

LA REVUE **forge et fonderie**

N°45

MARS | 2026

Au sommaire

- 6** EUROGUSS 2026
succès confirmé de la 30e édition du salon
international leader de la fonderie sous pression
- 14** La mesure de pression de gaz dans les moules en sable
- 21** Étude de forgeabilité d'une préforme obtenue par
Fabrication Additive Arc-Fil
- 26** Loi de finances pour 2026 : Évolutions en matière
d'apprentissage et de formation professionnelle



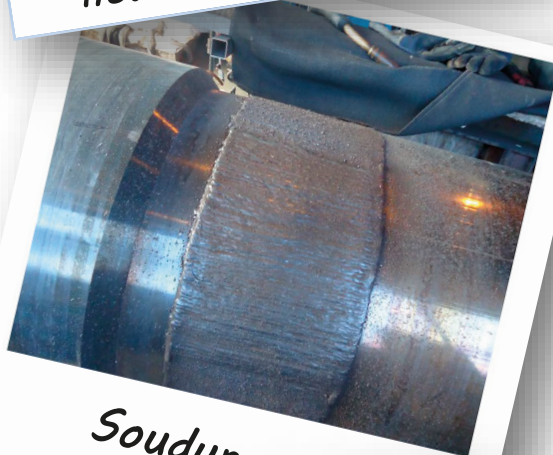
MAINTENANCE PRESSES
CLERMONT-FERRAND



*Maintenance corrective et
préventive*



*Vente de machines
neuves et occasions*



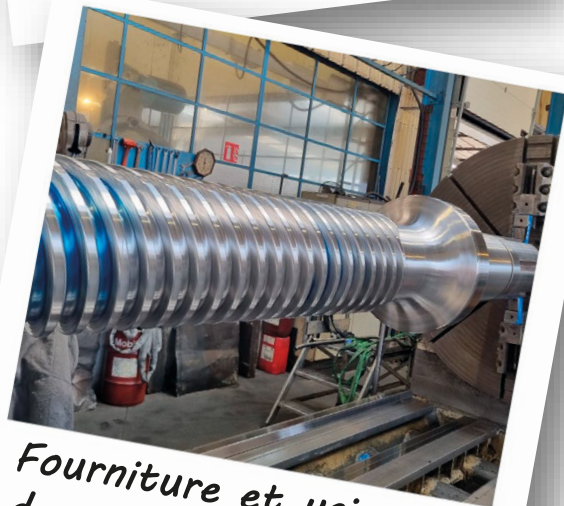
Soudure



*Reconstruction et mise
en conformité*



Usinage sur site



*Fourniture et usinage
de pièces de rechange*



**Actemium Maintenance
Presses Clermont Ferrand**
Société AREF
Route de Courpière- 63920
Peschadoires- France
Tel: + 33 (0) 4 73 80 17 68 –
Fax: + 33 (0) 4 73 80 52 14
E-mail: ampcf@actemium.com
Site: www.eref.fr

A.R.E.F.

EDITORIAL

- 02** Lorsque la Corée du Sud se retrouve européenne...
Wilfrid BOYALT

BREVES

- 04** La Fédération Forge Fonderie mobilise ses membres au salon CastForge 2026
- 05** Accueil des équipes FMC du CETIM et lancement du laboratoire commun METALIQ sur le campus ENSAM de Châlons-en Champagne

TECHNIQUE

- 06** EUROGUSS 2026
succès confirmé de la 30^e édition du salon international leader de la fonderie sous pression
- 14** La mesure de pression de gaz dans les moules en sable
Patrick HAIRY, Stéphane MAGRON, Yves LONGA,
Jean-François CARTON, Cécile NICOLI et Gabriel VINCO
- 21** Étude de forgeabilité d'une préforme obtenue par Fabrication Additive Arc-Fil
Lucas A. DUQUE VARGAS, Sophie BERVEILLER, Régis BIGOT, Marc WARY, Stéphane MATHIEU, Sandra CHEVRET et Laurent LANGLOIS

FORMATION

- 26** Loi de finances pour 2026 : Évolutions en matière d'apprentissage et de formation professionnelle
Sergio DA ROCHA
- 27** Apprentissage, de nouvelles aides à l'embauche en 2026

AGENDA

- 28** Les rendez-vous de la profession



**La revue complète
à télécharger gratuitement
sur notre site
www.forgefonderie.org**

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

Hervé Gestas

Rédacteur en chef

Wilfrid Boyault

Comité de rédaction

W. Boyault, C. Macke-Bart,

C. Grosjean

Rédaction

Heidi Palzer

Tél. : 01 43 34 76 68, h.palzer@forgefonderie.org

Abonnement

(revue sous forme papier)

4 numéros : 95,34 € TTC

ISSN 2493-5824



Pour vous abonner :

<https://www.forgefonderie.org/fr/la-federation/revue-forge-fonderie-abonnement>

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 :

Yael Sibony

Tél. : 01 53 36 37 97 yael.sibony@ffe.fr

Les publicités paraissent sous la seule responsabilité de leurs annonceurs. Les articles sont rédigés sous la responsabilité 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 : 500 exemplaires

Impression

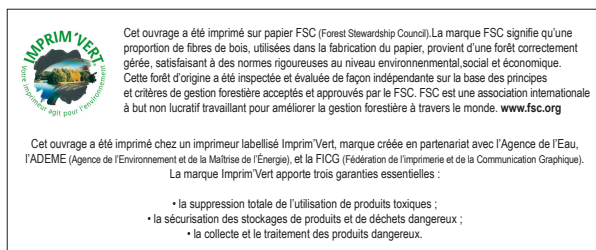
Espace Graphix

Imprimé sur papier recyclé et encres

100 % végétales

Photo de couverture

Dominique Sarraute





CastForge

International Trade Fair
for Castings and Forgings
with Processing



Your free ticket code
CF26YOURTICKET
Redeem online at:
castforge.eu/ticket

9 to 11 June 2026 Messe Stuttgart, Germany

6 CastForge highlights: A perfect one-cast solution!



Record participation in 2026:
over 500 exhibiting companies.



Entire production chain:
from blank to finished component.



High international character:
global network for the industry.



Hotspot for cast and forged parts:
one of the largest user markets in Europe.



High-quality contacts with potential:
demand and supply in one place.



Optimal public transport connections:
airport, bus and train directly on site.



Further information about the
trade fair can be found online at:
castforge.eu

Lorsque la Corée du Sud se retrouve européenne...

Depuis plusieurs mois, les lecteurs de cette revue suivent la mobilisation de la fonderie et de la forge françaises pour que soit mise en place, sans délai, une politique industrielle articulée autour de l'exigence d'un contenu local européen substantiel comme condition *sine qua non* de tout financement public ou bénéficiant d'une quelconque politique publique.

Il n'est donc pas besoin de revenir longuement sur les raisons, simples, qui le commandent : la patiente et puissante stratégie de la Chine (et d'autres), pour déverser sur le territoire de l'Union ses productions, issues de surcapacités industrielles, totalement subventionnées, aidée en cela par des acheteurs européens à courte vue qui ne voient pas venir le jour où ils seront pieds et poings liés avec une fourniture chinoise qui, ayant supprimé les chaînes de production européenne à coup d'énormes dumpings, pourra leur asséner, sans crainte, et des prix élevés et d'éventuelles pénuries organisées.

En revanche, comment ne pas consacrer ces lignes à ce dont a finalement accouché la Commission européenne pour, selon elle, prendre en compte cette demande de politique de contenu local : le projet de règlement dit « *Industrial Accelerator Act* » rendu public le 4 mars dernier ?

Un accouchement aux forceps et dans la douleur, rappelons-le.

En effet, alors qu'il était initialement envisagé que la politique de *local content* européen puisse être annoncée en même temps que le paquet automobile, qui devait l'être le 10 décembre 2025... mais ne l'a été que le 16 décembre..., il a alors fallu se rendre à l'évidence : le sujet était tellement explosif, la révolution des esprits nécessaire tellement « copernicienne », que la Commission et les autres parties prenantes, dont les Etats membres et nos « amis » hors UE, avaient besoin d'un peu plus de temps, pour retrouver leur souffle, leurs esprits.

D'où une date d'annonce d'abord fixée fin janvier 2026, à nouveau reportée au 25 puis 26 février, pour une annonce finalement intervenue au début de ce mois de mars.

Alors le jeu en valait-il la chandelle pour l'avenir de l'industrie européenne, spécialement celle de la forge et de la fonderie ?

En l'état du projet de la Commission, la réponse est clairement négative.

Certes, il nous faut d'abord prendre quelques précautions puisque le projet de texte en cause se hisse à des sommets que seuls les services de la Commission peuvent atteindre en termes de complexité, de multiplicité des thèmes abordés, des textes existants ou à venir impliqués. On ne sait jamais... peut-être qu'aux détours de ce labyrinthe et de ces emboîtements un peu de lumière d'espoir apparaîtra vraiment.

Mais pour l'heure force est de constater qu'au moins deux énormes failles béantes promettent le dispositif à un naufrage assuré. Du moins si, au cours du processus législatif, le Parlement et le Conseil européens ne corrigent pas fermement la copie.

