs d'accompagnement des entreprises dans la mise en place et le développement d'actions de prévention des risques.

Le contrat de prévention

Ce dispositif s'adresse aux entreprises de moins de 200 salariés qui

envisagent de souscrire un contrat de prévention auprès de leur Caisse régionale d'assurance santé au travail (CARSAT) sur une ou plusieurs des thématiques prioritaires suivantes :

- la prévention des troubles musculo-squelettiques (TMS) et notamment des risques liés aux manutentions et aux ports de charge,
- la prévention des expositions aux agents chimiques dangereux (ACD) y compris aux agents cancérogènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction (CMR), aux fumées et poussières,
- la prévention des risques liés aux nuisances physiques tels que le bruit, les vibrations et les rayonnements,
- la prévention des risques de chutes (plain-pied et hauteur),
- la prévention du risque de collision engins-piétons.

Au travers du contrat de prévention, l'entreprise s'engage à mettre

en œuvre des mesures portant sur ces thématiques prioritaires en vue d'améliorer un ou plusieurs postes de travail ou un procédé de fabrication. Ces mesures doivent inclure l'installation ou la transformation d'équipements existants et au moins une action de formation. La réalisation d'études préliminaires est également couverte par le contrat de prévention.

Pour les mesures définies comme prioritaires par la convention ou présentant un caractère innovant ou exemplaire, la participation financière de la CARSAT aux objectifs fixés dans le contrat de prévention couvrira entre 15 et 70 % des dépenses. Les autres mesures du contrat bénéficieront d'une prise en charge comprise entre 15 et 25 %.

Cette nouvelle convention sera complétée d'ici la fin de l'année par des guides sectoriels de mise en œuvre à destination des CARSAT et des entreprises.

NOUS AIDONS LES FONDERIES A AMELIORER LA QUALITE DES PIECES

Notre nouvel **HOLLTEX Shroud** procure un métal plus propre et par conséquent un plus haut degré d'efficacité de filtration et de réduction de turbulences pour la production des grosses pièces en acier.

NOUVEAU PRODUIT

HOLLTEX Shroud

VESUVIUS

FOSECO. Your partner to build on.

Save
the
date

Réunion organisée par la Fédération Forge Fonderie au Lycée d'Armentières et à l'Usine de Vossloh Outreau Technologies les 19 et 20 novembre 2019

La Fédération Forge Fonderie organise les 19 et 20 novembre prochain au lycée d'Armentières et chez VOSSLOH OUTREAU TECHNOLOGIES une réunion sur deux thèmes d'actualité : la révision du BREF Forges et fonderies et la formation. Cette journée se poursuivra le jeudi 20 novembre avec la visite de la fonderie OUTREAU TECHNOLOGIES à Outreau (62).

Le 19, au cours de la matinée consacrée à la révision du BREF Forges et fonderies, le CTIF présentera le bilan de l'étude Rebrefond, qui a été conduite de 2017 à 2019 et qui a fortement mobilisé la profession afin d'obtenir un état des lieux aussi précis que possible de l'application du précédent BREF. La Fédération Forge Fonderie reviendra ensuite sur le déroulement du processus de révision du BREF dont elle est partie prenante au nom des professions et fera un point sur les premières avancées dans ce cadre.

L'après-midi sera consacrée à la formation avec notamment des échanges entre industriels et étudiants de BTS sur les parcours professionnels de chacun. La journée se terminera par une visite des installations du lycée.

La matinée du jeudi 20 novembre, qui se déroulera à Outreau, restera axée sur la formation autour d'une intervention de la Fédération Forge Fonderie consacrée à l'actualité de la formation professionnelle (présentation de l'enquête formation, de l'offre de formation et des impacts de la réforme) et se terminera par la visite de la nouvelle fonderie du groupe Vossloh, spécialisée dans la fabrication de cœurs de voies de chemin de fer en acier au manganèse.

Ces deux jours de réunions sont exceptionnellement ouverts par la Fédération Forge Fonderie à toutes les entreprises du secteur et la participation est gratuite. Pour vous inscrire, veuillez contacter Olivier Vasseur : o.vasseur@forgefonderie.org, +33 7 60 38 09 80



- PRODUCTIVITÉ ET PRODUCTION ÉLEVÉES
LORS DE LA FORGE À CHAUD
- RIGIDITÉ STRUCTURELLE ÉLEVÉE AVEC RÉDUCTION
DES DÉFORMATIONS
- RÉSISTANCE AU BASCULEMENT ÉLEVÉE
EN CAS DE CHARGE EXCENTRÉE
- RÉDUCTION DE LA HAUTEUR DE MACHINE
AU-DESSUS DU SOL DE 25%

La nouvelle presse Farina: 16 000 tonnes de force concentrée, 1700 tonnes de poids et une hauteur de 10 mètres. La presse à forger Farina est l'une des plus grandes installations mécaniques de son type au monde.

La première machine de type GLF 16000 sera en service à partir de 2021 chez thyssenkrupp sur le site de Hombourg pour forger des essieux avant de camions et des vilebrequins. «La presse principale de la nouvelle ligne de forgeage est la première presse à excentrique au monde de cette ampleur et dotée de ces performances et cette vitesse de mise en œuvre à être mise en service», explique Franz Eckl, directeur de l'usine de forge à Hombourg. «Cet équipement nous permettra de fabriquer environ 360000 pièces forgées par an.»

Depuis 2018, Farina fait partie du groupe Schuler et constitue un des fournisseurs européens leader en fabrication de lignes de forgeage grâce à son rapport qualité-prix attractif.

Farina Presse SRL
Via Provinciale, 31
23867 Suello (Lecco)
Italy

Phone +39 031 655881
Fax +39 031 656769
info@farinapresse.com

MORE INFORMATION



www.farinapresse.com

FARINA
DF
PRESSE

Member of the SCHULER GROUP



Xavier LEDOUX
Ingénieur Matériaux -
Pôle Industrie Du Futur
CETIM Grand Est

Influence des ségrégations sur la déformation des pièces forgées

Introduction

La déformation des pièces mécaniques forgées est un sujet majeur d'étude pour les constructeurs, les forgerons et les aciéristes car il entraîne des surcoûts importants dus aux opérations d'usinage nécessaires pour éliminer ces déformations.

Il y a de très nombreux paramètres qui peuvent influencer significativement la déformation lors de la fabrication des pièces dont la plupart concerne les conditions de traitements thermiques et de trempe.

Dans le cadre de la commission forge du CETIM, un groupe de travail a décidé de traiter un paramètre encore peu étudié : les ségrégations mineures et majeures qui apparaissent lors de la solidification.

Pour ce faire, il a été décidé de caractériser les ségrégations puis de déterminer s'il y a une corrélation entre les paramètres sidérurgiques et les déformations des pièces après traitement thermique.

Une méthodologie a été mise en place pour étudier les ségrégations sur des barres en acier 27MnCr5, de diamètre 55mm fournies par différents aciéristes avec les étapes suivantes :

- étude de l'évolution morphologique/géométrique (forme, décentrement, ...) de la ségrégation suivant la longueur de la barre ;

- caractérisation des déformations après usinage et traitement thermique ;
- évaluation de la dispersion des duretés après traitement thermique.

Pour assurer une bonne compréhension de l'évolution des ségrégations le long des barres, nous avons décidé :

- de repérer arbitrairement un 0° sur chaque barre ;
- de réaliser sur chaque barre un usinage centré et décentré de 4mm/225° pour les mesures de déformation ;
- d'utiliser des barres redressées et non redressées.

Si plusieurs aciéristes ont participé à l'étude et fournis des barres, nous nous limiterons dans cet article aux résultats obtenus dans un seul cas.

Morphologie des macroségrégations

Trois échantillons ont été prélevés en début, milieu et fin d'une barre de 9500mm pour visualisation de la ségrégation et caractériser son éventuelle évolution. A cet effet, les échantillons ont été polis jusqu'à la pâte diamantée de granulométrie 1µm puis attaqués au Nital 4%.

Dans un premier temps, les observations ont été réalisées sur banc macrographique avec un éclairage homogène de type dôme LED.

Pour chaque barre nous distinguons trois zones que nous avons identifiées de la manière suivante (figure 1) :

- une zone extérieure de couleur claire ;
- Une zone de transition de couleur foncée ;
- une zone centrale de forme carrée.

D'un point de vue métallurgique, les zones claire et foncée représentent la zone colonnaire. La partie foncée est une zone de ségrégation qui correspond à une teneur locale plus élevée en carbone et en soufre. La zone centrale est la zone équiaxe où l'attaque révèle une microstructure plutôt hétérogène. La forme rectangulaire de la zone équiaxe a pour origine le bloom de section carrée à partir duquel la barre a été réalisée.

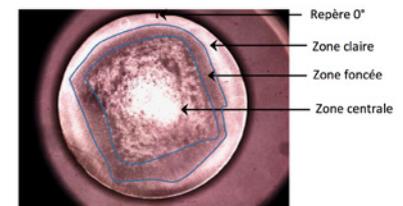


Figure 1 : Macrographie de la barre en 27MnCr5 après attaque Nital

Une analyse d'image a été effectuée via le logiciel d'acquisition/traitement d'image ARCHIMED pour une barre centrée et décentrée (figures 2 et 3). Le rapport entre la surface occupée par la zone équiaxe et la surface totale de l'échantillon a été mesuré et est globalement constant avec des valeurs comprises entre 40 et 43% ce qui est en accord avec les données des aciéristes.

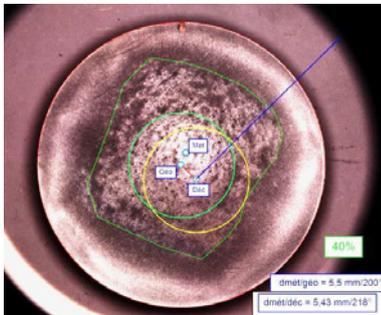


Figure 2 : Macrographie réalisée en milieu de barre avec l'analyse de la surface de la zone équiaxe et la localisation des centres géométriques et métallurgiques pour la barre non redressée

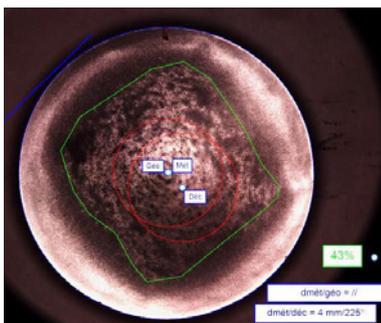


Figure 3 : Macrographies réalisés en milieu de barre avec l'analyse de la surface de la zone équiaxe et la localisation des centres géométriques et métallurgiques pour la barre redressée

Nous avons estimé la position relative entre les centres géométrique et métallurgique pour chacune des macrographies. Les résultats suivants ont été obtenus :

- Barre non redressée : Les centres géométrique et métallurgique sont distants de 1 à 5 mm environ ;
- Barre redressée : Coïncidence des centres géométrique et métallurgique.

L'observation des macrographies réalisées sur une même barre indique donc que la ségrégation carrée évolue tant au niveau de sa forme que de son orientation.

Caractérisation des déformations

L'instrument utilisé est un mesureur d'écart de forme de type Taylor-Hobson. L'éprouvette utilisée pour les mesures est décrite à la figure 4 et une vue du système de mesure à la figure 5.

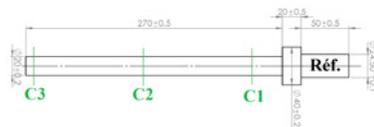


Figure 4 : Plan de l'éprouvette servant à mesurer les déformations dans les barres

Afin d'obtenir les valeurs de déformation, nous avons procédé de la manière suivante :

- Centrage nivellement en prenant en référence la partie $\varnothing 24,5\text{mm}$;
- Construction cylindre (et donc axe) de référence sur une partie de $\varnothing 24,5\text{mm}$;
- Prise de trois cercles sur la partie étudiée $\varnothing 20\text{mm}$ (C1 z=90mm, C2 z=210mm, C3 z=335mm) ;
- Mesure d'excentration pour chacun des trois cercles mesurés ;
- Prise de valeur d'excentration sur cercle C3 : valeur la plus importante.

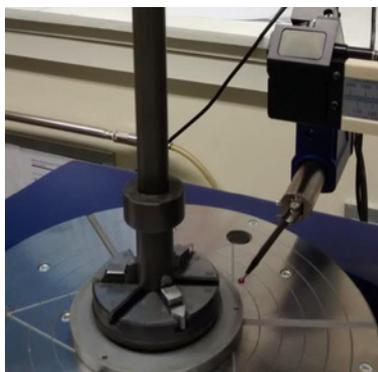


Figure 5 : éprouvette en place sur le dispositif de mesure

Les résultats obtenus sont représentés à la figure 6 pour deux barres redressées dont l'une a été usinée centrée et l'autre décentrée.

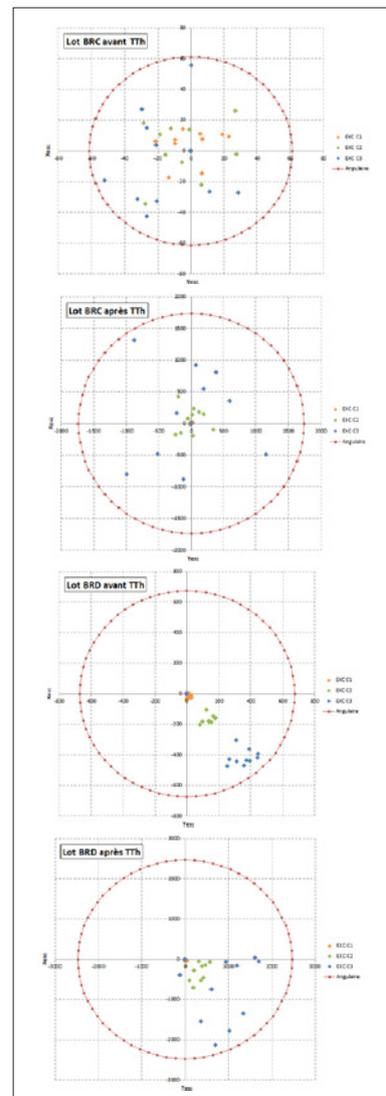


Figure 6 : Barre redressée – Déformations avant et après traitement thermique – En haut : pièces centrées ; En bas : pièces décentrées.

Les contrôles ont permis de mettre en évidence que des déformations étaient systématiquement relevées avant traitement thermique et qu'elles étaient amplifiées après traitement thermique. Les déformations ont pu atteindre des valeurs de l'ordre de 2 mm. Nous n'avons pas constaté l'influence significative du lieu de prélèvement des pièces (centré et décentré) sur l'ampleur des déformations mesurées.

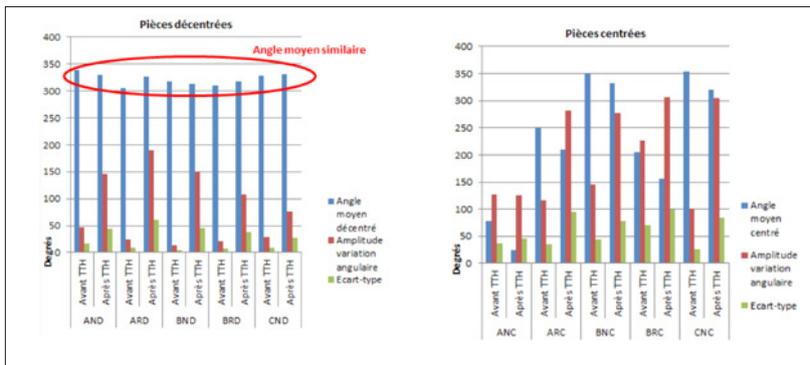


Figure 7 : Synthèse des mesures des directions de déformation mesurées sur des barres centrées et décentrées

Dispersion des duretés – Essais Jominy

Des essais Jominy ont été réalisés conformément à la norme NF EN ISO 642 :1999 sur des éprouvettes usinées.

Les différentes étapes de l'essai sont les suivantes :

- Traitement de normalisation à 870°C pendant une durée de 3h et refroidissement lent
- Usinage d'une ébauche d'éprouvette Jominy centrée dans la barre.
- Austénitisation à 850°C de l'éprouvette avec un maintien de 30 min.
- Refroidissement en bout par un jet d'eau.
- Usinage de 6 méplats distants de 60° le long des génératrices dans des conditions évitant tout revenu par échauffement excessif.
- Mesures de duretés HRC sur les méplats à différentes distances de l'extrémité trempée.

Les résultats des essais (figure 8) montrent des différences importantes à une distance donnée. L'évolution des valeurs à une distance déterminée de l'extrémité trempée présente des motifs différents suivant les éprouvettes. Les éprouvettes de 20mm se localisant dans la zone équiaxe, la microstructure hétérogène observée dans cette zone peut être à l'origine de la forte dispersion des duretés constatées.

De plus, précisons que l'essai Jominy semble difficilement corrélable avec les déformations dans le sens où l'examen reste local et que contrairement à la macrostructure, il ne semble pas accessible d'anticiper l'évolution des Jominy en fonction de la longueur de la barre. Nous avons entrepris une tentative en adoptant une représentation différente des résultats des essais Jominy (figure 9). Il s'agissait de

représenter l'évolution de la dureté en fonction de la position angulaire. Ainsi on trace l'évolution de la dureté en fonction de l'angle pour chaque distance à la face trempée. Cette représentation a permis de montrer que le « motif » de la Jominy était répétable en fonction de la distance trempée. L'écart de dureté entre les différents angles a naturellement tendance à s'accroître avec la distance à la face trempée. Dans la mesure où la ségrégation présente une rotation, on pourrait s'attendre en première approche à retrouver un motif de Jominy présentant un « déphasage » entre le prélèvement en début, milieu et fin de barre. Cependant cela n'a pas été le cas.

Conclusion

L'influence des ségrégations a été étudiée sur des barres en acier de nuance 27MnCr5, de diamètre 55mm et de longueur 9500mm redressées et non redressées.

Tout d'abord, une caractérisation quantitative de la géométrie/morphologie de la ségrégation a été réalisée sur les quatre barres. On remarque que les rapports de surface sont similaires sur les barres examinées.

Dans un second temps, nous avons entrepris le contrôle de la déforma-

Résultats Jominy – Barres B non redressée

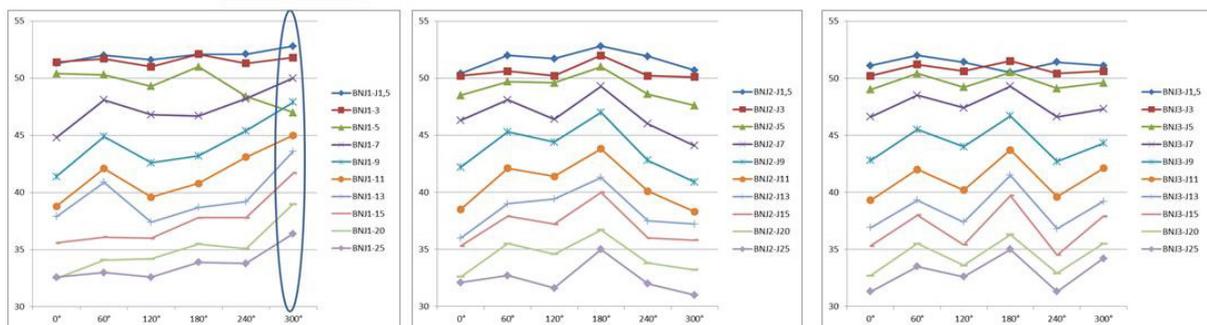


Figure 8 : Résultats des essais Jominy dans le cas de la barre non redressée (de gauche à droite prélèvements en début, milieu et fin de barre)

tion des pièces usinées et ce, avant et après traitement thermique. Après traitement de trempe, les excentrations sont naturellement

amplifiées et ont pu régulièrement atteindre les 2 mm. Sur le lot de pièces décentrées, les déformations se produisaient dans une direction

globalement similaire. Cet effet est clairement visible avant traitement thermique. *A priori* ce résultat s'expliquerait par le fait que l'on englobe une partie de la zone basaltique différente du reste de l'échantillon composée principalement de la zone équiaxe. Ainsi, la pièce décentrée présente une structure hétérogène et surtout asymétrique. A l'inverse dans le cas des pièces centrées, on se retrouve avec une matière macroscopiquement homogène et symétrique correspondant à la zone équiaxe de la ségrégation. Dans ce cas, les déformations semblent davantage suivre un processus aléatoire.

Dans un dernier temps, des essais Jominy ont été réalisés sur une barre en réalisant des éprouvettes centrées. Il a été constaté des écarts très importants entre génératrices pour une distance à l'extrémité trempée donnée.

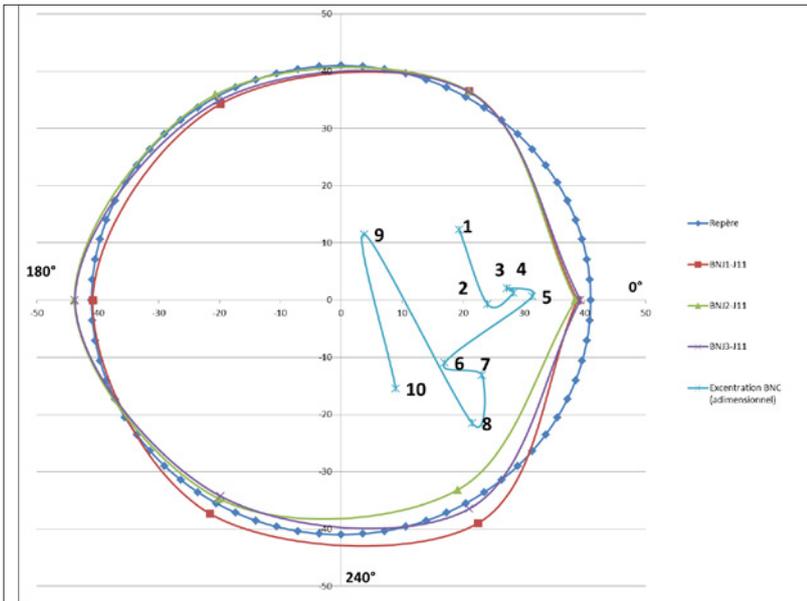


Figure 9 : Évolution angulaire de la dureté Jominy JII pour les trois éprouvettes et une superposition des déformations des pièces centrées avant TTH





www.vaccaripresse.com

**screw presses
for forging**

steel
brass
special alloy
titanium
copper
aluminium









Xavier LEDOUX
Ingénieur Matériaux -
Pôle Industrie Du Futur
CETIM Grand Est

Les revêtements anti-oxydation

Introduction

Dans le cadre de la commission Forge, le CETIM débute une étude sur les solutions de revêtements afin de protéger les lopins contre l'oxydation à haute température durant leur mise en chauffe en four et durant l'opération de forgeage elle-même. Cette problématique concerne les aciers et les alliages de titane. En effet, les aciers sont chauffés jusqu'à 1200°C pour être mis en forme ce qui conduit à la production de fortes épaisseurs de calamine qui détériorent les outils. Les alliages de titane, chauffés autour de 900°C, produisent une couche dite d'« alpha-case » lorsqu'ils sont en présence d'oxygène à haute température. Cette couche dure nécessite une opération de décapage qu'il serait intéressant d'économiser.

