

LA REVUE

# forge et fonderie

MARS | 2020

N°21



**Au sommaire**

**7** Les techniques innovantes de contrôle non destructif appliquées à la Forge

**14** Prédiction du comportement des matériaux métalliques

**26** Dossier : FABRICATION ADDITIVE SABLE





**Votre partenaire  
maintenance et usinage**

## Solutions & Services pour l'Industrie

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



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

# Sommaire

N° 21/2020



## EDITORIAL

- 5** Formation continue forge fonderie :  
2020, l'année de la nécessaire adaptation des outils



## TECHNIQUE

- 7** Les techniques innovantes de contrôle non destructif  
appliquées à la Forge
- 14** Prédiction du comportement des matériaux métalliques



## Dossier : FABRICATION ADDITIVE SABLE

- 26** Fabrication additive sable
- 27** Démonstrateur de la fonderie Boisson
- 31** Démonstrateur de la fonderie SRI
- 34** Analyse des sables de fonderie
- 37** La solution globale pour fabriquer des pièces  
de fonderie de qualité dans des délais optimisés



## FORMATION

- 40** Quand le lycée Gustave Eiffel d'Armentières  
ouvre ses portes aux fondeurs !

## VIE DE LA PROFESSION

- 42** Hommage à Jacques DEGUY
- 43** Réunions territoires
- 46** Un nouveau responsable des relations  
avec les entreprises adhérentes  
de la Fédération Forge Fonderie.



## AGENDA

- 47** Nos formations 2020
- 49** Les rendez vous de la profession



# CHAQUE JOUR, NOUS CONTRIBUONS A LA FABRICATION D'INNOMBRABLES PRODUITS

En veillant à ce que suffisamment de matière première puissent être traitées grâce à nos produits et l'aide de nos experts.



Les pièces moulées sont incontournables dans la construction d'équipements et de corps de pompe pour l'industrie pétrochimique.

Les fonderies peuvent s'appuyer sur un partenaire solide, porteur de solutions innovantes, de technologies efficaces et de produits de la plus haute qualité depuis plus de 100 ans. Nous vous permettons également de bénéficier de l'expertise de nos ingénieurs spécialisés en fonderie partout dans le monde.



**FOSECO. Your partner to build on.**

**VESUVIUS**

Abonnez-vous dès à présent à notre newsletter sur [www.foseco.fr](http://www.foseco.fr)

[www.foseco.fr](http://www.foseco.fr) | [info.france@foseco.com](mailto:info.france@foseco.com)





# Formation continue forge fonderie : 2020, l'année de la nécessaire adaptation des outils

Plantons le décor.

D'une part, la loi du 5 septembre 2018 *pour la liberté de choisir son avenir professionnel* qui a très profondément reconfiguré les acteurs et les règles du jeu de la formation continue, conduisant notamment à une sévère baisse des possibilités de financement de ces actions.

D'autre part, les entreprises de forge et de fonderie qui, à l'instar de l'industrie en général, sont toujours plus confrontées à d'importantes difficultés de recrutement, et de maintien en leur sein, de collaborateurs suffisamment bien formés à leurs process et à leurs évolutions pour répondre efficacement aux besoins des marchés clients.

Telles sont les conditions dans lesquelles, parallèlement à sa propre restructuration, menée pour coller aux réalités économiques du secteur, la Fédération Forge Fonderie a souhaité engager une réflexion sur les outils de formation aux services des forges et des fonderies, spécialement les outils de formation continue et plus spécifiquement encore, sur l'association A3F (Association de Formation Forge Fonderie), son adéquation aux besoins et son éventuelle évolution.

Cette association qui n'est autre que FOPERFIC, l'historique bras armé des Fondateurs de France pour la formation continue, renommé A3F depuis 2009, est l'outil que les professions se sont donné pour répondre à leurs besoins en termes de formation continue de leur personnel. La question se posait donc légitimement de savoir si cette structure, ses moyens et son offre demeuraient pertinents en l'état de la révolution du contexte et des besoins des entreprises.

Un état des lieux, lancé en 2018, sous le pilotage de la Fédération Forge Fonderie, a conduit au constat que l'évolution du modèle était impérative afin d'assurer la pérennité d'une offre jugée pertinente et adaptée par les fonderies, les forges et leurs clients mais aussi sa conformité aux nouvelles exigences issues de la réforme de la formation professionnelle.

C'est dans ces conditions que les instances d'A3F, dont sont notamment membres la Fédération Forge Fonderie, le CTIF, l'École Supérieure de Fonderie et de Forge et l'ATF, ont décidé de mettre l'outil en ordre de marche pour faire face aux nouveaux enjeux en matière de formation.

Comme dans la plupart des secteurs industriels, c'est ainsi désormais le Centre Technique qui porte les activités de

formation continue au bénéfice des professions, cette décision opérant une rationalisation et permettant une optimisation des moyens mis au service de cette offre.

Dans ce cadre, c'est donc aussi maintenant au CTIF d'être en charge de la mise en place et du respect de l'ensemble des procédures, certification etc..., tant en termes d'expertise technique que pédagogique ou qualité, d'une exigence jusque-là inédite, imposées par la réforme de 2018, ces procédures, certifications etc... étant seules de nature à permettre aux professions de la forge et de la fonderie d'avoir encore demain un organisme de formation dédié répondant aux stricts standards du nouveau mode de la formation.

Simultanément, il a été confirmé aux prestataires historiques, tel ATF, qu'ils pourront naturellement bénéficier de l'accès à ce nouveau monde, accès que seuls la taille et les moyens de CTIF vont permettre de ménager, pour continuer à commercialiser leurs prestations et ce, à des conditions tarifaires qui, eu égard à l'historique de la relation et à l'exclusivité réservée, seront très sensiblement meilleures que celles qu'ils pourraient espérer du marché, à supposer qu'ils puissent remplir seuls les conditions pour y avoir désormais accès.

Enfin, cette évolution s'est accompagnée de la création au sein de CTIF d'une structure de suivi de la mise en place de l'activité, des moyens consacrés et de l'offre qui, par sa composition (membres du conseil d'administration du CTIF, d'une part, et représentants de la Fédération Forge Fonderie, d'autre part) et son pilotage (par la DRH d'un groupe adhérent à la Fédération Forge Fonderie), assure la supervision effective, pragmatique et opérationnelle de l'activité formation de CTIF par les professions.

C'est donc assurées de l'existence pour aujourd'hui et demain d'un outil de formation performant et aux standards requis, d'une offre de formation dédiée et pertinente, que fonderies et forges peuvent affronter les défis résultant de l'évolution actuelle de nombre de leurs marchés.



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



ÉCOLE SUPÉRIEURE  
DE FONDERIE ET DE FORGE

Vous connaissez la qualité  
de notre formation et  
**nous avons encore autant**  
**BESOIN**  
de votre  
**SOUTIEN**

## Le mode de versement de la **taxe d'apprentissage 2020** **a changé !**

**Avec le solde de votre taxe** (anciennement hors quota)  
vous contribuez activement à :

- **Assurer** le financement des formations de l'ESFF
- **Pérenniser le savoir-faire** des fonderies et des forges françaises
- **Disposer de moyens** informatiques de conception et de calcul indispensables pour le développement de pièces
- **Réaliser** des actions de communication dynamiques et attractives auprès des écoles et IUT pour un recrutement plus important et de qualité





# 25%

du budget  
de l'École est  
constitué  
par la taxe  
d'apprentissage  
hors quota

**COMMENT  
REVERSER**  
le solde de votre  
taxe d'apprentissage  
à l'école

Pour toute  
information,  
contactez-nous  
au **01 55 64 04 40**  
[contact@esff.fr](mailto:contact@esff.fr)



44 av. de la Division Leclerc  
92310 Sèvres



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

**ATTENTION !** la part réservée au financement reste inchangée (0,68%). Celle réservée au financement direct des écoles passe de 23 à 13% de la taxe.

**Aujourd'hui cette ressource est indispensable pour exister et durer**

Près de **90 apprentis** suivent actuellement le cycle de formation ingénieur de l'ESFF. Quelques ingénieurs diplômés suivent tous les ans la formation de l'**année de spécialisation**, formation d'origine de l'école.

## Les formations à l'ESFF

### Diplôme d'ingénieur en Fonderie et Forge

- en apprentissage ouvert aux BAC+2 et licences
- en formation continue

### Année de spécialisation avec un Certificat professionnel d'Expert en conception et production de produits de fonderie et de forge (code NSF 223)

- en statut étudiant ouvert aux ingénieurs diplômés

## Du nouveau pour verser votre taxe d'apprentissage 2020 !

Vous avez jusqu'au

**31 mai 2020**

pour verser **directement** le solde de votre taxe sous le libellé TA ESFF-2020 soit :

**Par chèque  
à l'ordre de l'ESFF**

### Par virement bancaire

IBAN : FR76 3000 3040 2500 0503 1 404 070  
BIC Adresse SWIFT : SOGEFRPP

**Vous recevrez  
à réception, une attestation  
justifiant du versement**



# LE CONSTRUCTEUR SW IMPLANTE SA FILIALE EN FRANCE

Connu essentiellement des spécialistes, le constructeur de centres d'usinage horizontaux multibroches a décidé d'implanter sa filiale en France, pour mieux servir ce marché.



Régis ALEXANDRE  
Président

Le constructeur SW veut faire de la France un marché correspondant à sa progression, constante dans le reste du monde industriel.

En 2000, SW employait 212 personnes, et réalisait 56 millions d'euros de chiffre d'affaires. En 2018, les 1 018 salariés de SW, dont 285 travaillent dans neuf filiales à travers le monde, ont réalisées près de 400 millions d'euros.

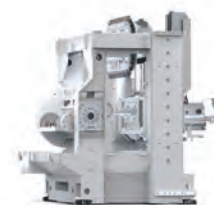
La mission de la nouvelle filiale SW France consiste à mettre en avant ces arguments technico-économiques, à étudier les solutions les mieux adaptées aux besoins divers, à suivre les machines déjà en place et assurer un SAV de proximité en France, Belgique et Suisse francophones.

« Grâce à SW France, nous devons conforter et amplifier cette présence », souligne Régis ALEXANDRE, le

responsable de la filiale française du constructeur. Le choix de l'implantation aux portes de Lyon montre déjà la volonté du groupe de s'installer au cœur de la première région mécanicienne de France.

L'équipe SW France est presque au complet. Son équipe commerciale de 3 personnes, dont un ingénieur projet chargé des études, permet de répondre aux différentes demandes de nos clients : idées innovantes dans la production de pièces, études et analyses des temps de cycles, propositions des systèmes de prises de pièces et des outils de production. L'équipe SAV basée dans les locaux de SW France est constituée d'un coordinateur et une assistante pour répondre non seulement aux demandes de pièces détachées, d'interventions sur site et d'optimisation des machines en service. « 2 techniciens SAV complètent cette équipe et nous sommes à la recherche active d'un 3e. Nous pourrions toujours demander l'assistance de nos collègues allemands si des besoins de main d'œuvre complémentaires sont nécessaires mais le but de cette équipe multidisciplinaire est de répondre aux urgences et en Français » rajoute Régis ALEXANDRE. La gamme des CU horizontaux multibroches du constructeur allemand SW mérite une attention particulière. **Une conception de machines devenue un modèle économique.** Conçus avec une structure box in box intégrale, ces centres de haute précision sont aussi très productifs, tout en restant flexibles.

C'est au cœur d'un véritable cube monobloc qu'évoluent à la fois les broches porte-outils et le double support pivotant qui permet le chargement des pièces en temps masqué. Celui-là minimise la flexion et assure parfaitement la transmission de puissance de coupe entre chaque outil coupant et chaque pièce à usiner. Parfaitement guidée dans son cadre box in box, l'unité 3 axes de support de broches offre une rigidité optimale et une précision maximale. En fonction du type de machines, les axes Z des supports de broches peuvent être indépendants, permettant un réglage d'outil facile. Configurables avec 1 à 4 broches d'usinage, les modèles BA sont dotés de moteurs couples et vis-à-billes, ou de moteurs linéaires pour les modèles BA W. À choisir en fonction des matériaux à usiner, amagnétiques ou non. Positionné au-dessus des porte-broches pour limiter la surface au sol, le magasin d'outils modulaires peut accepter jusqu'à 280 outils. Une cellule robotisée de chargement-déchargement peut augmenter considérablement l'autonomie de ces machines. L'accessibilité de la machine sur les 4 cotés est facile et dégagée. La conception autorise aussi une mise en ligne cohérente de plusieurs machines.







Fan ZHANG  
Ingénieur  
CND au CETIM



Patrick BOUTEILLE  
Ingénieur  
CND au CETIM



Benoit DUPONT  
Ingénieur  
CND au CETIM

## Les techniques innovantes de contrôle non destructif appliquées à la Forge

Dans les différents procédés de transformation des métaux tels que la forge, un certain nombre de défauts « matière » (en distinction avec des défauts géométriques ou dimensionnels) sont susceptibles d'apparaître. Nous les avons classés en trois catégories qui conditionnent fortement le choix des méthodes de contrôle non destructif à déployer.

Catégorie	Nature de défauts	Stade d'apparition
Défauts surfaciques	Fissures externes, replis, incrustation de calamines et de bavures, pailles, bavures, rides/gerçures, marques de poinçon, arrachement dans l'alésage, traces d'usure de l'outil, rayures, décohésion, arrachement, aspect en surface, oxydation	Selon la nature, apparition possible à tous les stades : élaboration, déformation plastique, préparation de surface ou/et traitement thermique, usinage ébauche, contrôle qualité et stockage
Défauts volumiques	Retassures, ségrégations, inclusions, fissures internes, manques de matière	Idem
Caractéristiques mécaniques ou métallurgiques	Elasto-plastiques, dureté, contraintes résiduelles, phases en présence, décarburation en surface, taille de grain, profondeur de traitement de surface	Elaboration de coulée, Traitement thermique

Jusqu'à présent, les principales méthodes de contrôle utilisées dans l'industrie de la Forge restent assez traditionnelles :

- Analyses destructives par prélèvement, contrôle par radiographie ou par ultrasons pour détecter les défauts volumiques,
- Contrôle visuel, contrôle par magnétoscopie, par ressuage, ou pour quelques rares cas par Courants de Foucault pour détecter des défauts surfaciques ou d'aspect
- Essais mécaniques et analyses destructives par prélèvement pour caractériser les propriétés mécaniques et métallurgiques des matériaux

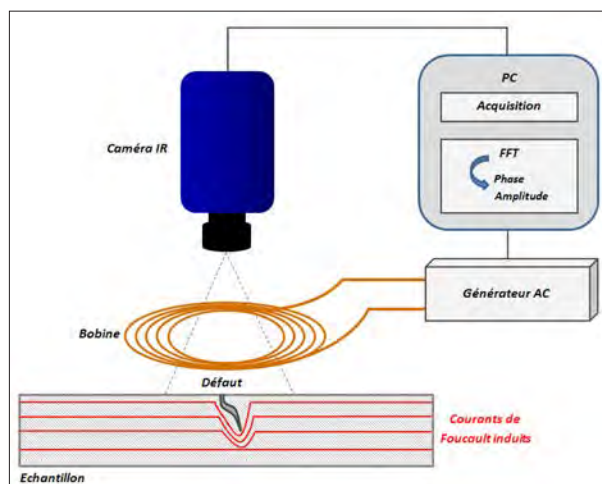
Pour gagner en qualité, en productivité et le tout dans le respect de l'environnement et des conditions de travail des opérateurs, les méthodes innovantes en contrôle non destructif deviennent de plus en plus incontournables. Surtout lorsqu'il s'agit de faciliter la mise au point d'un nouveau procédé, détecter les défauts le plus tôt possible dans le cycle de fabrication, anticiper les dérives de production, et enfin prévoir les éventuelles défaillances du produit / process.

Pour certaines méthodes innovantes, des solutions existent sur le marché depuis déjà plusieurs années. Pour d'autres, elles sont en voie de développement proche de l'industrialisation. Un dénominateur commun de ces méthodes est qu'elles sont plus précises, rapides, propres, traçables, automatisables ou intégrables dans les lignes de production.

En 2017, la revue Forge et Fonderie a publié un dossier spécial CND où un certain nombre de méthodes innovantes ont été présentées. Nous allons dans cet article compléter ce dossier en présentant trois méthodes innovantes pour respectivement les trois catégories de défauts de forge citées ci-dessus : la thermographie infrarouge inductive pour les défauts surfaciques, les ultrasons haute définition pour les défauts volumiques, et les ultrasons rétrodiffusés pour le contrôle de la trempe superficielle.

## Thermographie infrarouge inductive pour détecter les défauts surfaciques

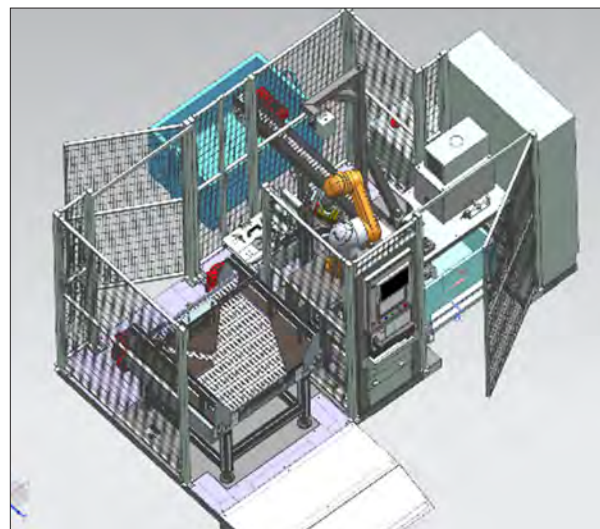
La méthode consiste à « chauffer » la pièce à contrôler à l'aide d'un inducteur. Celui-ci crée des courants de Foucault à la surface de la pièce. Ces courants génèrent à leur tour un échauffement par effet Joule. La présence d'un défaut perturbe en plus la distribution de ces courants induits, créant une concentration de la densité de puissance autour du défaut. Cette concentration se traduit par des surchauffes locales au niveau des défauts, qui sont détectées par la caméra thermique. Ce principe est illustré dans la figure ci-dessous.



Un grand nombre d'étude réalisées au CETIM ont permis de démontrer que cette méthode permet de mettre en évi-

dence des défauts de surface débouchants ou sous-jacents sur produits métalliques, magnétiques ou non (replis de forge, tapures de trempe, criques de rectification, défauts de soudage...). L'absence de produits chimiques et l'automatisation possible du contrôle et de la sanction la rendent particulièrement intéressante pour tout contrôle en production en alternative au contrôle par ressuage et par magnétoscopie.

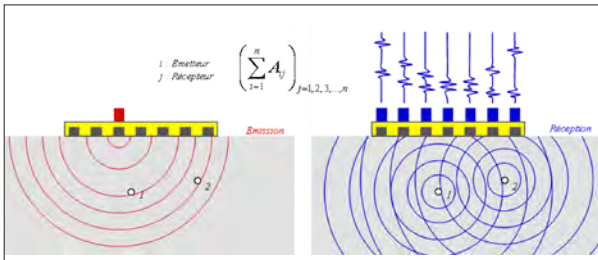
En 2019, la méthode arrive à sa maturité puisqu'un ilot robotisé, développé par le CETIM, a été installé dans l'usine de NTN Transmissions Europe à Crézancy pour le contrôle automatique de tulipes de transmissions. Un cycle de contrôle de 7 secondes par tulipe est atteint, fonctionnant 24h/24, avec la garantie de détecter 100% des replis sur ces pièces forgées et d'assurer une sanction sans l'intervention d'un opérateur grâce à un traitement d'images, comme le montre la photo ci-dessous.



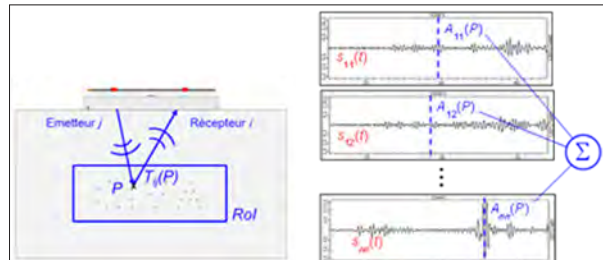
## Les ultrasons haute définition pour détecter et caractériser les défauts volumiques

C'est une méthode de contrôle par ultrasons multiéléments (soit une sonde de N éléments) associant un algorithme de reconstruction d'image FTP (ou TFM en anglais) – Focalisation en Tous Points. Elle fonctionne en deux temps : une étape d'acquisition de N x N signaux obtenus avec à tour de rôle un élément en émetteur et tous les autres éléments en récepteurs, puis une deuxième étape de post-traitement des signaux en appliquant les lois de retard adaptés à chaque point de calcul. Les figures ci-dessous montrent ces deux étapes.