Cette copie est, en effet, la résultante de tristes combinaisons que l'on pourrait résumer comme suit : comment donner l'impression à la France, au Vice-président de la Commission, Stéphane Séjourné, à ses services, au tissu industriel européen qui l'a largement soutenu en vue de l'instauration d'une exigence substantielle de contenu local européen, que tel est bien l'objet du texte ...

... tout en posant des conditions qui privent le mécanisme de la plus grande part de sa portée et satisfont ainsi les orthodoxes d'un libre échange, d'une libre concurrence mondiaux (qui n'existent plus qu'à l'état le plus théoriquement gazeux), la DG Commerce, les Etats membres du nord (pas les plus concernés par la survie de l'industrie...), les conservateurs allemands (dont la Présidente de la Commission est, rappelons-le, issue) qu'ils soient en charge à Berlin ou au Parlement européen au sein du Parti Populaire Européen (PPE) ?

Eh bien en expliquant ou laissant expliquer que Bruxelles a enfin changé de logiciel, que le nouvel état du monde le commandait et que, dans sa grande sagesse, la Commission propose de donner naissance à une vraie politique de contenu local à l'europpéenne.

Alors qu'en fait... force est de constater que le projet de règlement reste attaché à et fondé sur le respect des règles de l'OMC, des seules exceptions admises dans ce cadre, tout comme au respect des très nombreux accords passés par l'Union avec ses partenaires du reste du monde.

D'où les deux énormes voies d'eau dans le système envisagé à ce stade.

D'une part, en effet, pour près de 50 % du chiffre d'affaires de nos professions, à savoir le marché automobile, afin de rester dans les clous de l'Organisation Mondiale du Commerce, pourtant, rappelons-le, en état de mort cérébrale, le champ d'application des exigences de contenu local est limité, dans le projet, aux véhicules électriques et hybrides rechargeables qui seuls contribueraient à la décarbonation de l'industrie et peuvent ainsi relever des exceptions aux règles de droit commun de l'OMC.

Or un tel choix signifie que, outre tous les autres secteurs d'activité de nos métiers hors automobile qui sont à ce stade exclus, seul un tiers du marché automobile serait concerné par les nouvelles règles de *local content* annoncées comme révolutionnaires... tout en étant ainsi largement vidées de leur intérêt pour sauvegarder le tissu industriel européen (lequel dépend d'ailleurs indirectement du secteur automobile bien au-delà de ses limites strictes).

D'autre part, afin de ne pas attenter aux accords de libre-échange, d'union douanière, sur les marchés publics ... conclus avec les très nombreux partenaires de l'Union autour du monde, le projet assimile ces derniers à des Etats membres de l'Union (sauf pour la Commission à les exclure, le cas échéant, au cas par cas).

Et c'est ainsi que, par exemple, la Corée du Sud se retrouve européenne ... et le mécanisme de contenu local prétendument européen, très largement vidé de sa substance et de son intérêt.

Pourtant, l'industrie de l'Union attend et mérite beaucoup mieux qu'un trompe-l'œil qui continuerait à satisfaire les tenants de l'orthodoxie du libre-échange et d'une concurrence pure et parfaite à laquelle l'actualité du monde ne ressemble plus du tout, tout en flouant ceux dont la survie exige des prescriptions fortes de contenu local européen.

Alors puisque le chemin du projet ne fait que commencer, mobilisons-nous fortement auprès des gouvernements des Etats membres et des parlementaires européens pour qu'au soir de son adoption, le texte définitif constitue bel et bien le geste fort annoncé et indispensable à la pérennité de l'industrie de l'Union.

Nous y prendrons toute notre part.

Wilfrid Boyault
Directeur général de la Fédération Forge Fonderie

La Fédération Forge Fonderie mobilise ses membres au salon CastForge 2026

Présente au salon CastForge 2026 avec le « Village Forge & Fonderie », la Fédération Forge Fonderie réunit une vingtaine de fonderies et de forges françaises afin de valoriser leur savoir-faire industriel, renforcer leur visibilité sur le marché européen et favoriser de nouvelles opportunités de coopération et de développement.



À l'occasion de la nouvelle édition du salon CastForge 2026, la Fédération Forge Fonderie sera présente aux côtés de plusieurs de ses entreprises membres au sein du « Village Forge & Fonderie ». Cet espace collectif réunit une vingtaine de fonderies et de forges françaises produisant des pièces techniques essentielles pour de nombreuses chaînes de valeur industrielles.

Cette présence commune vise à mettre en avant les atouts du secteur, notamment les capacités industrielles, l'expertise technique, la qualité, l'innovation et la compétitivité des entreprises françaises. Elle permet également d'adresser un message clair au marché européen et international, en soulignant l'importance de ces métiers pour l'industrie et la souveraineté industrielle européenne.

Le salon constitue un rendez-vous stratégique pour les entreprises du secteur. Il offre une plateforme privilégiée pour valoriser le savoir-faire des équipes, renforcer la

visibilité des entreprises et développer des échanges avec clients, partenaires et acteurs institutionnels.

Pour la fédération et ses membres, la participation à CastForge 2026 doit notamment favoriser la création de nouveaux contacts commerciaux, encourager des coopérations industrielles concrètes et accroître la visibilité du secteur à l'échelle européenne et internationale. L'événement représente également une opportunité de renforcer les relations avec les fonderies et forges d'autres États membres et leurs organisations professionnelles, notamment la European Foundry Federation et EUROFORGE, autour d'enjeux communs tels que la défense commerciale de l'Union européenne, la décarbonation, la digitalisation et le développement des compétences.

Nous serons ravis de vous accueillir sur notre stand hall 10 (10B38) et d'avoir l'occasion de vous présenter nos entreprises membres.

Accueil des équipes FMC du CETIM et lancement du laboratoire commun METALIQ sur le campus ENSAM de Châlons-en Champagne

Le 5 février 2026 a marqué une étape majeure sur le périmètre de la métallurgie au sein du CETIM, avec l'accueil officiel d'une partie des équipes du **Pôle FMC** (Fonderie Forge et Métallurgie à Chaud) du CETIM sur le campus Arts et Métiers de **Châlons-en-Champagne**, lors d'une journée dédiée qui a réuni collaborateurs du pôle FMC, équipes du laboratoire MSMP (Mécanique, Surface, Matériaux et Procédés) de l'ENSAM, et des représentants des deux directions, présents pour l'occasion.

Cette cérémonie d'accueil, et le lancement associé du **Laboratoire Commun METALIQ** qui sera dédié à la mise en forme et transformation à chaud du métal liquide, marquent la première pierre d'une nouvelle phase scientifique et industrielle s'inscrivant pleinement dans le partenariat stratégique CETIM/ENSAM, déjà porteur de plus de 25 années de coopération.

Les moyens et compétences du laboratoire commun METALIQ constitueront ainsi un cadre structuré de recherche partagée pour favoriser le dépôt de projets communs et renforcer la visibilité scientifique des travaux conjoints (thèses, projets divers) sur un nouveau périmètre : **la mise en forme à chaud du métal liquide**. Le laboratoire adressera des thématiques couvrant la conception et élaboration métallurgique, la maîtrise des phénomènes thermophysiques, l'optimisation des procédés de fonderie, le développement d'outillages innovants, l'instrumentation avancée et l'exploitation des données pro-

cess, et la modélisation associée pouvant aller jusqu'au jumeau numérique.

Les travaux développés conjointement sur le site de Châlons-en-Champagne bénéficieront des **moyens expérimentaux du CETIM et de l'ENSAM** partagés au sein du laboratoire : fours d'élaboration, atelier de cire perdue, noyautage, moulage main et coquille, banc Thermocracks®, laboratoire sable, plateforme FSP Carat 130, fabrication additive TruePrint 5000 exploitable pour les outillages, tomographe METROTOM 1500 et divers outillages instrumentés et moyens de caractérisation associés.

Outre le rétrofit des moyens techniques transféré par le CETIM sur le site, cette montée en puissance s'accompagne d'un renforcement significatif des équipes: plus de douze recrutements ont déjà été réalisés au sein du pôle FMC, et plusieurs projets structurants sont engagés ou en démarrage, dont une thèse en métallurgie, deux projets sur la fonderie sous pression et la thermique outillage, et différents travaux suivis avec les industriels dans le cadre de la Commission Technique Fonderie du CETIM, notamment sur la caractérisation thermo-physique des matériaux et la simulation numérique process.

Avec METALIQ et le rapprochement de leurs équipes sur le campus de Chalons, le CETIM et Arts et Métiers affirment leur volonté commune de structurer une recherche de haut niveau au service de la filière métallurgique et de la fonderie, tout en accompagnant les entreprises dans leurs défis d'innovation.