Outre la résistance à l'oxydation, le revêtement doit également répondre à d'autres paramètres de cahier des charges propres à l'opération de forgeage :

- Il doit être compatible avec les produits lubrifiants ;
- Il doit être capable de subir une forte déformation à chaud ;
- Il doit pouvoir se retirer aisément par un post-traitement de type sablage ;
- Il ne doit pas modifier en profondeur la microstructure et les propriétés de la pièce forgée.

Nous présentons ici une synthèse de la recherche bibliographique et des solutions choisies pour la suite de l'étude.

Presentation du phénomène d'oxydation a haute temperature

En guise d'introduction, nous pouvons préciser quelques données fondamentales sur l'oxydation haute température des aciers et des alliages base titane.

L'oxydation des aciers

L'oxydation du métal fer à haute température est relativement complexe puisque la calamine est en fait composée de plusieurs oxydes de degrés d'oxydation différents stables décrits par le diagramme de phase Fe-O :

- La wustite FeO
- La magnétite Fe_3O_4
- L'hématite Fe_2O_3

La stabilité de ces oxydes est fonction de la pression partielle de O_2 dans la couche (figure 1). On notera que ces oxydes, notamment FeO , sont peu stœchiométriques. C'est-à-dire qu'ils ont une concentration en défauts ponctuels qui est élevée ce qui fait qu'ils représentent une mauvaise barrière de diffusion et ils ne ralentissent pas ou peu la « consommation » du métal par l'oxygène.

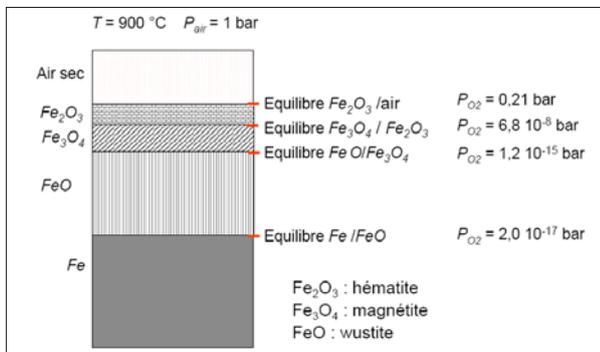


Figure 1 : Schéma des différentes couches d'oxyde de Fer en fonction de la pression partielle de O₂

Pour accroître la résistance à l'oxydation des aciers, on ajoute généralement du chrome. Pour des teneurs inférieures à 10% en chrome, l'oxydation à haute température des alliages Fe-Cr conduit à une morphologie complexe de couches composées d'oxydes de fer, de spinelles et de Cr₂O₃ (figure 2).

Lorsque la teneur en chrome de l'alliage augmente, la quantité de Cr₂O₃ et de spinelle FeOCr₂O₃ croît aux dépens des oxydes de fer, et les teneurs en chrome en solution dans ces derniers oxydes augmentent. Ainsi, la vitesse d'oxydation diminue de nouveau, surtout lorsque la teneur en Cr est suffisante (13% Cr) pour conduire à l'élaboration d'une couche continue de Cr₂O₃ qui est une bonne barrière de diffusion et va diminuer significativement la vitesse d'oxydation.

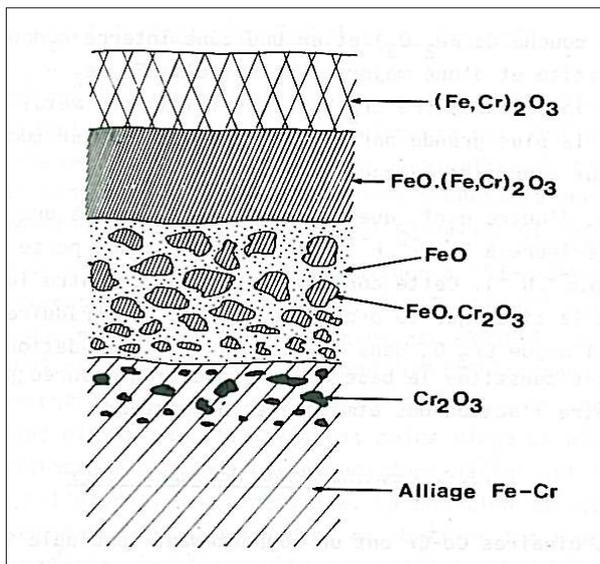


Figure 2 : Constitution de la couche d'oxyde sur un alliage Fe-Cr à faible teneur en Chrome [1]

L'oxydation sur les alliages base titane

Le titane a une grande affinité avec l'oxygène. Ainsi, lorsqu'il est exposé à des environnements oxydants, il forme une couche d'oxyde de type TiO₂. A température ambiante, cette couche de passivation apporte une protection efficace dans de nombreux environnements corrosifs.

Cependant, au fur et à mesure de l'augmentation de la température d'oxydation, cette couche d'oxyde est de moins en moins protectrice. A partir de 900°C, elle n'apporte presque plus aucune protection (cinétique d'oxydation linéaire) à cause d'une structure poreuse et d'une forte expansion volumique qui l'empêche d'adhérer correctement au métal.

La particularité du titane, par rapport au fer et au nickel, est que la solubilité de l'oxygène (dans la phase α) y est très élevée, 30%at. d'après le diagramme de phase.

Cela a pour conséquence la génération d'une couche de diffusion de l'oxygène sous la couche d'oxyde qui est la fameuse couche d'« alpha-case » qui est délétère pour les propriétés mécaniques car elle est dure et fragile.

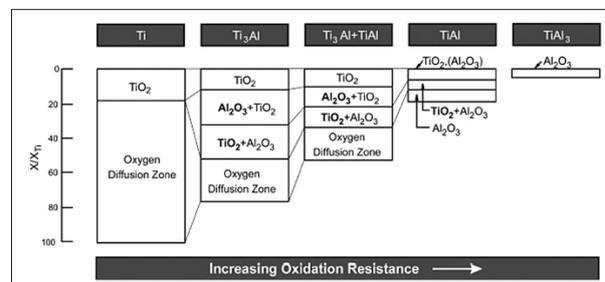


Figure 3 : Représentation schématique des couches d'oxydes dans les alliages de titane en fonction de la teneur en aluminium [2]

Les alliages de titane contiennent généralement une certaine quantité d'aluminium (6%at dans le TA6V par exemple). Comme c'est un élément qui a également une forte affinité avec l'oxygène, il y a « compétition » entre l'oxydation du titane et de l'aluminium à la surface des alliages conduisant à une structure multicouche de TiO₂ et d'Al₂O₃ (figure 3).

La présence d'aluminium est globalement bénéfique pour la résistance à l'oxydation des alliages de titane : plus sa quantité est élevée, plus les couches de diffusion et d'oxyde s'affinent. A partir de 50%at, la couche d'« alpha-case » disparaît et à partir de 75%at, la couche d'Al₂O₃ devient fine et protectrice.

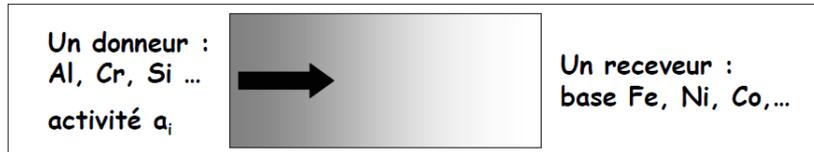


Figure 4 : Principe du revêtement par diffusion

Les solutions de protection

Dans le domaine de la haute température, il existe deux grands types de revêtements qui peuvent protéger les aciers :

- Les revêtements métalliques ;
- Les revêtements céramiques ;

A ces revêtements, s'ajoutent des traitements de surface encore expérimentales de type traitements de conversion.

Les revêtements métalliques

Le moyen le plus utilisé pour protéger contre l'oxydation et la corrosion à haute température est le revêtement par diffusion d'éléments métalliques dont le principe est présenté dans la figure 4 ci-dessous. Il consiste à enrichir la surface des pièces à protéger par un ou plusieurs éléments formant des oxydes protecteurs.

Ces revêtements peuvent être obtenus par « slurry », projection thermique ou par un procédé thermochimique. Dans le premier cas, l'élément souhaité est déposé à la surface du substrat sous la forme d'une peinture ou d'une barbotine puis la diffusion est provoquée par un traitement thermique qui peut se faire dans un four ou par induction (figure 5).

Les avantages présentés par ces revêtements sont : une mise en œuvre facile et reproductible, leur coût modéré, ils sont adaptés au traitement de pièces de toutes tailles et de forme géométrique complexe.

Cependant, ces revêtements présentent des épaisseurs relativement faibles (dizaines de microns), ils ne sont pas toujours compatibles avec des contraintes de production industrielles (temps de traitement de l'ordre de la vingtaine d'heures) et les compositions possibles sont limitées.

Généralement, on cherche à ajouter de l'aluminium, du chrome ou du silicium ou un mélange de ces éléments à la surface de la pièce à revêtir.

L'aluminisation des aciers conduit à la formation d'aluminures de fer (Fe_2Al_5 , $FeAl...$) qui améliorent la résistance à l'oxydation par la croissance d'alumine à la place des oxydes de fer. Cependant, les phases formées sont fragiles et présentent souvent des porosités. Ainsi, il est préférable de réaliser un prénickelage avant aluminisation pour former un revêtement plus dense et plus durable.

Comme pour les alliages base fer et nickel, ce sont les revêtements à base d'aluminium qui sont les plus utilisés et les plus étudiés sur les alliages de titane. Généralement c'est une composition de type $TiAl_3$ qui est recherchée en surface afin de former une couche continue et compacte d' Al_2O_3 (figure 6).

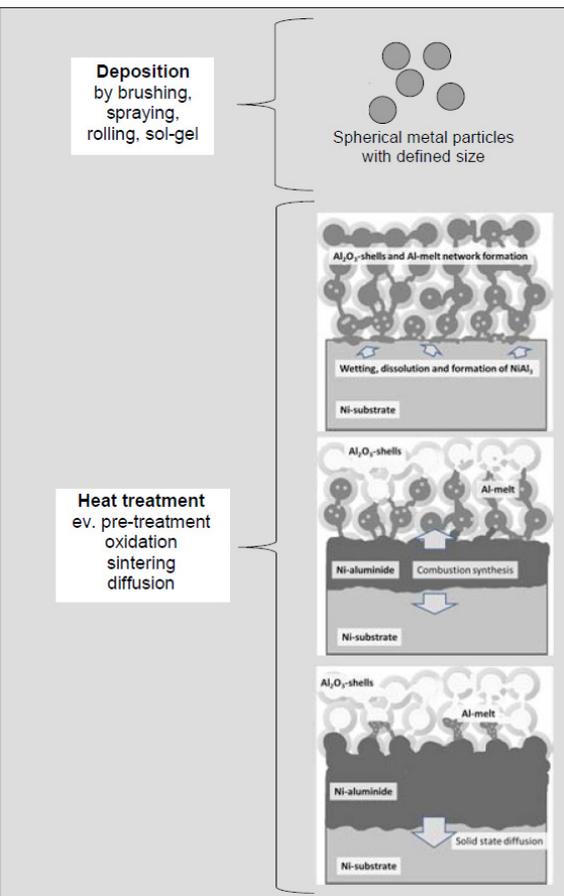


Figure 5 : Etapes d'application d'un revêtement d'aluminium par slurry [3]

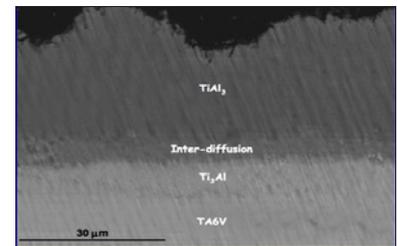


Figure 6 :Alliage Ta6V revêtu d'aluminium

Afin d'améliorer le coefficient d'expansion thermique, on ajoute du chrome au revêtement. Par exemple, T. Zhaolin a étudié les comportements d'oxydation à haute température des revêtements $Ti-37Al-14Cr$ [4] et $Ti-50Al-10Cr$ [5]. Ces deux revêtements ont montré non seulement une bonne compatibilité avec le substrat, mais également une excellente résistance à l'oxydation à haute température, sans fissure après oxydation cyclique.

Les revêtements céramiques

Dans les applications hautes températures, les revêtements céramiques ont été développés pour jouer un rôle de barrière physique, chimique ou thermique.

Les barrières anti-oxydation les plus utilisées sont Al_2O_3 , SiO_2 et Cr_2O_3 . Elles sont généralement appliquées par dépôt CVD.

Les revêtements d'oxydes améliorent la résistance à l'oxydation en raison de leur stabilité thermique élevée. Cependant, les revêtements d'oxyde ne pourraient pas être appliqués sur des pièces destinées à être déformées en raison de leur fragilité et de leur mauvaise adhérence sur des substrats métalliques. Ainsi, ils satisferont mal notre application pratique.

Finalement, les seuls revêtements céramiques utilisables en forge sont les vitrocéramiques de compositions générales $Na_2O-CaO-SiO_2$ ou $SiO_2-Al_2O_3-CaO-Na_2O$ qui sont connus des forgerons car ils composent les produits d'envragement servant de lubrifiants pour les alliages base nickel et titane. Une étude a évalué la résistance à l'oxydation de ce type de revêtements en vitrocéramique [6]. Elle a montré qu'il n'y a pas d'oxydation sur des échantillons revêtus à $800^\circ C$ pendant 300 h, et aucun nouvel oxyde ne s'est formé à la surface des revêtements (figure 7).

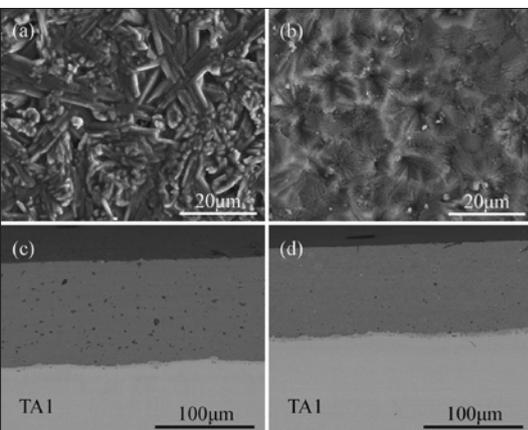


Figure 7 : Revêtement d'émaillage vu au MEB [6]

Les revêtements en vitrocéramique conviennent donc à la protection des alliages de Titane contre l'oxydation à haute température.

Néanmoins, L'un des principaux facteurs contraignants est que la phase de cuisson doit se faire sous gaz inerte sinon le revêtement ne parvient pas à empêcher la formation d'une couche enrichie en oxygène sur une certaine épaisseur. L'étude comparative entre un revêtement d'aluminium et des émaux [7] traduit bien ce problème avec des valeurs de dureté plus élevées à proximité de la surface pour les émaux à cause de l'alpha-case (figure 8).

Autres traitements

Une étude du CETIM sur les tapis de four [8] a montré que traiter par des solutions acides ou de soude des alliages réfractaires permettait de favoriser la croissance d'une couche de silice protectrice ce qui augmente fortement la durée de vie des tapis de fours à passage contre l'oxydation.

Ce type de traitement n'a pas de conséquences chimiques sur la pièce mais il faut un acier ayant un minimum d'éléments d'alliage pour espérer avoir un effet significatif de ce type de traitement.

Une autre voie de traitement « doux » pour les alliages base titane est le traitement par l'acide phosphorique (H_3PO_4) qui se fait par tremper ou par anodisation.

Comme il est visible sur la figure 9 ci-dessous, une immersion durant quelques minutes dans un bain d'acide phosphorique suffit à diminuer par 2 l'oxydation sur 500 heures. C'est surtout durant les 50 premières

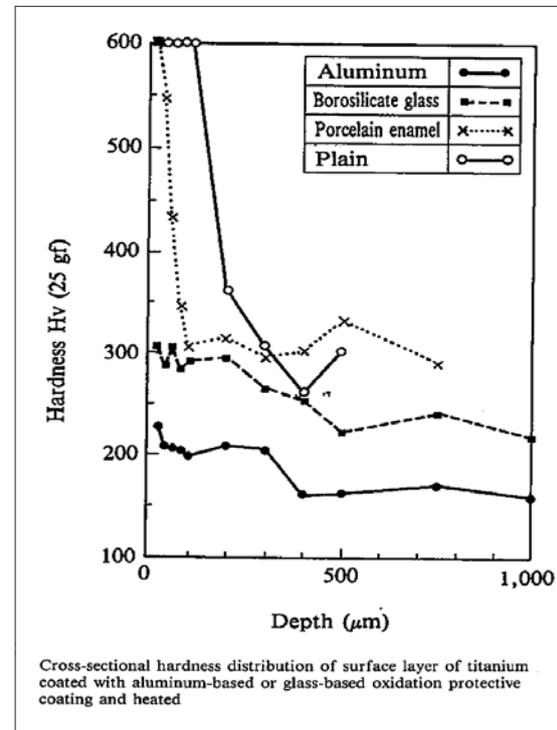


Figure 8 : Dureté en fonction de la profondeur pour du titane chauffé nu (« plain ») ou avec des dépôts d'aluminium ou de vitrocéramiques [7]

heures que l'effet du phosphore est visible.

Le mécanisme d'action du phosphore durant l'oxydation n'est pas parfaitement clair mais c'est la croissance d'une phase TiP_2O_7 qui permettrait de ralentir la cinétique d'oxydation.

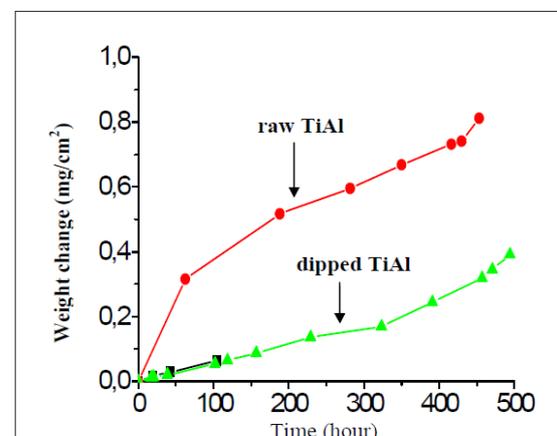


Figure 9 : Effet d'un traitement par l'acide phosphorique sur l'oxydation de TiAl à $800^\circ C$ [9]

Conclusion

Pour lutter contre le développement de la calamine et le phénomène d'alpha-case, les revêtements anti-oxydation les plus utilisés sont les revêtements métalliques à base d'aluminium. Différents procédés de dépôts existent mais le plus facile à mettre en œuvre industriellement est le procédé de dépôt par Slurry (ou barbotine).

Il est possible de protéger de l'oxydation par des revêtements céramiques d'oxydes mais à cause de leur fragilité intrinsèque seuls des émaux sont envisageables dans le domaine de la forge. Des solutions de conversion ont été développées ces dernières années et peuvent constituer des alternatives intéressantes.

A la suite de cette revue, une première phase d'étude a été mise en place afin de tester les revêtements d'aluminium déposés par slurry et

le traitement à l'acide phosphorique afin de valider leur intérêt. Des essais de traction à chaud interrompus sont ensuite envisagés pour évaluer leur comportement à la déformation.

Bibliographie

- [1] J. MOREAU, J. POULIGNIER – BENARD, *L'Oxydation des Métaux*, GAUTHIER-VILLARS, Paris (1964)
- [2] C. Leyens, M. Peters, *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003
- [3] On-site slurry coatings for aggressive high temperature environments, A. Naji, X. Montero, J. T. Bauer, M. C. Galetz, poster DECHEMA, 2016
- [4] Tang Zhaolin, Wang Fuhui, Wang Qingjiang, Wu Weitao, Li Dong, « Effect of coatings on oxidation resistance and mechanical properties of Ti60 alloy », *Acta Metall. Sinica* 34 (3) (1998)
- [5] Tang Zhaolin, Wang Fuhui, Wu

Weitao, « Effect of coatings on cyclic oxidation resistance of TiAl intermetallics », *Chin. J. Nonferrous Metals* 8 (1) (1998)

[6] Zunqi Xiao, Fatang Tan, Wei Wang, Hongfei Lu, Yuncheng Cai, Xiaolin Qiu, Jiangguo Chen, Xueliang Qiao, « Oxidation protection of commercial-purity titanium by Na₂O-CaO-SiO₂ and SiO₂-Al₂O₃-CaO-Na₂O glass-ceramic coatings », *Ceram. Int.* 41 (2015)

[7] Isamu Takayama, « development of oxidation protective coating for titanium », *Nippon steel technical report* n°62 (1994)

[8] A. Fleurentin, PF. Cardey, H. Buscail, C. Issartel, « *Optimisation de la durée de vie des éléments réfractaires dans un four de traitement thermique* », *Matériaux* 2010

[9] S.Y. Brou, G. Bonnet, J.L. Grosseau-Poussard, « Improvement of high-temperature oxidation of titanium alloys by dipping in a phosphoric acid solution », *Materials Science Forum*, Vols. 595-598, pp 17-22 (2008)






- 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 ■ site : www.adial.fr



Olivier MOUQUET
 Chef de projets
 Pôle Matériaux et
 Procédés à CTIF

Des aspects importants de la sécurité aux fours à induction, employés pour l'élaboration des alliages ferreux

Introduction à la sécurité aux fours à induction

Bien maîtrisée par les industriels, l'exploitation des fours à induction a permis de grands progrès pour la métallurgie et en particulier pour la fonderie, avec des équipements robustes dotés d'une électronique de puissance performante. Quelques rares accidents surviennent néanmoins, entraînant à chaque fois de lourdes conséquences pour les équipes concernées et pour l'entreprise.