Acquisition des signaux

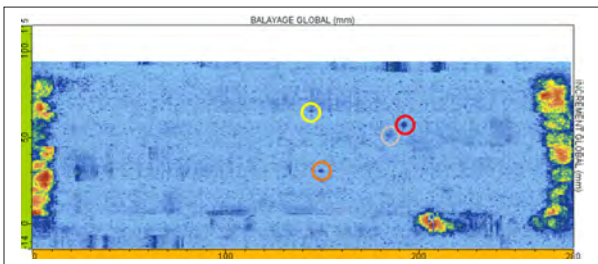


Reconstruction d'image FTP

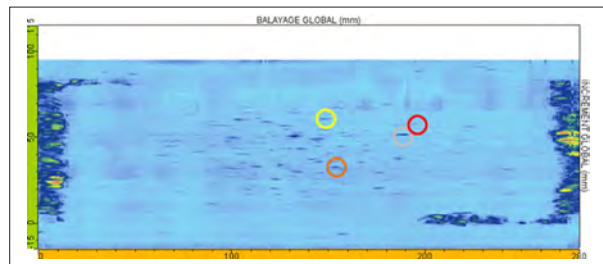
Cette fonctionnalité, à l'origine gourmande en temps de calcul, est aujourd'hui implantée dans plusieurs systèmes industriels capables de reconstruire en temps réel les images de haute définition. Elle offre une résolution hautement supérieure aux images classiques ; la position et la taille des défauts sont donc plus proches de la réalité.

Un premier exemple d'une pièce moulée présentant des porosités en volume en comparant l'imagerie classique multiéléments (balayage électronique) et l'imagerie FTP :

- Image vue dessus en représentation C-Scan

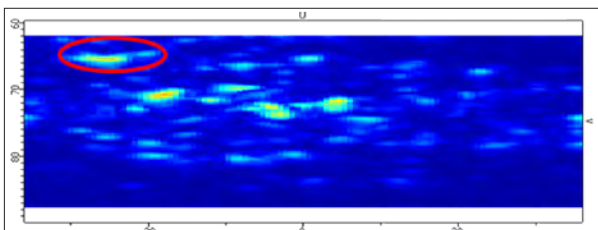


Balayage électronique

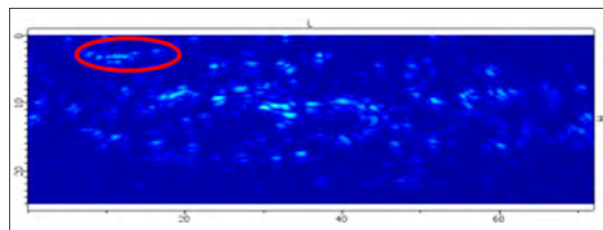


FTP

- Image vue en profondeur B-Scan :

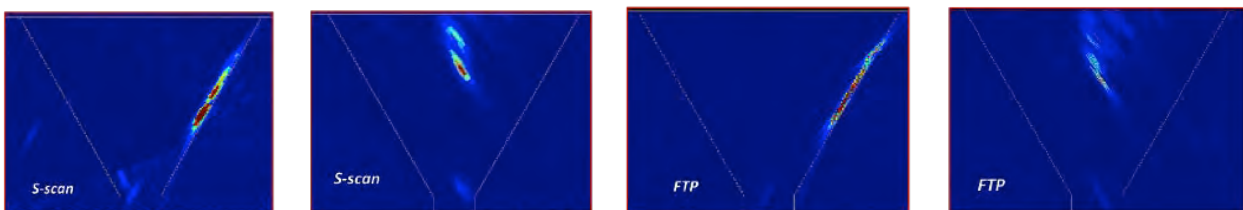


Balayage électronique



FTP

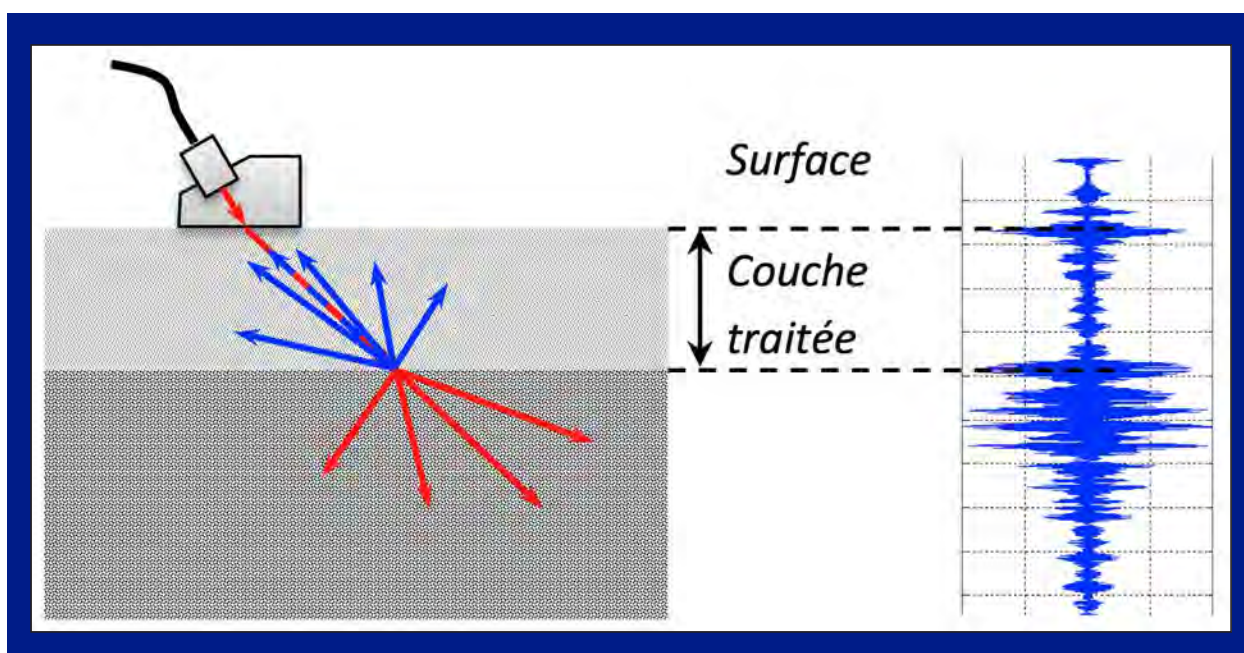
Une autre comparaison dans le cas de défauts (manque de fusion à gauche et fissure à droite) dans un assemblage soudé :



## Les ultrasons rétrodiffusés pour évaluer la profondeur de trempe superficielle

Un acier trempé superficiellement présente un gradient de microstructure où la taille de grain est très différente entre la surface durcie et celle à cœur. Lorsque les ultrasons pénètrent dans le volume, la diffusion des ondes ultrasonores sera plus ou moins importante selon les zones traversées ;

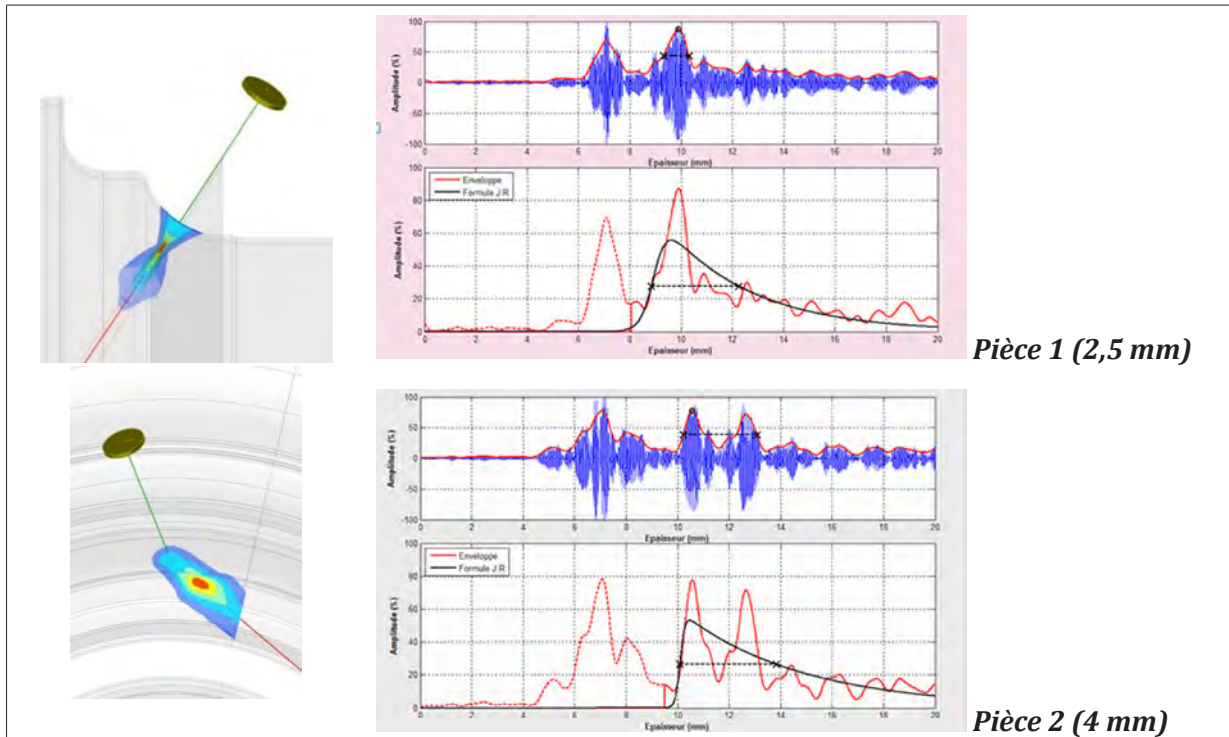
elle est faible dans la couche trempée et forte à cœur dans une structure plus grossière. L'analyse du signal rétrodiffusé permet alors de déterminer la profondeur de trempe sans découper la pièce.



Ce contrôle peut être fait aussi bien avec une sonde mono élément qu'une sonde à multiéléments. La première est plus simple dans la mise en œuvre et la seconde permet dans certains cas une plus grande capacité de contrôle en gagnant en qualité d'image et couverture de zone.

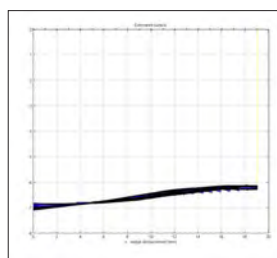
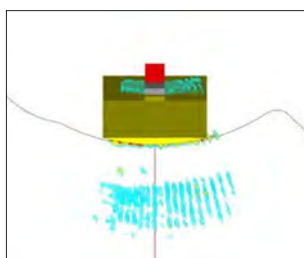
Un exemple de contrôle avec une sonde monoélément est donné ci-dessous. Grâce à un couplage par immersion locale, la profondeur de trempe sur la piste de roulement d'un moyeu à rayon de courbure faible a pu être estimée par ultrasons avec une bonne précision (2 mesures ci-dessous pour deux profondeurs trempées différentes).



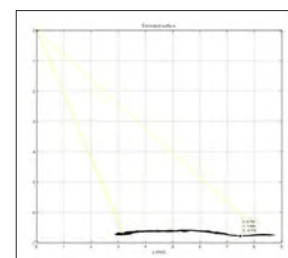
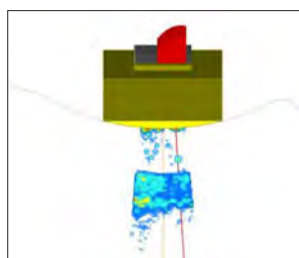


Le deuxième exemple utilise une sonde à multiéléments pour contrôler la profondeur de trempe sur une piste de couronne :

- A gauche, un balayage électronique angulaire circonférentiel est associé à un déplacement mécanique radial
- A droite, le balayage électronique est radial tandis que le déplacement est circonférentiel



Vue radiale



Vue circonférentielle

D'autres sujets sont également en cours d'étude actuellement au CETIM pour la profession FORGE, comme par exemple :

- Automatisation de l'analyse des images et de la sanction du contrôle par magnétoscopie , à l'aide des algorithmes évolués d'intelligence artificielle (machine learning)
- Détection des défauts par émission acoustique en cours de forgeage
- Contrôle géométrique et d'aspect par vision
- Contrôle en production de la dureté et d'autres propriétés mécaniques
- Outils instrumentés

Nous ferons leur présentation dans les prochains numéros de la revue.

# PLUS DE PERFORMANCE EN FONDERIE AVEC LA SIMULATION NUMÉRIQUE

**Proposer des solutions de simulation en fonderie à la fois accessibles, fiables et précises, tel est l'engagement de Transvalor vis-à-vis des fondeurs. La société apporte son expertise et accompagne ses clients avec des solutions toujours plus performantes afin de tirer le meilleur profit d'une utilisation intelligente du numérique. Le point avec Stéphane Andrietti, Directeur Marketing & Communications.**



Stéphane ANDRIETTI

## **Le numérique implique des mutations profondes dans le monde de l'industrie. Quelles sont ces tendances ?**

Au-delà du discours habituel autour de l'industrie 4.0, nous percevons une tendance forte vers le 'Full Digital'. Nos clients ont besoin d'une démarche intégrée. Ils recherchent aussi des solutions digitales permettant de simuler toute la chaîne de fabrication. En effet, les caractéristiques intrinsèques du produit final sont, plus que jamais, conditionnées par le process de fabrication.

Toutes nos recherches vont clairement dans ce sens avec pour direction stratégique, la capacité de pouvoir associer 'Simulation Process' et 'Simulation Produit'. Le but est de valider le dimensionnement des

pièces en tenant compte des propriétés inhérentes au process de fabrication.

## **Quels sont les axes que vous privilégiez pour accompagner vos clients dans ce sens ?**

Nous aidons nos clients à répondre au marché le plus rapidement possible tout en produisant des composants en toute fiabilité et au meilleur coût. Il s'agit de réaliser en toute sécurité des pièces exemptes de défaut ce qui est essentiel notamment pour le monde de l'aéronautique et du nucléaire. En parallèle, nous plaçons la performance des pièces et leurs caractéristiques métallurgiques au cœur de nos préoccupations. Ainsi, nos outils à destination des fondeurs embarquent des modèles propres à prédire les ségrégations, les transformations de phase et les phénomènes de croissances des grains. Enfin, nous suivons aussi avec beaucoup d'attention les défis industriels récents dont l'électrification des motorisations et son impact sur la production de notre clientèle. Nos logiciels de simulation sont aussi là pour soutenir nos clients dans ce défi majeur qu'est l'électro-mobilité.

## **Le début de l'année sera marqué par le lancement de la prochaine version de votre logiciel THERCAST®. Dites-nous en plus.**

Ce logiciel de simulation est destiné au secteur de la fonderie. Il permet de simuler le procédé depuis la coulée initiale jusqu'à la fin de solidification. À l'origine, ce logiciel a été utilisé principalement dans

le secteur de la sidérurgie pour étudier les procédés de coulée de lingot et de coulée continue avec comme clientèle des sociétés telles que ArcelorMittal, Aperam, Ascometal, ABS, Nippon Steel, Gerdau ou encore Kalyani Steels.

Aujourd'hui, nous visons le marché des pièces de fonderie. Le but est de simuler tous les procédés et technologies de coulée parmi lesquels le moulage sable ou coquille, la fonderie sous pression, la fonderie à la cire perdue... En termes de caractéristiques principales, THERCAST® est un logiciel dit « éléments finis ». Il s'appuie aussi sur une technique de remaillage dite AAA (Automatique, Adaptatif, Anisotropique).

Il simule à la fois :

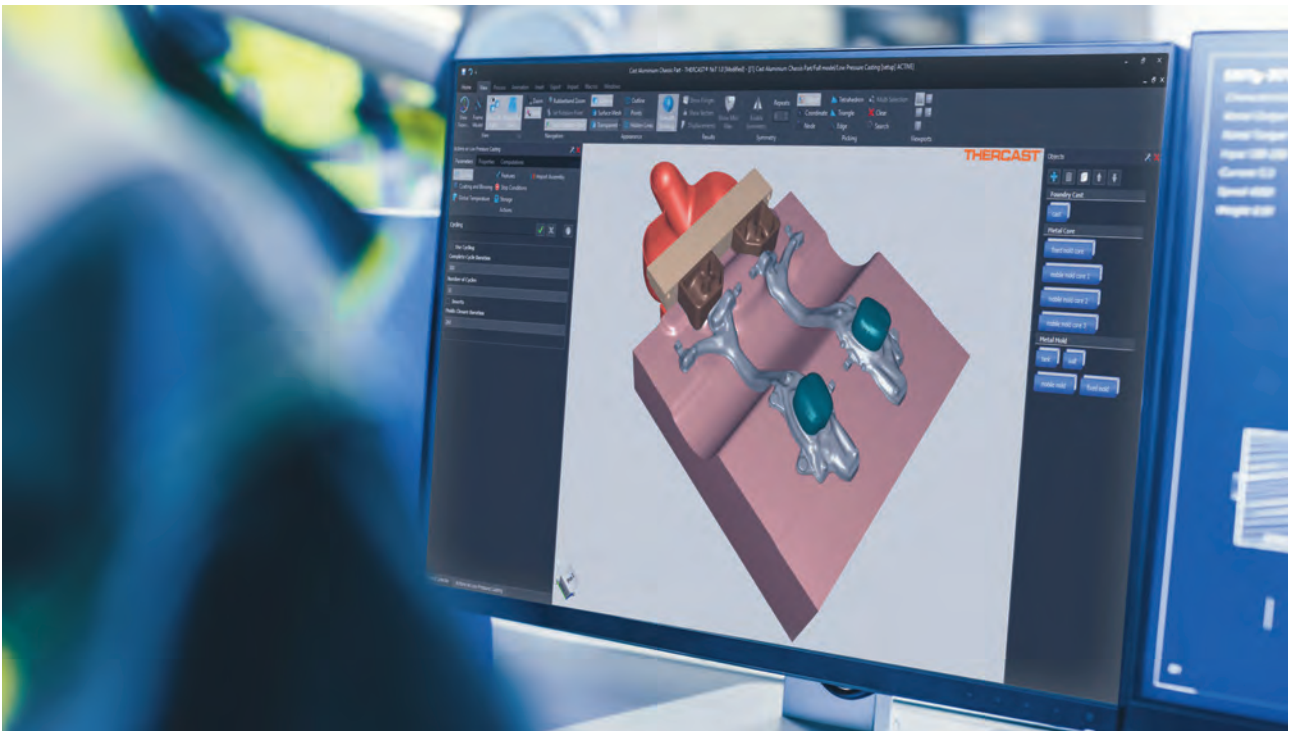
- La partie « Mécanique des Fluides » c'est-à-dire l'écoulement du métal liquide avec la prise en compte des effets de turbulence ;
- La partie « Mécanique du solide » c'est-à-dire la capacité de calculer les déformations et les contraintes qui se créent dès que la solidification est entamée.

## **Quelles sont les atouts de la nouvelle version THERCAST® NxT 2.0 ?**

Cette version sera modulaire avec les différentes possibilités d'options suivant le procédé de coulée ou encore le niveau de fonctionnalités attendu par l'utilisateur. En outre, les fondeurs pourront bénéficier de plusieurs nouveautés telles que :

- Des modèles de simulation propres à chaque technologie de moulage. Ainsi, les paramètres «





métiers» nécessaires à la simulation seront prédéfinis ou pourront être introduits aisément par l'utilisateur ;

- Le pilotage du cycle de coulée pourra être basé sur une température maximale du métal. À ce titre, le logiciel fournit au fondeur le temps d'éjection (temps à partir duquel la pièce peut être éjectée). Il pourra ainsi optimiser le temps de cycle et accroître la productivité ;
- Une fonctionnalité dédiée pour obtenir facilement la géométrie d'une pièce à partir du négatif du moule (application en moulage coquille). Et inversement, l'obtention d'un moule à partir de la géométrie d'une pièce pour des applications en fonderie sable ou à la cire perdue (création de la carapace autour de la grappe de pièces) ;
- Pour la fonderie basse ou sous pression, la prise en compte de toutes les phases du cycle de pression : la phase initiale de remplissage jusqu'aux attaques, le remplissage de la cavité avec une rampe de pression et le maintien final en pression pour compenser le retrait.

### En quoi le logiciel THERCAST® se différencie-t-il des solutions existantes ?

Le logiciel assure une prise en compte, beaucoup plus précise des

phénomènes physiques et métallurgiques. À tout instant du procédé et en tout endroit de la pièce, le logiciel détermine l'état du métal (liquide, pâteux ou solide) et il applique une 'physique locale' propre à chaque état.