Accueil des équipes FMC du CETIM sur le campus ENSAM de Chalons en Champagne



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

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

www.ficfp-france.fr

EUROGUSS 2026

succès confirmé de la 30^e édition du salon international leader de la fonderie sous pression

Avec un nombre record de plus de 720 exposants venus de 37 pays, Euroguss 2026, salon leader de la fonderie sous pression, a établi de nouveaux standards en janvier. Des entreprises venues de toute l'Europe et du monde entier (15 000 visiteurs, la moitié hors Allemagne) ont présenté leurs produits et innovations les plus récents lors de cette édition 2026, la plus importante jamais organisée. Salon bisannuel en Europe, plateforme stratégique pour la fonderie sous pression dans le monde, Euroguss a été marqué cette année par le développement croissant de la digitalisation, de la datascience et de l'IA, par des enjeux réaffirmés de durabilité, d'économie circulaire et d'efficacité énergétique prenant le pas sur la seule performance industrielle, et par des innovations tant sur les alliages que sur le process. Pour son 30^e anniversaire EUROGUSS 2026 démontre une capacité soutenue du secteur aux conceptions et productions de pièces de grandes dimensions, associées à des développements de matériaux optimisés, en réponse notamment au marché de l'e-mobilité (méga-casting, assemblages fonctionnels et adaptation des équipements périphériques).

Retour en 2 parties sur un salon en pleine croissance, qui mettait à l'honneur cette année le potentiel et les spécificités du rhéocasting, l'exploitation en temps réel des données du process, et le développement -qui se poursuit- du mégacasting et de ses technologies périphériques.

UN MARCHÉ AUTOMOBILE QUI RESTE DOMINANT

Lors de la visite, le premier constat est toujours sur la représentation dominante des produits du secteur automobile, que ce soit par l'ensemble des pièces exposées par les fondeurs ou par les produits de démonstration des porteurs de solutions, équipements et outillages périphériques. Il est de ce point de vue intéressant de mettre en perspective les chiffres de la production sous pression et basse pression prévue en 2026 avec le ressenti du salon (figure 1) où les

produits exposés font avant tout la part belle aux pièces automobiles, tendant à démontrer que la fonderie sous pression, en aluminium en particulier, n'a pas encore développé de forte diversification en dehors de ce marché.

Dans leur majorité, les développements de produits mis en avant sont donc (figure 2) des **pièces de structure** et composants de l'**e-mobility** pour les plus récents, de liaison au sol et **moteur thermique** pour les plus classiques, avec la mise en avant cette année de conceptions plus inédites (roues allégées en sous pression, designs bio-inspirés, assemblage de matériaux optimisant les conceptions hybrides de grande dimension).

Longerons, berceaux, traverses, capots arrières, coupelles d'amortisseurs, packs batterie, carter de moteurs électriques, carters cylindres et autres pièces de liaison au sol ont été mis en avant par l'ensemble des exposants du salon.

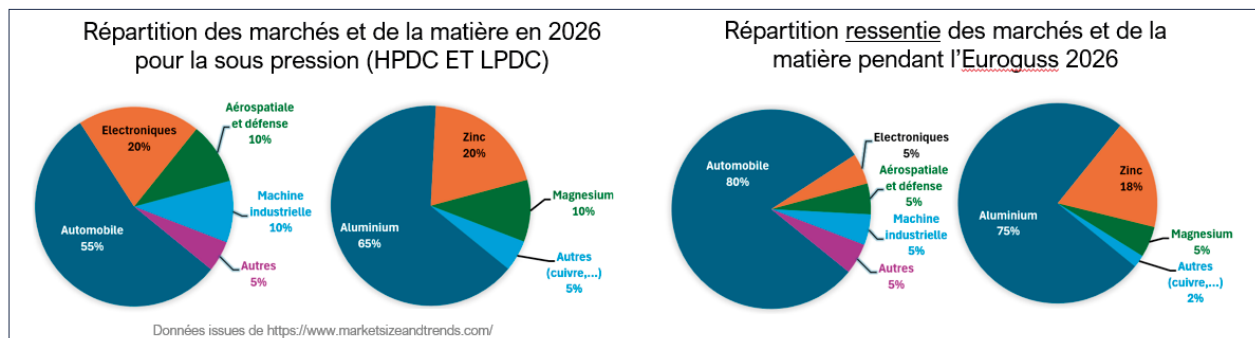


Figure 1 : répartition ressentie des marchés représentés sur Euroguss 2026, versus prévisions de production

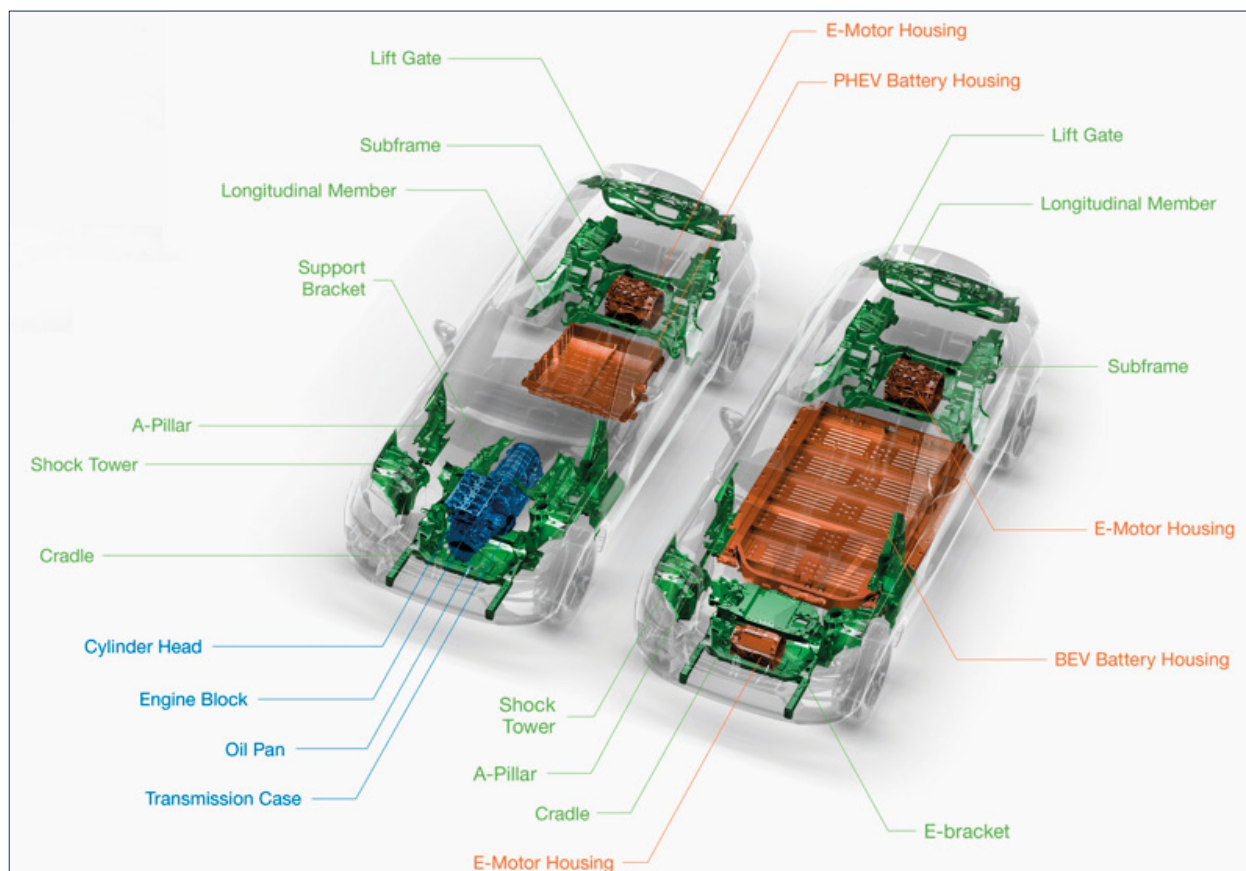


Figure 2 : Décomposition des éléments d'une voiture hybride et électrique par NEMAK

On peut citer à titre d'exemple, quelques exposants toujours remarquables :

- **Magna**, spécialisé dans des solutions de carrosserie, châssis et structure en fonderie sous pression aluminium, présentait différentes conceptions, essentiellement en C65K (alliage AlSiMnMg) traité T5 et AlSi10MnMg avec recyclage traité T2, T5 ou T7 selon l'application, outre de remarquables carters en lien avec l'électrification des véhicules (figure 3)
- **Nemak**, spécialisé sur les pièces moulées et assemblées couvrant notamment les composants de structure (*longitudinal members, a-pillars, shock towers*) et carters et supports de motorisations tant électriques que thermiques, présentait en particulier un prototype de berceau (subframe, figure 4) réalisé en fonderie sous pression (HPDC) et revendiquant une réduction de masse de 25 % à performances comparables, l'élimination de 30 pièces et 50 soudures avec simplification de la production et amélioration de la durabilité, outre une résistance à la corrosion améliorée, supprimant la nécessité d'un traitement e-coating (bain de peinture hydrosoluble).