De nombreux sites métallurgiques font face à des cycles intenses d'élaboration où les fusions de moins de 1 heure s'enchaînent d'où une implication soutenue pour le personnel. Ces situations soulignent l'importance des consignes de sécurité et des conduites à tenir en cas d'incidents.

C'est aussi le besoin de flexibilité qui exige que les routes métallurgiques fassent davantage appel aux fours à induction avec des élaborations de multiples nuances, comportant parfois des démarrages programmés ou des vidanges échelonnées en 2 ou 3 poches. Ce sont également les élaborations secondaires avec des versements d'acier liquide vers des équipements de type AOD ou VOD.

Ce contexte de forte sollicitation des équipes et des moyens renforce le besoin de personnes qualifiées et formées, aptes à suivre la sécurité au four à induction.

Pour rappel, la sécurité individuelle et collective s'appuie sur :

- La formation du personnel,
- Le retour d'expérience et les actions correctives,
- Les méthodes d'analyses des risques,
- Les mesures de prévention,
- Les équipements maîtrisés et conformes aux normes,
- Une organisation sûre, basée sur une bonne relation entre l'encadrement et le personnel opérationnel.

Grâce à une approche méthodologique, l'étude des risques est une démarche constructive et réglementaire qui permet d'organiser leur prise en compte dans une approche globale de la sécurité.

Cet article porte principalement sur l'élaboration des alliages ferreux. Il n'est pas exhaustif, mais est le fruit des rencontres avec les industriels et des observations menées avec eux sur leurs sites industriels. Aussi certains aspects de la sécurité n'ont pas été traités ici, même s'ils font aussi partie intégrante des règles de sécurité sur les sites : le port des EPI, la mise en sécurité électrique par la maintenance en cas d'intervention, l'exposition aux champs magnétiques, la sécurité lors du transport de métal liquide...

Rappel de l'induction et positionnement du four à induction : un creuset élancé plutôt étroit

L'induction permet un chauffage à distance des matériaux conducteurs. Le champ magnétique provoqué par une alimentation alternative à haute puissance, créé par la bobine, génère un champ magnétique secondaire qui initie des courants induits superficiels (figure 1). Ceux-ci interagissent sur les différents éléments de la charge puis sur le bain liquide. Ces courants induits vont activer l'effet joule et contribuer à l'échauffement des matières solides puis leur fusion.

Cet échauffement surfacique intense entraîne plusieurs effets rapides :

- Un écoulement de métal fondu vers le fond du creuset, en présence de résidus ou de morceaux solides en cours d'échauffement,
- Un écart prononcé de température entre le bas et le haut de la charge et du creuset,
- Une répartition variable du champ magnétique, couplée à l'évolution au cours du temps de la charge et du pied de bain liquide.

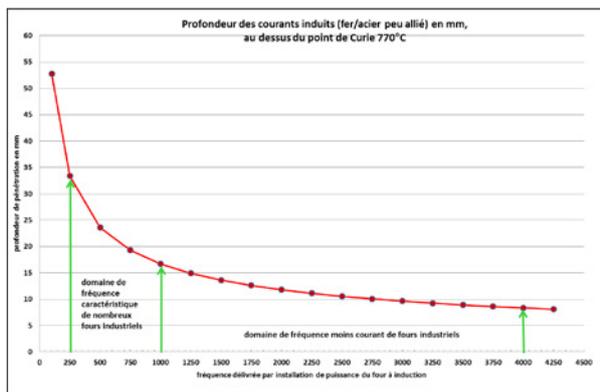


Figure 1 : Profondeur des courants induits à la surface de l'acier. Rôle de la fréquence et de la taille des morceaux chargés.

Importance du démarrage sur creuset froid

A noter que lors des démarrages à froid, la paroi du creuset subit un échauffement différé dans le temps, par rayonnement et contact conductif depuis la charge métallique. Aussi, certains industriels positionnent un brûleur pour préchauffer le creuset du four. Tous appliquent une procédure spécifique de démarrage sur creuset froid, qui doit assurer

une montée progressive de la puissance afin de laisser le creuset s'échauffer et s'accommoder aux mouvements de dilatation. Certains accidents ont été rencontrés à la suite d'un démarrage à froid trop rapide, avec comme résultat la pénétration du métal à travers un creuset peu dilaté. De ce point de vue, les gros fours présentent une plus grande sensibilité que les petits, ainsi que localement les parties hautes du creuset.

Importance du chargement des matières

L'architecture du four à induction nécessite un rapport hauteur/diamètre (H/D) élevé, pour une meilleure efficacité de l'induction ; ce qui impose que les scraps et les ferrailles ou paquets d'acier doivent s'écouler sur une grande hauteur : au contraire du chargement de la cuve employée au four à arc.

Exemple de rapport H/D :

Capacité du four rapport H/D	Four de 4 t	Four de 5.5 t	Four 12 t
Diamètre creuset (mm)	780	900	1160
Rapport d'élanement du creuset H/D	1.68	1.67	1.63

L'écoulement de la charge composée de matières diverses et vrac, parfois concassée grâce à l'emploi d'un broyeur, doit être garanti depuis le haut (zone d'enfournement) vers le bas du creuset : ce déplacement étant assuré en quelque sorte par la gravité et le ramollissement de la charge.

Or la masse volumique apparente vrac varie selon la nature de la charge de 0.2 t.m⁻³ (copeaux vrac) à 2.5, 3 t.m⁻³ (gueuses, aciers massifs) et la masse volumique apparente moyenne peut égaler 1.8 tonne.m⁻³. Par conséquent, cet état oblige à charger un volume, par exemple 3.9 fois celui du creuset pour l'acier liquide (7) : au final, le chargement d'un four moyenne fréquence (MF) peut durer 20 à 25 minutes sur un cycle de fusion de 50 minutes, avec la pleine puissance engagée. En pratique, le chargement est particulièrement à surveiller d'où une forte implication du personnel, capitale pour le bon déroulement de l'opération.

La densité surfacique de puissance de chauffe et le rôle de l'enfournement au regard de l'élancement du creuset expliquent une partie des principales situations à risques qui sont décrites ci-après.

A - Situation critique de croûtage et de figeage du haut du bain

Cette situation concerne un four dont la fusion des charges est quasiment terminée, et trouve son origine de 2 manières principales, succinctement décrites ci-dessous :

- Croûtage par la remontée d'un laitier excessif ou d'une nature chimique inappropriée ou la formation d'un agglomérat « laitier-métal-non-fondu » qui fige le haut de four,
- Figeage ou croûtage de la surface du métal (en dessous de sa température de liquidus) : un bain d'acier par effet « glaçon de la charge », lié par exemple à une fin de chargement ou d'ajout d'un ferro-alliage très endothermique (FeCr par exemple).

Ici deux phénomènes sont à distinguer : soit il s'agit de la formation excessive d'une couche de laitier visqueux ou froid qui surnage au-dessus du métal en fusion (A-1), soit la surface métallique du bain se solidifie et colle aux parois (A-2).

A-1 - Laitier figé, croûtage

Dans le premier cas, l'origine de cet incident peut être multiple (présence de souillures et stériles contenues dans la charge, d'inorganiques tels que vernis, peinture, ou de copeaux mal maîtrisés, ou encore une charge contenant une forte teneur en résiduel). De fait, le laitier n'est maintenu chaud que par le contact diffusif avec le métal liquide, qui est placé dessous. Or, le laitier possède une nature plutôt isolante ; il se solidifie alors et fige le haut du creuset, d'autant plus que son épaisseur est forte.

Le risque dans ce cas est celui d'une surpression de gaz piégé par la croûte de laitier avec une projection potentielle de gaz chauds ou de métal (un geyser en quelque sorte).

Parfois, ce laitier peut gêner la fin de chargement des morceaux solides à intégrer au creuset, ce qui provoque un agglomérat formé de laitier et des morceaux de métal.

Actions en cas de laitier figé à la surface du bain

- Avant toute intervention, alerter les responsables, puis revêtir les EPI¹ aluminisés, conformes à la situation,
- Arrêt immédiat de la puissance si métal assez chaud ou fusion fonte, sinon ajuster une faible puissance de maintien. Le plus tôt possible, maintenir une zone de surface de bain « ouverte » où le laitier est repoussé et par laquelle on voit le métal liquide (pas de surpression dans ce cas),
- Sur une zone du bain localisée près de la paroi du creuset, dans le secteur angulaire du bec ou proche du bec, tenter d'ouvrir une petite surface afin de libérer l'accès au métal, observer la situation, si possible prendre une température,
- Soit le laitier est manipulable et extractible avec des efforts qui peuvent être importants pour le détacher de la paroi circulaire du creuset, décision au cas par cas,
- Soit le laitier est trop figé : en ce cas prévoir un basculement d'urgence en ayant libéré la surface placée juste devant le bec, ou autrement enclencher une légère inclinaison du four et attendre de voir si le laitier redevient fluide, avant basculement complet,
- Soit dans la situation ultime le haut du four reste figé ; par conséquent arrêt de la fusion.

Nota : la prévention de ce risque suppose un tri strict de la charge avant son enfournement.

A-2 - Bain métallique figé en partie haute du creuset, figeage :

Dans ce deuxième cas, la surface du métal métallique se solidifie du fait d'un manque de température en partie haute du creuset. C'est parfois le cas pour l'élaboration des aciers peu alliés dont la température de liquidus est élevée (1480-1500°C par exemple). Cela peut également être provoqué par un niveau de remplissage trop élevé au regard du haut de creuset et de la bobine d'induction, ou d'addition de ferro-alliage absorbant beaucoup d'énergie lors de leur introduction par la surface du bain.

¹ : Pour l'ensemble des actions mentionnées dans cet article, les EPI conformes à la situation sont à utiliser.

Actions en cas de figeage de la surface du bain (croûte solide)

- Avant toute intervention, alerter les responsables, revêtir les EPI aluminisés conformes à la situation,
- Ajustement immédiat de la puissance selon la température atteinte, sinon ajuster une faible puissance de maintien,
- Incliner le four avec une puissance réduite (si le four le permet), afin de fusionner une surface réduite de métal figé, rendre liquide cette zone,
- A partir de ce moment, noter impérativement l'énergie qui est passée vers le bain fondu (P_p, t),
- Contrôler la puissance avec calcul de surchauffe et seuil d'énergie maximale à passer et surveiller la couleur de la croûte : soit elle fusionne (OK), soit elle ne fusionne pas pour une durée critique : en ce cas, arrêt définitif de la fusion,
- Ou si présence d'un chalumeau oxy-acétylène ou gaz, ouvrir près du bec une surface limitée afin de libérer la pression potentielle,
- Attention, la supervision peut ne plus être en mesure d'extrapoler correctement la température du bain (la relation Energie ΔO de surchauffe est biaisée), elle repose sur une température moyenne égale en tout point du bain fondu : donc sur un bain homogène.

Nota : les actions de prévention sont capitales face à ce risque. Au préalable, il faut limiter la hauteur du bain, gérer la fin de chargement avec l'assurance de diluer les morceaux froids dans le bain (par inertie thermique et leur immersion), éviter un agglomérat entre morceaux légers et laitier. Limiter autant que faire se peut les enfournements mal connus ou mal maîtrisés (de taille variable).

Remarque complémentaire sur la hauteur de bain fondu vis-à-vis de la hauteur de bobine : dans certains cas de fours peu puissants, ou d'un excès de remplissage, la surface du bain manque de mouvement. C'est-à-dire que la surface du bain en haut de four possède une vitesse d'écoulement faible ou nulle ; ce qui accentue son figeage par solidification.

Pour les deux situations de figeage et de croûtage, les actions préventives sont :

- Connaissance et optimisation préalable de l'ordre des charges, de leurs tailles et masses spécifiques, de la gestion de la puissance graduelle du four, connaître le comportement de la dernière charge à placer sur le bain,
- Triage strict des éléments de la charge : limitation des stériles, ou autres apports (organiques), surveiller la teneur en éléments très oxydables tels que résiduel,
- Ajustement de la hauteur du bain liquide au regard de la bobine d'induction, rester dans la capacité nominale du constructeur,
- Mise en place d'un bras télé-manipulé pour agir sur le haut du bain,
- Optimisation des outils de décrassage et de l'ergonomie du poste. Placer des écrans de protection sur roues ou profiter de la cabine (avec toit) du four pour protéger le pilote du four.

B - Situation critique de voûtage par enchevêtrement de morceaux de la charge en partie haute du creuset, conjugué à un pied de bain surchauffé en partie basse du creuset

Comme la majorité des fonderies le pratique activement, le recyclage de ferrailles d'acier, de vieilles fontes, de copeaux permet leur transformation et valorisation pour une deuxième utilisation. De fait, ces gisements sont constitués de nombreuses natures de formes, de tailles, d'états (référentiel NF A08-821 de 2013). C'est une des caractéristiques de l'exploitation du four à induction : la charge est constituée d'éléments divers et vrac dont l'écoulement prédictif est malaisé. De plus, pour les petits fours, le diamètre plus réduit est un facteur limitatif. L'enchevêtrement des morceaux est donc possible avec un blocage de leur écoulement vers le fond du creuset. Le suivi du chargement ne peut se faire par conséquent que par un contrôle visuel permanent, le personnel étant le premier garant de la sécurité.

Dans certains cas rares, le risque peut survenir aussi avec des dimensions inappropriées des éléments de la charge tels que des masselottes volumineuses, des paquets d'aciers, des poutrelles.

Une des caractéristiques de la fusion au four à induction est la formation d'un pied de bain qui modifie les variables électriques de la bobine (U et I) et concentre partiellement la puissance de l'induction. Lorsque le pied de bain se forme, par son contact mouillant au diamètre intérieur du creuset et sa résistivité élevée, il concentre une partie de l'induction vers le bas du creuset. L'échauffement du pied de bain est très rapide, il varie près des parois et selon son mouvement. Ce sont bien évidemment les résidus solides ainsi que la descente des morceaux froids de la charge qui pondèrent son échauffement.

On comprend par ce phénomène la dangerosité d'un enchevêtrement de la charge ou son coincement qui n'autorise plus sa descente : les morceaux solides et froids ne refroidissent plus le pied de bain et absorbent moins l'énergie transmise par le four.

Cela se combine à un brassage intense du pied bain sous l'incidence de l'induction magnétique (vitesse prononcée le long des parois réfractaires), avec comme corollaire une accélération de l'usure du creuset. Aussi l'usure peut devenir rapide et localisée jusqu'au percement du creuset (voir description au paragraphe suivant).

Actions en cas de descente interrompue de la charge et risque de pied de bain surchauffé

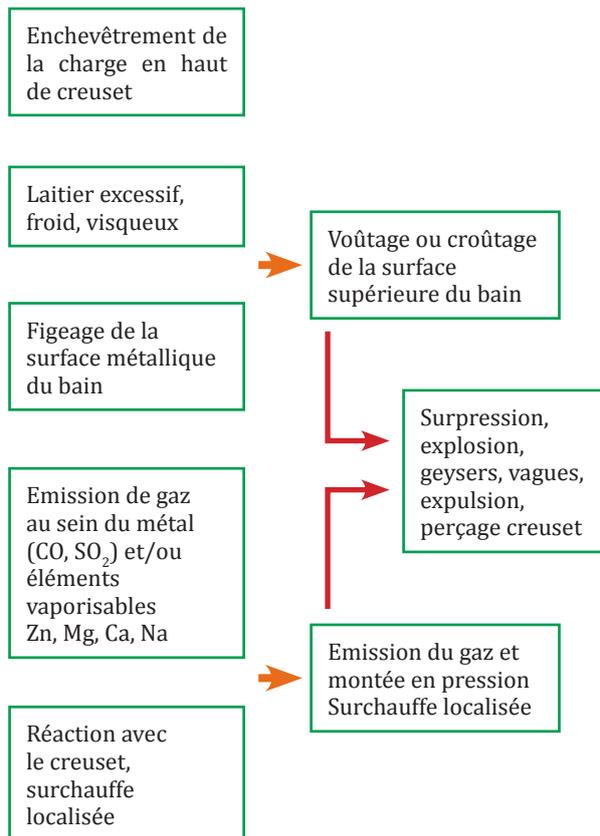
- Limiter la puissance (fraction de la puissance nominale selon situation), voire arrêter le four, notifier le début du coincement,
- Arrêter le chargement : pas d'autre charge ajoutée,
- Branler ou décoincer la charge au moyen d'une barre à mine ou employer une pince sur potence pour lever l'enchevêtrement (EPI appropriés),
- Evaluer la température du pied de bain ou mieux la mesurer, agir en conséquence : si le creuset est usé, ne pas programmer les fusions ultérieures ou contrôler cette usure en partie basse du creuset dès la fin de fusion,
- Retirer des éléments de la charge si nécessaire, (des poussées vers le bas sont souvent contre-productives car elles accentuent le coincement ou/et le phénomène d'arc-boutement).



Figure 2 : Cas rares d'éléments de la charge arc-boutée. Fusion stoppée risque de surchauffe.

Nota : La prévention en amont de ce risque demeure l'action la plus efficace.

Schéma d'analyse des causes de surpression, ou d'explosion (geysers, vagues, expulsion)



C - Situation critique de perçage du creuset par usure ou fissure localisée du réfractaire

Les mesures associées portant sur le creuset : une sécurité renforcée.

Les personnels connaissent plutôt bien le comportement du réfractaire car le creuset constitue un élément capital pour leur sécurité. A défaut, une formation, par les réfractaristes est recommandée portant sur les risques liés à la mise en œuvre du réfractaire et sa surveillance au cours de l'exploitation.

Au fur et à mesure des fusions, la géométrie du creuset va évoluer, son diamètre et sa profondeur vont augmenter, de manière variable.

Plusieurs contrôles permettent d'encadrer cette évolution au cours du temps : l'impédance d'alimentation de la bobine, la valeur d'isolement électrique, le relevé dimensionnel de la forme intérieure du creuset. Pour autant, c'est l'examen visuel et l'expérience du personnel de fusion qui demeurent prépondérants. Car certaines mesures sont indirectes ou globales (impédance, isolement) et ne permettent pas toujours d'appréhender une usure localisée.

Il faut effectivement rechercher toute anomalie d'usure locale (sous le bec ou opposé au bec), au niveau de la couronne, en partie basse de creuset : l'emploi de photos avec échelle, ou de piges constitue un outil efficace dans l'évaluation du risque.

Le percement du creuset constitue le risque majeur d'exploitation des fours à induction car de l'eau circule dans les spires de la bobine d'induction. Selon la position du percement et la température du métal liquide, l'incident sera de dangereux à très dangereux (explosion, jet de métal liquide, onde de chocs)... Dans ce dernier cas, c'est l'évacuation de la plateforme qui prévaut.

En cas de percement du creuset réfractaire, le béton ou revêtement céramique déposé sur la bobine en cuivre peut agir comme barrière physique : donc il convient de bien surveiller l'intégrité physique et l'état de ce revêtement.

Selon sa localisation et sa trajectoire, il faut noter que le percement du réfractaire ne provoque pas toujours une réaction avec l'eau. Le fond ou la partie supérieure du creuset peuvent conduire en effet à des percements sans contact avec l'eau de refroidissement. Dans ce cas, il serait dommageable d'avoir de l'eau sous le four (voir ci-contre).

Actions sur usure ou fissure localisée

- Contrôle visuel à chaque début ou fin de poste, avec une vision correcte d'où la nécessité d'un éclairage adéquat et dirigé,
- Surveillance de la valeur d'isolement avec des valeurs seuils à ne pas dépasser, connaissance de sa variation relative au cours du temps (à 15 , 20 fusions, etc..),
- Un défaut d'isolement ne doit pas être shunté, ni considéré à la légère : il faut remédier au problème d'isolement en priorité, avant une utilisation de la puissance nominale,
- Relevé dimensionnel sur creuset froid, avec des cotes maximales admissibles d'usure en profondeur et au rayon du creuset,
- Compilation des suivis et retours d'expérience de l'usure du creuset : toujours casser précocement plutôt que de frôler l'accident,
- Sur creuset froid en fonction des usures, constitution d'une série de photographies montrant ses degrés d'usure ou ses dommages avec pige de référence dimensionnelle,
- Emploi des patchs de réparation de bonne qualité et sur les conseils des fournisseurs pour boucher les fissures,
- Rappel des scénarios de préventions vis-à-vis du manque d'isolement et de la fissuration du réfractaire : informations claires à donner auprès du personnel.

Actions conjointes : installation obligatoire et surveillance régulière de l'état des fosses de rétention situées sous le four

Afin de limiter les conséquences d'un percement de four, des fosses de rétention sont toujours prescrites. Elles sont placées sous le four (lors du génie civil), et leur volume doit être bien suffisant pour collecter le volume de métal liquide afin d'éviter toute extension de l'écoulement ou d'une vague de métal.

Ces fosses nécessitent une attention particulière et un suivi de façon à garantir cet aspect de la sécurité :

- absence d'eau ou autre fluide (huile) dans les fosses (pompes et alarme),
- absence de débris inflammables,
- certaines fosses sont couvertes de tôles de protection fusibles (au comportement à vérifier), ce qui réduit leurs pollutions,
- la fosse est conçue avec un plan incliné pour concentrer la rétention de métal.

Face au risque de percement : la gestion de l'énergie, ou gestion de la puissance et des durées (minutage) participent à une maîtrise au service de la sécurité.

Le four à induction et son creuset ne possèdent pas de boucle de mesure en continu de la température de l'alliage en fusion. Certains industriels ont su placer des lunettes bichromatiques qui mesurent le rayonnement du bain en fusion ; mais elles ne peuvent se substituer à une mesure précise par immersion. Par conséquent, la surchauffe ou le maintien du métal liquide repose sur des mesures de températures volontaires, décidées par le personnel. Autrement, il s'agit d'une extrapolation paramétrée au moyen de la supervision lorsqu'elle est présente sur l'équipement. Sans supervision, ce sont la gamme opératoire (puissance, temps, nature de la charge) et la vision du rayonnement,

qui indiquent la marche du four et le niveau d'échauffement du métal.

Un contrôle de la température est obligatoirement effectué afin de déterminer la quantité d'énergie encore nécessaire et donc la durée de chauffe : ce contrôle est toujours très important mais encore davantage dans les situations particulières de retour de poche au four, d'un chargement interrompu, d'une nouvelle matière chargée, d'un changement de réfractaire, d'une nouvelle bobine, etc..