Le logiciel ne dissocie pas la phase de remplissage (état liquide) et la phase de solidification (état solide). Toutes les transformations liquide/pâteux/solide sont calculées de manière combinée, quel que soit l'instant où elles surviennent. Ainsi, THERCAST® offre une précision et une qualité accrue dans la prédiction des écoulements de métal et des défauts pouvant survenir (retassures, porosités, criques, malvenues, ségrégations...). De même, les interactions entre le métal et les constituants du moule (broches, inserts, noyaux) sont aussi prises en compte à tout instant du procédé et en tout endroit. La création de lames d'air est détectée instantanément et les échanges thermiques locaux sont ainsi adaptés dynamiquement.

La particularité du logiciel, c'est aussi l'interopérabilité avec la suite de logiciels Transvalor pour une simulation de la chaîne complète de fabrication :

- THERCAST® et FORGE® pour la forge libre ou le laminage de produits longs ;

- THERCAST® et SIMHEAT® pour le traitement thermique des pièces moulées.

### Et pour conclure ?

Depuis longtemps, nous parions sur l'amélioration continue et nous nous inscrivons dans une logique de veille permanente. Plusieurs actions de R&D sont en cours avec par exemple l'ambition de simuler le procédé de « Lost-Foam » très en vogue dans le secteur automobile. Nous sommes aussi intimement convaincus que travailler dans un écosystème est un vecteur clé pour connaître le plus finement possible nos clients et leurs enjeux. Dans cette optique, Transvalor a été présent au salon Euroguss du 14 au 16 janvier. Et dans la continuité, Transvalor prépare également pour le mois d'avril une journée « TechDay France » où tous les logiciels dont THERCAST® seront en démonstration. ■

### Chiffres clés

- 70 collaborateurs ;
- Plus de 600 clients à l'international ;
- 15 projets de R&D en cours ;

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



Yves GAILLARD,  
Expert Procédés et  
Métallurgie Aluminium,  
CTIF



Sabeur JEDID,  
Ingénieur Projets  
Fabrication Additive,  
CTIF



Guillaume Le BRETON,  
Ingénieur Calcul de  
Structures,  
CTIF



Didier LINXE,  
Responsable Pôle Déve-  
loppement Méthodes &  
Ingénierie Numérique,  
CTIF

## Prédiction du comportement des matériaux métalliques

La prédiction du comportement des matériaux métalliques est étudiée à CTIF (Centre Technique des Industries de la Fonderie) à travers différents groupes de travail et projets collaboratifs. Nous vous proposons ci-après une synthèse des études conduites par les équipes de CTIF dont les principaux objectifs sont :

- L'approche thermomécanique et physique des matériaux,
- L'approche thermodynamique des matériaux (métallurgie numérique)
- L'approche prédictive du comportement en fatigue des produits métalliques, et
- L'approche numérique de la fabrication additive métal.

### I. Approche thermomécanique et physique des matériaux

CTIF anime **différents groupes de travail** qui rassemblent les industriels autour de thématiques métier que sont notamment la fusion, la modélisation des matériaux, des produits et des procédés, les contrôles non destructifs, la sécurité et l'environnement. Dans le domaine de la prédiction et de la modélisation, deux groupes de travail animés par des experts de CTIF portent sur l'étude du comportement des matériaux métalliques, à savoir les groupes de travail *Thermomécanique* et *Numérique Physique*.

#### 1.1. Un groupe de travail dédié à la thermomécanique

Le Groupe de travail *Thermomécanique*, qui rassemble plusieurs industriels et académiques utilisateurs d'outils de simulation en fonderie, a pour but de fédérer les moyens et les compétences de chacun afin de faire progresser les logiciels de simulation et leur mise en œuvre en fonderie. La validation de ces outils passe systématiquement par une comparaison des simulations sur différents outils, et la confrontation à des essais expérimentaux. Les partenaires de ce groupe sont CTIF en tant que pilote, le Lycée Hector Guimard, les Arts et Métiers, l'Université Lyon I, et cinq fondeurs associés.

Les thématiques traitées par le groupe de travail vont de l'analyse thermique des fontes et la corrélation avec les compositions chimiques et l'analyse spectrographique, à la durée de vie des outillages. Les travaux sont aujourd'hui centrés sur les outillages de fonderie sous pression avec un focus sur les méthodes et moyens d'acquisition et d'instrumentation des moules. Un moule d'essais a été conçu, réalisé et instrumenté, pour réaliser des mesures où l'acquisition de données physiques doit permettre de recalibrer les modèles de simulation numérique (Figures 1 et 2, page suivante).





Figure 1 : Moule d'essai de coulée sous pression. Crédit photo : CTIF.

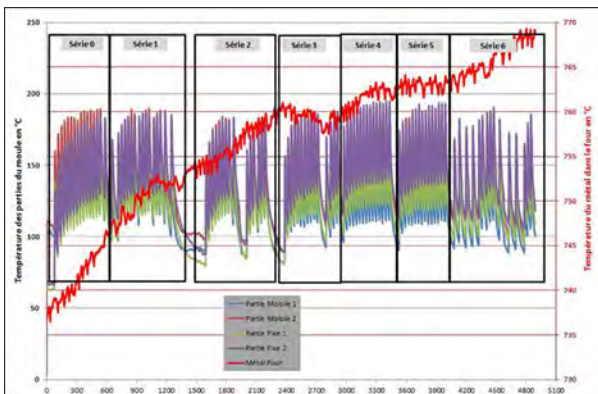


Figure 2 : Courbes des températures relevées dans le moule au cours des essais. Crédit photo : CTIF.

L'outillage d'essai a été conçu de façon à être évolutif pour permettre d'appréhender plusieurs problématiques dont le poteyage, l'évacuation de l'air dans l'empreinte, la thermorégulation...

Les données recueillies ou mesurées via les essais instrumentés sur l'outillage, permettent de recalibrer les modèles de simulation et de mener au sein du groupe de travail, une analyse croisée des réponses de chaque logiciel.

### 1.2. Un groupe de travail dédié à la physique des matériaux

Les objectifs du groupe de travail *Numérique Physique* sont, en parallèle du groupe de travail précédent *Thermomécanique*, l'étude de thématiques plus transversales, notamment autour de la physique des matériaux et de la fonderie

gravité, et leur application dans les logiciels de simulation numérique (FLOW 3D, QuikCAST, ProCAST, THERCAST®, MAGMA). L'enjeu est ici aussi de progresser sur les logiciels de simulation numérique et leur mise en œuvre en fonderie.

Ce groupe de travail rassemble CTIF en tant que pilote, le Lycée Hector Guimard, Les Arts et Métiers d'Angers, l'Université de Lyon, et quatre fondeurs associés.

Après différents travaux successifs sur la génération de base de données avec CompuTherm (avec l'alliage Al-Si7Mg0,3 en particulier), sur l'étude de l'impact de la composition et de la vitesse de solidification, de la coulabilité, et sur la prise en compte des aspects énergétiques de la solidification dans les modèles numériques, les thématiques du groupe de travail ont été réorganisées en septembre 2018 :

- La thématique solidification et les bases de données matériaux sont traitées sous forme de formation (Université Lyon I),
- Les thématiques sur le remplissage sont divisées en différents lots :
  - Éprouvette « Disac » (influence du paramètre rugosité dans les logiciels, optimisation du coefficient d'échange entre le moule et le métal),
  - Plaque trouée (comparaison de l'écoulement du métal entre réalité et simulation),
  - Éprouvette de validation en sable (remplissage de toiles minces en gravité).

La thermique moule acier est étudiée séparément des autres sujets avec un montage dédié (Figure 3).

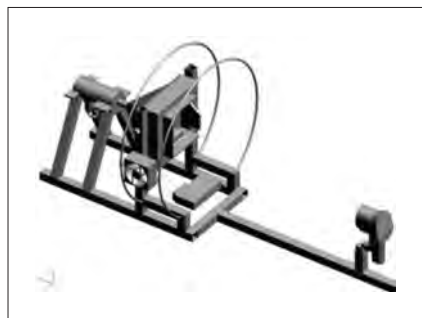


Figure 3 : Banc d'essai thermique (moule métallique). Crédit photo : CTIF.

Dans le cadre de ces thématiques, l'article « *Le recalage des bases de données matériaux* » a été publié dans Metalblog, le blog des experts de la métallurgie (<https://metalblog.ctif.com/>) ; par ailleurs, ces groupes de travail ont été présentés au Forum CTIF lors des METALDAYS 2018 organisés par CTIF en novembre 2018 à Chaville.

## II. Approche thermodynamique amont des matériaux (métallurgie numérique)

Au-delà des logiciels de simulations numériques qui permettent une amélioration continue des opérations de mise en forme des matériaux, il ne faut pas oublier que la fiabilité de ces simulations repose avant tout sur la bonne description du comportement thermo-mécanique des matériaux concernés. Or ce comportement est lui-même conditionné par la microstructure de ces matériaux, et son évolution dans le temps.

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

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

En parallèle de ses travaux sur l'approche thermomécanique et physique des matériaux, CTIF a donc intégré Thermo-Calc® en 2018, avec 3 bases de données dans un premier temps puis dans la base aluminium : les aciers et ferroalliages, les alliages base nickel, les oxydes et laitiers. CTIF envisage l'intégration en 2020 d'une nouvelle base de données sur les alliages à haute entropie.

Performant tant pour l'appréhension des diagrammes d'équilibre, que pour la prédiction des phases à l'équilibre ou hors équilibre (Scheil), Thermo-Calc® permet des gains de temps majeurs pour la compréhension des observations (comportement), le choix de données pour les simulations process appliquées à des cas industriels, l'étude des effets de la composition, et permet des approches diversifiées et très concrètes, allant de la conception de laitier en fonction d'une composition, à la mise en place de plans d'expérience numériques (influence éléments d'alliages ou impuretés), jusqu'à la « conception » de nouveaux alliages et autres perspectives (Couplage avec Matlab/Python).

Pour en savoir plus, voir l'article paru dans le N° 18 de mai 2019 dans *la revue Forge et Fonderie*.

## III. Approche prédictive du comportement en fatigue

Plusieurs projets conduits à CTIF sont centrés sur le comportement en fatigue des produits métalliques. Nous proposons ici une description de ces actions IDEFFAAR (Influence des Défauts de Fonderie sur la Fatigue des Alliages Aéronautiques) et GIGADEF (Fatigue GIGAcyclique à partir de Défauts internes), qui ont reçu le soutien de l'ANR, et le projet CDFAF (Calcul des Défauts de Fonderie Admissibles en Fatigue) soutenu par l'ICEEL.

### III.1. Influence des défauts de fonderie sur la fatigue des alliages aéronautiques

Les défauts de fonderie sont inhérents aux procédés de fabrication, et la compréhension et la prédiction du comportement des systèmes complexes que sont les « structures avec défaut » deviennent nécessaires à la pérennité de l'utilisation des pièces de fonderie dans le secteur aéronautique.

A ces fins, CTIF a été partenaire du projet IDEFFAAR (Influence des Défauts de Fonderie sur la Fatigue des Alliages Aéronautiques)<sup>1</sup> visant l'anticipation de l'influence (combinée ou non) sur les propriétés mécaniques monotones et cycliques des pièces issues de fonderie, des défauts issus du procédé de fabrication, des opérations de traitement destinées à réparer ces défauts potentiels (CIC et soudage TIG), et des conditions spécifiques d'utilisation (fatigue, température...).

Le projet qui a associé CTIF, les Arts et Métiers, l'INSA de Lyon, Ventana Arudy, Safran Transmission Systems et Airbus a eu pour objectifs de :

- Développer un modèle prédictif tant pour le fondeur que pour l'utilisateur,
- Prédire l'impact des défauts sur le comportement en service des pièces en fonction de leur mode de sollicitation,
- Optimiser leur dimensionnement,
- Définir des critères affinés d'acceptation des dits défauts.

<sup>1</sup> : Projet financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) – Convention ANR- 2010-RMNP-016



Deux outillages métalliques ont été conçus et réalisés pour la coulée d'éprouvettes de microstructures comparables et à défauts contrôlés répétables (l'une avec artifice, l'autre par défaut naturel). Les simulations numériques de remplissage et de solidification permettent désormais de prévoir la finesse de microstructure (DAS) ainsi que la présence de défauts de fonderie (retassures, microretassures).

Le projet IDEFFAAR a donc permis de construire des outils numériques pour évaluer la nocivité de défauts de fonderie (retassures et porosités) sur la tenue en fatigue de pièces en aluminium moulé. Le modèle de calcul issu du projet, intégré dans un code de calcul du marché (suite MSC/Software pour CTIF), réalise d'assez bonnes prédictions d'un point de vue qualitatif, seul le calcul des tailles de défauts et des durées de vie en fatigue reste à affiner.

Une meilleure connaissance de l'impact des défauts peut désormais permettre aux constructeurs d'argumenter pour une diminution significative du Casting Factor. Une augmentation ne serait-ce que de 10 % sur les caractéristiques en statique et en fatigue utilisées par les calculateurs pour la définition des pièces, limite d'endurance et de dispersion, permettra d'ores et déjà d'économiser de précieux kilogrammes sur les avions.

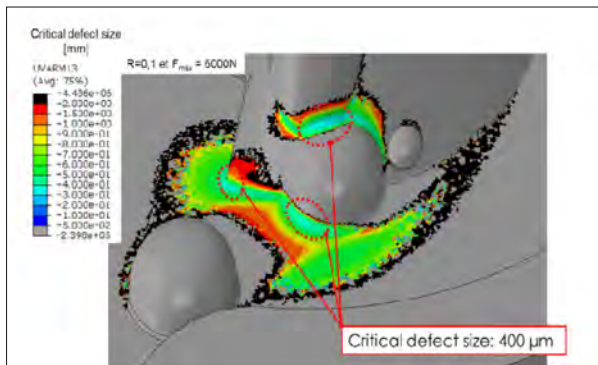


Figure 4 : Calcul de la taille de défaut admissible sur composant industriel pour un chargement complexe avec le critère DSG (Defect Stress Gradient).

### III.2. Développement d'un outil numérique pour prédire l'influence des défauts de fonderie sur la durée de vie en fatigue

Le projet CDFAF (Calcul des Défauts de Fonderie Admissibles en Fatigue) part de ce constat simple que les pièces de fonderie peuvent présenter des défauts dans des zones ciblées : retassures, porosités, inclusions... Ces défauts sont inhérents au procédé de mise en forme et peuvent présenter le risque de générer des ruptures par fatigue sur les pièces mécaniques s'ils sont mal appréhendés. Ce constat peut induire par précaution, un surdimensionnement ou une sur-qualité

sur les produits. Mais existe-t-il un moyen de mieux évaluer l'impact réel de ces défauts potentiels sur la tenue en service ? Est-il possible d'adapter en connaissance les exigences de qualité, par exemple via des dérogations pour des pièces présentant des défauts, si la tenue mécanique des pièces moulées est assurée sur le long terme malgré la présence desdits défauts, et ainsi optimiser les coûts de production ?

#### Un partenariat entre industriels et universitaires pour la création d'un outil numérique.

Le projet CDFAF s'inscrit dans la continuité du projet IDEFFAAR (Influence des Défauts de Fonderie sur la Fatigue des Alliages Aéronautiques) décrit précédemment ; il a pour objectif majeur de caractériser l'influence des défauts de fonderie sur la durée de vie en fatigue des pièces moulées.

Le projet CDFAF est centré sur le développement et la validation d'un outil numérique permettant d'identifier, en tout point des pièces, la taille maximale des défauts admissibles sans causer la rupture de la pièce par fatigue. Pour ce faire, il a été nécessaire en premier lieu d'identifier un critère de fatigue multiaxial suffisamment adapté et polyvalent.

#### Des formulations mathématiques au service d'un modèle numérique.

C'est le critère de Crossland qui a été choisi [1], critère issu de celui, plus répandu, de Von Mises. Il se base notamment sur le calcul du second invariant du déviateur des contraintes, sur la contrainte hydrostatique maximale ainsi que sur deux paramètres matériau identifiables empiriquement.

On observe cependant, en utilisant ce critère, une surestimation des contraintes si la structure présente des entailles ou des inclusions. C'est la raison pour laquelle un second critère est rentré en jeu : le critère du gradient, ou critère DSG [2]. Celui-ci peut être utilisé pour un matériau comportant un défaut. Il est basé sur la formulation de Crossland et utilise le gradient de contrainte autour du défaut pour décrire l'influence du défaut sur la limite de fatigue. Il permet ainsi de lier le chargement, la durée de vie et la taille du défaut admissible. La contrainte équivalente a été modifiée par une fonction du gradient de contrainte autour du défaut.

À l'aide de ces critères, une routine en Fortran utilisable dans les outils MSC Software (Marc, Patran) a été développée. A partir du calcul du tenseur des contraintes en chaque nœud du modèle éléments finis, la routine va calculer, pour un chargement et une durée de vie donnés, la taille de défaut admissible en cet endroit. Il est alors possible de post-traiter des résultats dans Patran, puisque les données obtenues permettent la création d'une cartographie des défauts admissibles dans la pièce étudiée (Figure 5, page suivante).

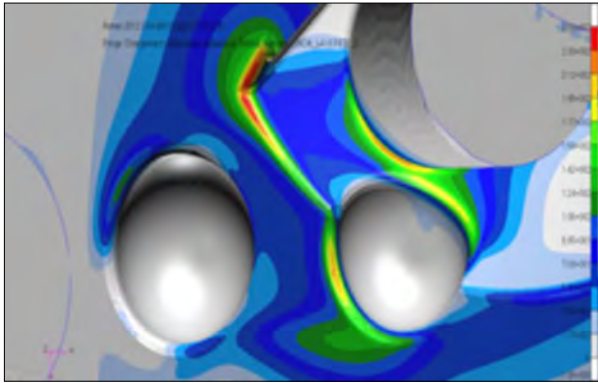


Figure 5 : Cartographie des tailles de défauts admissibles.

**De l'importance de la validation des outils numériques.**

Cet outil a été validé dans un premier temps sur des exemples simples (barre en traction, barre soumise à la gravité) en comparant les résultats obtenus numériquement avec les valeurs analytiques attendues en utilisant les théories d'Eshelby [3] [4]. Dans un second temps, une application de type industrielle a été mise en place afin de tester la robustesse de l'outil numérique sur une pièce géométriquement plus complexe. Là encore, la corrélation étant assurée, l'outil a pu être validé.

Néanmoins, une phase de calibration du modèle a été nécessaire : en effet, on observait une trop grande dépendance des spécificités géométriques sur les résultats obtenus, ceux-ci étant trop conservatifs par rapport à des données constatées sur les courbes de Wöhler correspondantes. En modifiant le critère DSG « local » pour en faire un critère « non local », via une détermination par éléments finis du gradient de contraintes autour du défaut, la prise en considération de celui-ci est mieux assurée et permet d'obtenir des résultats plus proches de la littérature.

**La mise à l'épreuve sur des exemples industriels : une étape indispensable au développement.**

Une fois cette optimisation de l'outil réalisée, il convenait de l'éprouver sur un démonstrateur réalisé par CTIF afin de confronter les prédictions réalisées numériquement avec le comportement réel d'une pièce mise à l'épreuve. Pour ce faire, un démonstrateur a été conçu et l'outil a été employé, donnant une cartographie des tailles de défauts admissibles pour un chargement de fatigue et une durée de vie donnés. Deux cas de chargement seront étudiés. Deux démonstrateurs dits « sains » ont été réalisés par voie de fonderie et sont en attente de tests sur banc d'essai en fatigue, puis d'autres démonstrateurs seront réalisés, cette fois comportant des défauts volontaires mis en place à l'aide de refroidisseurs, qui seront positionnés de manière

à contrôler à la fois l'emplacement et la taille du défaut. Le but de ces opérations est d'évaluer la corrélation entre les résultats obtenus numériquement et les résultats expérimentaux.

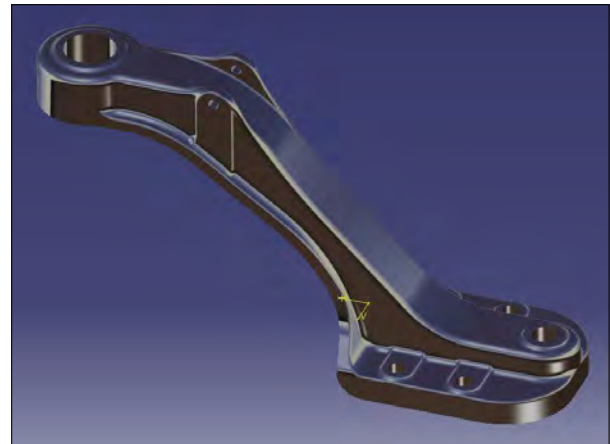


Figure 6 : Modèle CAO du démonstrateur. Crédit photo CTIF.