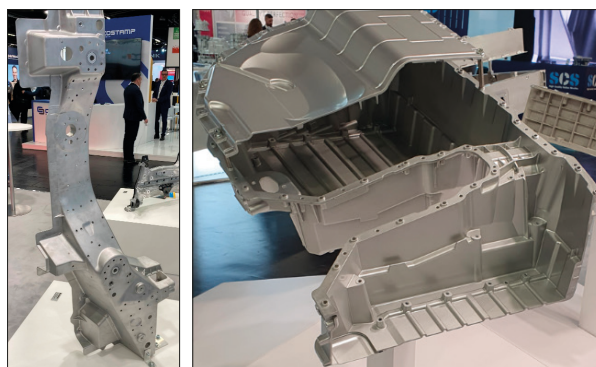


Figure 3 : Pièces de structure et carters de batteries présentés par MAGNA

Nemak revendique l'usage d'alliages produits avec 100% d'énergie verte, et la capacité à adapter les solutions aux besoins des clients, mettant en avant :

- l'assemblage de pièces de fonderie pour une solution plus **performante**, modulable pour des plus grandes dimensions, et permettant un allègement multimatériaux.
- la basse pression (et le Rotocast®) pour une solution axée sur une plus grande **rigidité**, avec des designs creux et de larges applications,
- la fonderie sous pression (FSP) pour une solution axée sur **les coûts**, avec une plus grande flexibilité de conception et des parois minces optimisant l'allègement global.

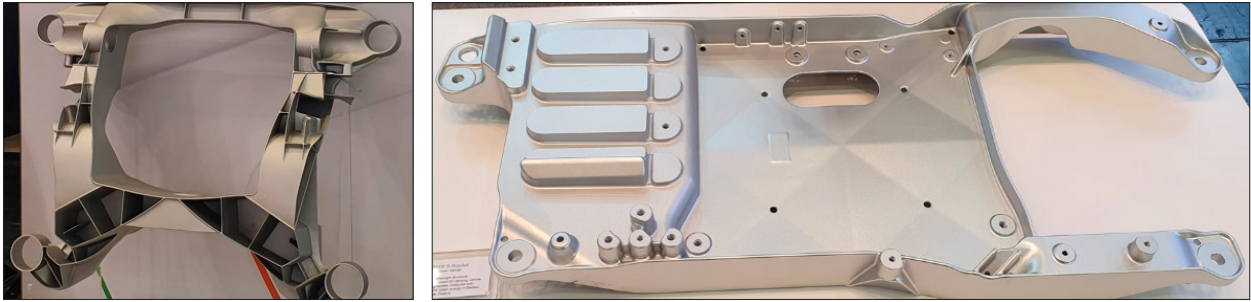


Figure 4 : Berceau injectés sous pression et e-bracket alliage 100% énergie verte, présentés par NEMAK

Outre les pièces de structure, Nemak est également producteur de pièce en lien avec l'e-mobility, présentant à ce titre plusieurs pièces liées aux batteries,

- **Martinrea International Inc.**, entreprise automobile de rang mondial (Tier 1), spécialisée de longue date dans la conception, le développement et la fabrication de pièces métalliques complexes pour véhicules, présentait également un large panel de pièces automobiles produites et conçues en basse pression et injection sous pression,
- **Ryobi**, acteur majeur de la fonderie sous pression, a présenté de nombreuses pièces liées à la structure de l'automobile et à son électrification, injectées sur presses de 2500 à 6500 tonnes, dont un *rear under frame* de plus de 31 kg injecté sur 6500 tonnes (figure 5), outre des composants plus usuels de moteurs thermiques

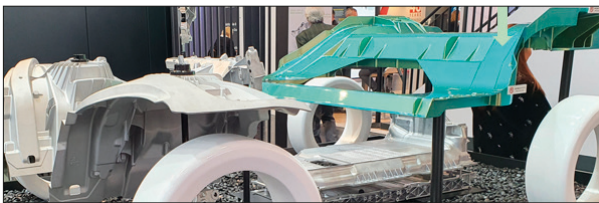


Figure 5 : Rear Under Frame (prototype) RYOBI, alliage propre, machine HPDC 6500 tonnes, > 31 kg

- **Linamar Corporation** quoique déjà plus diversifié tant par ses marchés (mobilité, industrie, médical) que par ses procédés (forge, fonderie, usinage), présentait également une majorité de pièces automobiles, notamment de structure et en lien avec l'e-mobilité (figure 6)



Figure 6 : composants de structures sur e-véhicule et carter de batterie présentés par LINAMAR

- **Eurocast** pour sa part était associé cette année sur un stand commun à **DSBJ**, avec différents composants automobiles pour moteurs thermiques et électriques, outre un remarquable carter pour système d'énergie démontrant la diversification amorcée sur d'autres secteurs que l'automobile (figure 7).

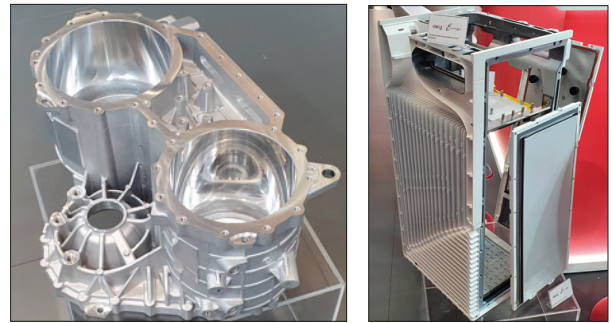


Figure 7 : carter e-moteur et boîtier Energie présentés par EURO-CAST-DSBJ

- **Handtmann**, via sa division fonderie de métaux légers, présentait en avant première une jante en aluminium allégée de 20 à 30 % par rapport aux jantes classiques moulées sous pression, co-développée avec le groupe Cevher, qui démarrera en production en série courant 2026. On notera également un remarquable support batterie avec compartiment électronique inclus (assemblage avec panneau de plancher soudé par friction-malaxage (FSW), injecté sur machine 4 000 tonnes en moule trois plaques (figure 8).





Figure 8 : Roule allégée et support batterie injectés sous pression présentés par HANDTMANN

Dans une approche 360° très démonstrative, Handtmann présentait également des solutions sur toute la chaîne de valeur: FSW sur pièces, fusion laser (SLM) pour outillage, high-speed prototyping service, conception holistique de produits, finition de haut niveau, alliages sur mesure et/ou à faible teneur en CO2 de type *secondary & primary-like low CO2 alloys* associés au développement de traitements thermiques allégés.

En aluminium, quelques produits de diversification ont cependant pu être identifiés sur différents stands, avec des conceptions dédiées au marché de l'énergie (cf carter DSBJ) des carter de batterie pour poids lourd (vus notamment chez Nematik), des composants sur motos, supports d'écran et autres applications thermiques ciblées (figure 9).



Figure 9 : Carter Poids Lourd NEMAK, fourches moto LINAMAR & TOORA, support écran YIZUMI, et autres carters nervurés

La DATA et l'IA OMNIPRESENTES

L'édition 2026 du salon est marquée par deux tendances fortes et omniprésentes dans toute la chaîne de valeur :

D'une part, **l'IA industrielle** se révèle comme n'étant plus une option, mais un levier essentiel de production et une **réalité opérationnelle** de plus en plus présente pour la maîtrise de dérives process, la réduction des temps d'analyse des causes de défaillance, la capacité à des recommandations d'actions en temps réel, et la stabilisation de la qualité, y compris avec des équipes moins expérimentées.

D'autre part, **la numérisation, l'approche industrie 4.0 et l'automatisation** se transforment, avec mise en avant de **jumeaux numériques**, de systèmes de contrôle qualité **automatisés** (vision, CT, 3D), de plateformes digitales et **monitoring avancé**, et de lignes de production **intelligentes**.

Les solutions exposées couvrent toute la chaîne de valeur : machines de fonderie, fours, moules, systèmes périphériques, robotique, outillage additif, posttraitement et contrôle.

A titre d'illustration très concrète, on peut citer sur le stand de **Norican** la présentation de la chaîne de surveillance **MONITIZER®** (figure 10), avec 3 niveaux d'intégration possibles associés au dispositif périphérique IIoT (passerelle) **NoriGate** capable de collecter des données provenant des différentes sources des installations d'un atelier, les horodater et les stocker pour une vue unifiée et fiable des données de production, sans silos de données ni fusion manuelle.

Les 3 niveaux d'intégration proposés sont :

- Niveau « **DISCOVER** » qui revendique des données de production claires, l'accès aux informations clés à tout moment et en tout lieu, des vues personnalisées en temps réel et historiques, la création de rapports flexibles et d'alertes intelligentes, et de tableaux de bord préconfigurés pour l'énergie, les pertes de métal et la maintenance (un automate programmable suffisant pour l'implantation),
- Niveau « **REFILL MONITOR** » destiné au pilotage optimisé du remplissage des fours : efficacité de remplissage, maintien du niveau et de l'efficacité des fours, surveillance des paramètres clés grâce à l'expertise intégrée de l'entreprise, alertes intelligentes pour un contrôle optimal,
- Niveau « **PRESCRIBE** », visant le contrôle des processus piloté par l'IA, des processus plus stables et la réduction des rebuts, un contrôle personnalisé piloté par l'IA pour l'ensemble de l'exploitation, des informations exploitables par les opérateurs, les responsables de processus et la direction, avec des réductions de rebuts démontrées (sur 3 mois de données) de l'ordre de 40 %.