La conduite du four est améliorée par l'emploi de pesons. De cette manière, au fur et à mesure de son remplissage, la puissance est ajustée ainsi que son arrêt qui peut être programmé (les fours récents proposent cet équipement de pesage). Par contre, il est compliqué de l'intégrer pour une installation de four existant ; à voir au cas par cas.

Exemple de critères d'énergie donnés à titre indicatif : sur four chaud délivrance de l'énergie en 2 temps avec palier de contrôle de la température avant la surchauffe :

Nature d'alliage	Energie délivrée en kWh.tonne ⁻¹	Surchauffe en kWh.tonne ⁻¹
Alliage fonte EN-GJS-400-18	Arrêt à 1420°C E ≈ 470 kWh	Arrêt à 1550°C E ≈ 58 kWh
Alliage acier GX- 17CrNi17-2	Arrêt à 1550°C E ≈ 550 kWh	Arrêt à 1670°C E ≈ 54 kWh

Cette notion de l'énergie est l'intégration de toutes les puissances instantanées et des durées :

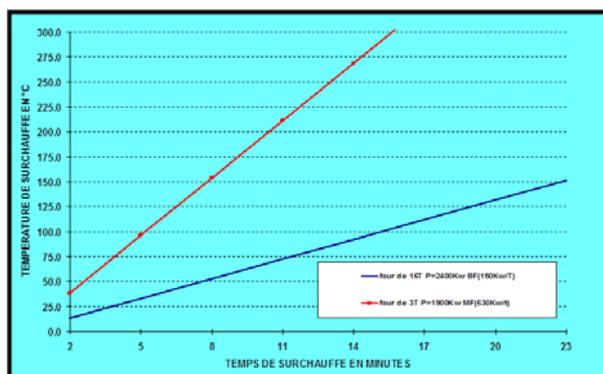


Figure 3 : Illustration de la vitesse de surchauffe sur four plein de 16 tonnes (BF) ou 3 tonnes (MF) avec une puissance respective de 150 et 630 kW/t, vitesses de surchauffe de 7 et 20°C.min-1

D - Situation potentiellement critique : le décrassage, un moment capital pour la qualité métallurgique mais à risque pour le personnel

Le décrassage est une opération plus ou moins aisée selon la mécanisation présente sur l'équipement du four mais en règle générale, les petits fours ou les fours moyens ne possèdent pas de potence et de pince de décrassage semi-automatisée. De plus, en cas de fusion d'acier peu allié, la durée de décrassage peut conduire à un croûtage de la surface supérieure du bain, aussi en ce cas une puissance modérée du four est maintenue.

En pratique, l'opérateur décroasse le laitier au moyen d'un outil qui entre en contact avec le bain métallique. Cette opération dure de 2 à 8 minutes environ. La puissance du four doit être obligatoirement coupée ou des équipements isolants doivent être utilisés pour éviter tout risque d'électrisation ou d'électrocution.

Actions en cas de décrassage

Les outils portatifs étant le plus souvent en métal (barre, pelle de décrassage), ils sont conducteurs. Aussi, il convient de bien identifier la pratique et les conditions de décrassage :

- Soit il y a obligation de couper la puissance du four : le décrassage peut être effectué en sécurité (électrique),
- Soit pour des raisons spécifiques par la présence d'un risque plus grand comme le figeage du bain d'acier voire de la fonte, la puissance réduite est maintenue...dans ce cas, il faut isoler électriquement l'opérateur par des équipements dédiés haute tension (manche isolant haute tension, autres).



Figure 4 : Exemple de laitier à la surface du bain ; assez couvrant et fluide ou en amas grumeleux.

E - Isolement et mise à la terre du creuset : le potentiel électrique de la bobine égale DANGER entraîne un risque d'électrisation ou d'électrocution

Le creuset réfractaire du four à induction joue le rôle de l'entrefer entre la bobine en cuivre alimentée par un haut potentiel électrique (ex : 1500V) et le métal liquide, isolé de ce haut potentiel. L'intégrité physique du creuset et du béton de bobine doit être garantie. Or son exploitation conduit à une usure au fur et à mesure des élaborations, parfois à des usures anormales et localisées, et peut provoquer des fissures (en particulier pour les réfractaires de type spinelle et magnésien). En présence de fissures du réfractaire, il y a un risque d'infiltration de langues de métal se rapprochant de la bobine en cuivre, d'où un isolement réduit, ou au pire son percement.

L'usure du creuset est étroitement surveillée par des mesures diverses, dimensionnelles, électriques, visuelles, parfois une mesure via des caméras infrarouges. D'autres systèmes de mesure en continu de l'état d'usure du creuset sont intégrés au creuset tels que « Saveway » ou « Opticoil ».

Une des conditions majeures de sécurité des fours industriels est la mise à la terre du métal : en pratique, cela est assuré par des antennes métalliques qui traversent la paroi réfractaire et viennent en contact avec le métal en fusion. La continuité électrique de la mise à la terre doit être vérifiée. Comme le creuset est régulièrement réparé, une attention est requise à chaque réfection du creuset.

Actions pour le suivi de l'isolement du four

Deux vérifications permettent la surveillance électrique du creuset :

- La mesure en continu de la résistance d'isolement ($k\Omega$) ou du courant de fuite (mA),
- Le test de déclenchement de la puissance sur four plein de métal liquide (testé avec une antenne portative qui vérifie le déclenchement du four par courant différentiel et la continuité électrique de la mise à la terre), à chaque prise de poste par exemple.

Un déclenchement de la puissance du four et/ou alarme sont requis pour prévenir tout contact ou risque d'un arc électrique entre la bobine et le métal.

La consignation de la valeur d'isolement est utile à chaque prise de poste du four à induction, et en toute occasion de modification d'exploitation du four. Cela permet de mobiliser l'attention du personnel sur cet indicateur de sécurité ainsi que d'établir un retour d'expérience.

La variation de cet isolement est également une source d'information sur une évolution néfaste ou un événement électrique potentiel : par exemple la valeur d'isolement baisse lors de la mise en place d'un réfractaire pulvérulent légèrement humide, ou si des vapeurs métalliques imprègnent le réfractaire. Dans ces cas il est recommandé d'employer la puissance du four dans un mode pondéré selon une procédure adéquate, validée par l'encadrement.



Figure 5 : Exemple de pupitres de commandes (gauche Inductotherm ; droite ABP Induction) qui indiquent la valeur d'isolement du creuset.

F - Débordement du bain, déversement de métal sur la margelle du four

Plusieurs situations à risques de débordement de métal liquide ont été constatées sur le terrain. Les principales origines sont de types physico-chimiques mais d'autres sont purement mécaniques.

Il s'agit pour la première famille d'origine de :

- Vaporisation ou effervescence ou bouillonnement plus ou moins brutal de CO, Zn, ou autres éléments vaporisables, à la suite d'un phénomène d'oxydo-réduction, par exemple (acier effervescent de frittage peu ou pas calmé) ou de l'emploi de tôles zinguées ou pour un laitier chimiquement instable, d'un moussage.

Pour la deuxième famille, il s'agit :

- D'une chute inopinée d'un élément de charge alors que le four est quasiment plein, avec comme corolaire la formation d'une vague qui submerge et recouvre la margelle du four;
- D'un retour de poche mal géré avec un versement brutal du métal liquide qui éclabousse la margelle du four;
- Du retour d'une poche en mode aérien, avec un percement inopiné du réfractaire de celle-ci.

Actions de prévention

- Encadrer strictement le taux d'apport de zinc selon la qualité des ferrailles chargées, contrôler le taux d'oxydes inférieurs, mesurer l'activité d'oxygène, introduire des désoxydants en cours de fusion,
- Limiter les introductions d'oxygène par des gammes inappropriées de chauffe ou de fusion,
- Ajuster la puissance du four de façon à laisser une durée de départ de vapeurs de Zn aspirées, voire procéder à des coupures intermittentes pour surveiller la hauteur de bain liquide, optimiser l'aspiration et le niveau de dépression au-dessus du four,
- Ne pas autoriser de charge lourde au filin ou à la corde en fin de fusion,
- Coordonner le retour aérien de la poche si retour métal au four; tenter d'éloigner le personnel par action via des outils ou gabarit de guidage ou pare-chocs amovibles,
- Vérifier le système de sécurité anti-basculement,
- Améliorer la radio télécommande des ponts roulants avec des translations optimisées et des arrêts de position,
- Contrôler régulièrement les parois de la poche en circulation, employer une caméra infrarouge pour relier un risque de percement et l'épaisseur de réfractaire.
- Limiter la hauteur de métal liquide dans le creuset

G - Introduction d'eau dans le bain par des apports extérieurs

Deux circonstances principales sont à l'origine de ce risque qui peut provoquer un violent souffle avec expulsion et projection de métal, ce qui expose le personnel à des accidents corporels graves :

- Introduction de morceau (il en suffit d'un seul) ou d'élément de la charge mouillé ou humide (attention également aux corps creux),
- Introduction d'outils de travail préalablement enduits ou poteyés, mal séchés ou mal étuvés,

Pour rappel, 0,5 litre d'eau porté violemment à haute température (1500/1600°C) peut générer un volume de détente de vapeur de 3,8 à 4,3 m³ ... et potentiellement de l'hydrogène (s'il y a décomposition de la vapeur d'eau).

Actions de prévention

- Obliger ou recommander les recycleurs pour leur transport sous bâche des matériaux métalliques,
- Stocker les matières sous bâche, ou préau,
- Contrôler de visu avant chargement, identifier des fluides éventuels,
- Placer des brûleurs de séchage sur la charge lors des mois particulièrement pluvieux,
- Prévoir une zone de stockage des outils secs et prêts, différente de celle des outils à poteyer : le séchage des outils peut être effectué au bord du creuset,
- Insister sur les bonnes pratiques auprès du personnel de fours,
- Eloigner le personnel lors des chargements incertains ou interdire les chargements incertains,
- Limiter autant que possible les charges très rouillées comportant des hydroxydes poreux et aptes à relâcher des gaz.

H - Exposition des personnes : les conseils importants

Le risque est évalué par l'association d'un danger potentiel et de l'exposition de la personne. De fait, on comprend évidemment tout l'intérêt à éloigner la personne de la zone de danger potentiel, afin de limiter les accidents corporels. On sait de ce point de vue que les personnels qui exploitent les fours à induction sont habilités aux interventions sur la plateforme fusion ; ils possèdent une connaissance des dangers du métal liquide et des moments critiques de la fusion (formation du pied de bain, surchauffe, décrassage, etc.).

Actions de prévention

- L'intérêt est de favoriser les contrôles croisés : c'est-à-dire que deux personnes sont situées à leur poste de travail de manière à toujours permettre un échange visuel entre eux. Dans le cas (à limiter autant que faire se peut) d'une personne qui doit se trouver isolée dans l'usine, elle porte obligatoirement un dispositif PTI (Protection Travailleur Isolé). Néanmoins, l'encadrement vérifie que la durée d'intervention éventuelle auprès de la personne demeure courte,
- L'encadrement est impliqué, ce qui motive des visites aux postes de travail pour bien identifier les différentes zones plus ou moins cachées ou leurs éloignements ainsi que les durées relatives du travail sur la plateforme de fusion ou le parc matière ou au niveau des chargeuses et autres dispositifs annexes,
- Une PTI ou un DATI est utilisé par un travailleur « hors de vue et hors d'ouïe » d'autres travailleurs. Il s'agit d'un appareil permettant d'alerter les secours en cas de problème : la posture de verticalité et les mouvements sont en permanence mesurés, et en cas de problème l'appareil envoie des messages d'alerte sur les portables des personnes à proximité. La durée d'intervention vers la personne à secourir doit être minimale.

Actions en cas d'anomalies ou d'événements singuliers dans le déroulement de la fusion comme par exemple formation de flammes importantes, de projections d'étincelles ou de gouttelettes, formation de vapeurs intenses ou de souffles bruyants (gazéification) :

- La conduite à tenir est de s'éloigner de la source de danger, c'est-à-dire le creuset. La distance d'éloignement est le critère de sécurité dans ces cas rares mais potentiellement dangereux. Il ne faut pas réagir de suite pour voir de près le creuset et la charge enfournée. Après un temps d'observation (de 2 à 4 min) soit le phénomène a disparu soit il perdure. En ce cas, la puissance est coupée, le responsable est alerté, une procédure de mise en protection est respectée,
- En règle générale, le personnel doit à chaque fois que cela est possible, s'éloigner du creuset où séjourne le métal liquide surchauffé. Les cabines de pilotage des fours jouent un rôle de protection des personnes; malheureusement elles n'existent pas pour les petits fours. Il reste que l'enfournement du four nécessite obligatoirement la présence d'une personne qui surveille le bon déroulement de l'opération, c'est-à-dire la descente effective des scraps de ferraille, des jets et coulée. Normalement cette phase est moins critique car le métal n'est pas totalement fondu et très chaud.

Par contre, seules les équipes habilitées peuvent intervenir à l'intérieur des armoires électriques et sur les branchements électriques placés sous les fours.

I - Le démarrage des fours à induction : un risque de travailleur isolé.

Les industriels organisent souvent des démarrages anticipés pouvant conduire à des situations critiques de travailleurs isolés. D'autant que les fours sont placés le plus souvent sur des dalles surélevées d'une part, et que, d'autre part le bruit des ateliers pourrait couvrir un appel de détresse.

J - Contribution annexe à la sécurité : ergonomie, rangement, propreté, éclairage

La sécurité au poste de fusion profite également des améliorations annexes telles que l'ergonomie, la propreté, l'éclairage, l'emploi de caméras, ou d'alarmes et de flashes lumineux.

Par exemple l'ergonomie de l'opération de décrassage, comportant un écran thermique avec une potence et un palan qui reprend les efforts de soulèvement, rend plus efficace cette opération, allège la pénibilité et permet d'améliorer la propreté du métal liquide.

L'éclairage a un fort impact sur l'habileté et le déplacement du personnel près des fours. Or on note régulièrement un éclairage défaillant ou peu puissant qui ne facilite pas le travail. De ce point de vue, le nettoyage des éclairages est également très efficace dans l'amélioration des conditions de travail.

K - Prévention et formation du personnel : un élément clé de la sécurité

De nombreux industriels organisent des réunions « sécurité » hebdomadaires ou mensuelles (parfois courtes : 30 min) pour les équipes de fusion et leur encadrement. La sécurité est ainsi partagée collectivement ce qui contribue à élever le niveau de chaque intervenant. C'est aussi l'occasion de consolider les retours d'expérience très spécifiques des fusions et des fours. La sécurité collective s'en trouve renforcée.

La formation est un pilier incontournable du renforcement de la sécurité. En particulier il faut insister sur l'emploi correct des dispositifs de mesure ou de supervision et de leurs paramétrages. Sur le four à induction il y a une obligation à comprendre les conséquences physico-chimiques que cela induit : par exemple la vitesse de surchauffe de telle nuance, l'incidence d'un retour poche, la puissance de maintien en cas de vidange partielle du creuset, la fissuration d'un creuset, etc..

Conseils des organismes d'information à la sécurité

Les données Aria du site Barpi sont toujours riches d'information sur les accidents enregistrés ; ainsi que sur leur prévention. Ainsi il est montré que la majorité des accidents résultent d'une situation qui est aurait pu être anticipée :

- 66% de l'ensemble des enquêtes Aria montre que l'usure prématurée du réfractaire est la cause principale, parmi d'autres facteurs,
- 35 % des sites industriels avaient déjà rencontré un tel événement,
- En particulier il est répertorié que le déversement de métal en fusion représente 4 accidents en 2017,

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/>

Le site de l'INRS (<http://www.inrs.fr/>) constitue également une aide au déploiement d'une méthode de classement d'accidentologie, d'analyse préliminaire des risques (APR), tenant compte de probabilité et gravité.

Conclusion

L'étude de la sécurité des personnes sur leurs lieux de travail est obligatoire. Dans bien des cas, elle est aussi une source de progrès.

Conjuguée à la prévention et à la formation, elle donne de bons résultats. La prise en compte des observations et opinions du personnel des postes de travail constitue un formidable levier pour déterminer les voies de progrès en ce domaine.

Un article complémentaire, qui abordera d'autres thèmes de la sécurité au four à induction, sera rédigé au cours de l'année 2020.

Pour plus d'informations : mouquet@ctif.com



Figure 6 : Réunion de sécurité

Améliorez
significativement le
coût outillage par
pièce

Economisez l'acier
d'outillage

Augmentez
la durée de vie
de vos outils

RECHARGEMENT ROBOTISÉ

Depuis 17 ans à votre service pour optimiser vos coûts d'outillage et ce sur tout type de travail à chaud: matricage, estampage, laminage et forge libre pour la mise en forme des aciers, inox, aluminiums, titanes et superalliages; que ce soit sur pilon, presse mécanique, presse à vis, presse hydraulique ou laminoir.

DG Weld Advanced Welding Technology. www.dgweld.it

Contact:
Michaël Dugne
06 60 98 76 99
dgwfrance@dgweld.it

Martha Barbone adv



DIFFRACTION & SPECTROMÉTRIE

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 / Tél : +33 (0)381 590 909 / Mail : doc@gnrfrance.com



Clotilde MACKE-BART,
Direction Conseil &
Innovation
CTIF

GIFA 2019 – Une édition à nouveau réussie !

« The Bright World of Metals » s'est tenu avec succès fin Juin 2019 à Düsseldorf. CTIF y était et confirme que l'évènement international reste un rendez-vous majeur à ne pas manquer dans le domaine de la fonderie et de la métallurgie.

Les organisateurs retiennent que :

- GIFA, METEC, THERMPROCESS & NEWCAST ont permis de nombreux échanges et la conclusion de nouveaux investissements,
- Une majorité de visiteurs professionnels est venue des autres continents,
- Un nouveau pas a été franchi et clairement affiché dans l'Industry 4.0,
- De nouveaux enjeux et perspectives apparaissent notamment avec la Fabrication Additive.

Après 5 jours de Salon, l'évènement a été clôturé avec succès le 29 Juin 2019, et confirme sa position de principal évènement mondial dédié à la métallurgie et à la fonderie. L'atmosphère dynamique dans les 12 halles du Congrès de Düsseldorf a donné le jour à de nombreux nouveaux contrats et investissements avec une véritable dimension internationale : 70% des exposants (65% en 2015) et 66% des visiteurs (62% en 2015) venaient cette année de pays étrangers.

Pour cette édition 2019, 2 360 exposants venus de tous les continents étaient présents, des acteurs globaux aux PME, des nouveaux joueurs aux technologies de niche, tous les métiers étaient efficacement représentés et valorisés, faisant honneur aux 72 500 visiteurs venus de 118 pays, avec une forte demande vis-à-vis de la métallurgie et des solutions de fonderie européennes, en particulier des visiteurs en provenance de l'Asie. Une tendance confirmée par les niveaux de participation, Chine et Inde en tête, suivies par l'Italie, la Turquie, le Japon, la France et la Russie.

Au-delà de la dimension internationale, c'est aussi la qualité des participants qui fait le succès du Salon : cette année, plus des deux tiers des participants étaient des représentants du management intermédiaire et de la direction de leurs entreprises, influençant donc sur les choix d'investissements à venir, avec un vrai dynamisme ressenti et confirmé dans les échanges.

En priorité, les mots clés au cœur des échanges pour cette nouvelle édition du Salon étaient :

- la digitalisation,
- l'automatisation,
- les solutions de fabrication additive,
- l'éco-efficience,

avec la notion d'efficacité totale, l' "Overall Equipment Effectiveness (OEE)", reprise par de nombreux exposants, qui vise grâce à une exploitation optimale des données (IoT, Big Data, données temps réel, machines connectées, Cloud, numerical twin...), une production optimisée pour les clients et pour les équipes de production.

Une édition dense et réussie ... et des développements qui seront à suivre en attendant le prochain rendez-vous en Juin 2023 !



I. APPROCHE DIGITALE, SUR LES PRODUITS ET LA PRODUCTION

- **L'intégration de capteurs sur pièces** est présentée par **IFAM** sous le Topic « CASTTRONICS® - Digitalisation of castings », et « e-mobility », avec 3 développements dédiés : des **puces RFID** introduites en fonderie sous pression (fig.1) chez Audi, des **marqueurs issus de Fabrication Additive** métal, lisibles uniquement par RX (traçabilité en cas de litige ou contrefaçon), et des capteurs permettant la **détection et mesure de contraintes mécaniques dans la pièce**. Les solutions ont aujourd'hui été éprouvées en sous pression et en basse pression.



Fig.1 – Intégration de capteurs sur produits (IFAM)

- **Au niveau de la collecte et exploitation intelligente des données**, de nombreux développements sont présentés dans l'Industrie 4.0 :

ProserviceTech, avec la baseline « **Innovation in Foundry Process** », propose des services et produits dans le domaine de la métallurgie des ferreux dont le **système d'analyse thermique ITACA**. Avec des algorithmes et travaux développés sur les alliages haut-carbone et Ni-hard dès 2016, puis sur la **traçabilité des données** et leur analyse (modules Data Viewer, Data Trend & Comparaison de courbes), des algorithmes sont aujourd'hui en développement pour la production de fontes vermiculaires. L'analyse thermique est associée à l'analyse spectro pour le contrôle de la charge, jusqu'à l'inoculation, avec un gros travail mené sur la **consolidation des bases de données**, les **alarmes et corrections**, l'**ergonomie des affichages**, l'**enregistrement en temps réel** des données et la possibilité d'exploitation et d'analyse de l'**historique de production**.

Novacast de son côté présentait aussi ses outils de maîtrise de la métallurgie en production : METAMASTER pour le **calcul de charge**, associé à l'ATAS METSTAR, (Adaptive Thermal Analysis System), outil adaptatif de **contrôle de la métallurgie** permettant l'extraction de données et l'optimisation des paramètres métallurgiques pour une qualité visée, et enfin l'ATAS MetPro, pour la **collecte et le management des données de production**, du calcul de charge au contrôle de la fusion. Le système utilise et enrichit la base de données de production, et donne des **recommandations en temps réel** aux techniciens à la fusion (calcul dynamique de l'inoculation en fonte GS), assurant qualité et traçabilité.

Foseco de son côté, mettait en avant l'**Intelligent Coating Unit (ICU)** pour le contrôle automatique de la dilution des enduits (mesure en temps réel de la densité) et le système d'**analyse thermique FERROLAB V** (mesure en temps réel du %Ceq, %C, %Si et du taux de germination de la fonte).

Et d'autres encore, non cités ici ...