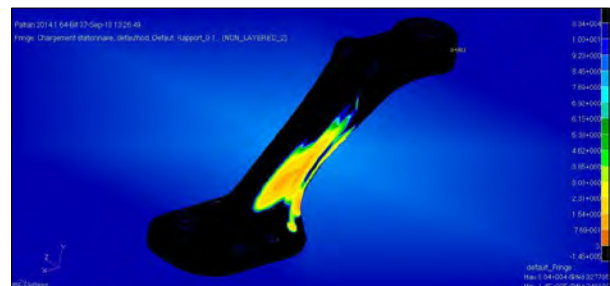


Figure 7 : Cartographie (Patran) de la taille des défauts admissibles sur le démonstrateur pour un des cas de chargement. Crédit photo CTIF.



Figure 8 : Pièce saine réalisée à CTIF par voie de fonderie. Crédit photo CTIF.



### Suites prévues et perspectives pour la profession.

Une fois cette phase de validation sur démonstrateur industriel réalisée, une phase d'amélioration de l'outil de calcul pourra être menée, incluant notamment la création d'une interface utilisateur ainsi que la rédaction d'une notice d'utilisation. Ce projet intéresse de nombreux industriels voulant prendre en compte le procédé de fabrication dans le dimensionnement de leurs pièces. Il constitue donc une véritable opportunité de montrer notre capacité à développer des outils numériques innovants. Ce projet aboutira ainsi sur la création d'un outil numérique puissant à destination des concepteurs souhaitant dimensionner leurs pièces de fonderie en présence de défauts. Cet outil permettra également de définir des critères d'acceptabilité des défauts de fonderie, pour une réduction des coûts et délais, avec une garantie de la fiabilité mécanique.

### III.3. Etude de la nocivité en fatigue des défauts internes inhérents au procédé de fonderie

Le projet GIGADEF (Fatigue GIGAcyclique à partir de Défauts internes)<sup>2</sup> qui reçoit le soutien de l'ANR, aborde la problématique de la nocivité en fatigue des défauts internes inhérents au procédé de fonderie. La maîtrise de cette problématique est un enjeu essentiel pour faire évoluer les règles de prise en compte de l'impact de ces défauts sur la tenue en fatigue et doit permettre de concevoir au plus juste, alléger les structures et réduire les rebuts en augmentant ainsi la productivité. Si la littérature est abondante sur l'étude des défauts de surface en fatigue, il n'existe, à ce jour et à notre connaissance, que deux publications très récentes décrivant des résultats de propagation de fissure de fatigue interne (une provenant d'une équipe anglaise<sup>3</sup> et l'autre d'une équipe japonaise<sup>4</sup>). Le projet GIGADEF a pour objectif de concevoir, fabriquer et mettre au point un banc de test de fatigue ultrasonique in situ sous rayonnement synchrotron pour suivre des fissures de fatigue internes dans les métaux.

Le matériau retenu pour les tests de fatigue est un aluminium moulé, l'AlSi7MgT6 qui avait déjà été mis en œuvre dans le précédent projet IDEFFAAR (projet décrit précédemment). Cet alliage est bien connu dans le domaine de

l'aéronautique, il est également très employé dans l'automobile par exemple pour la fabrication de jantes.

### Un objectif : une expérience de fatigue in situ unique à ce jour.

L'objectif principal du projet est de détecter et suivre une fissure de fatigue interne amorcée à partir d'un défaut de fonderie.

Pour aboutir à cet objectif, il est nécessaire de se placer dans le domaine des très grandes durées de vie, au-delà de 10 millions de cycles, dans le but de favoriser l'amorçage interne. Quatre équipes de recherche et un centre technique se sont réunis autour de ce projet : Institut P', MATEIS, I2M+PIMM et CTIF.

Le projet comprend quatre parties :

- 1) Fabriquer des éprouvettes de fatigue contenant, d'une part, des défauts internes, artificiels centrés et reproductibles et d'autre part, des défauts de micro retassures de taille contrôlée dans l'aluminium moulé,
- 2) Concevoir, fabriquer et mettre au point un banc de test de fatigue ultrasonique destiné à des essais in situ sous rayonnement synchrotron. Ce banc d'essai doit permettre d'observer les fissures sous chargement mécanique,
- 3) Mettre au point des techniques de détection et de suivi d'une fissure interne in situ :
  - Mesure de température (ponctuelle + cartographie) pour détecter la fissure et en assurer un suivi par une analyse inverse à l'aide d'un modèle thermomécanique complet,
  - Détection de la plus petite fissure possible par chute de fréquence et tentative de suivi de cette fissure par calibration (lien fréquence – taille de fissure),
- 4) Analyser les images tomographiques pour comprendre les mécanismes d'endommagement par fatigue à partir des défauts internes et quantifier la morphologie du front de fissure pour calculer le facteur d'intensité des contraintes. Analyser les mécanismes de propagation des fissures de fatigue en lien avec l'environnement (air, vide et ultra vide) pour comprendre l'environnement des fissures internes.

<sup>2</sup> : Projet financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) - Convention ANR-16-CE08-0039-04)

<sup>3</sup> : Chapman, T. P., K. M. Kareh, M. Knop, T. Connolly, P. D. Lee, M. A. Azeem, D. Rugg, T. C. Lindley, and D. Dye. 2015. "Characterisation of Short Fatigue Cracks in Titanium Alloy IMI 834 Using X-Ray Microtomography." *Acta Materialia* 99 (Octobre): 49–62.

<sup>4</sup> : Yoshinaka, Fumiyoshi, Takashi Nakamura, Shinya Nakayama, Daiki Shiozawa, Yoshikazu Nakai, and Kentaro Uesugi. 2016. "Non-Destructive Observation of Internal Fatigue Crack Growth in Ti–6Al–4V by Using Synchrotron Radiation MCT Imaging." *International Journal of Fatigue, Gigacycle Fatigue-Theory and Applications Dedicated to the Memory of Professor Claude Bathias*, 93 (Décembre): 397–405.

Le projet GIGADEF a pour objectif de mettre en place une expérience de fatigue in situ unique à ce jour. Outre le fait de mettre en avant sur la scène internationale, les équipes de recherche françaises impliquées, ce projet permet aussi d'obtenir les données quantitatives indispensables au progrès à réaliser pour prendre en compte l'effet des défauts internes dans le dimensionnement en fatigue des pièces contenant ces défauts.

### Une fabrication d'éprouvettes bien maîtrisée.

La fabrication des éprouvettes à défauts et structure contrôlés est maîtrisée par CTIF et le système de défauts artificiels internes a déjà permis l'amorçage et le suivi de fissures sur différentes éprouvettes à défaut et structure contrôlés en plusieurs campagnes de tomographies réparties sur plusieurs synchrotrons.

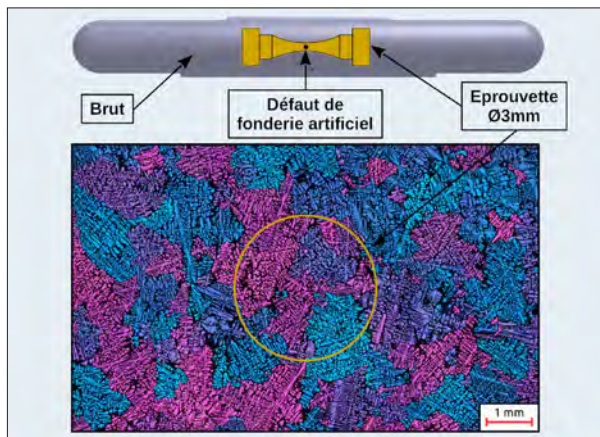


Figure 9 : Matériau et éprouvette (Alliage A357-T6, avec défaut de fonderie artificiel contrôlé)

La machine de test ultrasonique est opérationnelle et a fonctionné in situ au synchrotron. La fréquence utilisée est de 20 KHz. La détection de l'apparition de la fissure est assurée par un vibromètre laser qui mesure la vitesse de déplacement de l'extrémité libre de l'éprouvette. L'arrêt automatique de l'essai est réalisé par analyse modale en temps réel.

A noter la publication de l'article « *In-situ synchrotron ultrasonic fatigue testing device for 3D characterisation of internal crack initiation and growth* » paru dans *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* en octobre 2019.

Un suivi par thermographie infrarouge est également pratiqué, il permet également de détecter l'apparition de la fissure.

Les résultats ont été présentés à Aussois 2019 « Rupture des matériaux et des structures ». Les résultats obtenus sont en cours d'exploitation et les questions fondamentales sur la compréhension des mécanismes sont posées :

- Rôle de l'environnement (interne / surfacique),
- Effet de fréquence (20 KHz / 100 Hz),
- Quel est le rôle du niveau de sollicitation ?

### III.4. Maîtrise de l'impact des défauts en fonderie

QualiCAST®, est l'approche opérationnelle proposée par CTIF pour mieux dimensionner et fiabiliser les pièces de fonderie en présence de défauts.

Si la fonderie a cette capacité à intégrer des fonctions diverses avec la possibilité de réaliser des formes très complexes, elle est néanmoins desservie par les défauts inhérents aux procédés de fabrication. Ces défauts, très redoutés sur les pièces de structure, conduisent au mieux à l'adoption par les bureaux d'études de coefficients de sécurité (notion de Casting Factor) et, au pire, au rejet de la solution de la fonderie, faute de savoir chiffrer l'impact réel des défauts ou du seul fait de critères qualité trop conservateurs, dans les cahiers des charges pour les pièces de fonderie.

Egalement, dans une optique de réduction des masses et de maîtrise des coûts, il est important aujourd'hui de dimensionner au plus juste les composants mécaniques et de connaître l'impact de défauts de fonderie sur les propriétés mécaniques en statique et en fatigue des pièces.

Alors, comment déterminer les réels abattements des propriétés mécaniques des alliages de fonderie ? Une réponse se trouve dans le programme QualiCAST® développé par CTIF pour la caractérisation des alliages de fonderie en présence de défauts. QualiCAST® est basé sur le processus de réalisation d'éprouvettes à défauts contrôlés, leur caractérisation et la confrontation à la modélisation numérique.

**QualiCAST®**



Le programme QualiCAST® proposé par CTIF permet de caractériser mécaniquement la matière en présence de défauts ciblés à partir de la production et caractérisation d'éprouvettes à défauts représentatifs des structures à caractériser. Ce programme s'appuie sur deux méthodes pour la mise en œuvre de défauts contrôlés :

- La méthode dite « artificielle » qui consiste à utiliser des artifices de procédé pour positionner au cœur de l'éprouvette, des défauts répétables de types soufflure, retassure, cavité ou inclusion,
- La méthode dite « naturelle » basée sur une solidification maîtrisée, et notamment utilisée pour créer des défauts de types retassure, micro-retassure ou gazage.

Pour permettre la détermination d'abattements en tenue mécanique en présence de défauts, il est important aussi de considérer le matériau avec sa matrice saine. Ainsi, des barreaux (éprouvettes) représentatifs d'une qualité métallurgique de référence exempte de défauts sont également produits et caractérisés.



Figure 10 : Exemple de défauts contrôlés. A gauche : défaut naturel (retassure dans une éprouvette de 2 mm de diamètre, image de tomographie alliage Al Si13) ; au centre : défaut naturel (soufflure dans éprouvette acier martensitique I3-4) ; à droite défaut artificiel (défaut lenticulaire Ø2mm dans éprouvette de fatigue Ø10mm alliage Al Si7Mg0,6).

Une première phase du programme QualiCAST® consiste à réaliser les outillages dédiés à la fabrication des éprouvettes brutes permettant l'obtention de défauts représentatifs des défauts obtenus sur pièces. Un plan d'expérience numérique est alors mis en place en simulation (logiciels QuikCAST® - ProCAST) pour définir la géométrie des éprouvettes et des artifices à mettre en œuvre pour contrôler la solidification dans la zone ciblée du défaut à obtenir. L'objectif ici est de cibler les défauts par une première approche numérique afin de limiter les essais expérimentaux en fonderie.

Les protocoles de moulage et de coulée sont alors mis en œuvre expérimentalement (d'après les spécifications établies en simulation) pour obtenir les défauts visés. Il est impératif de s'assurer, à ce stade, de la reproductibilité des défauts obtenus avec l'évaluation du taux de succès (probabilité d'obtention du défaut ou d'une gamme de défauts), avant d'engager la phase de production.

Des contrôles CND des éprouvettes par radiographie numérique, voire par tomographie, permettent de calibrer et trier les niveaux de défauts obtenus. Les défauts internes seront évalués et classés par rapport à leur taille en comparaison aux images de référence ASTM telles qu'utilisées sur pièce.

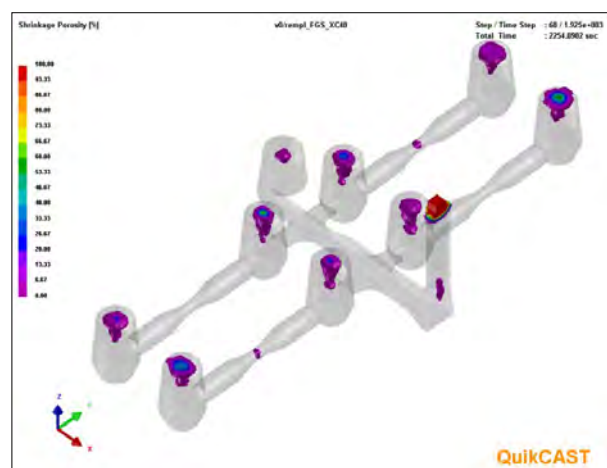


Figure 11 : Simulation d'une grappe de coulée d'éprouvettes à défauts naturels.



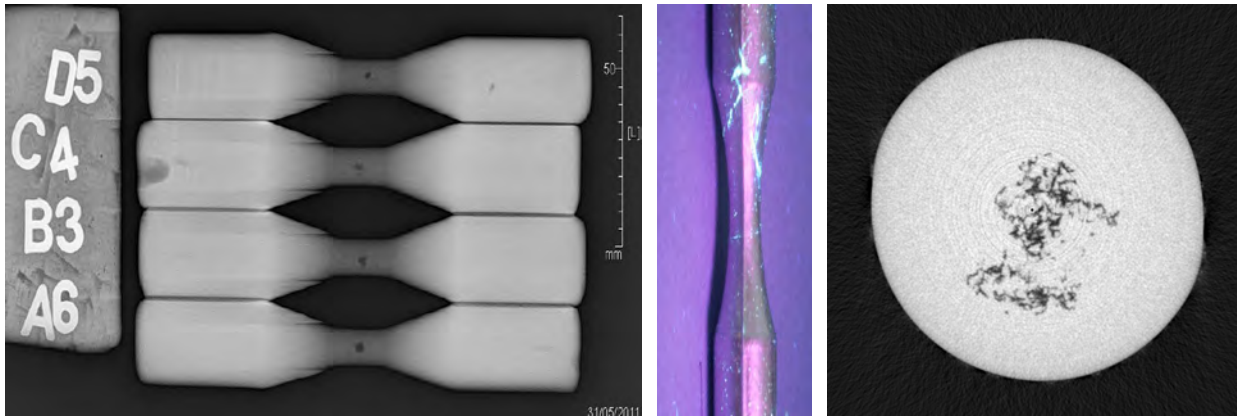


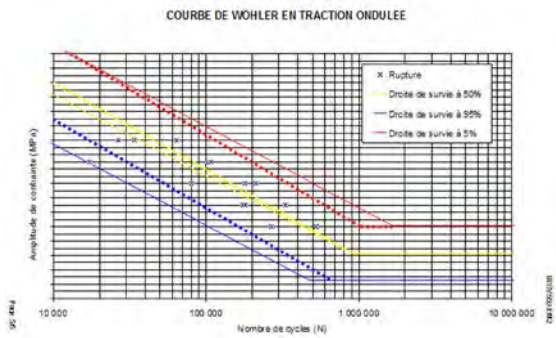
Figure 12 : Tri des éprouvettes par contrôle non destructif.  
A gauche : radiographie numérique d'éprouvettes ; au centre : ressuage ; à droite : tomographie RX.

La phase de production consiste ensuite à produire à plus grande échelle les défauts visés pour alimenter les essais de caractérisation mécanique. Les barreaux coulés suivant le protocole établi précédemment, sont ensuite triés (contrôles CND), traités thermiquement et usinés, puis ressués (dans le cas d'essais de fatigue).

Les lots d'éprouvettes permettent alors d'alimenter les essais en statique (traction, résilience) à l'ambiante ou à température et des essais en dynamique (détermination courbe de Wöhler et de la limite d'endurance avec des probabilités de survie établies pour chacun des lots à 5%, 50 % et 95 %).



Figure 13 : Caractérisation des éprouvettes à défaut en fatigue.  
A gauche : flexion 4 point ; au centre : traction-compression ; à droite : courbes de Wöhler.



#### IV Approche numérique de la Fabrication Additive Métal

Comme pour les autres procédés, la simulation numérique joue un rôle très important dans la prédiction du comportement mécanique des pièces issues de la fabrication additive. En effet, elle permet d'appréhender l'impact des paramètres du procédé de fabrication (apparition des contraintes résiduelles et distorsion) et de prédire la formation des défauts et leurs influences sur le comportement mécanique de la pièce.

Le procédé SLM (fusion sur lit de poudre), le plus connu en fabrication additive métallique, permet de réaliser des

pièces complexes avec un large panel de poudres métalliques. Ce procédé peut réduire considérablement les temps et les coûts de fabrication par rapport à la fabrication conventionnelle. Il met en jeu un certain nombre de disciplines physiques étroitement liées entre elles. On trouve principalement la thermique (fusion, conduction, convection, rayonnement), la mécanique (comportement, contraintes et déformations) et la métallurgie (composition chimique, phases en présence, cristallographie) (Figure 14, page suivante).

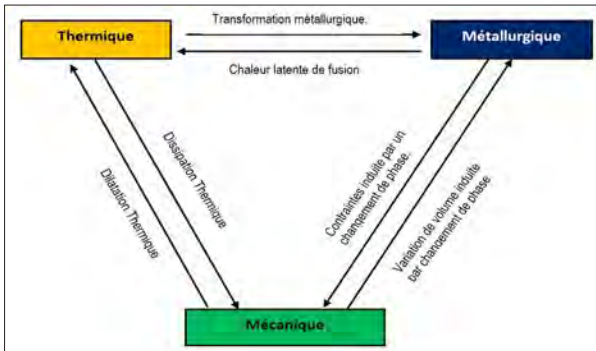


Figure 14 : Paramètres physiques mis en œuvre dans le procédé SLM.

**La modélisation à l'échelle micro.**

On s'intéresse ici à l'interaction laser/matière en particulier la réflectivité et l'absorption du rayon laser pour l'estimation de la quantité d'énergie thermique absorbée par la poudre. La modélisation de la distribution spatiale des particules sur le lit de poudre joue un rôle important dans la zone affectée thermiquement (ZAT), c'est dans cette zone que sont définies les propriétés thermo-physiques du processus de transfert thermique durant la fabrication. La modélisation du bain de fusion permet de caractériser sa dynamique, sa forme et le mécanisme de formation des défauts qui apparaissent (figure 15).

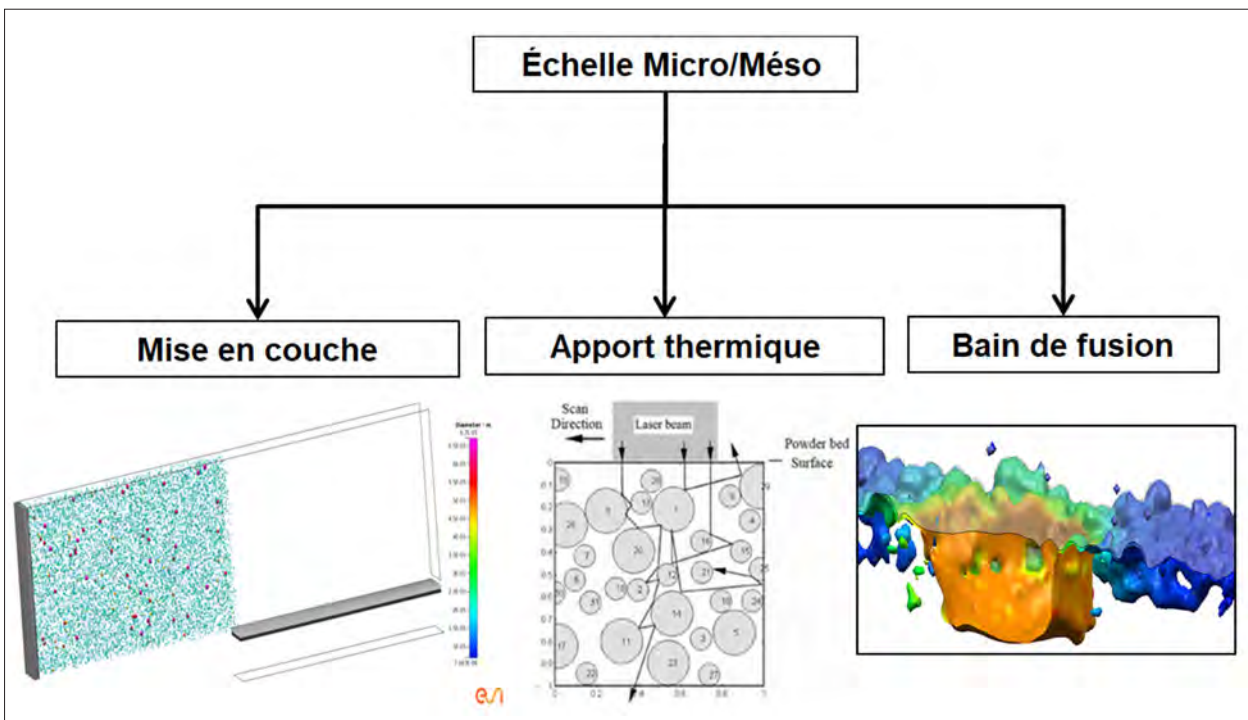


Figure 15 : La modélisation à différentes échelles, du procédé SLM.