Figure 10 : solution Monitizer® de NORICAN

Des présentations également par des startups ou proposeurs de solution du domaine. A titre d'exemple, **TVARIT** présentait son IA Hybride **TiA**, là aussi avec plusieurs niveaux d'intégration :

- **PENSER** : stabilisation proactive des processus -> anomalies de processus et actions réactives
- **PRÉVOIR** : analyse automatisée des causes profondes et amélioration continue à long terme -> analyse approfondie des causes profondes et des potentiels
- **PRÉDIRE** : identifier les tendances dans les processus complexes pour trouver les paramètres et les limites optimaux -> les modifications complexes des paramètres sont une réaction à un gaspillage important

Le principal défi de l'industrie de la fonderie identifié ici est la complexité : rebuts coûteux, coûts énergétiques élevés, procédés complexes, transparence limitée. **TVARIT** démontre que sur 2,4 milliards de combinaisons possibles pour optimiser les paramètres de production, seuls 50 paramètres ont un impact majeur sur la qualité ou l'énergie, là où les experts en procédés modifient généralement des paramètres individuels pour stabiliser le processus : actions réactives, compréhension fastidieuse, stabilisation de processus complexe.

Pour combiner connaissance approfondie des processus et une adoption de l'IA axée sur la valeur, **TVARIT** revendique avec sa solution **TiA**, un impact quantifiable (figure 11) sur la stabilité du process (+15%), la performance (+12% de rendement), la qualité (-18% de rebuts), la rapidité de diagnostic, l'amélioration continue (24/7), et la capacité à des synergies multisite.

Industry Problem	Tvarit AI Solutions	TiA Impact
Process Instability	Dynamic Golden Runs	+15% process stability
Low Yield Repeatability	Prescriptive Yield Optimization	+12% yield improvement
Inconsistent Quality	Quality Consistency Engine	-18% quality defects
Delayed Root Cause ID	Automated Root Cause Analysis	90% faster diagnosis
No Real-Time Optimization	Real-Time Prescriptions	24/7 optimization
Fragmented Decisions	Scalable AI Across Plants	Multi-plant synergy

Figure 11 : impact revendiqué de la solution TiA de TVARIT

TVARIT propose avec son software un accompagnement en 4 étapes :

1. Preuve de valeur sur 1 à 2 mois à partir de données déjà structurées
2. Détection d'anomalies et alerte prédictive (hors qualité)
3. Analyse des causes racines (versus qualité)
4. Modèle de prédiction IA

Une étude de cas sur pièce série LPDC en aluminium concentrée sur 1 machine et 1 moule a permis la réduction de 50 paramètres et 2 milliards de combinaisons à 20 paramètres par clustering qui ont pu être hiérarchisés (1/ lubrification 2/ épaisseur de la carotte 3/ temps de remplissage etc...) pour aboutir à une réduction du taux de rebuts de 50%.

Dans le même registre, **SYMATE** et **VOLVO** ont présenté dans le cadre des conférences du salon, une application réussie de l'IA au giga-casting, avec des travaux qui doivent se poursuivre en 2026 sur le développement de modules spécifiques pour le processus complet, de la fusion au dosage, de la coulée aux finitions, en intégrant contrôles qualité et maintenances.

LA SIMULATION EN ANTICIPATION ET ACCOMPAGNEMENT DES EVOLUTIONS DU PROCESS

Au même titre que l'exploitation des données, les technologies, les tailles de machine, et les enjeux industriels évoluent, les éditeurs et développeurs d'outils de simulation font évoluer leurs solutions, pour accompagner les changements et mutations du secteur.

Sur ce périmètre, **Flow 3D** (figure 12) était présent pour présenter FLOW-3D@CAST, logiciel de simulation CFD doté d'un module fonderie sous pression dédié à l'optimisation du remplissage et de la solidification, la réduction des porosités et inclusions et l'amélioration de la qualité et performance des pièces. Une importation et définition simplifiées des géométries de moules, une création rapide de maillage et l'exploitation de la puissance de l'algorithme TruVOF sont revendiqués pour des simulations optimales.



Figure 12 : Stand FLOW-3D CAST

Keysight/ESI était également présent avec Keysight Casting (ProCAST) et des présentations dédiées sur le gigacasting et les nouveaux challenges pour les simulations en crash, la conception des attaques de coulée, le comportement thermique des moules et l'intégration des résultats des simulations de coulée ((oxydes, longueur d'écoulement, SDAS), dans les simulations de performance des produits moulés.

Pour sa part, **Novacast** présentait son développement en collaboration avec ENTEC-STRACON, de la solution TURBU PRESSURE CASTING (figure 13), pour le moulage de jantes allégées, optimisées avec NovaFlow&Solid. Une jante BMW est exposée, illustrant les possibilités offertes par la technologie :

- Répartition optimisée des matériaux pour une résistance accrue
- Plus grande liberté de conception pour alléger les jantes
- Réduction de la consommation d'énergie et de l'empreinte carbone en production

Une réduction de 40% sur l'utilisation d'aluminium est revendiquée, et des temps de cycle réduits d'un tiers, outre la réduction de moitié de la consommation d'énergie sur le traitement thermique, et une géométrie brute permettant une réduction jusqu'à 80% du temps d'usinage.

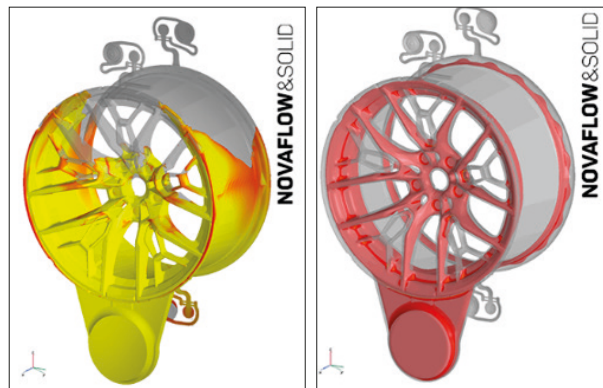


Figure 13 : Solution Turbu Pressure Casting pour jantes allégées présentée par NOVACAST

Enfin, 4 axes de développement ont été mis en avant plus spécifiquement cette année chez **MAGMA** (figure 14) :

- Une nouvelle approche sur l'équilibre entre qualité, coûts et durabilité grâce à MAGMA ECONOMICS,
- Des modélisations adaptées aux technologies du thixomoulage et du rhéocasting mis en avant sur le salon cette année, avec MAGMAsemisolid,
- Un focus sur la simulation de l'injection sous pression à grande échelle (adaptée au gigacasting) et sur le moulage sous pression des alliages de zinc avec MAGMASOFT®,
- Et plus globalement, les accompagnements de MAGMA en ingénierie pour une mise en œuvre réussie de MAGMASOFT®.

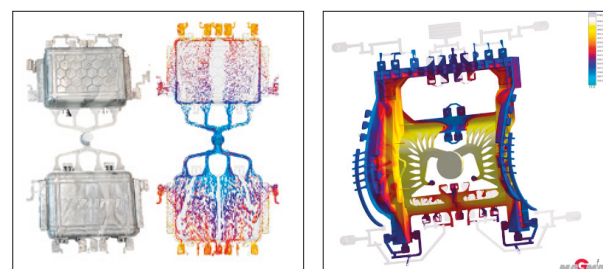
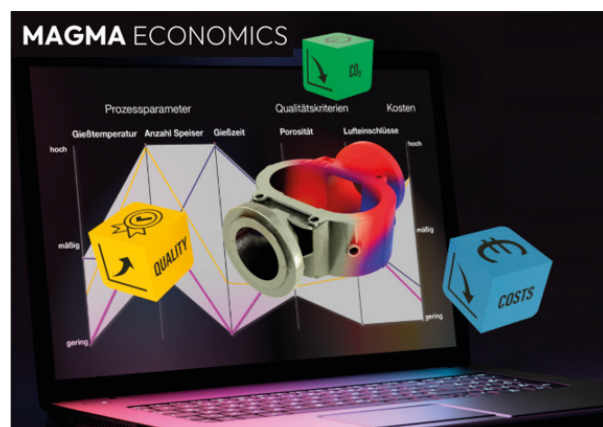


Figure 14 : Solutions MAGMA Economics, MAGMA semisolid et gigacasting de MAGMA

MODULARITE ET GRANDES DIMENSIONS SUR LES EQUIPEMENTS, OUTILLAGES ET PERIPHERIQUES

Même si les produits moulés sur **Gigapresses** sont omniprésents cette année, cette édition marque peut-être la fin de la course à la démesure des machines sur le salon. A la différence de l'Euroguss 2024, les fabricants de presses n'ont pas présenté de presse supérieure à 6000 tonnes.

Pas ou peu de grandes évolutions sont à signaler côté **outillage** : Comme à l'Euroguss 2024, les fabricants de moules ont présenté leur « meilleur » savoir-faire... ou le plus gros.