- **En fonderie sous pression**, l'approche industrie 4.0 est également prédominante :

Bühler sous la baseLine « **Die Casting that Conserves Energy and Resources** » présentait, sur le service aux fondeurs, des concepts propres (**5G, smart CMS, creating tomorrow together, digital cells**) revendiquant l'accompagnement à l'atteinte de zéro rebuts, de 40% de réduction de temps de cycle et d'une production 24h/24, 7j/7.

L'ambition de la « Digital Cell » opérationnelle 24h/24, 7j/7 passe par le Machine Learning (ML), les algorithmes d'intelligence artificielle (AI) et d'autres outils au service de « décisions intelligentes » par l'opérateur sans intervention extérieure.

La **Digital Cell**, produit phare de Bühler pour cette GIFA, s'appuie sur 3 axes d'innovation (fig.2) :

1. Le **SmartCMS**, cerveau de la cellule qui collecte les informations et coordonne les activités,
2. De nouveaux algorithmes développés sur Microsoft Cloud, avec le **Die Casting Dashboard** (plateforme visuelle pour le pilotage machine disponible 24/7), le **Predictive Analytics** utilisant le Machine Learning, et le **Downtime Analysis**, qui analyse les causes d'arrêt et pourra bientôt être étendu à presque tous les composants de la cellule,
3. La prise en compte du **pilotage de la thermique**, avec l'introduction -nouvelle- des données issues de la thermique outillage en boucle contrôlée

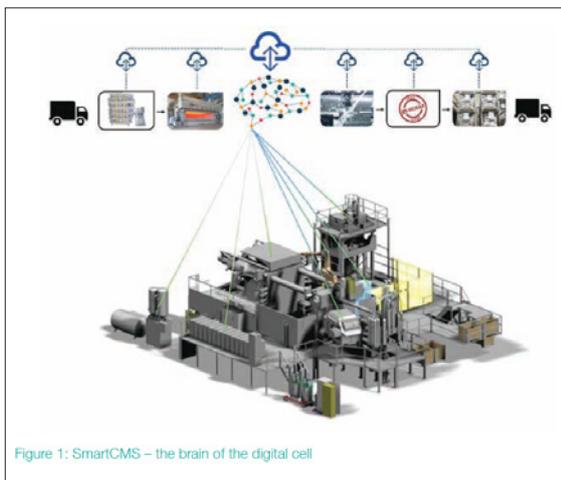


Fig.2 – SmartCMS (BÜHLER)

Sans oublier le **système de contrôle Dat@net** adaptable sur machines chambre froide de 260 à 900 tonnes de force de fermeture.

Italpresse Gauss de son côté présentait en particulier l'application **AME** pour les **opérations d'inspection (simulées)** des pièces de machines, avec des conseils pas-à-pas exploitant la **réalité augmentée** et des **données de visualisation 3D** maintenance, et le système **HMe** qui permet, lui, en surveillant les données des machines, de proposer une **vision holistique et en temps réel** ainsi que des actions correctives.

Frech pour sa part, célébrait cette année ses 70 ans, avec, outre ses services sur machines et outillages sous pression (voir chapitres outillages et fonderie sous pression):

- L'approche **Digital Twin** développée avec corrélation à la simulation,
- L'approche **Cloud et big data** en connection pour et avec ses clients, avec un focus sur 3 axes : l'optimisation des temps de cycle et disponibilités machines, la productivité et la performance qualité.

Idra, qui propose les plus grosses machines existant sur le marché, comme les autres constructeurs, présente aussi une forte approche Industry 4.0 avec plusieurs axes clés dont :

- **OEE (Overall Equipment Effectivness)**, sur le contrôle de la production et les KPI's associés,
- **Artificial Intelligence & Big Data**, et anticipation des arrêts avant qu'ils n'arrivent,
- **Artificial vision**, avec le pilotage process via la vision artificielle.

L'approche Industrie 4.0 est donc chez tous les constructeurs.

- **L'approche digitale, transversale à tous les métiers, au sein d'un même groupe**

Enorme stand (près de 800 m²) de **Norican Group** qui présentait sa « **fonderie connectée complète** », avec les 4 marques du groupe (Disa, Italpresse Gauss, StrikoWestofen et Wheelabrator) et sa nouvelle entité Norican Digital. L'accent était mis cette année sur la possibilité de **connecter les machines, les services et les processus**, à l'aide de matériel de collecte de données dédié et de solutions logicielles IoT sophistiquées, optimisées par Norican Digital.

Disa en particulier (lignes de moulage), revendique outre son nouveau pack **Equipment Modernisation Packages (EMPs)** proposé pour améliorer la performance des lignes de moulage existantes et leur durée de vie sans nécessiter l'investissement dans une nouvelle ligne, l'utilisation nouvelle du **DI-SAMATIC Digital Twin** (simulation de la ligne de moulage).

Le pack EMPs met lui en œuvre le **Mould Accuracy Controller (MAC)** visant le **Zero Defect Manufacturing (ZDM)** en prévenant l'opérateur des éventuels écarts avant remplissage du moule, associé à l'**Automatic Mould Conveyors (AMCs)**.

Le nouveau système de traçabilité proposé par Disa, **Trace and Guidance (TAG)**, en instance de brevet, propose lui une traçabilité à 100% avec un identifiant unique pour chaque pièce permettant de faire le lien avec les paramètres process (compression du sable, pression de tir, température de coulée ...).

Enfin Disa présente le concept **Monitizer | CIM nouvelle génération**. Le réseau numérique affichant de façon exhaustive et en temps réel l'historique des données de fonderie, couplé à l'industrie 4.0 et à Monitizer | CLOUD basé sur l'IoT, permet aux fonderies de collecter, surveiller et analyser les données de fonderie d'un ou de plusieurs sites internationaux pour améliorer leur productivité.

StrikoWestofen, (de la fusion au transport et dosage du métal), présente de son côté l'approche « **Connected Foundry** », au travers de ses capteurs temps réel et son kit «Monitizer Starter» qui permet de **rétrofiter les fours existants en termes de connectivité**, avec le leitmotiv « It's time to connect », et un aperçu du nouveau logiciel de contrôle **ProDos3** qui simplifie l'expérience utilisateur.

- L'approche digitale, génératrice de partenariats nouveaux ou dans la durée

Plusieurs partenariats sont revendiqués et affichés sur l'approche digitale lors de cette GIFA, que ce soit en simulation, en collecte de données, en IoT ou autres exploitations intelligentes de l'approche numérique.

Hüttenes albertus pour sa part, met en avant sur son stand la vision partagée de la fonderie 4.0 en partenariat avec Magma GmbH, & Laempe Mössner Sinto GmbH et leur présentation d'un concept inédit de « **Virtual Core Shooting Process** ».

Magma, présent comme partenaire sur de nombreux stands (Foseco, Hüttenes, RWTH Aachen ...) affichait ce même partenariat, ainsi que les collaborations sur la prédiction en conception d'outillage (fonderie sous pression), la simulation du noyautage, et autres simulations prédictives. Pour faciliter la communication interne et avec les clients, Magma propose également aux fondeurs la solution **MAGMAinteract**, nouveau programme de visualisation des résultats de simulation sous MAGMA-SOFT®.

ESI affiche également des succès et partenariats forts avec les fondeurs et clients en fonderie (Nissin, Renault, Far, ...) (fig. 3), en fabrication additive (Replic Air ...), sur le prototypage virtuel, la réalité augmentée ou encore sur son concept d'Hybrid Twin™.

Côté simulation, des approches « en ligne » sont aussi présentées telles que celle proposée par **Flow 3D** avec le FLOW-3D CLOUD installé sur Penguin Computing on Demand (POD) viable y compris sur des calculs lourds, et permettant un coût « au calcul » sans investir dans les outils.

On notera aussi des affichages complémentaires, tels que ceux de **Weldstone & RWP Alliance** avec le logiciel WinCast, qui annoncent (et affichent) sur un stand commun (fig.4), un projet de recherche en cours avec l'Université de Munich, sur le **Jumeau Numérique**, dédié au développement d'un système de prédiction des défauts et corrections induites sur Disamatic en moulage vertical, avec prise en compte des paramètres sable (température, compression, humidité). Les essais seront réalisés dans leur propre fonderie prototype.



Fig.4 – Stand partagé industrie 4.0 (WELDSTONE & RWP)

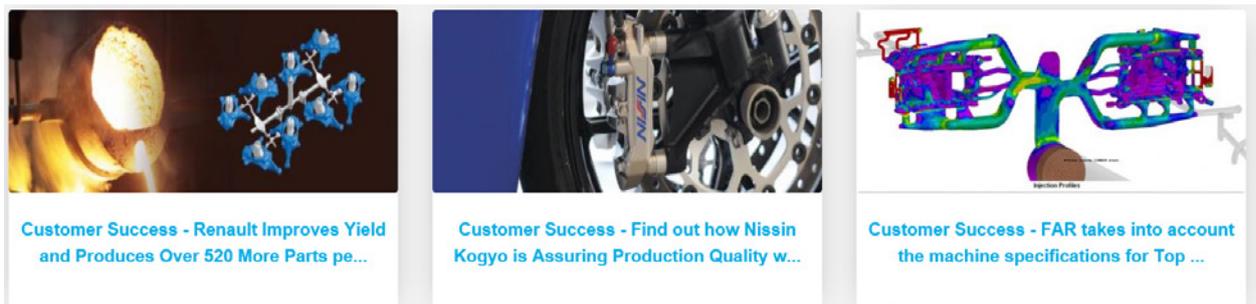


Fig.3 – Success stories et partenariats (ESI)

De son côté, **ExOne** (Fabrication Additive Sable et Métal) annonce un **nouveau partenariat avec Siemens** (fig.5) avec pour cible le développement d'usines d'impression 3D connectées, sous l'initiative "Collaborate. Innovate. Accelerate."



Fig.5 – Accord de partenariat (EXONE & SIEMENS)

Des partenariats générateurs d'innovation ...

2. APPORTS DE LA FABRICATION ADDITIVE (FA)

Difficile d'être exhaustif tant les apports de la fabrication dans nos métiers sont nombreux. Nous ne citerons donc ici que **quelques exemples** identifiés en cours de visite et faisant l'illustration des apports de la FA.

Parmi d'autres, l'outilier & mécanicien allemand **Rolf Lenk Werkzeug-u Maschinenbau** GmbH présentait ses solutions associant les opérations usuelles d'usinage (tournage, fraisage, électroérosion...) et des **moyens intégrés en fabrication additive métal** (fig.6) : **2 machines SLM280, 2 machines SLM500, 1 machine 3DMP®** capable sur aciers inoxydables, aciers d'outillage, alliages de titane, alliages d'aluminium, Hastalloys et Inconel 718, exploitable sur outillages et sur prototypes. Un exemple de rétro-engineering est aussi présenté dans le cadre d'un partenariat avec GOM avec l'utilisation des solutions de métrologie 3D, ATOS Core de GOM, pour reconstruire des géométries unitaires et les reproduire en 3D métal.



Fig.6 – Machines 3DMP®
(Rolf LenkWerkzeug-u Maschinenbau)

Bosch Rexroth présentait en tant qu'utilisateur les avantages de la Fabrication Additive 3D Sable, mise en œuvre avec le **procédé Exone**, avec 2 machines intégrées : une machine S-Print et une machine S-Max permettant des dimensions jusqu'à 1m80 par 1m par 700mm. Démonstration avec l'un de leurs plus **grands noyaux**, réalisé en 18 heures (21 heures pour la boîte complète). Le procédé vient en complément des procédés usuels (Croning, Coldbox) et permet la production de géométries complexes, sur développements, prototypes, ou petites séries (fig.7).



Fig.7 – Noyaux complexes & noyaux de grande taille en FA (BOSCH REXROTH)

Fort de 30 ans d'expérience, avec les baselines « **Taking you from Prototypes to Production Parts** », « **Rethink Manufacturing** » ou encore « **Manufacturing Products at Digital Speeds** », **3D Systems** via l'offre d'une gamme élargie de solutions, de la machine au logiciel de conception (jusqu'au scanner pour du rétro-engineering), du service au produit, montre tout le potentiel de marché (et l'offre) en fabrication additive.

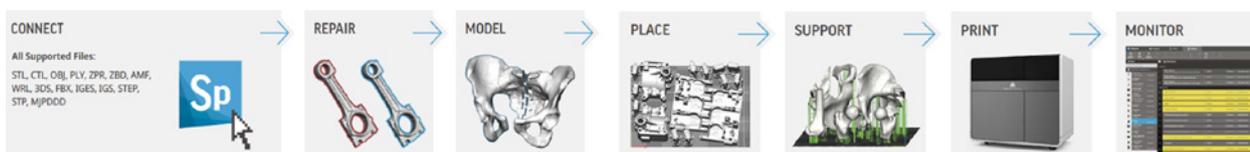


Fig.8 – 3D Sprint (3D SYSTEMS)

Avec 12 sites dans le monde, 14 procédés mis en oeuvre, plus de 2 millions de pièces produites par an, 3D Systems offre une sélection élargie de matériaux (plastiques, métaux, cires pour la fonderie), associée à une gamme élargie de machines et de services.

En logiciel, les solutions sont notamment :

- **3DXpert**, logiciel « tout-en-un » pour la Fabrication Additive,
- **3D Sprint**, logiciel dédié à l'impression 3D des plastiques (fig.8),

La 3D s'invite sur tous les matériaux, et toutes les applications, et c'est ainsi qu'on trouve aussi des applications dans les halles de THERMPROCESS :

- Chez **Saint Gobain AM**, Céramiques industrielles, avec la conception et production en fabrication additive 3D de brûleurs céramiques, **Amasic 3D™** (fig.9), à partir de carbures de silicium, utilisés pour un **gain de 80% sur l'efficacité du brûleur**, par sa seule conception 3D,



Fig.9 – brûleur céramique Amasic-3DTM (Saint Gobain AM)

Chez **GH Inducteurs**, la 3D s'invite aussi dans les conceptions des inducteurs (fig.10), avec des inducteurs 3D issus de fabrication additive, poussant à l'extrême les possibilités et le potentiel de la 3D, sur des applications de chauffe industrielle ... « Join the Revolution ! ».



Fig.10 – plateau d'inducteurs issus de FA 3D (GH Inducteurs)

Métallique ou non métallique, la Fabrication Additive trouve donc sa place dans le procédé autant que sur le produit.

3. INNOVATIONS ET EVOLUTIONS EN MOULAGE ET NOYAUTAGE SABLE

Voxeljet, après les résines furaniques (ODB, Organic Direct Binding) et phénoliques (PDB, Phenol Direct Binding), propose sa solution IOB en **inorganique** (IOB, InOrganic direct Binding) avec la mise en avant de la **machine VJET X**, qui sur la base de la VX1000 (1,000 x 600 x 500 mm), propose un passage de couche inférieur à 5 secondes, soit une **cadence de production multipliée par 10** par rapport à la génération précédente (capacité à imprimer 180cm³ toutes les 5 secondes). Mais le scoop pour cette GIFA (fig.11) est la présentation de **l'ICP (Industrialization of Core Printing)**, fruit de la collaboration **VoxelJet, Loramendi et AskChemicals**. Les 3 partenaires ont présenté ici en avant-première (sur le stand de Loramendi), la démonstration d'une **production totalement automatisée d'impression 3D de noyaux complexes en inorganique, sur ligne de moulage**, qui va, qui plus est, démarrer cette année en série sur application automobile en Allemagne (100 000 p/an) chez BMW.



Fig.11 – Annonce de l'ICP (VoxelJet, Loramendi, AskChemicals)

Du côté de **ASK Chemicals**, les innovations mises en avant sont le liant NOVASET 3D proposé aujourd'hui en inorganique (qui va donc être lancé en production grande série), et le liant ECOCURE BLUE, visant la réduction des émissions de BTX et des taux de phénol dans les sables recyclés.

Les **liants NOVASED 3D** visent la **fabrication 3D** des moules et noyaux sables, et sont compatibles avec les différentes têtes d'impression du marché. Développé également **en inorganique**, le système INOTEC 3D revendique du « Zero-Emission » de la production au stockage et à la coulée des noyaux. Présentée en avant-première avec la première production série sur VX1000-S de VoxelJet en collaboration avec Loramendi, la solution est désormais industrielle sur grande série en avant première chez BMW.

Enfin, le **liant ECOCURE BLUE** (fig.13) succède au liant ECOCURE HE pour boîte froide, avec une réduction améliorée des émissions de BTX et des taux de phénol dans les sables recyclés.



Systems	Pictograms	Hazardous substance as per chapter 3 of the safety data sheet
Aromatics		Phenol, aromatics, (formaldehyde), additives
Biodiesel		Phenol (formaldehyde), additives
TEOS		Phenol, TEOS, (formaldehyde), additives
High-efficiency		Phenol, additives
ECOCURE BLUE	NO pictograms	NO hazard class

Fig.13 –Liant ECOCURE BLUE (AskChemicals)

Clariant pour sa part présentait pour cette GIFA ses produits GekOTM LE+ et EcosilTM LE+, revendiquant une **réduction à 90% des émissions de BTEX** à partir d'une solution Bentonite + additif carboné. Dans les exemples industriels présentés, des réductions de 25% des taux d'additifs et de 35% des produits générateurs de carbone brillant sont affichés.

Spécialisé dans les réfractaires, bentonites, sables à vert, et sables spéciaux (hors chromite et zircon), **Imerys** propose ses produits propres, Kersand (AFS60) et Durandal 60 (AFS50), compatibles avec tous les types de liants (organique et inorganique), et 40% plus légers que la chromite (haute réfractarité et faible expansion thermique).

Hüttenes Albertus (HA) pour sa part, mettait en avant :

- Ses développements sur les **liants boîte froide** dont les solvants aromatiques ont été substitués (réduction des émissions de BTEX), avec des solutions organiques et inorganiques,
- La montée en production des **liants inorganiques (IOB)**, avec une démonstration chez le fondeur chinois KPSNC, sur culasse aluminium **en grande série** (3,5 millions de pièces par an) après 1,5 ans de co-développement,
- La coopération avec Brembo sur le développement de **liants inorganiques (solution Cordis) en fonderie ferreux** appliqués sur disques de frein, et sur le point de passer en série (haut de gamme).

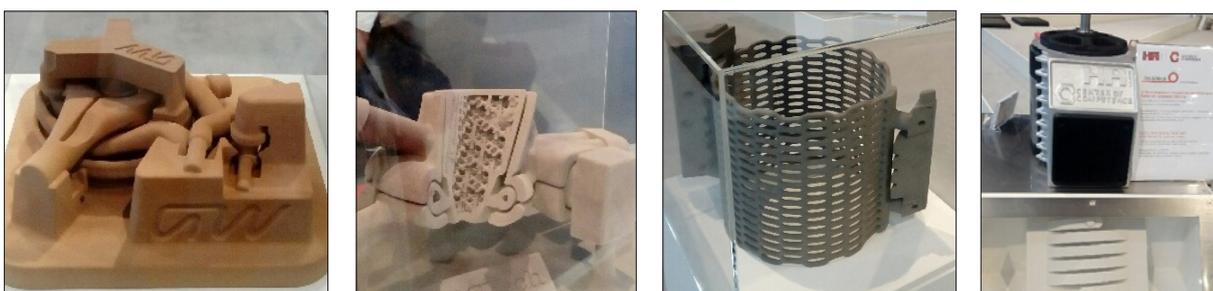


Fig.14 – FA Sable et maîtrise produit-process (Hüttenes Albertus)

De son côté, **ExOne** présentait plusieurs nouveaux produits dont sa machine S-Max Pro (10^e machine de la marque en Fabrication Additive sable, pour un volume de 1260 litres, avec une vitesse d'impression revendiquée de 135 l/h (18 s/couche))

Les machines **3D sable** de Exone travaillent en résines furaniques (furan binders), phénoliques (CHP & HHP) binders) et inorganiques (water based, alkali-silicate binder) avec 3 séries de machines mises en avant : la série **S-MAX Pro™**, **S-PRINT** et **S-MAX**.

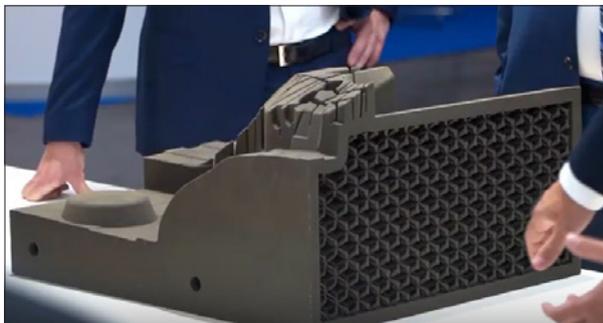
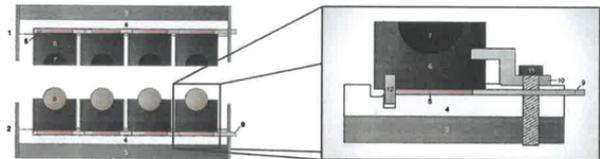


Fig.15 –FA Sable et maîtrise produit-process (Exone)

Dans les innovations, on notera un concept breveté inédit de boîte à noyaux (fig.16) présenté par **Advanced Core Solutions** (ACS), permettant de réduire **d'un tiers**, les temps de cycles (injection et prise des noyaux), **sans changer de liant**. Le gain est rendu possible via un choix de matériau conducteur pour la boîte à noyaux, et l'utilisation de la conductivité électrique propre aux liants inorganiques. Le procédé est plus productif, permet une prise plus homogène dans toute l'épaisseur du noyau, tout en conservant tous les autres avantages des liants inorganiques.

Le procédé est nouveau, et de premières démonstrations ont été faites sur ligne de production.



- | | | |
|--|--|----------------------|
| 1 Upper mould box half | 5 Electrodes (arranged parallel) | 9 Control of voltage |
| 2 Lower mould box half | 6 Mould material (electrically conductive) | 10 Square |
| 3 Moulding plate (electrically isolated) | 7 Mould cavity | 11 Isolation screw |
| 4 Isolation plate | 8 Sand-binder mixture / Core | 12 Alignment bolt |

Fig.16 –Nouveau concept de boîtes à noyaux (brevet Advanced Core Solutions)

L'environnement, la productivité et la performance (produit/process) sont donc au cœur des innovations en moulage et noyautage sable.

4. FA METAL ET METALLURGIE DES POUDRES

Avec la baselines « Manufacturing Products at Digital Speeds », **3D Systems** propose en métal, des solutions sur aluminium, maraging, aciers, et différentes bases titane (fig.17), nickel et cobalt chrome en Direct Metal Printing (DMP) associé aux logiciels 3DXpert™ et LaserForm®.