**La modélisation à l'échelle méso.**

Il s'agit ici de la modélisation à l'échelle de la couche, elle porte sur la solidification du cordon de fusion et sur l'apparition des défauts et des irrégularités (Figure 16). A ce stade, la simulation nous aide à comprendre l'évolution de la microstructure durant le procédé. Elle nous permet aussi d'estimer l'histoire thermique et les contraintes résiduelles locales au voisinage de la zone fondue qui seront le point de départ pour modéliser les contraintes résiduelles à l'échelle macro.

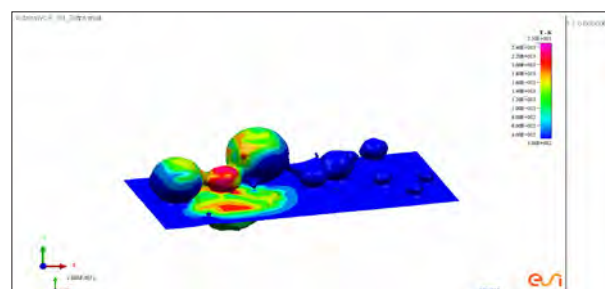


Figure 16 : Modélisation d'un bain de fusion sur un trajet laser (ESI).

## Modélisation à l'échelle macro.

La modélisation à l'échelle macro prend en compte les contraintes résiduelles et la déformation finale à l'échelle de la pièce. Elle n'envisage pas de prédire la forme du bain de fusion et les défauts qui en résultent dans certaines approches, mais essentiellement les transferts thermiques macroscopiques et leurs conséquences sur la tenue de la pièce et sur sa durée de vie.

La plupart des modèles utilisés dans la simulation numérique à l'échelle macroscopique sont basés sur la méthode des éléments finis. L'une des stratégies les plus utilisées pour la modélisation est la technique d'activation des éléments (Finite-Element Activation Strategy). En effet, au départ, la pièce est totalement construite en éléments inactifs et les propriétés mécaniques et thermiques sont nulles. Suivant la stratégie de lasage, un élément est dit activé (attribution des propriétés mécaniques et thermiques) s'il croise le faisceau du laser et sinon il reste inactif. Cette méthode présente un inconvénient en termes de coûts de calcul (qui est relativement élevé) mais elle permet une description très réaliste du procédé.

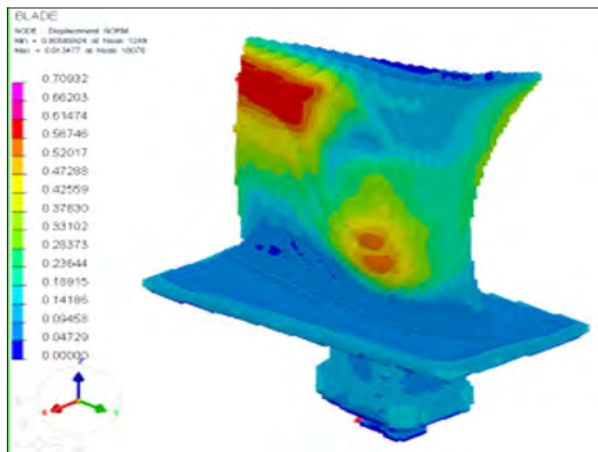


Figure 17 : Simulation de la déformation aube de turbine CTIF/ESI.

Pour l'optimisation du procédé de fusion sur lit de poudre, il est important de comprendre l'interaction entre les différents phénomènes physiques (thermique, mécanique, métallurgie) et leurs conséquences sur les propriétés mécaniques de la pièce finale à différentes échelles. C'est pourquoi la simulation numérique multi-échelle décrite dans cet article s'avère être un outil incontournable pour la bonne compréhension du procédé. Les travaux menés actuellement par CTIF en partenariat avec ESI portent d'ores et déjà sur l'approche macro du procédé (Figure 17).

## QualiPrint, nouveau projet collaboratif de CTIF.

Les propriétés fonctionnelles des pièces métalliques obtenues en Fabrication Additive Métallique (FAM) directe dépendent des paramètres généraux du procédé. La présence de défauts internes et les contraintes résiduelles dégradent les propriétés d'usage des pièces.

CTIF va lancer un nouveau projet collaboratif, QualiPrint, qui a pour objectif de caractériser mécaniquement des pièces en présence de défauts et d'appréhender les critères d'acceptabilité associés. Le projet QualiPrint doit répondre aux trois questions suivantes : quel degré de criticité peut-on tolérer pour améliorer la rentabilité de la FAM ? Faut-il contrôler systématiquement les pièces ? Comment peut-on améliorer la prédiction des logiciels de simulation ? QualiPrint se focalisera principalement sur les défauts internes avec une approche numérique basée sur la simulation multi-échelle notamment le couplage micro/méso.

## En conclusion

La prédiction du comportement des matériaux métalliques via les outils de simulation, les calculs prédictifs, l'enrichissement des bases de données, et l'amélioration des modèles associés, font partie intégrante de l'approche Industrie 4.0 des métiers de la mise en forme des matériaux métalliques.

Tant pour des métiers maîtrisés de longue date tels que ceux de la fonderie, que pour les nouvelles approches que propose la fabrication additive, c'est par ces approches numériques, confrontées aux essais suivis en temps réel et à la caractérisation, que les industriels amélioreront à la fois le chemin le plus direct vers des conceptions optimisées, et la maîtrise du process ensuite, par une meilleure connaissance des défauts potentiels, de leur genèse, de leur maîtrise, de leur contrôle et de leurs impacts sur les produits. C'est dans cet objectif que CTIF poursuit avec ses partenaires les travaux et projets impliquant simulation, modélisation, et essais instrumentés exploitant :

- En amont, l'approche thermodynamique des matériaux,
- La maîtrise de la simulation des procédés et leur corrélation aux essais réels (avec une nouvelle approche initiée au second semestre 2019 sur les jumeaux numériques, en partenariat avec ESI, Arts et Métiers et l'ESFF),
- L'approche thermomécanique et physique des matériaux (produits, outillages),
- L'approche prédictive du comportement, notamment en fatigue, des produits métalliques (qu'ils soient issus de fonderie ou de fabrication additive).

Pour en savoir plus, contactez-nous :  
Didier Linxe, linxe@ctif.com



## Références :

- [1] B. Crossland, *Effect of large hydrostatic pressures on the torsional fatigue strength of an alloy steel*, Proc. Int. Conf. Fatigue Metals, London, Instn mech. Engrs, pp. 138-149, 1956.
- [2] M. Vincent, Y. Nadot, *Fatigue from defect under multi-axial loading: Defect Stress Gradient (DSG) approach using ellipsoidal Equivalent Inclusion Method*, International Journal of Fatigue, 15 February 2013.
- [3] J. D. Eshelby, *The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems*, Proceedings of the Royal Society A, 241 (1226): 376-396, 1957.
- [4] J. D. Eshelby, *The elastic field outside an ellipsoidal inclusion*, Proceedings of the Royal Society A, 252 (1271): 561-569, 1959.

## FORMING THE FUTURE



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

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

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

#### Vos avantages :

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



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



**SCHULER** 

Member of the ANDRITZ GROUP

## Fabrication additive sable

L'impression 3D sable se démocratise depuis maintenant une petite dizaine d'années, se positionnant comme technologie complémentaire aux process de moulage classiques.

Ce numéro de la revue Forge Fonderie fait le point sur cette technologie à travers quelques actions menées sur le Territoire Français par les fondeurs et leur écosystème afin d'approcher et de cerner les atouts de la fabrication additive sable mais aussi d'en mesurer ses limites ou inconvénients face aux procédés classiques.

On peut dans une première approche noter que cette technologie ouvre la voie à de nouvelles possibilités en termes de réalisation de formes complexes, et qu'elle permet une réduction des délais et des coûts (notamment en prototypage, pièces unitaires ou petites séries) grâce à la suppression des outillages.

Par ailleurs, la fabrication additive sable reste une technologie à part entière et ne s'improvise pas, elle requière une maîtrise du procédé et des connaissances spécifiques d'une part pour la production, mais aussi en amont sur les études ou la simulation, sur les états de surface, l'évacuation des gaz ou encore la propreté des conduits dans le cas de formes ou noyaux complexes.

Dans les pages suivantes de ce dossier dédié, sont présentés des cas d'études et démonstrateurs industriels tirés d'une part du projet FASSE (Fabrication Additive Sable Sud Est), projet initié par les fondeurs du Sud Est, le CTIF et le lycée Hector Guimard à Lyon, et d'autre part par la nouvelle structure créée récemment

à Charleville Mézière, 3D METAL INDUSTRIE.

L'objectif étant de réaliser un panorama des actions mises en place en régions, hors fonderies ayant déjà investi dans la technologie et proposant dans certains cas des prestations de sous-traitance (Boutté, Danielson, Ventana, ...)

Dans le Sud Est les fondeurs ont choisi la voie d'un programme de R&D tripartite avec le CTIF, l'UFSE et le lycée Hector Guimard et son imprimante Voxeljet VX1000, avec pour objectifs principaux :

- D'évaluer le potentiel d'intégration de la fabrication additive sable au sein des fonderies
- D'étudier des démonstrateurs industriels pour la mise en place de méthodologies en conception, simulation, fabrication et réalisation de bilans technico-économiques.
- D'étudier et d'améliorer les process de moulage et de coulée en prenant en compte la santé interne et les états de surface des pièces



Dans les Ardennes le sujet a été abordé différemment, six fonderies locales et un bureau d'étude ont décidé d'un partenariat afin d'investir dans une plateforme d'impression avec une machine EXONE 3D SMAX, en y intégrant également la simulation et la numérisation 3D.

Dans le détail et à suivre dans ce dossier, l'étude de deux démonstrateurs industriels distincts, un article sur l'analyse des sables imprimés, et la présentation de la plateforme 3D METAL INDUSTRIE.

# Démonstrateur de la fonderie Boisson

Fabien LANICOT  
Professeur de fonderie  
Lycée Hector Guimard

Le premier démonstrateur est proposé par Philippe Boisson du Groupe Boisson.

La pièce est une pièce hydraulique de volume  $0,16 \text{ dm}^3$  coulé en alliage cuivreux  $\text{CuSn5Zn5Pb2}$  ou en  $\text{CuSn5Pb2}$ .

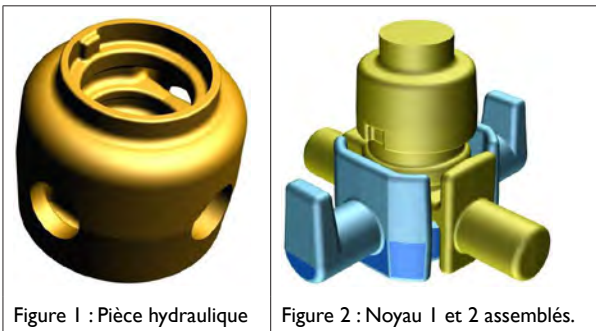


Figure 1 : Pièce hydraulique

Figure 2 : Noyau 1 et 2 assemblés.

La Fonderie Boisson développe ses propres pièces (cf. figure 1) afin de les proposer à ces clients. L'impression 3D sable permet de réaliser un démonstrateur en intégrant dans le moule imprimé un seul noyau (cf. figure 2).

Pour cette pièce, les étapes suivantes sont mises en place :

- Simulation de solidification suivant 3 sens de moulage,
- Simulation de remplissage + solidification et modification de la CAO,
- Impression 3D sable de 6 moules + noyau,
- Fusion et coulée à la fonderie Boisson,
- Analyse des pièces obtenues brutes et usinées,
- Améliorations proposées.

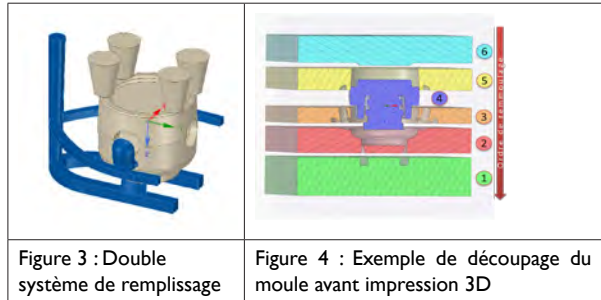


Figure 3 : Double système de remplissage

Figure 4 : Exemple de découpage du moule avant impression 3D

Même si cette pièce sera fabriquée sur le chantier Disamatic de la Fonderie Boisson, les moules sont imprimés en sable à prise chimique avec liant phénolique. Cela permet de réaliser, dans un premier temps, l'ensemble du moule en exploitant les nouvelles possibilités liées à ce procédé d'impression 3D (cf. figure 3 et 4).

Dans un second temps, seul le noyau est imprimé et positionné dans un moule vertical Disa.

## I. Simulation solidification de 3 sens de moulage

Les simulations de remplissage et de solidification sont réalisées au Lycée H. Guimard à l'aide du logiciel Theracast® de Transvalor.

Les deux alliages  $\text{CuSn5Pb2}$  et  $\text{CuSn5Zn5Pb2}$  envisagés ne sont pas présents dans la base du logiciel de simulation. JMatPro® est donc utilisé pour obtenir les données thermiques, physiques et mécaniques de chaque alliage.

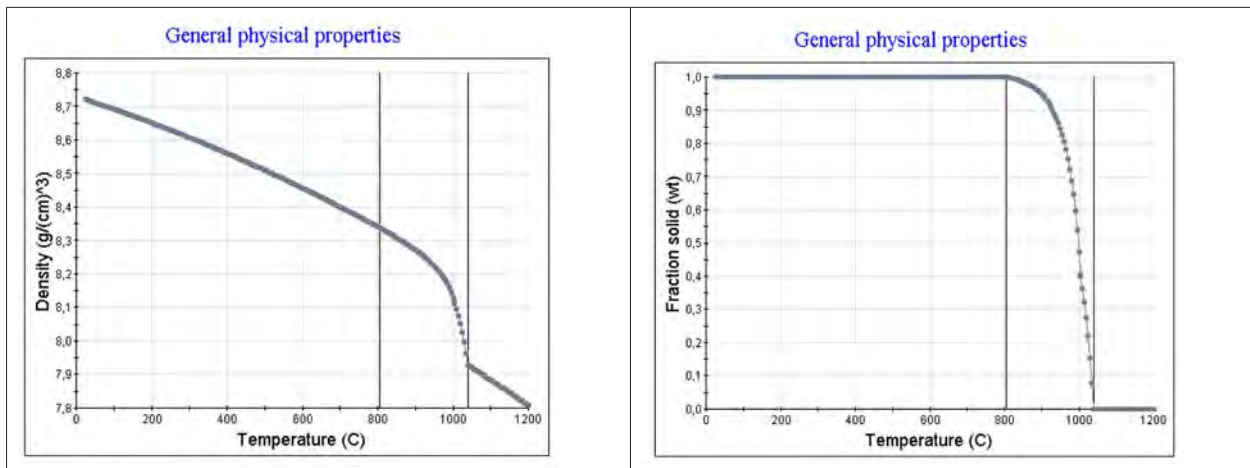


Tableau I : Exemple de données nécessaires pour un calcul de simulation



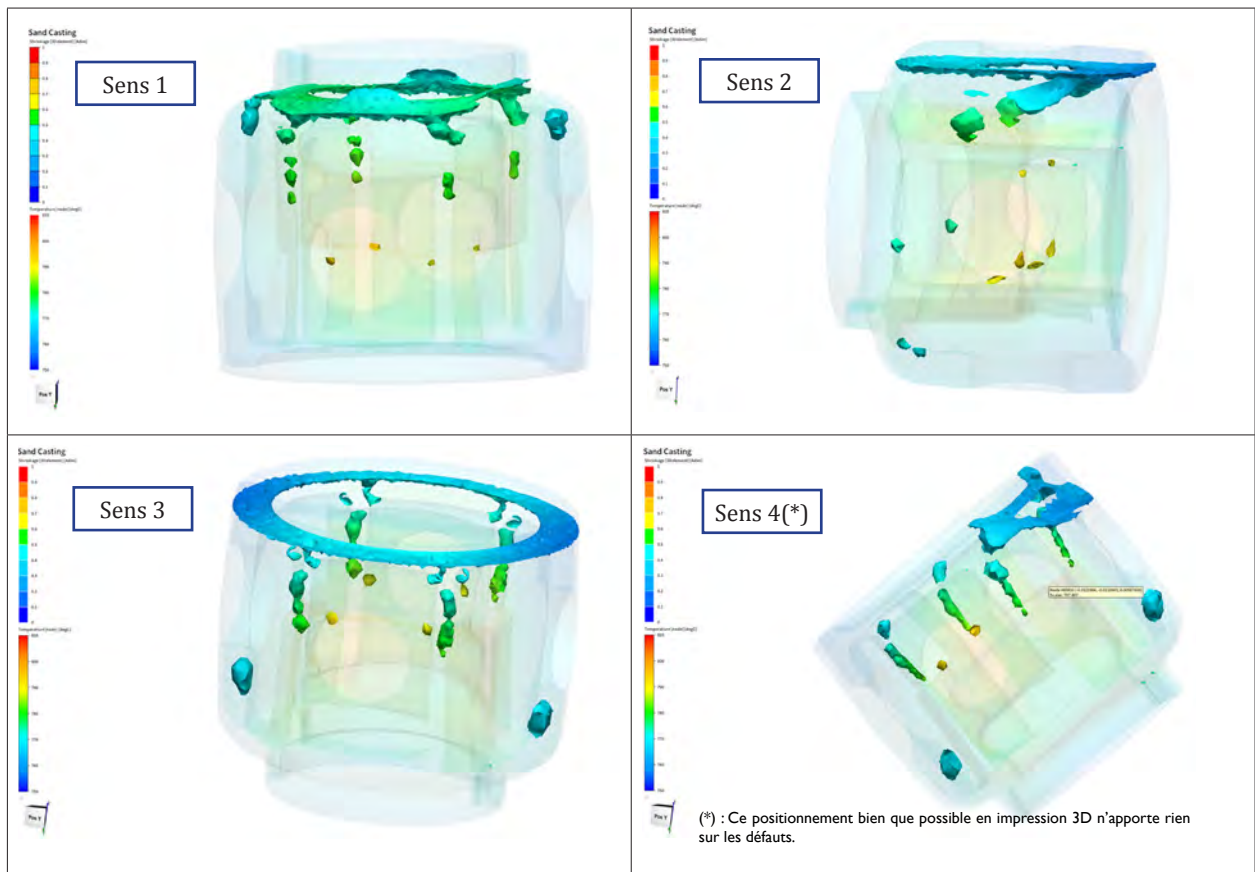


Figure 5 : Représentation et simulation de solidification des 3 sens de moulage.

Remarques :

- Pour le sens 1 : la majorité des retassures sont positionnées vers le haut,
- Pour le sens 2 et 3 : les retassures sont réparties entre le haut et le bas.

Critères	Sens 1	Sens 2	Sens 3
Stabilité du noyau	4	2	5
Evacuations de gaz du noyau	5	3	3
Remplissage de l'empreinte	3	2	5
Masselottage de la pièces	1	1	5
Innovation	5	5	5
Coûts	3	3	3
<b>Total</b>	<b>18</b>	<b>16</b>	<b>26</b>

Tableau 2: Matrice de choix

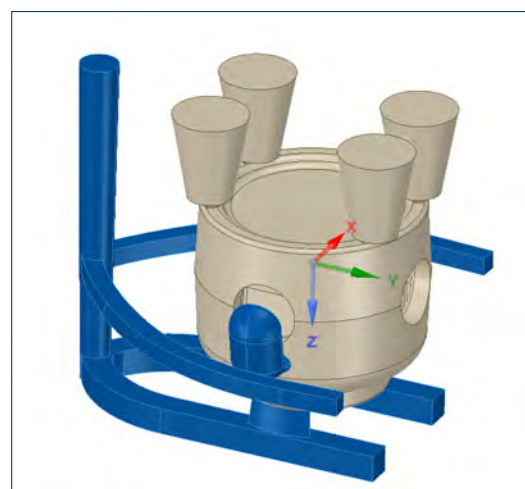


Figure 6 : CAO de la grappe

D'après le tableau 2, le sens 3 est celui qui est le plus pertinent. En résulte le tracé du système de remplissage et de masselottage décrit ci-dessous (cf. figure 6).