On notera, au titre d'illustration des changements d'échelle, la présentation par **HTS** du conformal cooling maîtrisé en

grande taille (Figure 15) dans toutes ses dimensions (empreintes, pistons, conteneurs), avec une forte intégration de la fabrication additive en complément des procédés usuels de fabrication des outillages (usinage, traitement thermique, traitement de surface)

Au niveau des conceptions innovantes d'outillages, on peut souligner le système breveté HUB System (**Hot runner Unit Bolster**) présenté par **FERROFACTA**, conception originale d'outillage à canaux chauds pour l'injection du zamack (figure 16)

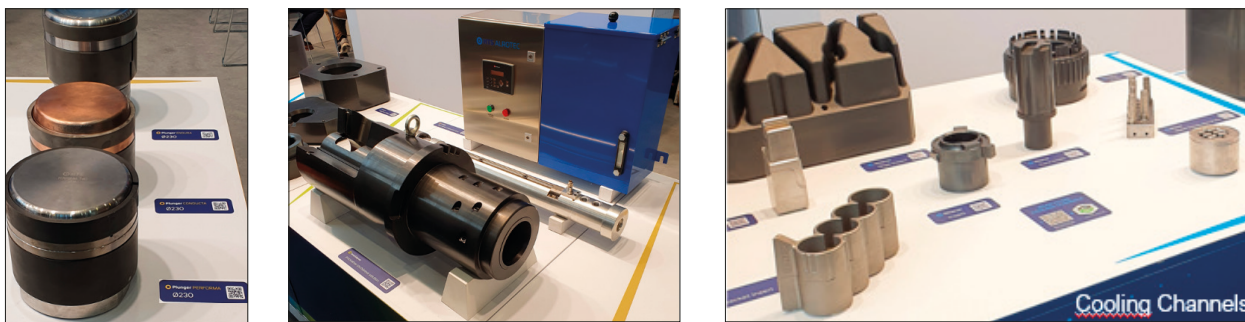


Figure 15 : solutions HTS : Pistons ENDURA, CONDUCTA, PERFORMA, conteneur INNOSLEEVE (Innovative Shotsleeve Solution) et solution iTHERM (conformal cooling sur Giga-Casting (FA 3D ou Forge + multi-assemblages)

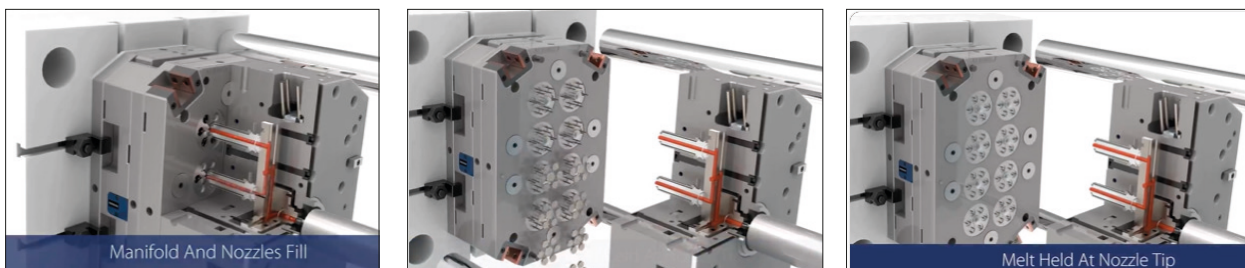


Figure 16 : système breveté HUB System (Hot runner Unit Bolster) présenté par FERROFACTA



Figure 17 : exemples de poteyeurs (AED Automation, Bohmer, Gerlieva)

Côté **poteyeurs**, tous les fabricants proposent en priorité de la modularité (figure 17) aux fins d'optimiser les capacités d'adaptation aux différents types de poteyages et formes de moule. Cette modularité permet l'utilisation de différentes buses et l'utilisation du poteyage en micro-pulvérisation seul ou avec du

poteyage classique (utilisation hybride). Une seconde vision de ces outils est orientée pour les pièces (et donc les moules) de grandes tailles par l'utilisation de grandes plaques. Ces solutions sont mises en œuvre pour répondre au besoin des nouvelles dimensions d'outillages, tout en maîtrisant le poids des outils.

La découpe change d'échelle également, avec des presses capables d'accueillir des outillages jusqu'à 40 tonnes. A titre d'illustration, ABK Pressenbau qui avait présenté en 2024 une presse de découpe pour des pièces issues du giga-casting, présentait cette année un outillage (figure 18) de 3,6 m par 3,2 m sur sa presse ABK SP36 adaptée à une masse maximale d'outillage de 40 tonnes.

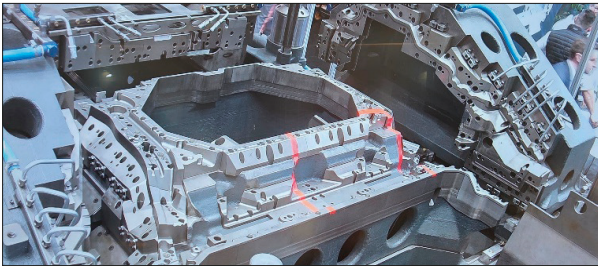


Figure 18 : outillage de découpe de grande taille sur presse ABK SP36

Les solutions de **thermorégulation** s'adaptent aussi aux grandes dimensions : deux sociétés (Brondolin et Compromec) ont présenté des conteneurs thermorégulés à l'huile (figure 19) permettant d'éviter la déformation dite « banane ». Les conteneurs sans régulation ne sont plus mis en avant. Par contre, pour accompagner la régulation des moules et des conteneurs, les offres de thermorégulateurs se diversifient (IECI, BRONDOLIN, GEFOND).

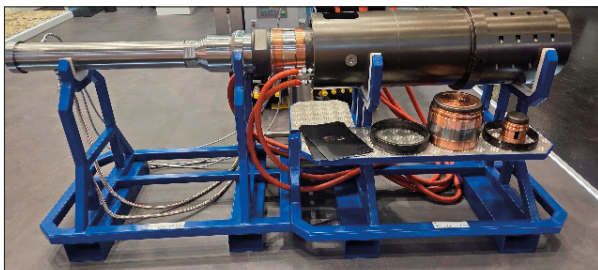


Figure 19 : Douilles et conteneurs régulés BRONDOLIN et COPROMECC

Comme la découpe, les **Centre d'usinage** changent d'échelle pour s'adapter au méga-casting. On peut citer à titre d'exemple le centre d'usinage G920F5 présenté par GROB (figure 20) et développé spécifiquement pour les pièces de grandes dimensions, dans la série G900 dédié à l'automobile. Le CU double broches / 5 axes est adapté à l'usinage des pièces de structure, des supports de batteries et autres pièces de grande taille. Le fabricant annonce une



Figure 20 : centre d'usinage grande dimension G920F5 présenté par GROB

grande rigidité et stabilité thermique, associées à une cinématique très rapide permettant de revendiquer une réduction des temps de cycle de 30%. Depuis son lancement fin 2023 : plus de 50 machines ont été vendues mondialement, y compris auprès de nouveaux clients au Japon.

Dans les mêmes proportions, métrologie, contrôle, vision, solutions d'assemblage, fours et équipements périphériques s'adaptent aux dimensions et spécificités du méga-casting.

La France a également répondu présent au salon EUROGUSS 2026, avec des stands sur place, outre GMD EUROCAST et LINAMAR précédemment cités, de ADIAL, ATHERM, GAMING ENGINEERING, SAB, ID Casting (rejoint en décembre par SIMI), LETHIGUEL, FAVI, Saint Jean Industries, GENLIS METAL, SAT Thermique, et SiiF SAS.

Quant aux autres étonnements et retours, vous pourrez les découvrir en partie 2 dans le prochain numéro de RFF, avec 4 axes forts :

LES ALLIAGES ET LEUR PART CROISSANTE DE RECYCLAGE
LE RHEOCASTING A L'HONNEUR : MARCHE DE NICHE OU POTENTIEL DE MASSE

LA R&D ET LES INNOVATIONS

LE ZAMAK EGALEMENT AU RENDEZ VOUS

D'ici là, ne ratez pas le webinar dédié au salon proposé par le CETIM le 26 mars prochain pour une présentation d'ensemble.

Vos contacts :

Clotilde MACKE-BART, Frédéric HOFFMANN, Mikael VAREILLAS



Pour le webinar : David DUBOIS, et lien d'inscription :

https://newevents.cetim.fr/assets/realtime/register.html?eventid=Restitution_Euroguss_20263177551159&formid=cc2ebdc9-3041-f011-8779-000d3abbe5fe



Patrick HAIRY
Expert Elaboration des
alliages et Maitrise des
moyens de fusions
CETIM

Stéphane MAGRON
Ingénieur Process Forge
CETIM

Yves LONGA
CETIM

Jean-François CARTON
SAFE METAL

Cécile NICOLI
SAFE METAL

Gabriel VINCO
SAFE METAL

La mesure de pression de gaz dans les moules en sable

Contexte

Les fonderies d'acier - mais également de fonte et dans une moindre mesure d'aluminium ou d'alliages cuivreux - utilisent un procédé de moulage en sable dit « à vert » (silice, bentonite, noir minéral et eau) ou en sable à prise chimique (silice et liant organique ou inorganique). Lors de la coulée et de la solidification d'une pièce, la chaleur transmise au moule en sable se diffuse par conduction dans ce dernier et décompose soit l'eau (sable à vert), soit le liant (sable à prise chimique). Cette décomposition peut provoquer une pression de gaz qui s'oppose à l'évacuation de l'air de l'empreinte. Si le gaz de l'empreinte est incorrectement évacué, cela peut augmenter le risque d'emprisonnement d'air dans les pièces (soufflures/piques) ou créer localement une contre-pression qui peut elle aussi provoquer un risque de manque matière dans la pièce de fonderie. Des essais ont été réalisés en collaboration avec la fonderie d'acier Castmetal Feurs (groupe SAFE METAL) dans le cadre du projet d'intérêt collectif du CETIM sur l'instrumentation en environnements sévères en forge et fonderie (PSS INSTRU).