3D Systems dispose désormais de machines dotées de **3 lasers** (plus productives) pour des géométries de **500x500x500 mm** (plus grandes), et propose outre les machines et les logiciels, des services ou produits à la demande, allant du rétro-engineering à l'optimisation topologique et à la fabrication.



Fig.17 –Optimisation topologique sur produits issus de FA métal (3D Systems)

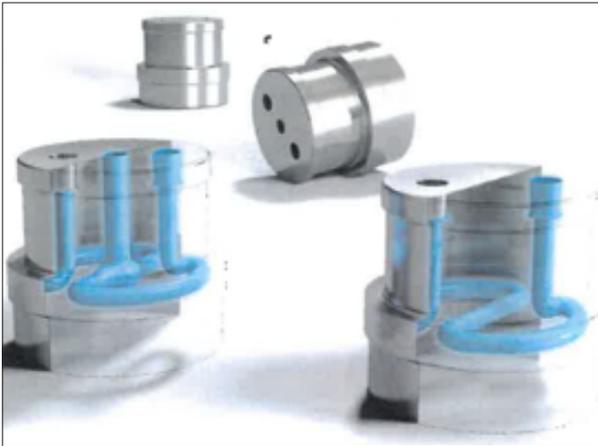


Fig.18 –AlliageAnviloy® pour Conformal Cooling (Weldstone)

Weldstone présentait pour sa part l'alliage à base de tungstène **Anviloy®**, qui vient concurrencer les aciers pour outillage H13 (en plus lourd). Initialement développé pour les moules métalliques (sous pression, coquille) et l'extrusion, l'alliage est désormais proposé en fabrication additive 3D (fig.18) pour des conceptions de conformal cooling, en revêtement (dureté x6) et en fil pour réparation par soudure ou par rechargement.

De son côté, **ExOne** présentait plusieurs machines disponibles en impression 3D métal : Innovent+™ la première machine de la gamme, X1 25PRO™ dernière innovation en binder jet printing utilisable avec différentes gammes de poudres MIM, la M-Flex® pour les prototypes et petites séries, et enfin la M-Print® plus grande machine de la gamme.

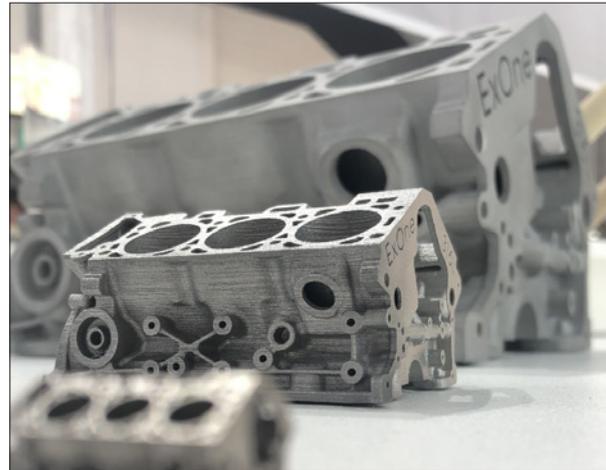


Fig.19 –Fabrication Additive métale (Exone)

Et d'autres encore non cités ici ... Les développements en fabrication additive métal touchent donc le produit autant que l'outillage.

Le MIM (Metal Injection Molding) n'est pas en reste, avec un regroupement de différents acteurs du domaine (www.mim-experten.de) intervenant en production ou simulation. A la question « quelle concurrence avec le développement de la Fabrication Additive », la réponse est directe : les marchés adressés ne sont pas les mêmes. Le MIM reste le plus compétitif sur de la petite pièce (jusque 250g) en grande série (20 000 pièces et plus) requérant de la précision dimensionnelle ($Ra < 3 \mu m$ sans post traitement) et des géométries complexes (inatteignables en usinage notamment).

EXACAST®
PRECISION CASTING

- Casting Weight: 2 - 400 kg
- Part diameter up to 1'000 mm
- Investment Casting Precision: Exceptional position / form tolerance & surface quality
- Broad range of material groups
- Economical even with small batch sizes

The graph plots 'Dimensional accuracy' (left y-axis, 0.01 to 0.15) and 'Surface roughness' (right y-axis, 0.1 to 100) against 'Part size' (x-axis, 10 to 1000 mm). Sand casting shows higher accuracy and roughness for larger parts, while investment casting shows higher accuracy and lower roughness for smaller parts.



Fig.20 –Procédé Exacast® (Wolfenberger)

5. INNOVATIONS PROCESS PRESENTÉES PAR DES PME

Dans les PME innovantes, on peut citer **Wolfenberger**, fonderie acier qui a développé son propre procédé de fonderie de précision, le **procédé Exacast®** (fig.20) sur le principe de modèles réutilisables en plastique, métal, bois ou silicone recouverts d'une céramique à durcissement rapide permettant la réalisation de géométries complexes à parois minces.

METROM pour sa part, propose des systèmes d'usinage mobiles et à options multiples basés sur une cinématique parallèle à 5 axes. Ces machines multifonction allient fraisage, tournage, mais aussi soudage au laser, soudage par friction-malaxage et impression 3D.

Les systèmes conçus par Metrom sont multifonctionnels grâce à la grande rigidité de leurs **structures en icosaèdres**. Ainsi, la société **Knowhow Wilheims GmbH** présentait une cellule capable de combiner les différentes opérations, avec comme domaines de service revendiqués (auprès des constructeurs allemands) :

- L'utilisation de l'impression 3D métal sur outillage,
- Des services en reverse-engineering et réparations sur pièces en soudure laser,
- Du prototypage rapide,
- Des machines de finition et d'usinage des pièces de fonderie.



Fig.21 –Cellules multifonctionnelles (Metrom)

Fournisseur de résines et modèles plastiques implanté aux Pays-Bas, **ColorFab** propose une gamme élargie de modèles plastiques (en remplacement des cires) et travaille actuellement à un **nouveau développement de structures pour la fonderie en Lost Foam**. Développement propre initié avec le support de l'American Foundry Society (USA), le projet mené en collaboration avec le Fraunhofer et les essais en cours, donnent des résultats prometteurs (avec des matériaux dont l'expansion pourrait permettre une **réduction de 50% des masses consommées** par rapport au procédé usuel).

Pour de l'insertion, **Combicore** propose des solutions de tubes cintrés (fig.22), destinés à du surmoulage, en fonderie gravité ou en sous pression aluminium (diamètres de 5 à 22 mm, épaisseurs de 0,5 à 2 mm). Les tubes sont produits dans des matériaux (AlMn1, AlMgSi0.5, E235, Cu, Zn) présentant suffisamment d'allongement (jusque 30%) pour être cintrés à volonté et **tenir à des pressions jusque 1000 bar**. Combicore peut ainsi mettre en forme à la demande, pour tous types d'applications, des tubes jusque 4m50 de long (tubes cintrés qui se tiennent, y compris sur des géométries étendues, limitant les assemblages), échangeurs thermiques notamment.



Fig.22 –Tubes de forme, à surmouler (Combicore)

On rappellera également ici le concept breveté présenté par **Advanced Core Solutions (ACS)**, concept inédit de boîte à noyaux, permettant de réduire d'un tiers, les temps de cycles (injection et prise des noyaux), sans changer de liant. (voir au chapitre moulage et noyautage sable, fig.16).

Et d'autres encore non cités ici ...

6. CONTROLE ET MESURE DES PRODUITS ET MATERIAUX

Du contrôle de la métallurgie au contrôle produit et à la rétroconception, le marché propose aujourd'hui une large gamme de matériels d'atelier, de laboratoire, portatifs ou fixes, avec différents niveaux de précision et de performance. Difficile ici encore d'être exhaustif.

On peut citer les solutions de **GOM** construites autour de la **mesure optique**, avec des développements plus récents revendiqués sur la technologie **ATOS 5 qui chasse le micron** (plus précis et plus rapide), et de nouvelles générations de « **Batch Process Scanning Boxes** » (BPS) visant clairement de passer au **contrôle en ligne automatisé sur des lots de pièces**. Le **contrôle tomographique en production** est également mis en avant avec le GOM CT, en revendiquant ici le contrôle en ligne automatisé sur pièces de grande taille. Un exemple de rétro-engineering est présenté en partenariat avec l'entreprise Rolf Lenk Werkzeug

& Maschinenbau (outillage et mécanique), qui a intégré la fabrication additive métal, et utilise les solutions de métrologie 3D, ATOS Core de GOM, pour reconstruire des géométries unitaires et les reproduire en 3D métal.

Creaform propose des solutions de contrôle 3D en ligne, avec 3 produits mis avant, les deux derniers étant les plus récentes innovations, primées au Reddot Award 2019 :

- **CUBE-R™**, une cellule de Scan 3D pour pièces de grande dimension (jusqu'à 3 mètres d'envergure), équipée d'un système de mesures coordonnées (précision améliorée par photométrie automatisée (C-Track™), et référencement dynamique, utilisant le système MetraSCAN3D™ avec calibration automatique,
- **Go!SCAN3D™**, Scan 3D portable autorisant la mesure sans préparation préalable de la pièce, le produit et le scanner peuvent être déplacés pendant la mesure (référencement dynamique), avec une **rapidité de mesure** revendiquée jusqu'à 1 500 000 mesures/sec, et une résolution à 0,1 mm.
- **HandySCAN3D™**, Scan 3D portable de classe métrologique revendiquant une **précision de mesure à 0,025 mm** (0,020 à 0,040 mm/m de précision volumétrique), avec référencement dynamique et rapidité de mesure (jusqu'à 1 300 000 mesures/sec, grande zone de numérisation, et une résolution à 0,1 mm.



Fig.23 –Solutions de scan 3D portable (Creaform)

3D Systems pour sa part, présentait **Geomagic® Control X™**, système de contrôle 3D par scan (fig.23) dont la vitesse de mesure a été multipliée par 3 par rapport aux versions précédentes,

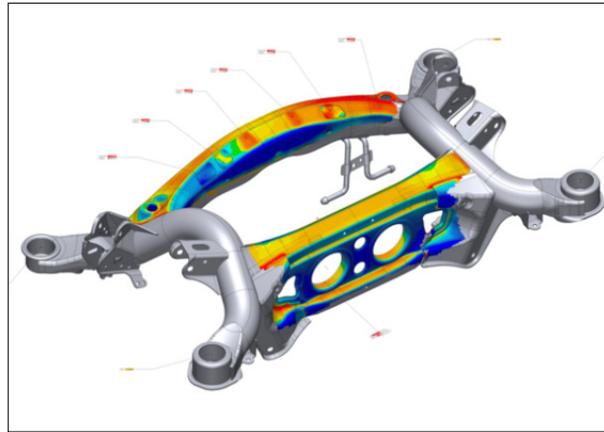


Fig.23 –contrôle par scan 3D Geomagic® Control X™ (3D Systems)

De son côté, **Limess** propose des solutions de **mesure optique pour l'industrie et la recherche**, avec des produits allant des **capteurs de contraintes** à la **corrélation d'image** et aux **scanners 3D** (0,3 mm de précision de mesure sur des dimensions de 10mx10mx10m et plus !) et systèmes d'**imagerie de laboratoire sur essais mécaniques** (systèmes multi-caméras pour visualiser et mesurer en temps réel ce qui se passe lors d'un essai de rupture par exemple).

Outre ses spectromètres compacts (easySpark), et autres analyseurs DX (Equinox 100, Equinox 1000) on notera de nouvelles solutions d'analyse portable des métaux, proposée par **ThermoFischer Scientific** dans sa gamme ThermoScientific :

- L'analyseur à fluorescence X (XRF) Niton™ XL2, pour une analyse élémentaire immédiate (calibration automatique) et non destructive des matériaux constituant les alliages, du titane au nickel (Mg, Cr, Fe, Cu ... tout sauf C &H), ainsi que l'analyse élémentaire de traces et d'impuretés métalliques (P, S <0,1%), utilisable y compris pour de l'analyse de traitement de surface,
- Un nouveau système laser portable (précision jusque 100 ppm pour le carbone),
- De nouveaux systèmes LIBS portables (qui devraient bientôt sortir) (précision de mesure sur le carbone, mais nécessité d'une surface lisse).

ThermoFischer a également racheté FEI il y a 3 ans, spécialiste en « MEB de table », qui a développé notamment l'analyse automatique des inclusions dans les aciers avec le système Metals Quality Analyzer (MQATM) (fig.24).

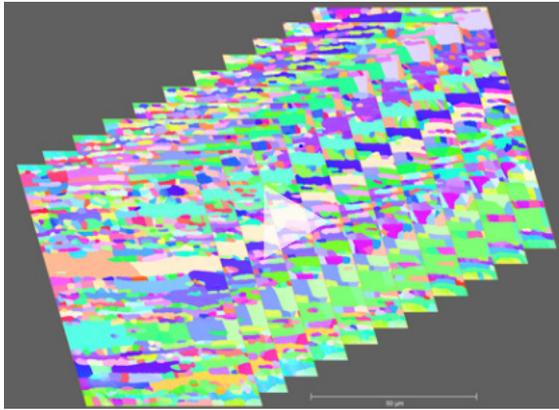


Fig.24 –Système Metals Quality Analyser MQATM (Thermo-Fischer)

Plusieurs systèmes de contrôle RX sont également présentés sur le stand de **Bosello**, filiale de Zeiss depuis fin 2017 et en particulier les produits :

- SRE HEX, cellule compacte de radioscopie industrielle avec option CT (Computer Tomography) et processeur IP BHT (filtre HDR, Hyghly Dynamic Radioscopy, sur toutes les versions avec panneau digital),
- WRE THUNDER 3, cellule d’inspection grande vitesse pour roues aluminium, avec reconnaissance de défaut automatique (système BHT ADR),
- OMNIA, cellule de radioscopie industrielle avec option BHT ADR (reconnaissance de défaut automatique) et système DDA (Digital Detector Array),
- VOLUMAX de ZEISS, tomographe industriel (Zeiss également présent sur un autre stand en propre).

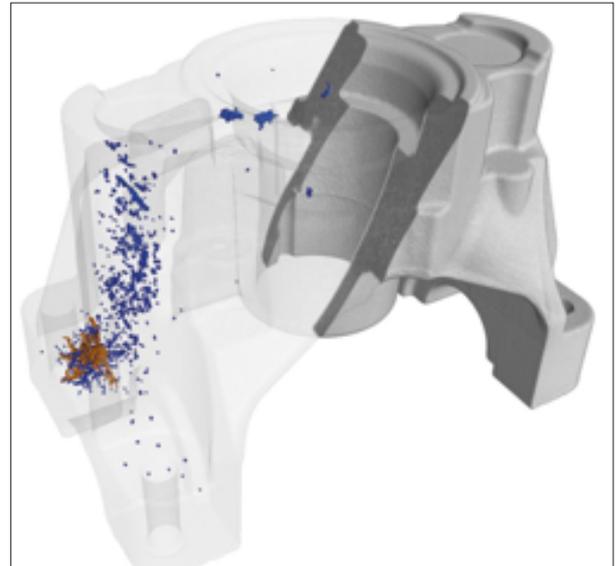


Fig.25 – Tomographie et reconnaissance de défaut (Bosello)

Plusieurs systèmes de contrôle RX et reconnaissance automatique de défauts (ADR), sans intervention de l’opérateur, sont également présentés par **VisiConsult** : XRH222 microfocus & robotstar, XRH Gantry, Gantry 600 kV & Palette ... VisiConsult se positionne sur l’automatisation du contrôle RX. Ses conceptions modulaires permettent l’inspection manuelle, l’ADR (Automated Defect Recognition) et le contrôle tomographique (CT) sur une même unité.

Autant de développements (tous ne sont pas cités ici) qui visent une intégration au plus efficace des contrôles de production en ligne.

7.ALLIAGES ET MATERIAUX METALLIQUES

Peu d’innovations identifiées au niveau des alliages légers, si ce n’est chez **Hydro** sur les alliages destinés à la forge, pour le marché automobile (alliages HyForge™). Avec la technologie LPC (Low Pressure Casting) mise en œuvre (fig.26), la friction en surface de lingot est réduite, offrant des lopins avec une surface beaucoup plus lisse. Les lopins HyForge™ ne présentent donc plus de zone de ségrégation inverse, et peuvent ainsi être utilisés directement dans le procédé de forge, sans opération préalable d’extrusion ou d’usinage.

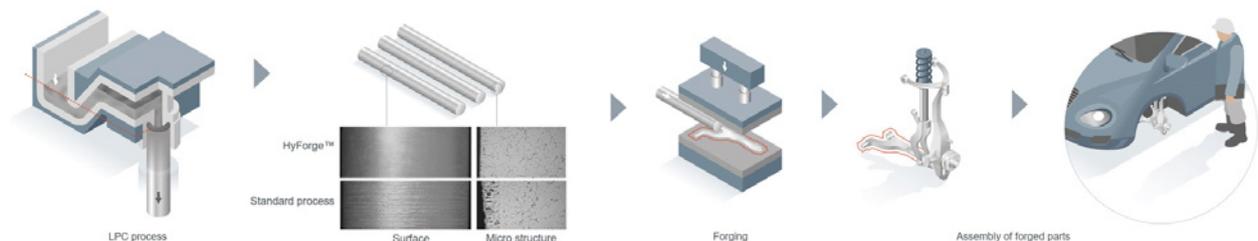


Fig.26 – Mise en œuvre des alliages HyForge™ (Hydro)

Du côté d'**Alcoa**, la nouveauté est sur l'**alliage EZ-Cast-NHT™**, destiné aux pièces de structure à paroi mince en fonderie sous pression, **sans traitement thermique**. Avec des caractéristiques sans traitement revendiquées de 14 à 17% d'allongement, 142 à 150 MPa de $R_{p0,2}$ et 267 à 283 MPa de R_m , l'alliage a également été testé en aptitude au rivetage sur structure extrudée.

Les autres alliages spéciaux remarquables (mais moins récents) sont :

- L'**alliage 370 EZCast™** destiné à la fonderie sous pression, pour les pièces de structure à parois minces requérant de la tenue aux chocs,
- L'**alliage A354 VersaCast™** destiné aux applications haute résistance avec allongement, requérant une bonne tenue en fatigue, avec des performances améliorées en comparaison des alliages A356 et A357. C'est ici la concurrence aux alliages de forge qui est visée,
- L'**alliage 351 SupraCast™**, destiné aux applications moteur (culasses, bielles, carters turbo) et composants sollicités en fatigue (étriers de frein, roues) et à haute température. Un **alliage C667F SupraCast™** est également proposé pour mise en œuvre en sous-pression,
- L'**alliage C862F EverCast** destiné aux pièces de suspension (pivots, bras de suspension ...), avec des caractéristiques après traitement T6 revendiquées de 8 à 12% d'allongement, 320 à 550 MPa de $R_{p0,2}$ et 375 à 400 MPa de R_m ... et 100 MPa en fatigue ($R=-1$, 10^7 Cycles).

Les innovations sont sinon portées par les académiques au service des industriels. On notera les travaux de l'université **TU Clausthal** sur :

- Le développement de **fontes GS résistant à la corrosion** (mise en œuvre de différentes méthodes de vieillissement),
- Le développement d'alliages **AlCu pour tenue aux hautes températures** (alliés au Ni, Mn, Co, pour application sur culasse, développements déployés en partenariat avec Nemak et AIF, et comparés aux alliages RR350 / Alufont-60 / AlCu5NiCoSbZr),
- Une étude sur la **crique à chaud des alliages AlZnMgCu**,
- Une étude sur la **coulée continue en centrifugation d'alliages base CuAl**,
- L'**affinage de grain dans les aciers** (solutions à base de cérium),
- L'**influence du molybdène sur la qualité de la fonte ADI pour des pièces de forte épaisseur** (15 mm et plus).

L'université **RWTH** de Aix-La-Chapelle présentait également ses différents travaux, avec aussi les activités de l'ACAM (Centre dédié à la Fabrication Additive).

Au niveau des procédés de fonderie, on soulignera (sans que ce soit exhaustif) :

- Le **projet SMARTSCRAP** (sur les impacts des éléments d'alliage dans les matières recyclées, sur la production et les propriétés de la fonte moulée).
- Le **projet (terminé) BEST-PROJEKT** (dédiés au traitement de tôles acier hybrides pour insertion en fonderie sous pression aluminium). (fig.27).

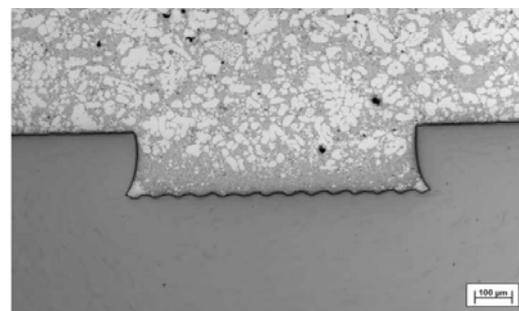


Abb. 2: Formschlüssiger Verbund zw. DQ04-Stahleinleger und Magsimal59-Druckgusslegierung.

Fig.27 – Insertion en fonderie sous pression de tôles acier hybrides (RWTH Aachen)

- Des échantillons présentés en vitrine, d'éprouvettes de traction pour caractériser les **mousses métalliques issues de FA**, et l'exploitation associée à un algorithme permettant la définition de structures lattices fonctionnelles (fig.28).



Fig.28 – Structures lattices issues de fabrication additive (RWTH Aachen)

8. DEVELOPPEMENTS AU SERVICE DE L'ECO-EFFICIENCE

L'éco-efficience est aujourd'hui présente dans toutes les propositions de produits, conceptions, services et procédés présentés à la GIFA. Des développements pré-cités dans les sables et liants ou collectes intelligentes des données, aux conceptions de fours et à la maîtrise des énergies ou des recyclages, là encore, quelques exemples ciblés permettent d'illustrer la tendance.

Le **Fraunhofer IFF** (Institute for Factory Operation and Automation) présentait le **projet ETAL** (Entwicklung neuer Technologien, Anlagenkomponenten und Logistik), projet « foundry 4.0 » porté par un consortium de 4 partenaires : Fraunhofer IFF, Promeos, LGL LeichtmetallgieBerei et l'Université de Magdebourg. Le projet présente un **nouveau concept d'énergie et de logistique de production**, avec une conception en rupture autour des installations de **fusion, transfert et maintien de l'alliage** liquide en fonderie aluminium. La solution se base sur 2 innovations : une nouvelle conception de système de chauffe des poches de métal (fig.29), et le remplacement du cycle usuel fusion/versement/transfert puis maintien, par une seule étape fusion et maintien, via un système de fours de distribution totalement mobiles. **Les économies d'énergie revendiquées sont de l'ordre de 60%, soit 300€ par tonne d'aluminium.** La solution sera testée cette année dans une fonderie aluminium en Allemagne.