## 2. Simulation de remplissage + solidification et modification de la CAO

- Double système de canaux qui permet de commencer le remplissage en source et d'apporter de l'alliage « chaud » dans les masselottes sur le côté. Masse totale de la grappe : 2,3kg
- Quatre masselottes sur le haut de la pièce et deux masselottes sur les côtés remplis par le deuxième système de canaux au moment où l'alliage arrive à ce niveau (cf. figure 7).

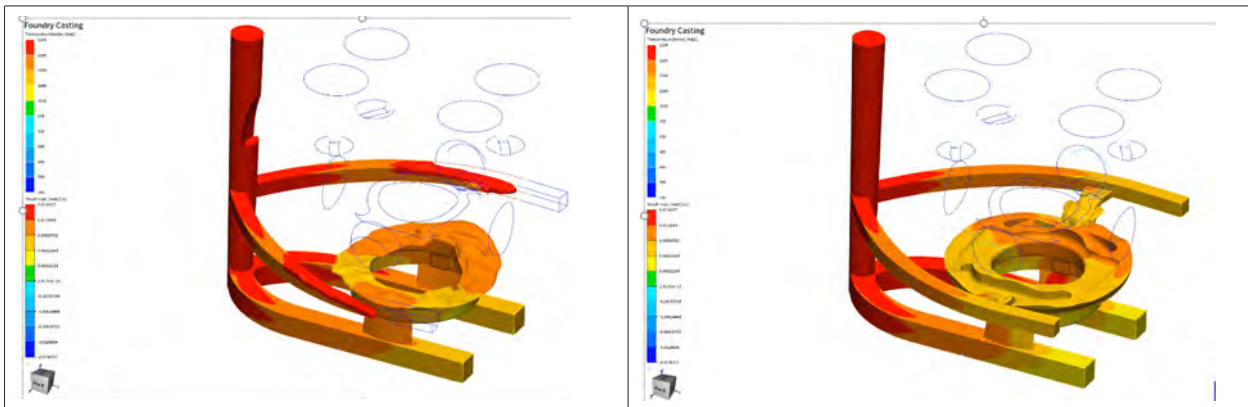


Figure 7 : Remplissage du deuxième double canal

La figure suivante montre que le système d'alimentation remplit quasiment son rôle. Seules restent des retassures visibles dans le cercle rouge en pointillé.

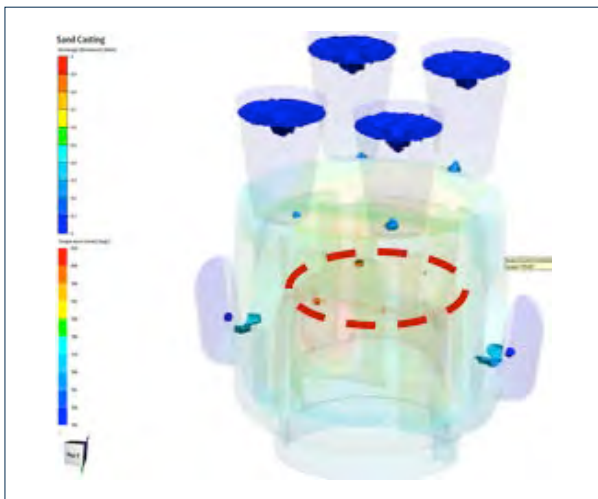


Figure 8 : Solidification de la grappe

Afin d'enlever ces défauts, les changements suivants ont été apportés :

- Modification du tracé de la pièce (cf. figure 9) afin d'amincir les zones sensibles à la retassure. Cela a permis de réduire la masse de la pièce de 13%.
- Choix de la fonderie Boisson de fabriquer cette pièce en CuSn5Zn5Pb2.

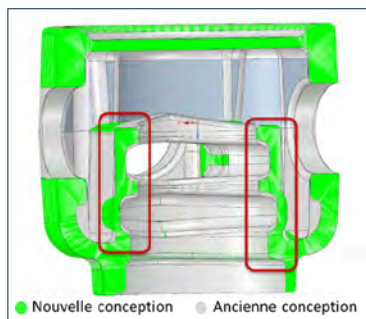


Figure 9 : Superposition des deux tracés de pièce

Création des zones potentiellement non démoulables pour le noyau si la fabrication est réalisée en procédé traditionnel et d'un seul bloc.

Comme le montre la figure ci-dessous, la nouvelle simulation avec ce changement de paramètres permet de faire disparaître les retassures internes.



Figure 10 : Simulation de solidification avec nouvelle CAO et nouvelle matière.

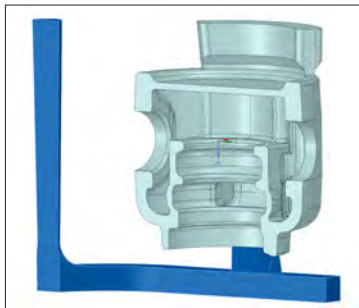
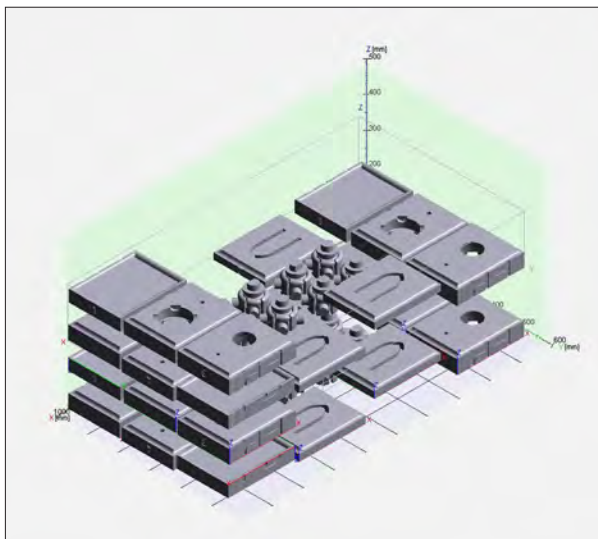


Figure 11 : 1/2 grappe avec nouveau SR

Pour finir ces aller-retours entre la CAO de la pièce et du moule, le système de remplissage a été simplifié (cf. figure 11) pour n'avoir qu'un seul canal et les masselottes allongées pour permettre d'avoir une action sur une plus grande surface.

### 3. Impression 3D



La figure ci-contre montre le positionnement des moules et noyaux dans le jobbox.

Afin de faire des contrôles mécaniques de type flexion 3 points, des barreaux sont positionnés entre les différentes parties.

Les paramètres d'impression sont :

- Sable : silice – AFS100,
- %résine : 2,3%,
- Durée d'impression : environ 35h.

### 4. Fusion et coulée à la Fonderie Boisson.

La fonderie Boisson a réalisé les fusions pour couler les moules. Elles sont faites à l'aide de 2 fours à induction. La fonderie utilise des lingots titrés et l'analyse chimique des fusions sont renseignés dans le tableau ci-dessous.

N° de four	% Cu	% Zn	% Sn	% Pb	%Ni
1	Reste	4,68	4,70	2,48	0,35
2	reste	4,97	4,76	2,48	0,34
<b>Théorique dans Thercast®</b>	<b>reste</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>0</b>

Tableau 3 : Analyse spectrale des fusions

N° de four	N° de coulée	Température / °C	Observations / N° de Four
1	1	1225	-
1	2	1215	-
1	3	1190	Bavure joint
2	4	1180	-
2	5	1170	-
1	6	1160	Malvenue







Didier TOMASEVIC,  
 Chef de Projets  
 Méthodes et Procédés  
 Fonderie, CTIF

## Démonstrateur de la fonderie SRI

Le second démonstrateur concerne une pièce proposée par la fonderie Saint-Rémy Industrie.

La pièce est un échangeur hydraulique de volume 0,55 dm<sup>3</sup> coulé en alliage cuivreux CuCr1.



Echangeur hydraulique en CuCr1

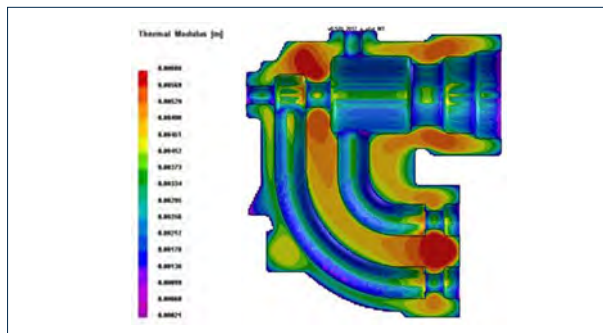
L'alliage CrCu1 présente la particularité d'avoir un faible intervalle de solidification, inférieur à 10 °C, et un liquidus proche de 1078 °C. Un tel alliage avec un faible intervalle de solidification présente l'intérêt de concentrer les retassures dans les zones de dernière solidification sans forcément former des micro-retassures dans d'autres zones. A contrario, un alliage avec un fort intervalle de solidification laisse apparaître également des micro-retassures dans des zones plus minces pouvant pénaliser l'étanchéité des

pièces. Un autre intérêt est le faible risque d'apparition de fissures dans les zones se solidifiant tardivement.

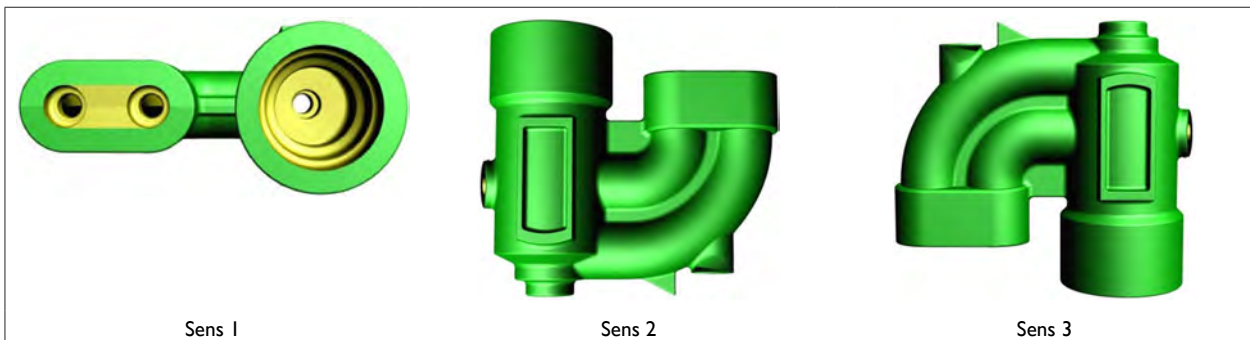
L'objectif proposé par la fonderie Saint-Rémy Industrie est de réaliser la pièce en fabrication additive indirecte sable et valider la qualité de la pièce (étanchéité, état de surface,...).

La pièce présente des dimensions hors-tout de 77 x 154 x 170 mm permettant de mettre deux pièces au moule. Trois sens de moulage ont été proposés :

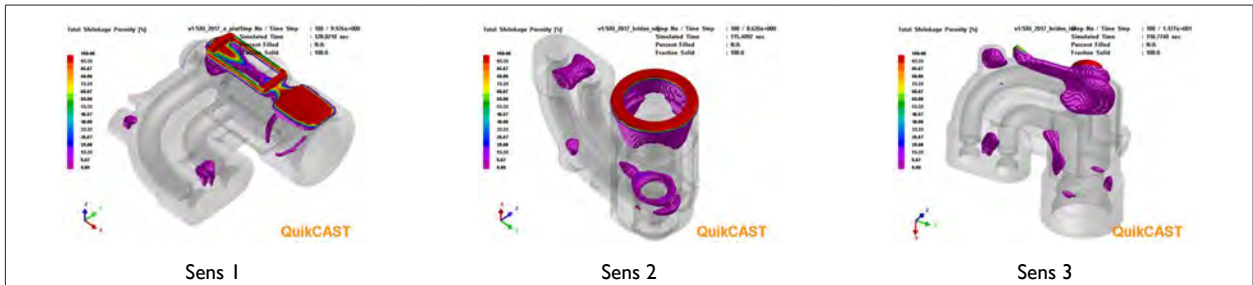
Une première série de simulations numériques de solidification a été réalisée sur la pièce seule pour définir les modules thermiques et localiser ainsi les zones de dernière solidification et les retassures en fonction du sens de moulage. Les simulations numériques ont été menées par le CTIF avec le logiciel QuikCAST® de ESI.



Modules thermiques de la pièce seule



Proposition de sens de moulage



Prédictions de localisation des retassures

Pour les 3 sens de moulage, 4 zones de retassures (en couleur mauve) sont décelées qui nécessiteront des actions, telle que la mise en place de masselottes sable, manchons, refroidisseurs sable ou métalliques ou adapter le tracé de la pièce.

Une matrice de choix a permis de ressortir que le sens de moulage 1 est le plus pertinent avec comme points forts la stabilité du noyau et le remplissage.

Critères	Sens 1	Sens 2	Sens 3
Stabilité du noyau	5	1	3
Evacuation des gaz du noyau	3	5	1
Remplissage de l'empreinte	5	2	2
Masselottage de la pièce	3	4	3
Innovation	3	5	5
Coûts	4	2	2
<b>TOTAL</b>	<b>23</b>	<b>19</b>	<b>16</b>

En conséquence, le tracé de la grappe de coulée a été réalisé en mettant en place

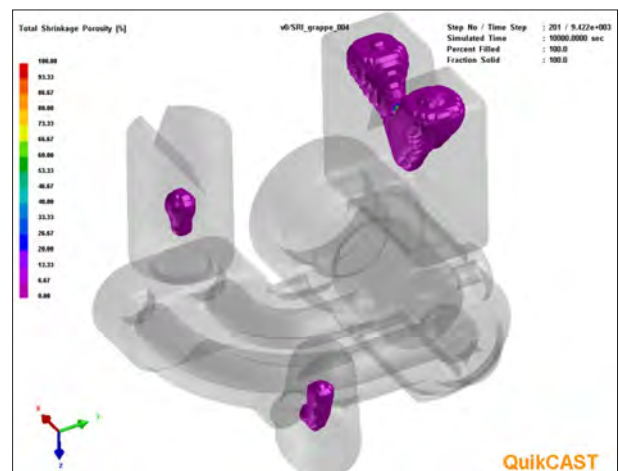
- Un système de masselottage constitué de trois masselottes et un refroidisseur.
- Un système de remplissage constitué d'une descente, d'un canal filtré et de trois attaques.



Grappe de coulée

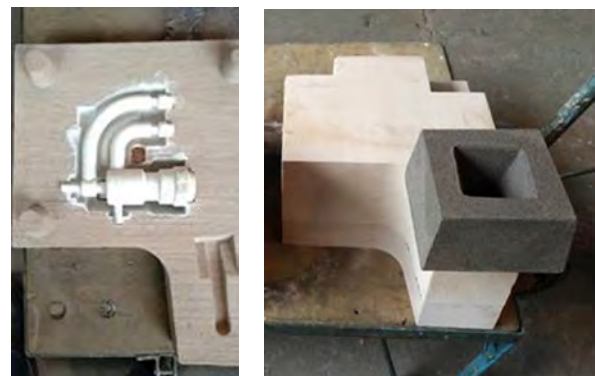
Une nouvelle simulation numérique de remplissage et de solidification a permis de valider un écoulement du mé-

tal sans turbulences majeures, des vitesses du métal inférieures à 0,7 m/s et un temps de remplissage de 4 secondes ainsi qu'une solidification dirigée de la pièce vers les masselottes limitant ainsi les retassures dans la pièce.



Prédiction de localisation des retassures

L'étape suivante a été de réaliser 3 moules sable en fabrication additive avec l'imprimante Voxjet du Lycée Hector Guimard. Les surfaces en contact avec l'alliage de coulées ont été revêtues avec un enduit à l'alcool à base de zircon pour limiter les réactions moule-métal.



Moules avant la coulée

Les températures de coulée des moules ont été comprises entre 1340 et 1360 °C.



Coulée des moules



Grappe de coulée

Après décochage, une bavure au niveau du plan de joint a été constatée non attribuable au mode de fabrication (impression) des mottes mais plutôt à un chargement insuffisant des moules lors de la coulée.

On constate également un état de surface correct des faces internes et dégradé des faces externes avec notamment les strates d'impression visibles. Une fabrication des moules avec des strates plus fines et un dépôt d'enduit plus épais sur les moules devraient améliorer.

Une optimisation du système d'alimentation a également permis d'éliminer la trace de retassure qui était présente lors de la première coulée. La mise au point du produit peut donc être intégrée au fur et à mesure du développement de la pièce ou du design. Cette amélioration a été confirmée après analyse radiographique.



Vue de la pièce première fabrication présentant un défaut de retassure



Clichés radiographiques Avant / Après amélioration système d'alimentation





Lise GUICHAOUA,  
Ingénieure Chimie des  
matériaux, CTIF

## Analyse des sables de fonderie

Différentes éprouvettes de sable liées par noyautage conventionnel et par fabrication additive (de 2 fournisseurs différents) ont été observées par Microscopie Electronique à Balayage.

La Figure 1 présente les observations CTIF des grains de silice liés par noyautage conventionnel avec un liant polyuréthane. Pour l'éprouvette obtenue avec le sable 55 AFS, on observe une **bonne perméabilité avec la présence d'espace entre les grains**, liés par des ponts de liant bien dispersés au sein de l'éprouvette. Avec un sable d'indice de finesse plus élevé, comme pour l'éprouvette obtenue à partir de sable 100 AFS, on constate peu ou pas d'espace entre les grains. Ces espaces semblent être comblés en partie par le liant, bien dispersé, entraînant une **faible perméabilité de l'éprouvette**.

Des éprouvettes fabriquées à partir d'un sable de silice par fabrication additive (imprimante Exone ; fournisseur 1) avec un liant furanique ont également été observées, selon

deux axes d'observation, pour voir l'influence du dépôt de liant et de sable par couche. Le sable de silice utilisé présente un indice de finesse 100 AFS conduisant à une faible perméabilité de l'éprouvette. De plus, selon les observations sur l'axe référencé X-Y (Figure 2, page suivante), les grains de silice semblent totalement recouverts et bloqués dans une couche de liant créant ainsi une barrière imperméable. Les observations sur l'axe Y-Z nous confirment le manque d'espace entre les grains et donc une **faible perméabilité de l'éprouvette**.

Pour les éprouvettes obtenues avec le sable de chromite 70 AFS et un liant furanique (fournisseur 2) (Figure 3, page suivante), on observe une **bonne perméabilité avec la présence d'espace entre les grains**, liés par des ponts de liant bien dispersés au sein de l'éprouvette. Ces observations ont été effectuées sur des échantillons sélectionnés selon les 3 plans de fabrication X, Y et Z et aucune différence de dispersion du liant n'a été observée.

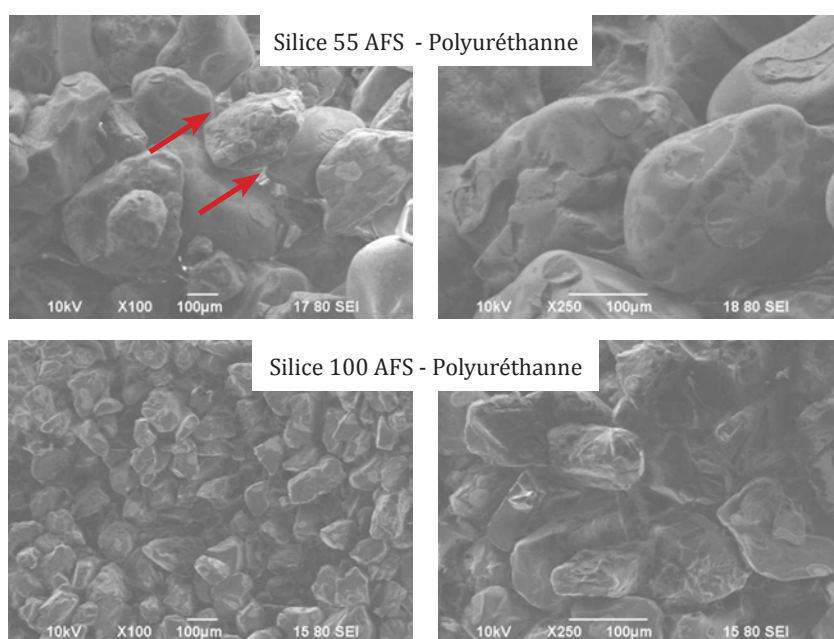


Figure 1 : Images de MEB des éprouvettes obtenues par une technique conventionnelle avec des sables de silice 55 AFS et 100 AFS. (Les flèches marquent les espaces visibles entre les grains).