Objectif et pièce retenue

L'objectif de ce projet était de mieux comprendre les phénomènes de dégagement gazeux dans les moules et dans l'empreinte, et de tester une méthodologie de mesure compatible avec l'utilisation de capteurs de pression conventionnels. Il a été retenu, avec le fondeur, d'instrumenter une éprouvette lingot de R&D représentative de la massivité des pièces industrielles et de la taille des moules. La grappe était constituée de deux empreintes identiques, dont l'une a été équipée de capteurs de température et de pression. La dimension du lingot était de 250 x 200 x 150 mm pour un poids de 55 kg environ et pour une masse de la grappe (avec des masselottes débouchantes et le système de remplissage) de 300 kg. Un noyau latéral, plat en surface moulante, a été instrumenté avec 4 capteurs de pression et 4 thermocouples à différentes distances de l'interface moule/métal (5 mm et 25 mm) afin de mesurer la pression des gaz issues de la décomposition du liant du sable à prise chimique. Un capteur de pression et un thermocouple ont été reliés à la cavité dans le haut du moule via un tube en acier - accessible par le dessus du moule - débouchant en surface.

Choix du capteur de pression

Il est important, afin de choisir le capteur adéquat, de faire un état de l'art pour identifier les articles sur le sujet et ainsi mieux cerner le niveau de pression nécessaire. Des contacts avec plusieurs fournisseurs de capteurs ont été également réalisés pour identifier l'offre et le niveau de prix. Certains capteurs de pression permettent une utilisation jusqu'à 500°C sans refroidissement à l'eau. Ils sont cependant relativement onéreux et réservés pour des applications haut de gamme. D'autres capteurs ont une tenue jusqu'à 600°C mais nécessitent alors un refroidissement à l'eau, ce qui augmente leur coût de réalisation d'autant et complexifie leur utilisation. La plupart des capteurs de pression traditionnels ne supportent qu'une température autour de 50°C à 150°C

selon les modèles. Si la température est au-delà de la limite spécifiée par le fournisseur, le signal mesuré peut dériver et présenter alors une plus forte erreur. Certains capteurs haut de gamme sont équipés avec une compensation en température qui comprend une mesure intégrée de la température et une correction de la pression. Il existe également des technologies de capteurs sans fils qui permettent d'utiliser, si besoin, le capteur dans des environnements à

fortes vibrations, à fortes accélérations ou à hautes températures. Enfin, il y a trois grandes technologies de mesure de la pression : les capteurs à effet résistif (déformation d'une jauge de contrainte), les capteurs à effet piézo-résistif et enfin les capteurs MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) qui utilisent des structures micromécaniques intégrées sur une puce de silicium. Ces technologies possèdent chacune (Tableau 1) des avantages et limitations.

Technologie	Avantages	Limitations
Capteurs à effet résistif	<ul style="list-style-type: none"> - Simple et robuste - Peu coûteux - Convient pour les environnements industriels difficiles 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité limitée - Peut dériver avec le temps.
Capteurs piézorésistifs	<ul style="list-style-type: none"> - Haute sensibilité et précision - Mesure aussi bien les pressions statiques que dynamiques - Large plage de pressions mesurées 	<ul style="list-style-type: none"> - Dépendance à la température (nécessite parfois une compensation) - Plus coûteux que les capteurs résistifs
Capteurs MEMS (Micro-Electro-Mechanical System)	<ul style="list-style-type: none"> - Très compacts et légers - Excellente précision - Possibilité d'intégration facile avec l'électronique - Faible consommation d'énergie 	<ul style="list-style-type: none"> - Fragilité potentielle (microstructures sensibles) - Complexité de fabrication entraînant des coûts initiaux élevés.

Tableau 1 : Avantages et limitations des technologies de capteurs

Le prix des capteurs de pression est fortement lié au niveau de précision de mesure souhaité ainsi qu'à leur capacité à travailler à plus haute température. Chez un même fournisseur, l'augmentation de la précision de mesure de $\pm 0.5\%$ à $\pm 0.08\%$ peut ainsi faire évoluer le prix d'un facteur 5 environ. Les délais d'approvisionnement sont également variables : de quelques semaines pour un capteur en stock à plusieurs mois dans le cas contraire.

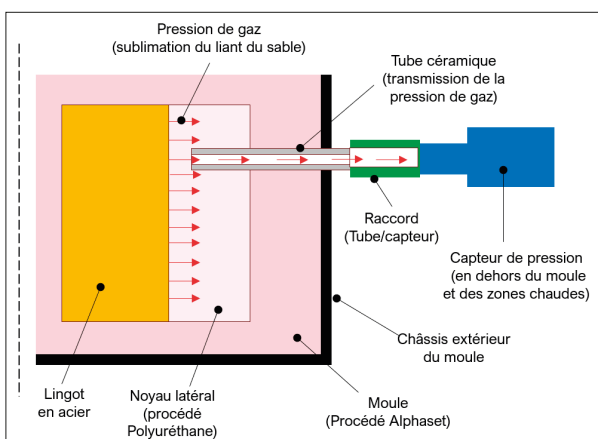


Figure 1 : Principe de la mesure de pression

Transmission de la pression via un tube céramique sortant du moule

Nous avons retenu, afin de pouvoir utiliser des capteurs de pression traditionnels, d'éloigner les capteurs de la zone chaude (Fig. 1 et 2) et de sortir les gaz de noyau à l'aide d'un tube en céramique débouchant à l'extérieur du moule. Les capteurs de pression seront donc positionnés en bout de tube céramique en dehors du châssis métallique du moule. Les thermocouples - qui par nature tiennent à chaud - sont positionnés classiquement dans les zones de mesure. Seuls leurs embouts de raccordement sont sortis en dehors du châssis.

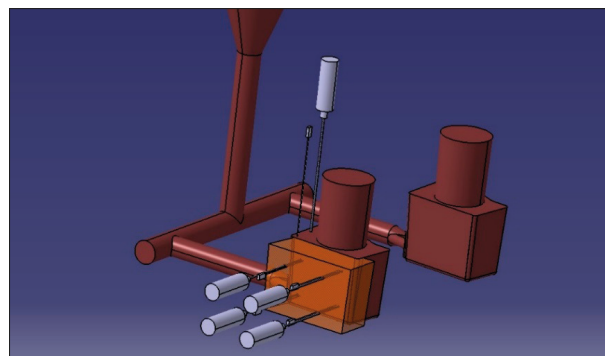


Figure 2 : CAO de la grappe et capteurs

Les capteurs retenus (OMEGA) sont de type PXM309-0.14 GI (Fig. 3) avec une gamme de pression de 0-140 mbar (pression relative) et une précision de mesure de $\pm 1.5\%$. La technologie mise en œuvre utilise un capteur en silicium micro-usiné (Micromachined Silicon Sensor), protégé par un diaphragme en acier inoxydable 316. La pression est transmise via une fine couche d'huile pour assurer précision et stabilité.



Figure 3 : Capteur et tube céramique

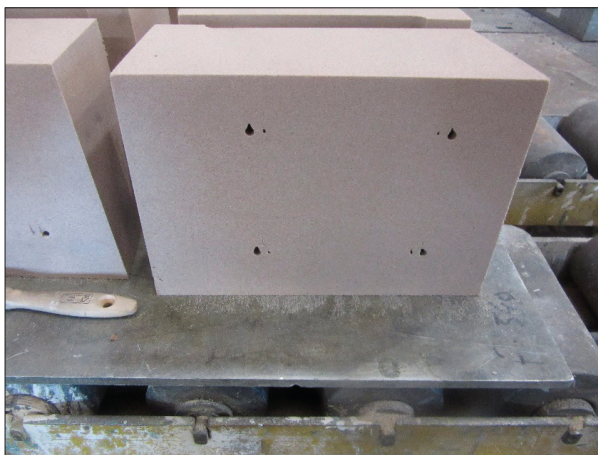


Figure 4 : Noyau sable (avec perçage) pour tubes

Un outillage métallique en aluminium a été réalisé. Il permet de réaliser le noyau latéral en sable siliceux ($\text{SiO}_2 > 99\%$) de granulométrie AFS 55 avec un liant polyuréthane (type Pentex) avec des perçages (Fig. 4) permettant d'insérer à posteriori - sur site industriel - les tubes céramiques et les thermocouples. Les tubes en céramique utilisés pour transmettre la pression ont un diamètre extérieur de 6 mm, un diamètre intérieur de 4 mm (passage du gaz) sur une longueur de 300 mm. Cette longueur importante permet de les positionner en dehors du châssis de moulage et donc de les éloigner de la zone chaude. Ces tubes sont cependant fragiles.