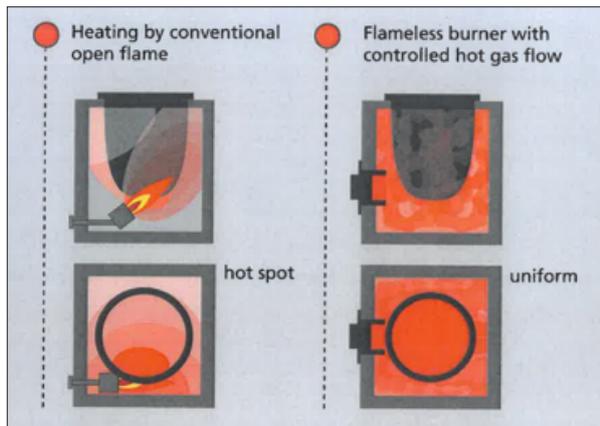


Fig.29 – Chauffage de poche homogénéisée par gaz porteur (projet ETAL)

Dans un autre registre, **Cavenaghi**, fournisseur de résines et d'enduits de fonderie, hébergeait sur son stand (là aussi en avant première) le **projet NEFERTUM**, en cours de test dans une fonderie italienne, visant la réduction des émissions de polluants via un système spécifique de traitement des fumées. Les résultats du projet et la solution développée (en cours de dépôt de brevet) seront présentés au second semestre 2019 avec de premiers résultats concluants sur l'abattement des émissions et odeurs.

En maîtrise des énergies, les fournisseurs de fours sont également au 1^{er} rang. On peut citer à titre d'exemple les solutions présentées par **Striko Westoffen** :

- Le **Refill Monitor**, dispositif de contrôle de remplissage qui limite tout risque de trop-plein et d'arrêts qui en découlent,

- Le contrôleur d'efficacité de charge partielle de **Striko-Melter** qui permet par ailleurs d'allonger les temps de fusion pour éviter les gaspillages au démarrage et à l'arrêt (réduction des consommations d'énergie jusqu'à 20 %),
- Le four **StrikoMelter BigStruc** conçu pour la refonte de grandes pièces structurales avec une consommation d'énergie réduite et une perte au feu limitée grâce à une conception inédite de couvercle.

Même esprit d'amélioration des performances avec **Pyrotek**, et ses nouvelles générations de **fours de maintien pour fonderie aluminium**, dans lesquels le chauffage en voûte est remplacé par des tubes intégrés aux parois du four, dans une conception nouvelle co-développée avec le partenaire japonais Tonetsu,

... Et d'autres nombreux développements présentés notamment sur **THERMPROCESS**, non cités ici.

9. DEVELOPPEMENT DE NOUVEAUX SERVICES, EN LIGNE

Dans les nouvelles gammes de services en ligne, **Metalshub** propose un réseau d'achats et de ventes en ligne de métaux et de ferroalliages. L'inscription est gratuite pour tout fondeur. **L'entreprise a moins de 2 ans, mais compte déjà 450 « membres »**, la moitié étant des fournisseurs d'alliages. Près de **20 millions d'euros ont été achetés via la plateforme en 2018, déjà 50 millions à mi-année en 2019.** MetalsHub se paie par un pourcentage (de l'ordre de 0.2%) sur chaque transaction, avec un plafond. Une nouvelle ligne pourrait être ouverte sur les scraps (il suffit d'un acheteur et d'un vendeur pour ouvrir un marché).

En termes d'outils, **3D View Station** offre toujours ses **solutions de visualisation** du développement produit aux ventes : 3D CAD Viewer, 2D Viewer, Desktop viewer & Web viewer.

Les solutions en ligne plus avancées sont : le système de visualisation HTML5 Web Viewer qui peut supporter du Catia, Creo / ProE, NX, SolidWorks, SsolidEdge, Inventor, JT, STEP, IGES et d'autres formats de fichier tels que DWG, DXF, PDF, du 2D pour MS Office (DOCX, XLSX...), du dessin technique (DWG & DGN viewer) et des fichiers au format image (TIFF viewer, JPEG viewer).

Les innovations de la version 2019.0 : de nouvelles versions sur les **formats de fichiers** et de nouvelles **fonctions**.

Pour **Hüttenes Albertus**, la présentation « INNOVATION INSIDE » permet au format numérique, avec différents cas d'applications (et fondeurs associés) de faire un balayage

assez exhaustif des produits du Groupe et de leurs dernières applications (testable en ligne via le lien <http://solutions-inside.ha-group.com>).

Côté simulation, des approches « en ligne » sont également présentées telles que celle proposée par **Flow 3D** avec le FLOW-3D CLOUD installé sur Penguin Computing on Demand (POD) viable y compris sur des calculs lourds, et permettant un coût « au calcul » sans investir dans les outils.

Pour faciliter la communication interne et avec les clients, **Magma** propose pour sa part aux fondeurs la solution **MAGMAinteract**, nouveau programme de visualisation des résultats de simulation sous MAGMASOFT®.

De la conception à la formation et aux conseils à valeur ajoutée, c'est aujourd'hui aussi sous forme de services interactifs en ligne que les fournisseurs accompagnent les industriels de la fonderie.

10. PRODUITS ET MATERIELS DE FONDERIE

Au niveau des produits :

Avec à nouveau un stand très démonstratif (200 collaborateurs présents, 43 cas d'application présentés, 12 nouveaux produits), **Foseco** présentait ses innovations et celles de ses partenaires (Vesuvius), dont :

- De nouvelles solutions de **filtration pour fonderies fonte et acier** avec les produits SEDEX & STELEX démontrés sur applications (le plus souvent corrélés à des simulations sur MAGMASOFT),
- Un nouveau système HOLLLOTEX de **filtration pour coulées acier de grande taille** associant les filtres STELEX à des tubes en silice fondue (fig.31), permettant la protection du métal liquide et la maîtrise des turbulences de sa coulée aux empreintes,

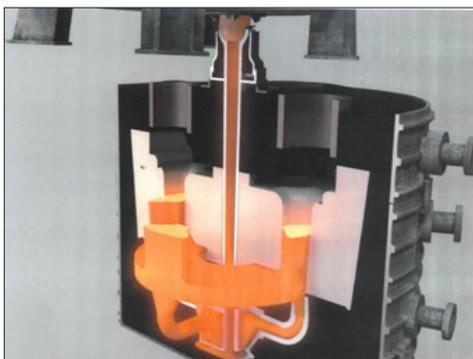


Fig.31 – Système HOLLLOTEX (Foseco)

- Les nouvelles gammes de **manchons pour fonderie fonte et acier**, VAX (zone de contact réduite de 40%), FEEDEK VAK (Self Centring Spot Feeders) & FEEDEX SCK (Sleeve Construction Kit) qui par leur conception permettent d'améliorer la mise au mille (jusqu'à 74% dans certains cas présentés),
- De nouvelles générations d'**enduits "Inner Cleanliness"** SEMCO IC visant la propreté interne des produits (blocs, culasses...) avec en particulier le produit ACTICOTE CG mis au point pour réduire les interactions métal/noyau et la dégénérescence du graphite en graphite lamellaire dans les fontes vermiculaires, et l'**Intelligent Coating Unit (ICU)** pour le contrôle automatique de la dilution des enduits (mesure en temps réel de la densité),

La France n'était pas en reste pour les produits destinés aux fonderies en non ferreux, avec **Aluminium Martigny**, qui pour l'occasion présentait sa gamme complète de flux de fonderie pour les alliages d'aluminium (Ecremal, Elimoxal, Desydral, Affigral, Natral, Calalex, Demag, Sodexal), de magnésium (Desomag), de cuivre (Cupralux) et de zinc (Zamalux) et poteyages pour outillages (Isalu, Isol, Conductal) et supports céramiques (Antanol).

Dans les innovations mises en avant par **ASK Chemicals** au-delà des sables et liant, à noter les **filtres EXACTPORE 3D** adaptés à la fonderie cire perdue, acier et fonte, qui proposent une alternative aux solutions habituelles des structures céramique frittées en réduisant le risque de particules détachables dans le flux du métal, et en proposant par l'homogénéité des structures, et les libertés de conception, des **flux de métal optimisés** (à taille de pore identique) tant en débit qu'en turbulence.

Hüttenes Albertus pour sa part présentait ses développements de nouvelles générations de manchons et inserts exothermiques pour moulage vertical développés par **Chemex Foundry Solutions GmbH**. **Chemex**, entreprise du Groupe HA, qui propose également des manchons pour fonderie aluminium sable, et de nouvelles conceptions en 2 parties « tele(scope) ».

Hébergé comme partenaire sur le stand de Hüttenes Albertus, **Lahnwerk**, outilleur (boîtes à noyaux), présentait 3 innovations : le « InBox Spraying », une solution propre de poteyage intégré (boîte fermée, érosion de surface réduite), de nouvelles générations de buses, permettant un flux optimisé de l'amine et une nouvelle conception de buses vrillées (twisted nozzle) améliorant là aussi le flux, avec des érosions d'outillages réduites de 50%.

GTP Schäfer qui produit depuis plus de 30 ans des manchons exothermiques et autres produits de fonderie destinés à améliorer la mise au mille et la qualité produit met-tait en avant:

- Les **manchons NETSleeve®**, dans lesquels un filtre maillé est directement intégré dans le matériau exothermique, et remplace une galette de segmentation sable normale, permettant d'élargir la surface d'alimentation, et ensuite de faciliter le démasselottage,
- Les **systèmes NETCore®**, développés spécifiquement pour les manchons exothermiques pour les coulées acier de grand volume (surface d'alimentation de 60 à 150 mm de diamètre, diamètre externe de la galette de segmentation de 190 à 420 mm de diamètre), permettant là aussi d'élargir la surface d'alimentation, et ensuite de faciliter le démasselottage,
- Le **produit NETFrame®** conçu pour les lignes de moulage en sable à vert. La maille sertie sur un support résistant aux hautes températures, sans nuire au passage du métal, fragilise ensuite la liaison et facilite le démasselottage.

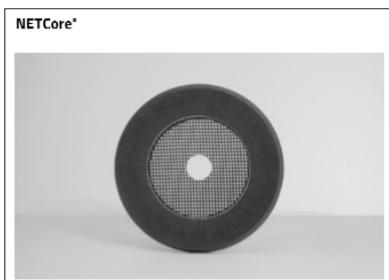


Fig.33 – Systèmes NETCore®, NETFrame® et NETSleeve® (GTP Schäfer)

Enfin, outre la fabrication additive sable et métal (évoquée dans d'autres chapitres), **Exone** propose des produits **3D céramique** (matériaux et liants) en binder jetting, pour l'impression de pièces frittées à base de carbures de silice, d'alumine, de zircon et de carbures de bore.

Au niveau des matériels :

Fort de compétences référentes en pyrométrie et maîtrise des réfractaires, **Pyrotek** présentait sa gamme d'équipements dédiés au métal liquide :

- **Station de dégazage**,
- **Pompe doseuse**, de transfert de métal, avec une précision de quelques % permettant de contrôler une vitesse d'injection (dans la logique de la basse pression),
- Sur de nombreux composants, la mise en œuvre de **l'enduit RFM®** (Reinforced Fiberglass Material), revêtement réfractaire à base de nitrure de bore, isolant anti-mouillage, appliqué sur louches, poches et liners monoblocs,
- Le béton réfractaire **Pyrocast FS44 AL à silice fondue** de densité moyenne contenant 29% de SiC, formulé pour offrir des finitions de surface améliorées, de la résistance aux chocs thermiques et une conductivité thermique très faible en comparaison avec d'autres bétons réfractaires contenant du carbure de silicium. Des agents non mouillants spécifiques permettent la résistance à l'aluminium en fusion pour les applications de coulée continue à températures élevées et pour les alliages à teneurs élevées en Mg, Zn et Si,

De même, pour les non ferreux, **FOSECO** présentait son système de traitement SMARTT (rotor de dégazage & traitement avec unité de pilotage), et ses revêtements isolant (lining) en Insural (17% d'économie d'énergie revendiquée) pour fours de maintien (dosing furnaces), avec une mise en œuvre où le four est à nouveau opérationnels en 3 jours sans frittage.

ProserviceTech, avec la baseline « Innovation in Foundry Process », propose outre l'analyse thermique avec ITACA, différents services et produits dans le domaine de la métallurgie des ferreux : notamment des solutions complètes sur les poches de transfert (système ALTS, Areal Ladle Transportation Systems et solution INITEK co-développée avec Foseco), des produits et solutions en enduisage noyaux et moules, coins hydrauliques de démasselottage (Promat™), cellules de grenailage et conseils techniques associés.

Elkem pour sa part, présentait deux produits phares pour la maîtrise de la métallurgie en fonderie fonte :

- Son nouveau système de dosage **DDS (Dynamic Dosing System)** permettant un calcul automatique, dosage, et positionnement à la poche des alliages de traitement des fontes GS,
- le **système EPIC**, outil de contrôle process en temps réel, à partir de l'analyse thermique.

Qualiflash® à l'honneur sur le stand de **Aluminium Martigny** qui pour l'occasion de cette GIFA présentait sa gamme complète d'équipements pour fonderies d'aluminium :

- L'HYDRALVAC 6000 pour le contrôle du gazage en fonderie d'aluminium,
- Le rotor ROTOXAL RD1 et Evolution 2 pour le traitement de fours et poches respectivement jusqu'à 600 kg et 1000 kg d'alliage d'aluminium,
- Et le dernier né donc, Qualiflash®, redesigné par Aluminium Martigny sur la base du Qualiflash® développé par CTIF pour le contrôle de la qualité inclusionnaire des alliages d'aluminium,
- Divers équipements de projection de flux (SPRAYFLUX), mélange (COATING MIXER), couverture de four (FURNACE COVER) et couvertures chauffantes.



Fig.34 – Présentation du Qualiflash® (équipe Aluminium Martigny)

Et d'autres encore, non cités ici ...

II. APPROCHES NUMERIQUES ET SIMULATION

C'est aujourd'hui selon Magma, un "**Autonomous Engineering**" qui remplace les approches conventionnelles de simulation process en fonderie, du tracé de la pièce et de la conception de fonderie, à l'approche prédictive (Virtual Design of Experiments and Genetic Optimization), avec MAGMASOFT®.

En avant première, les visiteurs pouvaient vivre l'**Autonomous Engineering live** avec un Holo-Theatre inédit, annoncé via une interrogation largement affichée dans tout le salon: "Is this the END of SIMULATION, or its BEGINNING?".



Dans ses développements, Magma présentait notamment la "**Virtual Core Shooting Machine**", développée en partenariat avec des industriels et fournisseurs du domaine. Un couplage direct entre la simulation process, la conception de la boîte à noyaux, le matériau de moulage et la machine d'injection elle même permet, et c'est une première, une optimisation en temps réel de la ligne de moulage.

Avec le "**Virtual Die Casting Die**", Magma démontre aussi comment simultanément réaliser et évaluer avec fiabilité une conception d'outillage, et optimiser les paramètres de production associés, en fonderie sous pression.

Magma introduit également de nouvelles optimisations en simulation de fonderie (tous procédés et alliages), en traitement thermique et en production de noyaux. Sur ce troisième axe, des partenariats sont revendiqués avec les leaders du domaines sur:

- Le développement de la simulation des **matériaux de moulage**,
- La prédiction quantitative des **déformations de noyaux** (partenariats avec Hüttenes Albertus Nematik et le RWTH Aachen) (fig.35),

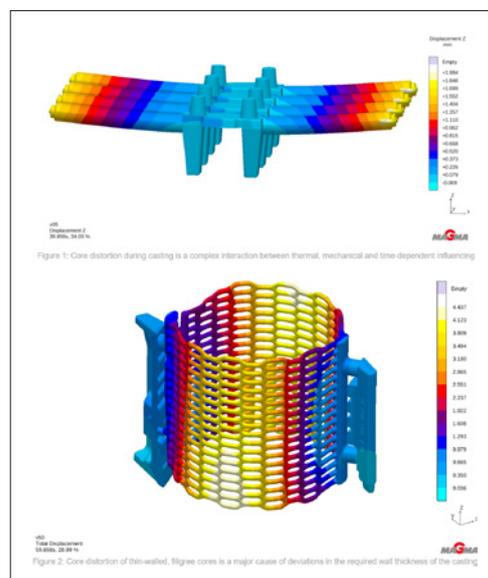


Fig.35 – Prédiction de la déformation des noyaux (Magma)

- l'anticipation de **l'évolution du liant et du gazage** pendant le process et des potentiels défauts induits (partenariat avec ASK Chemicals) (fig.36),

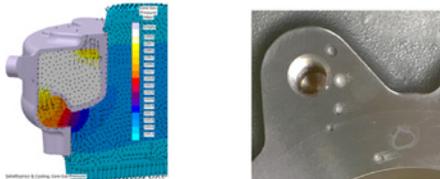


Figure 1: Development of the flow in the core due to binder decomposition and typical core gas-related casting defects

Fig.36 – Simulation de l'impact de la dégradation des liants (Magma)

Avec le leitmotif « **E-mobility is creating new Horizons for the Casting Industry** », **ESI** propose aux fournisseurs de pièces de fonderie (de l'automobile notamment) des solutions contribuant par le numérique à l'optimisation des conceptions et donc à l'allègement, à la réduction des émissions, à l'aboutissement de nouvelles conceptions pour véhicules électriques :

- En améliorant la qualité des pièces de fonderie, **sur des designs de plus en plus complexes**,
- **En exploitant tout le potentiel des procédés de fonderie**, y compris en gestion de données,
- En exploitant le potentiel des **nouveaux alliages d'aluminium et de magnésium**,
- En contribuant à **la conception, l'optimisation et la mise en production de nouveaux produits** : carters de batteries, composants de moteurs électriques...



Fig.37 – ProCAST (ESI)

La simulation process **combinée aux analyses de données** permet de répondre à de nouveaux challenges avec un enjeu de maîtrise des coûts (optimisations process, pièces bonnes du 1^{er} coup, réduction des taux de rebuts, réduction des temps de démarrage).

Le prototypage virtuel est la proposition d'ESI, pour réduire les coûts et temps d'essais au profit de la simulation numérique.

Avec plus de 40 ans d'expérience en physique des matériaux, et des décennies de collaboration avec les fondeurs, ESI a développé des solutions logicielles dédiées au prototypage virtuel pour la **mise en œuvre des matériaux métalliques** : de la **fonderie** à la **forge**, mais également la **soudure** et aujourd'hui la **fabrication additive**.



Fig.38 – Simulation de la Fabrication Additive (ESI)

ESI se fait fort d'accompagner les fondeurs pour relever de nouveaux défis technologiques : intégrer la **fabrication additive**, prédire le comportement fonctionnel de leurs produits via **l'IoT et les analyses de données**, optimiser les séquences de leurs opérations manuelles par l'usage de la **réalité augmentée**.

L'approche **Jumeau Numérique** en cours de développement également pour la fonderie (partenariat ESI, CTIF, ESFF, ENSAM) fait partie des axes de développement clés pour ESI.

RWP Alliance pour sa part, présente **WinCast®** expert, logiciel de simulation et d'optimisation (masselottage, remplissage, conformal cooling ...) en volume fini, avec module de prédiction de la microstructure après traitement thermique. Wincast couvre la simulation des procédés sable, coquille, cire perdue, sous pression, basse pression, coulée continue, centrifugation, procédé spéciaux, contraintes résiduelles, durée de vie, soudure, traitement thermique.



WinCast® expert

Fig.39 – WinCast® expert (RWP Alliance)

En conception et simulation, **Novacast** présente également ses différents outils :

- NOVAMETHOD, outil de conception 3D,
- NOVAFLOW&SOLID, outil de simulation de remplissage et solidification,
- NOVASTRESS, outil de calcul de contraintes et déformations,
- FOUNDRYTECH, outil de conception des systèmes d'attaque et d'alimentation,

Les dernières améliorations signalées sur les outils de simulation sont le maillage et un nouveau solveur pour les simulations en fontes grises et sur les fontes GS.

Flow3D présentait ses outils de simulation et développements en **mécanique des fluides numérique** (ou CFD = Computational Fluid Dynamics), pour la fonderie, la mécanique des fluides au sens large, et la fabrication additive.

Au-delà des outils connus de Flow 3D, qui revendique d'être pour la R&D ce que les autres acteurs du marché sont pour la production, avec une spécialité sur le remplissage, Flow 3D annonce de nouveaux développements qui seront rendus publics au second semestre 2019 (et on se concentre ici plus sur la solidification) :

- La prédiction de **l'évolution de la microstructure au cours de la solidification** et prédiction des propriétés mécaniques induites,
- Les développements en **FA et soudure** (SLM, SLS, DED, SBJ ...).



Fondé en 2011, **PIQ²** développe des solutions et services de simulation en **fonderie sous pression (FSP)**. Implanté en Italie dans les bureaux du CSMT (Centre for Multi-Sector Technologies) au sein de l'Université de Brescia, PIQ² développe des modules "Castle" pour l'optimisation de la conception et simulation en FSP.

Leurs travaux plus récents portent sur le développement de modules en :

- Basse pression et gravité
- Plasturgie
- **Simulation bi-phasique (métal+air)**
- Simulation de la thermique outillage



Plusieurs outils numériques présentés également par **3D Systems** en conception et fabrication additive (évoqués aux chapitres Fabrication Additive et Outillage) : **CIMATRON**, logiciel de conception spécialisé outillage, **3DXpert**, logiciel « tout-en-un » pour la Fabrication Additive, **3D Sprint**, logiciel dédié à l'impression 3D des plastiques.

Pas d'exceptions dans les technologies à simuler, avec l'exemple de **Wheelabrator**, qui présentait de nouvelles possibilités aussi via la simulation numérique, sur la finition des pièces complexes avec des structures internes élaborées, améliorée grâce à la **simulation du process**.