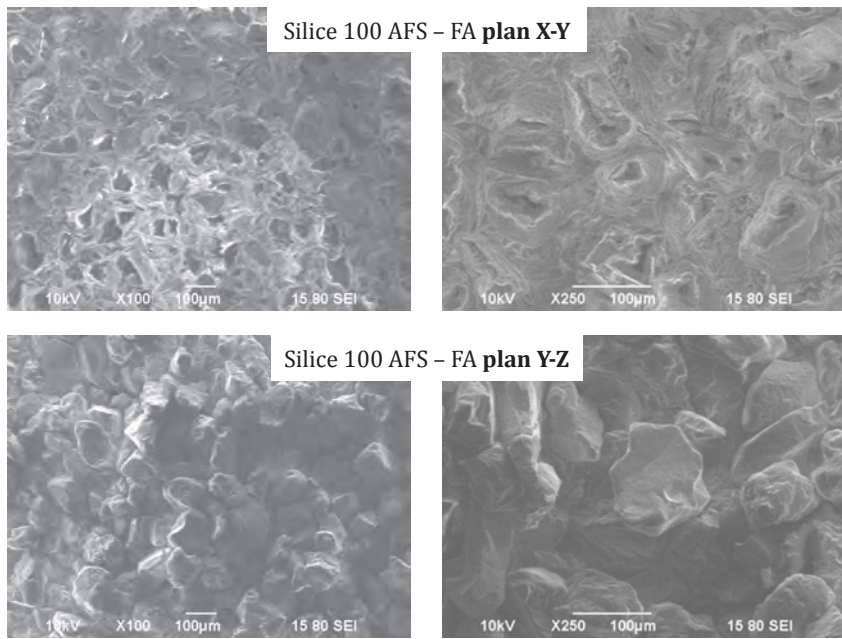


Figure 2 : Images de MEB des éprouvettes obtenues par fabrication additive (Exone chez fournisseur 1) avec un liant de type furanique et un sable de silice (100 AFS). Les observations ont été effectuées sur deux plans d'observation X-Y et Y-Z

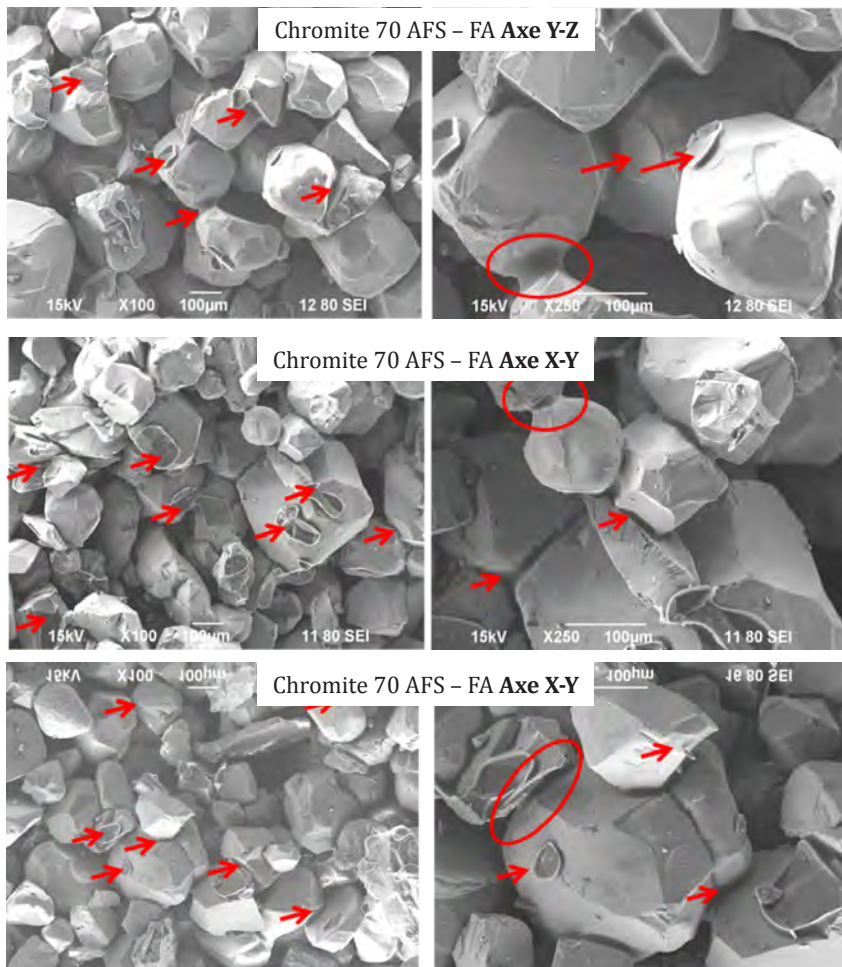


Figure 3 : Images de MEB des éprouvettes obtenues par fabrication additive avec un liant de type furanique (fournisseur 2) et un sable de chromite (70 AFS). (Les flèches marquent les ponts de liant entre les grains)

Par ailleurs, des éprouvettes ont été fabriquées à partir de sable silice ou chromite par fabrication additive pour évaluer leur résistance à la flexion (Figure 4).

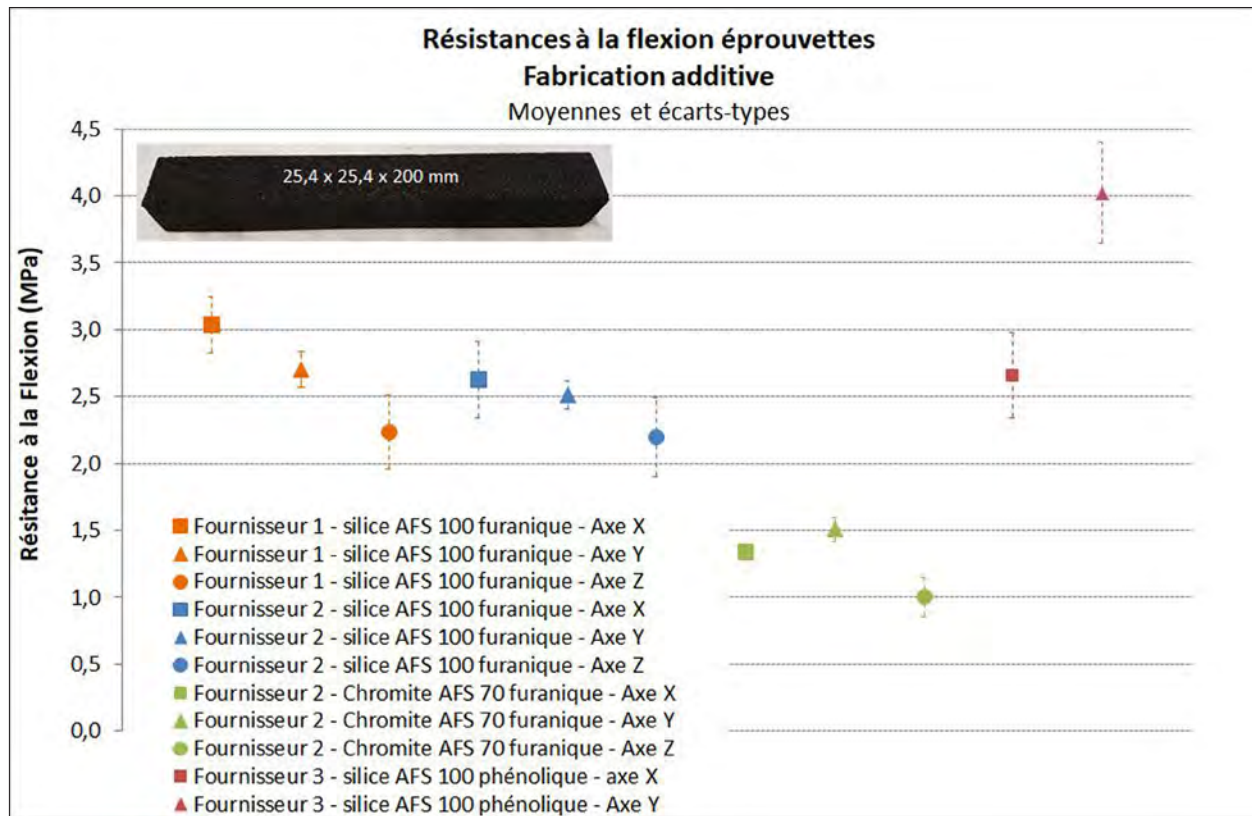


Figure 4 : Résistance à la flexion en fonction de la nature du sable et des conditions de fabrication

Les axes X, Y et Z correspondent aux sens d'impression où X et Y sont la longueur et à la largeur de la box d'impression et Z à l'altitude.

Pour un sable silice imprimé en fabrication additive, la résistance oscille principalement entre 2 et 3 MPa, valeurs équivalentes à un sable silice mis en œuvre par gazage ou

par malaxage à vis continu. Ces valeurs sont en phase avec la pratique, où les moules et les noyaux imprimés ne sont pas plus fragiles que ceux obtenus conventionnellement.

Par ailleurs, on constate un abattement de la résistance selon l'axe Z dans tous les cas ainsi qu'un abattement pour le sable chromite et pour une taille de grains plus grossière.





Renaud MIGNOLET  
Président de 3D  
Métal Industrie

## La solution globale pour fabriquer des pièces de fonderie de qualité dans des délais optimisés



Crée en mai 2019, dans les Ardennes, la société 3D METAL INDUSTRIE, fabrique des moules et des noyaux par impression 3D sable. Cette nouvelle société propose ainsi un service, en partenariat avec les fonderies associées ou non, une offre dynamique de développement et fabrication de pièces de fonderie.

### Developper la fonderie du futur



A l'origine de ce projet, la volonté de :

6 fonderies locales (La Fonte Ardennaise, Les Fonderies Bouhyer, Nicolas, Rocroyenne d'aluminium, Rollinger, Vignon) et un bureau d'étude : RM Technologie ; D'accroître la compétitivité, par une technologie de pointe, un secteur essentiel de l'industrie local soumis à une forte concurrence mondiale.

Un partenariat entre ces 6 fonderies, des investisseurs privés (Cap Invest 08), l'UIMM de Champagne Ardenne, l'Etat & la Région Grand Est (dans le cadre du PIA 3 et du Pacte Ardennes), a permis l'investissement dans une plateforme d'impression basée une machine EXONE 3D SMAX.

Nous avons intégré également la simulation numérique (NovaFlow) ainsi qu'un outil de numérisation 3D. 3D METAL INDUSTRIE gère donc la chaîne complète d'industrialisation quelques soit les données d'entrées : pièce, plan, fichier 3D, co-conception, avec en plus le savoir-faire du partenaire fondeur.



### Le seul endroit en europe avec une telle proximite entre : technologie, competences & fonderies

Une proximité géographique qui permet d'optimiser la production des pièces, un partenariat unique en France entre des acteurs locaux, grâce à un réseau collaboratif de fonderies([www.fonderie-ca.fr/](http://www.fonderie-ca.fr/)),

une plateforme de fabrication additive dédiée à la recherche et au transfert de technologies ([www.platinum3d.com/fr/](http://www.platinum3d.com/fr/)),



Une école d'ingénieurs à proximité : EISINE : Ecole d'Ingénieur en Sciences Industrielles et Numériques( [www.univ-reims.fr/eisine/](http://www.univ-reims.fr/eisine/)), un laboratoire universitaire partenaire : Institut de Thermique, Mécanique, Matériaux, des laboratoires d'expertises : CRITT MDTs, Laboratoire Forge Ardenne Nord, de la formation professionnelle et continue : AFPI / CFAI.

### Les caractéristiques de l'imprimante 3d ExOne S max :



Avec une très grande capacité d'impression :

1800 X 1000 X 700 mm<sup>3</sup>, à partir d'un mélange de sable et de résine à base furanique, d'une épaisseur de couche de 0.28 mm, le délai d'impression est court pour une box complète : 18 heures.

Cette imprimante 3D ExOne S Max permet de réduire les coûts et les délais de production des moules et des noyaux ayant des caractéristiques techniques beaucoup plus complexes que ceux des procédés traditionnels.



Une technologie de pointe qui apporte une solution dynamique pour fabriquer les pièces de fonderie, dans le domaine de l'Engineering (Conception de brut de fonderie, Scanning, rétro conception, Méthode de moulage, Simulation solidification et remplissage), de l'impression 3D (Impression 3D Sable, Fourniture de moules et noyaux, Conception de solutions de fabrication), du Manufacturing (Fabrication des pièces dans les fonderies partenaires, Contrôle et expertise sur les pièces, Finition et usinage dans un réseau de partenaires).



## Exemples d'application

Complexité technique : la turbine Kaplan, une turbine hydraulique à hélices, de type « réaction », scan et retro-conception à partir d'une pièce cassée.



- Dans le domaine artistique : Reproduction d'une sculpture en Malachite en métal : Bronze et Aluminium : scan 3D d'une sculpture existante, reproduction en plus grande dimension.



## 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

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

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





Sergio DA ROCHA  
Responsable Formations  
Fédération Forge Fonderie

## Quand le lycée Gustave Eiffel d'Armentières ouvre ses portes aux fondeurs !

Dans le cadre de ses activités en région, la Fédération Forge Fonderie a réuni, le 19 novembre dernier, au Lycée Gustave Eiffel à Armentières, Fondeurs et élèves de BTS Fonderie afin d'échanger sur les motivations et les aspirations de ces professionnels de demain.



Les présences de Monsieur Jean-Marc Desprez, Inspecteur général de l'Education Nationale, de Monsieur Frédéric Dédéken et de Monsieur Yves Causse, Inspecteurs de l'Education Nationale de l'Académie de Lille, ont souligné les liens étroits entre la profession et l'Education Nationale.

Après un accueil chaleureux de Madame Cécile Trémolières, Proviseure de l'établissement, l'ensemble des participants ont assisté à la présentation détaillée de Monsieur Frédéric Aldin, expert Environnement du CTIF, du projet REBREFOND, qui a été conduit de 2017 à 2019 et qui a fortement mobilisé la profession. Nicolas Créon, Responsable EHS Fédération Forge Fonderie, a par la suite présenté le déroulement du processus de révision du BREF ainsi qu'un bilan d'étape des premières avancées.



Un déjeuner au sein de l'établissement a permis à l'ensemble des participants de prolonger ce moment d'échange et pour certains fondeurs de se rappeler avec émotion de leur formation passée au sein de cet établissement.

L'après-midi, les professionnels ont profiter d'une présentation détaillée du contenu des formations de la section Fonderie (Bac pro et BTS) par Monsieur Nicolas Armingaud, Directeur Délégué aux Formations Professionnelles et Technologiques ainsi que de son équipe enseignante.

## Fondeurs et étudiants réunis pour partager leur vision du métier de fondeur

C'est dans un esprit de convivialité que les étudiants en BTS Fonderie ainsi que les professionnels ont démarré ce moment d'échange. Quelques moments choisis :

### Lucas, élève de 2<sup>e</sup> année :

« J'ai découvert la fonderie suite à mon Bac S, et à une expérience professionnelle lors du mois de juillet à la fonderie de la Scarpe. Cette expérience m'a permis de me familiariser avec l'ensemble des processus de la fonderie et la satisfaction de participer concrètement à la production d'une pièce m'a incité à m'orienter vers le BTS. »

### Serge Delattre, Fonderie de la Scarpe :

« La fonderie est un métier noble, un métier de créateur. Ce sont les mêmes techniques pour une produire une pièce automobile que pour une statue ! »

### Marion Nicard, Responsable développement RH, Bouhyer :

« Quelles étaient vos sources d'inquiétudes lorsque vous réfléchissiez sur votre orientation en fonderie ? »

### Noël, élève de 2<sup>e</sup> année :

« J'ai intégré le BTS à la suite d'un bac technologique STI2D. J'ai découvert la section fonderie suite à la présentation de la section fonderie de Monsieur Armingaud dans mon ancien lycée. Et à la suite des deux journées d'immersion, avec la réalisation d'un moule ainsi que de la coulée, j'ai décidé d'intégrer le cursus. »

### Brian élève de 2<sup>e</sup> année :

« J'ai également intégré le BTS suite à un Bac STI2D, avec l'intérêt d'une formation axée principalement sur de la pratique, permettant de concrétiser la partie théorique. »

### Lucas, élève de 2<sup>e</sup> année :

« C'est le niveau de difficulté de la formation ainsi que la réalité du travail en fonderie qui représentait une source d'inquiétude. »

### Marion Nicard, Responsable développement RH, Bouhyer :

« Quelles sont vos attentes concernant votre entrée dans le monde du travail et votre parcours dans dix ans ? »

### Serge Delattre, Fonderie de la Scarpe :

« nous recherchons des compétences mais surtout un savoir être qui se résume en quatre choses : être à l'heure, dire bonjour, dire au revoir et dire merci. »

### François Segard, Fonderie du Nord :

« Nous regardons également le type d'entreprise dans lesquelles vous avez effectué votre apprentissage ou vos stages. Car l'activité des salariés en fonderie varie en fonction de la taille de l'entreprise. Vous intervenez sur un éventail d'activités plus large sur production dans une petite fonderie par exemple. »

### Olivier Legrand, Staub :

« Je souhaite pour ma part vous féliciter car depuis quelques années j'observe une amélioration du savoir être des étudiants en BTS notamment en ce qui concerne la préparation des entretiens. Vous vous renseignez en amont sur nos entreprises et par la suite vous avertissez systématiquement lorsque vous rencontrez une difficulté pour vous rendre au travail. »

### Stéphane Lebleu, Le Creuset :

« Nous ne pouvons malheureusement pas recruter uniquement des salariés issus des formations fonderie. Nous recrutons principalement des salariés en reconversion et cela pose problème lorsque nous souhaitons les faire évoluer. N'ayant pas de bagage technique de base, la montée en compétences est difficile pour ces salariés. »

### Élève de 1<sup>re</sup> année :

« Quelles sont les compétences que vous recherchez lorsque vous recevez le CV d'un jeune titulaire d'un BTS en fonderie ? et celles que vous recherchez pour un diplômé de l'ESFF ? »



**Marion Nicard, Responsable développement RH, Bouhyer :**

« Le savoir être est important mais surtout lorsque vous vous présentez en entretien, ce que nous vous demandons c'est d'avoir réfléchi en amont sur votre projet professionnel afin que nous puissions travailler ensemble pour faire concilier le projet d'entreprise avec le vôtre. »

**Wilfrid Boyault, Directeur Général FFF :**

« Les conditions d'embauche des diplômés de l'ESFF sont très favorables. Sachez que les titulaires du diplôme de l'ESFF ne connaissent pas le chômage. »

**Élève de 1<sup>re</sup> année :**

« Rencontrez-vous des difficultés de recrutement ? Notamment en ce qui concerne les départs en retraite de personnels qualifiés ? »

**François Segard, Fonderie du Nord :**

« Nous n'anticipons pas assez les départs en retraites des personnels qualifiés afin de faire monter en compétences les salariés en poste. Cela pose des problèmes de compétences dans nos entreprises et souligne l'importance de la qualité des formations dans nos métiers. »

## Une visite du plateau technique de l'établissement

Afin de conclure ces échanges, une visite du plateau technique de l'établissement a permis aux professionnels d'apprécier la qualité des moyens mis à disposition des élèves pour l'apprentissage des compétences des métiers de la Fonderie.

**L'importance d'accueillir des stagiaires ou des apprentissages :**

« La faible implication des entreprises comme lieu d'accueil pour les périodes de formation en milieu professionnel des élèves mineurs est une problématique majeure à la mise en œuvre des formations en fonderie et représente un frein à l'attractivité de ce métier » Frédéric Dédéken, Inspecteur de l'Education Nationale.



**La Fédération Forge Fonderie tient à remercier chaleureusement :**

Les équipes du Lycée Gustave Eiffel d'Armentières pour leur accueil et leur implication dans la formation de nos métiers (Madame Cécile Trémolière, Provisoire ; Monsieur Franck Horgnies, Provisoire adjoint ; Monsieur Benoit Santraine, Enseignant Fonderie ; Monsieur Didier Delobel, Enseignant Fonderie ; Marc Legrand, Enseignant Fonderie ; Monsieur Oliver Laurent, Enseignant Fonderie).