12. DEVELOPPEMENTS ET TENDANCES SUR OUTILLAGES

On rappellera ici les développements ou intégrations de technologies mis en avant par des outilleurs tels que **Rolf Lenk Werkzeug-u Maschinenbau GmbH** avec l'association de solutions usuelles d'usinage (tournage, fraisage, électroérosion...) et de **moyens intégrés en fabrication additive métal (SLM, 3DMP®)**, ou encore **Knowhow Wilheims GmbH** travaillant sur cellules METROM capables de combiner différentes opérations, de **l'impression 3D métal** à l'usinage et à la **soudure laser**.

Pour cette GIFA, **3D Systems** spécialisé en outils de conception et de fabrication additive, mettait notamment en avant, côté outillage, **CIMATRON**, logiciel de conception spécialisé outillage, opérationnel de la CAO 2D-3D à la programmation des parcours d'usinage en commande numérique,



Fig.40 – CIMATRON, outil de conception outillage (3D Systems)

Pour la production de modèles en cire pour la fonderie cire perdue, 3D Systems met en avant l'alternative aux productions en outillages traditionnels, de la **fabrication directe de modèles 3D** sur la **ProJet MJP 2500 IC**, avec l'argument revendiqué du gain de temps et de coût sur des séries intermédiaires, par rapport aux fabrications usuelles.

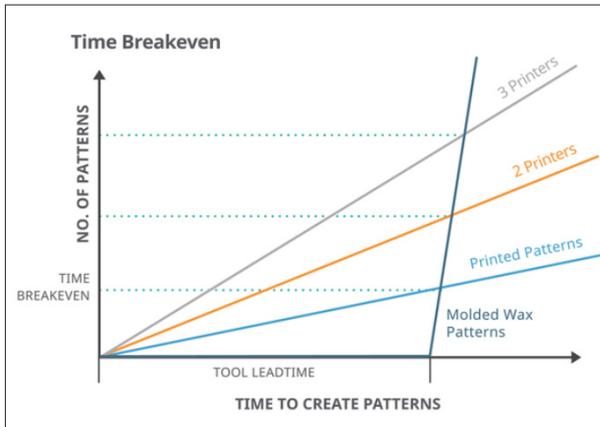


Fig.41 – Critères de choix entre injection de cires et FA (3D Systems)

Sur les outillages de grande taille (les tailles machine sont croissantes), on notera le stand démonstratif de **Vetimec** : « Think BIG and make it HAPPEN »... des moules sous pression qui peuvent dans certains cas peser jusqu'à 70 tonnes.



Fig.42. Moules de grande taille (Vetimec)

Concepteur et fournisseur de machines sous pression à chambre chaude et chambre froide, **Frech** pour sa part met en avant une offre forte en termes de **service sur les outillages**. On soulignera notamment:

- Dans la vitrine des innovations en outillage, le **FCC (Frech Core Casting)** noyaux destructibles pour fonderie sous pression, le **FGS (Frech Gating System)** avec amenée du métal par des canaux chauffés et le **FLM (Frech Laser Melting)** appliqué au prototypage, aux productions en petites séries et au conformal cooling,

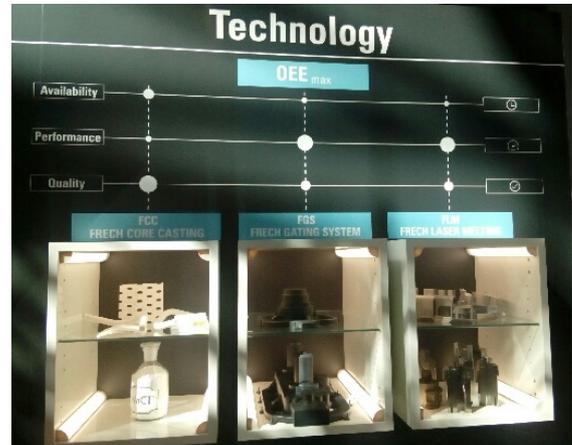


Fig.43. Innovations process et outillage en FSP (Frech)

- Le service sur la conception et fourniture des outillages mis en avant, sous le logo "**Frech Tooling**" avec des conceptions assurées en Allemagne, et la production en Pologne,
- L'optimisation de la thermique avec les **Laser Melted Cores** (inserts issus de fabrication additive) connectés à de la micropulvérisation co-développée avec Wollin, et **thermo-régulation multizone** (10 circuits), limitant les contraintes et chocs thermiques sur l'outillage.

Des outils de conception aux solutions issues de fabrication additive, le secteur des outillages bénéficie aujourd'hui de nouvelles solutions dédiées à leur performance et durabilité.

13. FONDERIE SOUS PRESSION

Stand à nouveau très démonstratif pour **Bühler** «**Die Casting that Conserves Energy and Resources**» qui présentait avec près de 80 collaborateurs présents, ses différentes gammes de machines :

- Famille FUSIA, machines modulaires de 140 à 1400 tonnes,
- Famille CARAT, machines modulaires double plateau, avec 13 tailles de machines, de 1050 à 4400 Tonnes de force de fermeture.

Sur le stand, une 4000 tonnes :



Au-delà des machines, l'offre porte sur le service, avec des concepts propres (5G, smart CMS, creating tomorrow together, digital cells) revendiquant l'accompagnement à l'atteinte de zéro rebuts, de 40% de réduction de temps de cycle et d'une production 24h/24, 7j/7 (voir chapitre approche digitale):

Italpresse Gauss de son côté, présentait (voir chapitre approche digitale) l'application **AME** pour les opérations d'**inspection (simulées)** des pièces de machines, et le système **HMe**, qui permet une **vision holistique et en temps réel**.

FRECH pour sa part célébrait cette année ses 70 ans, avec en vitrine le thème "**Digital twin meets digital shadow**", et une offre forte en termes de **service sur les outillages**.

IDRA, qui propose les plus grosses machines d'injection sous pression existant sur le marché, avec ses « **Giga-Presses** », soit une gamme de presses de 5500 à 6200 tonnes, annonce la **1^{ère} commande reçue sur une 5 500 tonnes**, et comme les autres constructeurs, aborde l'approche Industry 4.0 avec plusieurs axes clés (voir chapitre approche digitale).

COLOSIO était également présent avec sa gamme de machines PFO SERIES à **chambre froide** (140 à 3200 tonnes), PFZ SERIES à **chambre chaude** (30 à 320 tonnes), toutes équipées avec la mémoire des données de chaque moule (Coltrol System) et la visualisation des paramètres d'injection (Fullcoltrol), et ses systèmes de **chargement automatique** TRANSAL développés pour les machines jusque 2400 tonnes (capacité à vide : jusque 180 injections/heure).

Côté académique, on soulignera la présentation par la **Aalen Hochschule** du développement de solutions d'insertion avec d'autres types de développements de produits **hybrides, mais à partir de CFK (Carbon Fiber Composites)**, mis au point pour être insérés dans l'outillage avant surmoulage lors de l'injection sous pression,

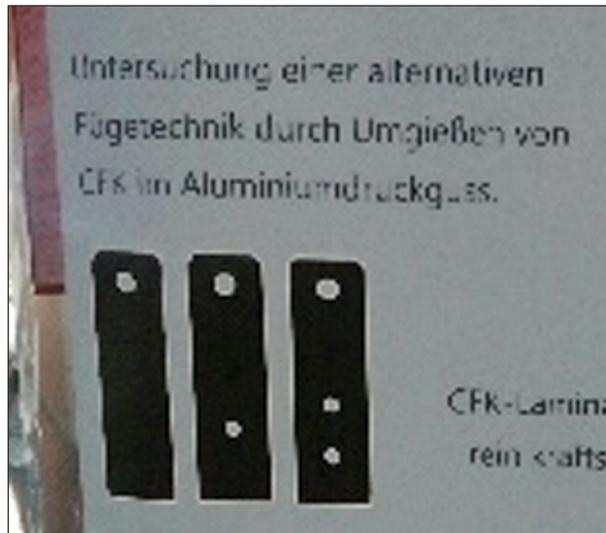


Fig.44. Inserts hybrides CFK (Aalen Hochschule)

Côté PME, on rappellera les solutions de **tubes destinés à du surmoulage**, proposés par **Combicore** utilisables en sous pression aluminium (diamètres de 5 à 22 mm, épaisseurs de 0,5 à 2mm). Les tubes sont produits dans des matériaux (AlMn1, AlMgSi0.5, E235, Cu, Zn) présentant suffisamment d'allongement (jusque 30%) pour être cintrés à volonté et **tenir à des pressions jusque 1000 bar**.

CONCLUSION

Sous le signe de la digitalisation, de l'industrie 4.0 et de la transition énergétique, la GIFA promet des avancées significatives dans nos métiers.

En savoir plus :
macke@ctif.com

Concours Général Fonderie 2019

Près de 16 500 candidats des filières générales, technologiques et professionnelles ont tenté de démontrer la maîtrise de leurs disciplines pour cette édition 2019 du Concours Général des Lycées et des métiers. C'est au Lycée Henri Brisson à Vierzon (18) que s'est déroulé, les 22 et 23 mai, la finale du Concours Général des Métiers, spécialité Fonderie.

Les candidats ont eu deux jours pour réaliser un buste de Léonard de Vinci. Rappelant ainsi qu'en cette année 2019 nous célébrons les 500 ans de la mort de l'artiste et homme d'esprit.

Cette finale a réuni 10 candidats en terminale Bac Pro Fonderie venant de 5 lycées professionnels à travers la France :

- Lycée Henri Brisson, Vierzon (18)
- Lycée Jean Prouvé, Nancy (54)
- Lycée Marie Curie, Nogent sur Oise (60)
- Lycée Hector Guimard, Lyon (69)
- Lycée Jean-Baptiste Colbert, Le Petit-Quevilly (76)

C'est dans ce contexte d'excellence des savoir-faire qu'a été inauguré le nouvel atelier fonderie de l'établissement (3,5 millions d'euros d'investissement de la Région Centre Val de Loire) qui démontre l'intérêt de la Région et de l'Éducation Nationale pour ce métier tourné vers l'avenir. Ce fut également l'occasion de rappeler aux médias présents que ces jeunes ne

connaîtront aucune difficulté d'insertion dans le secteur de la Fonderie où 2 000 postes sont à pourvoir cette année.

La Fédération Forge Fonderie qui soutient ce Concours d'Excellence tient à féliciter chaleureusement les lauréats de 2019 :

- **1^{er} prix** : *Monsieur Roméo Ticier* (Lycée des métiers Marie Curie à Nogent sur Oise)
- **2^e prix** : *Monsieur Tom Martin* (Lycée des métiers Henri Brisson à Vierzon)
- **3^e prix** : *Monsieur Romain Sagan* (Lycée des métiers Marie Curie à Nogent sur Oise)
- **3^e prix ex aequo** : *Monsieur Claude Dubois* (Lycée des métiers Henri Brisson à Vierzon)

La Fonderie à l'Honneur à la Sorbonne :

Les quatre lauréats se sont rendus le 11 juillet au grand amphithéâtre de la Sorbonne afin de recevoir leurs prix des mains de Jean-Michel Blanquer, Ministre de l'Éducation Nationale.

Ils ont également profité d'un échange privilégié avec le Ministre quelques instants avant le démarrage de la cérémonie afin d'échanger sur la technicité des savoir-faire en Fonderie ainsi que sur leurs projets de carrière au sein de ce secteur.



Les lauréats ont également remis au Ministre le buste de Léonard de Vinci ayant reçu le 1er prix au Concours lors de la cérémonie.



(de d. à g.) Frédéric DEDEKEN, Inspecteur de l'Éducation Nationale Pierre-Yves BRAZIER, Directeur de l'École Supérieure de Fonderie et de Forge Wilfrid BOYAUULT, Directeur de la Fédération Forge Fonderie Sergio DA ROCHA Responsable Formation pour la Fédération Forge Fonderie



Les œuvres du Concours Général Fonderie remises à Emmanuel Macron et son homologue italien Sergio Mattarella le 2 mai 2019 au château du Clos Lucé pour les 500 ans de la mort de Léonard de Vinci. Crédit photo :AFP



Candidats et Jury





Simon FAYS
Elève de l'Ecole Supérieure
de Fonderie et de Forge

La promotion ESFF 2020 en séminaires

Ce sont deux épopées traditionnelles que nous allons vous relater ici. En effet, les acteurs du monde industriel de la forge et de la fonderie reçoivent régulièrement les élèves de 2^e année de l'ESFF en voyages d'études. Ces séminaires sont des moments de rencontres privilégiées, permettant aux uns de partager leurs spécificités, leurs savoirs et leur excellence, et aux autres de parfaire leurs connaissances au sein d'un tissu industriel français fécond, qualifié et innovant.

Première visite aux Forges de Bologne (Lisi). Cette entreprise dédiée à l'aéronautique maîtrise des procédés rares tels que l'hydroformage.

Nous avons poursuivi avec SetForge (groupe Farinia) dont plusieurs entités nous ont accueilli au cours des séminaires :

- Hot formers (pièces forgées en acier pour l'automobile) et Near Net (frappe à froid et soudure par friction) à Hagondange.
- Barriol & Dalière dirigé par M. Mikhaël PUGNET (ESFF) à Andrézieux Bouthéon qui réalise de l'électroforgeage pour les secteurs de l'automobile, des poids-lourds ou des engins de travaux public (médaille d'or Caterpillar).
- Gauvin (forge à chaud et mi-chaud), conjuguant production automatisée en grande série (marché automobile) et production manuelle pour des marchés de niche.

Nous avons été particulièrement frappés par la robotisation de ces différents sites.

Direction ensuite l'impressionnante fosse de coulée continue – la plus profonde de France – et les installations d'élaboration de l'aciériste ASCOMETAL à Hagondange.

Chez Saint Gobin Pont-à-Mousson - leader mondial en solutions d'adduction d'eau - nous avons observé la production de conduites de grandes dimensions.

En passant par la Lorraine nous avons été accueilli à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Metz, sur la plateforme Vulcain, pôle de recherche et d'innovation en déformation plastique. L'équipe emmenée par M. Régis BIGOT a mis l'accent sur la confrontation entre données issues de simulations numériques et résultats expérimentaux. Ces travaux pratiques ont été bénéfiques pour la compréhension de phénomènes physiques et de paramètres clés mis en jeu lors de la déformation plastique.



L'échange avec les techniciens a été un réel point positif. Citons M. Sébastien BURGUN dont l'expérience professionnelle compte à la fois forge et fonderie. M. Daniel BOEHM, assistant ingénieur, nous a présenté un moyen de scannage des pièces en trois dimensions par stéréovision (technologie GOM).

M. Tudor BALAN nous a enfin dispensé un cours portant sur la plasticité, affirmant encore une fois l'excellence scientifique de la plateforme et des différents laboratoires de l'ENSAM.

Avant de poursuivre, soulignons que les élèves de l'ESFF ont également cherché à se mêler à la population locale lors des soirées passées sur place. Les kilts - tradition fraîchement lancée - ne sont pas passés inaperçus. Notons enfin qu'aucun débordement n'a été constaté, les sorties se faisant toujours sous l'œil attentif de quelques élèves bienveillants.

Nous avons été reçu sur le récent site de Suippes du Bronze Alloy, élaborateur d'alliage cuivreux. Des installations de forgeage et d'usinage permettent d'offrir une gamme de produits semi-finis comme finis.

Accueillis chez NTN Transmission Europe à Crezancy par le directeur M. Antoine SELOSSE, nous avons pu observer la compétitivité d'une forge travaillant pour l'automobile, intégrant par exemple l'usinage de ses outillages en interne.

Initialement dédié à la production de carter cylindres, PSA Sept-Fons a su s'adapter après la chute de production (Dieselgate) en réorientant sa production et en intégrant de l'usinage.

Chez CastMetal à Feurs - leader dans les pièces en aciers coulées en sable - nous avons pu observer le cheminement complet des pièces et échanger autour du métier d'ingénieur au bureau d'étude.

Nous avons ensuite été reçus par Aubert & Duval. D'abord aux Ancizes, où nous avons pu assister à l'ébauche d'une pièce aéronautique de grande dimension en forge libre ou encore échanger avec des membres du bureau d'études et du secteur R&D. Ensuite sur le site d'Issoire, produisant des pièces à haute valeur ajoutée (aéronautique, médical,...). Il

nous a également été donné d'observer la presse hydraulique de 65 000t d'Interforge.

Chez Constellium à Ussel nous avons pu découvrir un noyautage de haute précision ou des technologies innovantes telles que du scan 3D.

Nous avons fini ce second séminaire par la fonderie Saint Rémy Industrie, spécialisée dans les alliages cuivreux. La maîtrise de techniques diverses, l'intégration d'usinage et de nombreuses accréditations qualité lui permettent de réaliser petites et grosses pièces pour de nombreux marchés.

Concluons en remerciant les entreprises qui nous ont ouvert leurs portes, et plus particulièrement les femmes et les hommes qui ont donné du temps pour nous faire découvrir leurs métiers et les incroyables atouts de l'industrie française.

Cette épopée au cœur de notre tissu industriel aura été l'occasion de nombreux enseignements pour la promotion ESFF 2020 :

- D'un point de vue technique, c'est indéniable, tant la diversité des procédés observés a été grande. Il nous a été donné d'observer sur le terrain les méthodes de mise en forme enseignées à l'école mais également de découvrir toute la valeur ajoutée qui les entoure. Les moyens de mesure et de contrôles innovants nous ont particulièrement marqués (scan 3D). Notons aussi l'intérêt grandissant pour l'intégration d'usinage, pour une maîtrise complète du processus de mise en forme et de la valeur ajoutée des produits.
- D'un point de vue humain par l'accueil chaleureux que nous avons reçu dans chacune des entreprises et par la cohésion interne au sein de la promotion que ces séminaires ont également suscitée.

L'échange avec les acteurs du milieu de la forge et de la fonderie a également été encouragé par un diner offert par la Fédération Forge Fonderie. La promotion a pu y rencontrer des membres de la fédération. Ont été aperçus M. Oliver VASSEUR, Responsable des territoires, M. Frank MOLLE, représentant des fonderies de la région lyonnaise, M. Thierry FAYE de chez Préciforge et M. Jean-Baptiste FOISEL, directeur général de Constellium.

Nous tenons enfin à remercier notre directeur M. Pierre-Yves BRAZIER qui a su assurer une programmation riche, l'ensemble des sponsors ayant subventionnés ces voyages et les membres du BDE ayant trouvés des solutions logistiques. Sans chacun de ces acteurs rien n'aurait été possible, et nous espérons que cette expérience se renouvellera les années futures dans d'aussi profitables circonstances.

Vous trouvez un rapport détaillé de ce voyage sur notre plateforme adhérent (contactez-nous si vous n'avez plus vos codes:contact@forgefonderie.org)

Intitulé du stage	Réf.	Durée	Tarif	Oct.	Nov.	Déc.
Métallurgie des matériaux						
Métallurgie et traitements thermiques des pièces en acier forgé	FG A06	2 j	1 260 €		20-21 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		
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	
Superalloys : performances et domaines d'utilisation	SP A080	1 j	650 €		14 Sèvres	
Conception de pièces métalliques - Outillages						
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
Techniques de forge						
Forgeage des superalliages et alliages de titane	FG A14	2 j	1 260 €		26-27 Sèvres	
Techniques de fabrication additive						
La fabrication additive métallique par fusion laser	FA A10B	2 j	1 260 €	8-9 Mâcon		
Techniques de fonderie						
Apprentissage des bases de la fonderie	TMF015C	4 j	1 930 €	22-25 Nancy		
	TMF015D	4 j	1 930 €		3-6 Sèvres	
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
Contrôles de pièces - Analyses laboratoire						
Contrôles et analyse de défauts de pièces de fonderie	TM F057B	3 j	1 630 €	15-17 Sèvres		
Métallographie des fontes	FT F043	3 j	1 630 €	15-17 Nancy		
Métallographie des alliages d'aluminium	AL F016	3 j	1 630 €	1-3 Sèvres		
Contrôles Non Destructifs						
Instructions de contrôles Radiographie et Ressonage	TM F070	2 j	1 260 €	9-10 Sèvres		



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

octobre 2019

SEPEM	08/10/2019 - 10/10/2019	Angers	http://angers.sepem-industries.com	Salon de l'industrie
AIRTEC	14/10/2019 - 16/10/2019	Munich (Allemagne)	http://airtec.aero/	Salon international des fournisseurs de l'industrie aérospatiale
INTERNATIONAL SIMULATION DAYS !	15/10/2019 - 17/10/2019	Sophia Antipolis	http://tisd2019.transvalor.com	User Meetings de FORGE®, COLDFORM® & THERCAST®, DIGIMU®, TRANSWELD®, REM3D®
CONGRÈS GAZELEC	15/10/2019 - 17/10/2019	Paris	https://congresgazelec.com/2019/	Fournisseur d'énergie
RENDEZ-VOUS CARNOT	16/10/2019 - 17/10/2019	Paris	www.rdv-carnot.com	Rendez-vous de la R&D pour les entreprises
CONGRÈS ARTS ET MÉTIERS	21/10/2019 - 26/10/2019	Shangai (Chine)	congres.art-et-metiers.fr	Congrès organisé par Arts et Métiers Alumini
SIANE	22/10/2019 - 24/10/2019	Toulouse	www.salonsiane.com	Salon de l'Industrie du Futur

novembre 2019

5° SYMPOSIUM 3D	01/11/2019	Charleville-Mesières	http://www.platinum3d.com/fr/	Fabrication additive métallurgie
ICCME 2019	08/11/2019	Krakow, Poland	https://iccme.foundry-conference.com/	International Conference of Casting and Materials Engineering



- 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 CIFORGE (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



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



LA TECHNOLOGIE DE
FONDERIE DE DEMAIN

Etes-vous prêts

un monde plus coloré?



ECOCURE BLUE pour plus de protection pour l'environnement et pour les employés



En choisissant ECOCURE BLUE, le système de résine boîte froide exempt de produits classés dangereux dans la partie 1 (au regard de la réglementation CLP), vous vous engagez clairement dans la protection de vos employés et de l'environnement. Le nouveau système de résine réduit les émissions de COV, de BTX, de phénol et de formaldéhyde dans les process de fonderie ainsi que la teneur de phénol dans le sable recyclé. En même temps, ce nouveau système égale en performance les systèmes actuellement sur le marché au regard de la réactivité, des caractéristiques mécanique set des résultats sur pièces.

Nos experts sont à votre disposition

Tel.: +33-2-32525027

E-Mail: info.france@ask-chemicals.com

www.ask-chemicals.com/beyondtomorrow

ASKCHEMICALS
We advance your casting