Les représentants du Ministère de l'Education Nationale et de l'Académie de Lille pour le soutien de nos professions (Monsieur Jean-Marc Desprez, Inspecteur Général de l'Education Nationale ; Monsieur Frédéric Dédéken, Inspecteurs de l'Education Nationale de l'Académie de Lille ; Monsieur Yves Causse, Inspecteurs de l'Education Nationale de l'Académie de Lille).

Ainsi que les entreprises pour leur participation à la table ronde avec les étudiants (FAD ; Staub ; EJ ; Fonderie du Nord ; Vossloh Outreau ; Fonderie de la Scarpe ; Fonderie et aciérie de la Haute Sambre ; Le Creuset ; Bouhyer).





### VOSSLOH Outreau Technologies présente sa nouvelle fonderie



Lors de la matinée du 20 novembre, Monsieur David Souilah, Directeur général de Vossloh Outreau Technologies, a accueilli l'ensemble des participants et a présenté l'entreprise.

La Fédération Forge Fonderie a consacré une partie de cette matinée pour proposer un tour d'horizon de l'actualité formation (réforme de la formation, point CQPM, résultats de l'enquête formation FFF et effectifs des formations diplômantes fonderie).

Pour clôturer ces deux jours, l'ensemble des participants ont profité d'une visite guidée de la nouvelle fonderie VOSSLOH Outreau Technologies.

### Vous cherchez un apprenti ?

Monsieur Nicolas Armingand,

Directeur délégué aux fonctions professionnelles se tient à votre disposition au 03 20 48 43 05

Qu'est-ce qui ne coûte rien,  
fait réaliser 17%\* d'économie  
d'énergie et rassemble déjà  
+ de 300 entreprises ?

\*source ADEME

**PROREFEI**  
La formation des référents  
énergie dans l'industrie

Avec PROREFEI, l'industrie se mobilise pour devenir un modèle de transition énergétique. Ce sont pas moins de **3 000 référents énergie** qui vont être formés et accompagnés d'ici fin 2020.

Alors pourquoi pas vous ?  
**PROREFEI, LA formation des référents énergie en industrie.**

[www.prorefei.org](http://www.prorefei.org)

**Optimisons  
nos  
énergies**

Un programme porté par :

**atee**  
ASSOCIATION TECHNIQUE  
ÉNERGIE ENVIRONNEMENT

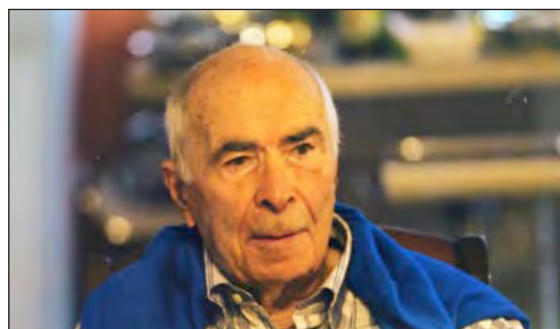
## Jacques DEGUY nous a quitté

Le décès de Jacques Deguy, survenu le dimanche 5 janvier 2020 à l'aube d'une nouvelle décennie et de ses 95 ans, nous laisse dans une profonde tristesse.

Ingénieur des Arts et Métiers, il débute son parcours professionnel à la forge intégrée de RENAULT, puis prend rapidement en main la forge familiale nogentaise avec son frère André.

Il convertit les Forges de Courcelles à l'industrie automobile en les équipant de moyens de production de grande série. Des marteau-pilons hydrauliques, des maxi-presses, des chauffeuses à induction, des machines à commande numérique, des robots viennent moderniser l'entreprise.

Par l'acquisition de la société AMIS qu'il déménage de Thiers à Montluçon et prédestine à la pignonnerie à denture forgée, il transforme la petite entreprise familiale en un Groupe de Forge.



Tout au long de sa carrière, il a contribué à l'essor et la prospérité des usines du Groupe et les a préparées aux marchés de la mondialisation.

« Nous retiendrons de lui ses compétences techniques, sa perspicacité sans faille par laquelle rien ne lui échappait, et enfin sa convivialité et son humanité qu'il exprimait par le biais de ses visites quotidiennes dans les ateliers où il aimait serrer les mains et écouter, avec son visage doux et souriant »

# be pro\*

TECHNOLOGY  
MACHINES  
SYSTEMS

TOUT CE QUI EST BON VIENT D'EN-HAUT. C'EST POURQUOI NOUS NOUS AVONS PORTÉ NOTRE ATTENTION SUR LE PRINCIPE DU FUNICULAIRE. LES PIÈCES À USINER SONT ALIMENTÉES DANS LE PROCESSUS ESSENTIEL PRODUISANT DES COPEAUX PAR LE HAUT PENDANT QUE D'AUTRES PROCESSUS COMME LE NETTOYAGE OU LE SÉCHAGE ONT LIEU. SYSTÈMES DE SW. C'EST INTELLIGENT.

**be progressive. be SW**

WWW.SW-MACHINES.COM

SW France SAS | Régis Alexandre | General Manager | Phone +33 6 33 87 49 43

## Réunions Territoires sur le site Setforge L'Horme et à la Fonderie Dechaumont à Muret

Moments privilégiés de rencontre et d'échange entre confrères, les réunions organisées par la Fédération Forge Fonderie en région permettent d'aborder différentes thématiques communes tout en découvrant une entreprise, ses savoir-faire et ses productions.

Le 29 janvier 2020, Didier Forestier, directeur du site Setforge à L'Horme (Loire) a ainsi accueilli seize participants dans cette unité du groupe Farinia qui produit des pièces forgées de 10 kg à 400 kg en particulier pour le marché du poids lourds et des véhicules spéciaux.

Au programme de la réunion, Wilfrid Boyault, directeur général et directeur juridique de la Fédération Forge Fonderie, est intervenu sur plusieurs évolutions récentes du droit des affaires : la réforme du droit des relations commerciales en 2019 (conditions générales de vente et d'achat, pratiques déloyales ...) et secret des affaires. Sergio Da Rocha, responsable de la formation à la fédération, et Laurent Parin, A3F, ont pris la suite pour respectivement faire le point sur les bouleversements entraînés par la réforme de la formation professionnelle et l'évolution des programmes de formation interentreprises.

Le 27 février, c'est Jean-Baptiste Dechaumont qui a reçu un groupe de treize personnes dans son entreprise familiale située à Muret (Haute-Garonne). Fondées en 1860, les Fonderies Dechaumont produisent des pièces en fonte ductile pour la voirie, l'assainissement et l'aménagement urbain.



Après le tour de table habituel et le point juridique de Wilfrid Boyault, les participants ont pu échanger avec Géric Garaud, directeur général de la société Inerta basée dans la région nantaise. Ce dernier expérimente une méthode de dépollution des sables de fonderie par phytomanagement et a pour projet de développer une plateforme expérimentale. Pour obtenir de plus amples informations à ce sujet, les entreprises adhérentes peuvent contacter Nicolas Créon, responsable Environnement, Hygiène et Sécurité à la Fédération Forge Fonderie.

Nous remercions les dirigeants de Setforge et des Fonderies Dechaumont ainsi que leurs collaborateurs pour leur chaleureux accueil et l'ensemble des participants pour la qualité et l'intérêt des échanges.





Guillaume KOZUBSKI,  
Responsable de l'animation  
adhérents et des  
groupements  
Fédération Forges Fonderie

## Un nouveau responsable des relations avec les entreprises adhérentes de la Fédération Forge Fonderie

Depuis le 6 janvier 2020, Guillaume Kozubski a rejoint l'équipe de la Fédération Forge Fonderie pour prendre en charge les relations Adhérents et les Groupements professionnels.

Il a auparavant travaillé pendant dix ans à la Fédération Française de Carrosserie, branche Constructeurs. Issu d'une formation universitaire en histoire des techniques, sa mission initiale dans cette fédération a consisté à valoriser l'histoire et le patrimoine de la profession par la rédaction d'ouvrages et d'articles et la mise en place de dispositifs de transmission des savoir-faire en matière de véhicules anciens.

Fort de cette culture de métier, ses activités se sont ensuite étendues au développement et à l'animation du réseau des entreprises adhérentes, mais aussi à la représentation de leurs intérêts auprès des constructeurs automobiles, des équipementiers et des autres organisations représentatives de la filière.

*« Mon parcours professionnel m'a notamment permis d'aborder de nombreux aspects des mutations en cours dans l'industrie automobile. L'importance de leurs enjeux techniques, économiques et sociaux pour certaines entreprises de notre fédération est évidente et je pourrai donc, par exemple, mettre cette expérience à leur service. Cela étant, je mesure également toute la diversité des secteurs d'activités clients de la fonderie et de la forge et ce que va devoir être celle de mes interventions, en conséquence. »*

A ce titre, Guillaume Kozubski a pour objectifs d'assurer au sein de la Fédération Forge Fonderie la vitalité des groupements professionnels, de prendre en compte les besoins des membres en termes d'approche commune métier ou process et d'animer, en collaboration étroite avec Olivier Vasseur, les réunions Territoires autour de thématiques métiers. Pour soutenir ces actions, il assure une veille stratégique sur l'évolution des marchés et pilote les outils de suivi des prix des matières premières et de l'énergie.

Il a également pour mission d'assurer la mise en place et le suivi d'opérations spéciales, d'actions collectives et autres partenariats (achats groupés d'électricité ou de gaz par exemple).

Il est enfin amené à représenter les intérêts de nos entreprises auprès des partenaires économiques et institutionnels, au niveau national et européen, et à s'assurer de la bonne diffusion des informations entre ces partenaires et les adhérents.

*« Je suis heureux de mettre mes compétences au service de professions historiquement et techniquement riches et variées, et je remercie les responsables et élus de la Fédération Forge Fonderie de la confiance qu'ils m'ont accordée. »*

Contact : [g.kozubski@forgefonderie.org](mailto:g.kozubski@forgefonderie.org) / +33(0)1 43 34 76 51

# Nos formations 2020



Métallurgie et comportement des matériaux			
Métallurgie et propriétés des alliages de cuivre	CU F026	28 au 30 avril 2020	1 630 €
Traitements thermiques des aciers et fontes	FE A074	5 mai 2020	650 €
Tenue à la corrosion des aciers inoxydables <b>N</b>	AC A075	4 juin 2020	650 €
Fatigue des matériaux <b>N</b>	TM F088	30 avril 2020	650 €

Conception et industrialisation des pièces			
Alliages d'aluminium et de magnésium : performances et domaines d'utilisation <b>N</b>	AMA076	23 juin 2020	650 €
Quelle technique de mise en oeuvre pour vos pièces : la fonderie, la forge, la fabrication additive	TM F068	7 au 9 février 2020	1 630 €
Normes et spécifications des produits moulés et forgés <b>N</b>	TM F082	18 juin 2020	330 €
Pièces moulées : règles de conception et de tracé	TM F051	10 au 12 mars 2020	1 630 €

Métiers de la forge			
Apprentissage des bases de la forge	FG A13	3 au 4 mars 2020	1 260 €
Métallurgie et traitements thermiques des pièces en acier forgé	FG A06	21 au 22 avril 2020	1 260 €
Conception et suivi des outillages de forge	FG A11	7 au 8 avril 2020	1 260 €
Défauts de forge	FG A08	17 au 18 mars 2020	1 260 €
Lubrification des outillages de forge	FG A15	10 juin 2020	650

Métiers de la fonderie			
Apprentissage des bases de la fonderie pour clients, fondeurs, fournisseurs	TM F015	10 au 13 mars 2020 2 au 5 juin 2020	1 930 €
Métallurgie, élaboration et traitements thermiques des aciers moulés	AC F042	9 au 11 juin 2020	1 630 €
Métallurgie et traitements thermiques des superalliages et alliages de titane	SP F063	27 au 28 mai 2020	1 260 €
Réfractaires en fonderie de métaux ferreux et cuivreux : choix et mise en oeuvre	FE F001	Reporté	1 630 €
Technologies et conduite de fours de fusion à induction	FE F045	12 au 14 mai 2020	1 630 €
Pièces moulées : règles de conception et de tracé	TM F051	10 au 12 mars 2020	1 630 €

<b>Métiers de la fonderie</b>			
Masselottage et remplissage en moulage sable pour tous alliages	TM F008	12 au 14 mai 2020	1 630 €
Outillages coquille gravité pour alliages d'aluminium : conception, remplissage, thermique, poteyage	AL F005	21 au 24 avril 2020	1 630 €
Optimiser la conception d'un moule en fonderie sous pression	NFE F033	23 au 25 juin 2020	1 630 €
Moules et modèles de fonderie par fabrication additive <b>N</b>	TM F071	28 au 29 avril 2020	1 260 €
Moulage et noyautage en sable à prise chimique	TM F006	16 au 18 juin 2020	1 630 €
Contrôles et analyse de défauts de pièces de fonderie	TM F057	21 au 23 avril 2020	1 630 €
Défauts en fonderie de fonte : diagnostics et solutions	FT F014	25 au 27 mars 2020	1 630 €

<b>Métiers de fabrication additive</b>			
Fabrication additive : les procédés industriels <b>N</b>	FA A085	17 mars 2020	650 €
Métallurgie, post traitement et caractérisation des produits métalliques issus de fabrication additive <b>N</b>	FA A086	10 mars 2020	650 €

<b>Analyses de laboratoire</b>			
Métallurgie et métallographie des fontes	FT F043	27 au 29 mai 2020	1 630 €
L'analyse chimique par spectrométrie sur produits métalliques	TM F056	24 au 25 mars 2020	1 260 €
Initiation à la caractérisation métallurgique des soudures <b>N</b>	TM F089	12 au 13 mai 2020	1 260 €

<b>Organisation et gestion de l'entreprise</b>			
Technical English in Foundry	TM F049	15 au 16 avril 2020	1 260 €
Management d'atelier	OG A03	25 au 26 mars 2020	1 260 €

<b>Les formations en Contrôles Non Destructifs (CND)</b>			
Contrôles visuels de pièces métalliques <b>N</b>	TM F092	5 au 6 mai 2020	1 260 €
Initiation aux techniques de CND sur pièces métalliques <b>N</b> (forge, fonderie, soudure)	TM F090	24 au 25 mars 2020	1 260 €

Nous vous informons qu'à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2020, la gestion opérationnelle de l'ensemble des activités de formation d'A3F sera traitée par CTIF, organisme de formation

- sous le n° de Déclaration d'Activité I 1922302492
- sous le n° Datadock DD 77906



## mars 2020

**INDUSTRIE PARIS**

31/03/2020 - 03/04/2020

Paris (France) Paris Nord Villepinte

[www.industrie-expo.com](http://www.industrie-expo.com)

Le salon des professionnels des technologies de production

## avril 2020

**HANNOVER MESSE**

20/04/2020 - 24/04/2020

Hanovre (Allemagne)

[www.hannovermesse.de](http://www.hannovermesse.de)

Salon international des industries et des techniques

**MACH**

20/04/2020 - 24/04/2020

Birmingham (Royaume-Uni)

[www.thenec.co.uk](http://www.thenec.co.uk)

Exposition internationale sur les outils d'usinage de métaux et machines-outils

**BIAM**

21/04/2020 - 24/04/2020

Zagreb (Croatie)

<https://www.zv.hr/en>

Salon international de la machine-outil



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

## mai 2020

<b>BIEMH</b>	25/05/2020 - 29/05/2020	Bilbao		Bienale espagnole de la machine-outils
--------------	-------------------------	--------	--	--

## juin 2020

<b>METALFORUM 2020</b>	02/06/2020 - 05/06/2020	Poznan (Pologne)	<a href="http://www.mtp.pl/en">www.mtp.pl/en</a>	
<b>SUBCON</b>	09/06/2020 - 11/06/2020	Birmingham (Royaume-Uni)	<a href="http://www.subconshow.co.uk">www.subconshow.co.uk</a>	Salon international de la sous-traitance en fabrication
<b>SALON MIDEST</b>	23/06/2020 - 26/06/2020	Paris Nord Villepinte	<a href="http://www.midest.com">www.midest.com</a>	mondial des salons de sous-traitance industrielle
<b>La Fédération sera présente au village Forge Fonderie</b>				
<b>CASTFORGE 2020</b>	16/06/2020 - 18/06/2020	Stuttgart (Allemagne)	<a href="http://www.messe-stuttgart.de/castforge/en/">www.messe-stuttgart.de/castforge/en/</a>	Salon professionnel sur les pièces moulées et forgées ainsi que leur usinage

Changement de date

À NOTER

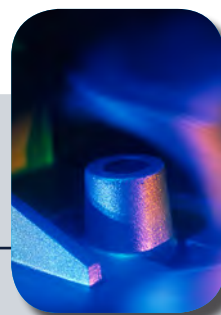
## novembre 2020

<b>METAL DAYS</b>	04/11/2020 - 05/11/2020	Chaville (92)	<a href="http://metaldays.ctif.com">metaldays.ctif.com</a>	Métallurgie 4.0 Transition écologique et énergie
-------------------	-------------------------	---------------	--	---

Pour leur 5<sup>e</sup> édition, les MetalDays qui se tiendront les 04 et 05 novembre prochains à l'Atrium de Chaville, seront l'occasion de rencontres et d'échanges avec les principaux acteurs des industries de la métallurgie, de la transformation des métaux et de leurs usages. Cette nouvelle édition mettra l'accent cette année sur l'**industrie du futur et la transition énergétique et écologique**.

Regroupant les sociétés les plus représentatives et novatrices du secteur, de la PME à la multinationale, cette manifestation est le lieu de rencontre des fournisseurs et donneurs d'ordres utilisant le matériau métallique. Pendant 2 jours, se dérouleront en parallèle des conférences plénières, des tables rondes, des ateliers, des rendez-vous d'affaires et des expositions avec pour ambition d'aborder tant les aspects marché, que technologiques et humains de la filière.

N'attendez plus ! Réservez les 4 et 5 novembre 2020 dans votre agenda pour nous rejoindre à l'événement de l'année en métallurgie !



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, P. Krumpipe,  
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

<b>AREF</b>	<b>2<sup>e</sup> de couv</b>
<b>ASK CHEMICALS</b>	<b>3<sup>e</sup> de couv</b>
<b>ATEE</b>	<b>49</b>
<b>FICEP FRANCE</b>	<b>41</b>
<b>FOSECO SAS</b>	<b>4</b>
<b>GNR FRANCE</b>	<b>45</b>
<b>LASCO</b>	<b>4<sup>e</sup> de couv</b>
<b>SCHULER PRESSEN GMBH</b>	<b>27</b>
<b>SW FRANCE</b>	<b>8</b>
<b>TRANSVALOR</b>	<b>3</b>



LA REVUE **forge et fonderie**

## BULLETIN D'ABONNEMENT

- 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

Neufize 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

### Mes coordonnées

Société .....

Service ou fonction .....

Nom .....

Prénom .....

Rue .....

CP ..... Ville .....

Pays .....

Téléphone : .....

Fax .....

mail .....

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



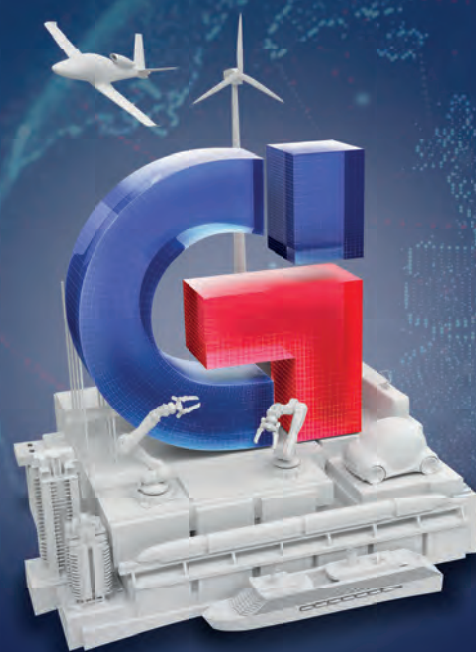
**LA REVUE forge et fonderie** est éditée par le Centre d'Information de la FORGE et de la FONDERIE  
45, rue Louis Blanc, 92400 COURBEVOIE  
Tél. : 01 43 34 76 30, Fax : 01 43 34 76 31  
E-mail : [contact@forgefonderie.org](mailto:contact@forgefonderie.org)

# GLOBAL INDUSTRIE

PARIS, THE GLOBAL MEETING PLACE OF THE INDUSTRY

**NOUVELLES DATES !**

**23-26 JUIN 2020**  
**PARIS NORD VILLEPINTE**



**TOMORROW'S INDUSTRY IS BEING SHAPED HERE**

L'INDUSTRIE DE DEMAIN S'INVENTE ICI

[global-industrie.com](http://global-industrie.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](mailto:info.france@ask-chemicals.com)

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

**ASKCHEMICALS**  
We advance your casting



# L'OPTIMUM QUALITÉ EST NOTRE PRIORITÉ – depuis 1863

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 ! **Your needs. Our solutions.**

## 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