Mesures sur site industriel

L'instrumentation a été réalisée sur l'aire de coulée avant l'amenée du métal liquide. Il a été noté la difficulté de garantir la précision de positionnement des tubes céramiques et des thermocouples entraînant une dispersion dans la distance à l'interface moule/métal. Le moule est équipé (Fig. 5) d'un tube en acier qui est en contact avec la pression de la cavité et débouche en surface de moule. Ce tube permet de positionner un thermocouple et un capteur de pression en contact avec la pression dans l'empreinte. Les 4 autres capteurs dans le noyau latéral, sont positionnés à l'extérieur du châssis (Fig. 6). L'ensemble des capteurs de pression et des thermocouples est relié à une centrale de mesure GRAPHTEC - modèle GL240, version 1.55 - avec 10 voies de mesure et avec une fréquence d'acquisition de 10 Hz. Le signal de sortie des capteurs de pression (en mA) a été converti (en V) par l'addition d'une résistance (250 ohms).



Figure 5 : Moule en sable (avant instrumentation)



Figure 6 : Capteurs de pression hors châssis

La fusion a été réalisée au four à arc et la coulée dans les moules avec une poche à quenouille de 7 tonnes (Fig. 7). Les deux moules instrumentés du projet ont été positionnés sur une extrémité de l'aire de coulée pour pouvoir offrir un accès suffisant pour l'instrumentation et le positionnement d'un chariot pour la centrale de mesure. Les nuances d'acier, coulées à un jour d'intervalle, sont de composition différentes - G18CrMo4 et 30CrMo4 - mais avec une température de coulée identique (1560°C - 1570°C).



Figure 7 : Coulée par poche à quenouille (7 tonnes)

Des projections de métal ont eu lieu en particulier sur le moule n° 2, qui ont endommagé le thermocouple sur le dessus du moule et interrompu son fonctionnement peu après le début de coulée.

Courbes de température et de pression

Les données enregistrées des thermocouples et des capteurs de pression ont été extraites de la centrale d'acquisition, transformées en fichiers Excel (Raw data) puis analysées en Python via l'IDE Spyder et les bibliothèques open-source Numpy, Pandas et Matplotlib (pour les représentations graphiques).

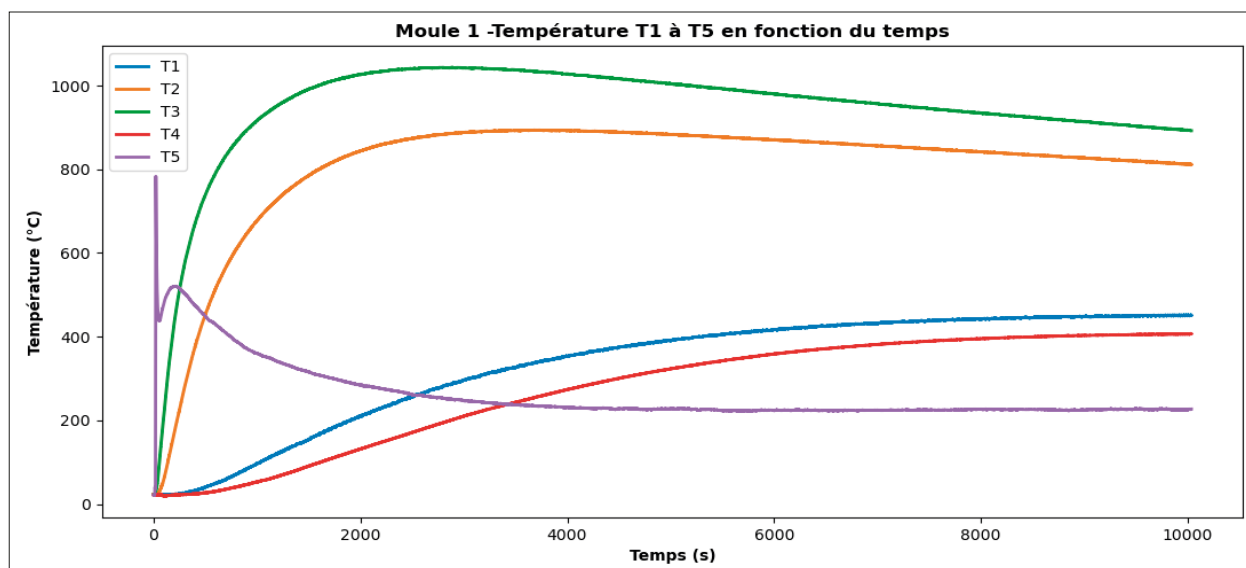


Figure 8 : Températures (moule 1) enregistrées pendant la coulée

Les données de température enregistrées montrent une montée plus ou moins rapide - qui traduit les gradients thermiques dans le moule - suivie d'une descente plus lente ralentie par un temps de solidification important (pièce massive). L'analyse des températures enregistrées (Fig. 8) met en évidence que les températures atteintes sont de plusieurs centaines de degrés pour l'ensemble des thermocouples et dépassent les 800°C pour certains. Le thermocouple T5 au-dessus du moule et qui mesure la température dans la cavité réagit presque instantanément après le remplissage. Ce capteur monte très rapidement en température et atteint 800°C en quelques secondes. Il n'a donc pas été en contact direct avec l'acier liquide (à 1500°C environ). Nous faisons l'hypothèse que c'est la chaleur liée au rayonnement de la surface du métal en fin de remplissage qui provoque cette montée rapide en température. La descente en température est également plus rapide que pour les autres thermocouples dans le noyau en sable en lien probablement avec une croûte de métal solidifiée rapidement sur le dessus de la pièce. Les températures les plus

élevées dans le moule restent à plus de 800°C pendant au moins 2 heures après la coulée. D'ailleurs, 12 heures après la coulée, les masselottes en surface étaient encore relativement chaudes.

En ce qui concerne les enregistrements en pression, il ressort (Fig. 9) que, pour les 2 moules, les valeurs enregistrées sont relativement faibles pour tous les capteurs : au maximum 10 à 20 mbar, et pour certains capteurs moins de 5 mbar. Les valeurs maximales sont atteintes au tout début de l'enregistrement (pendant les 15 premières secondes) pour quasiment tous les capteurs, et les valeurs chutent ensuite à des valeurs très faibles (de l'ordre de 1 mbar). Il semble y avoir 3 périodes d'activité (Fig. 10) des capteurs pendant ces 15 premières secondes. Deux premières périodes où le niveau de pression est faible (inférieur à 5 mbar) suivi d'une troisième période avec une montée rapide à un niveau de pression un peu plus important (10 à 15 mbar) pour certains capteurs (P3, P4 et P5 pour le moule n° 1 et uniquement P5 pour le moule n° 2).

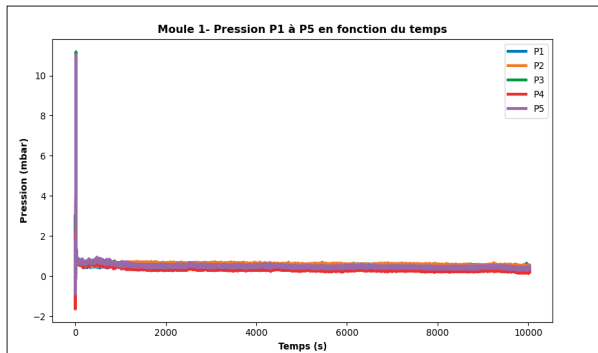


Figure 9 : Pression dans le moule n° 1 (2h30)

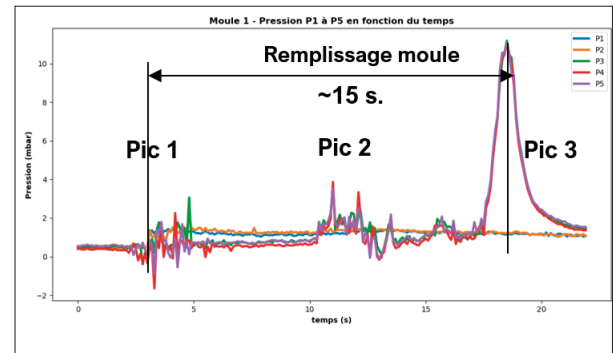


Figure 10 : Pression sur les 15 premières secondes.

Le moule n° 2 présente les mêmes 3 pics de pression en tout début d'enregistrement, puis il y a remontée de la pression (Fig. 11) du capteur P5 (dans la cavité empreinte), phénomène qui n'a pas été enregistré pour le moule n° 1.

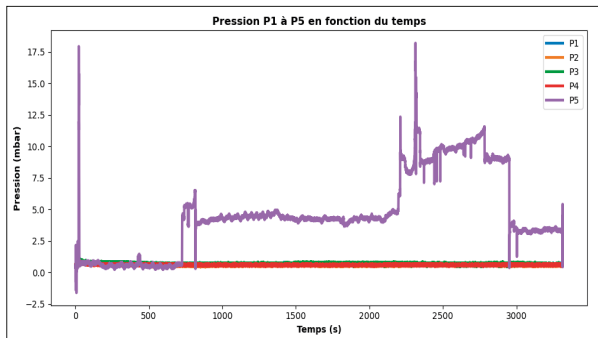


Figure 11 : Courbes de pression (moule n°2) avec remontée en pression du capteur P5

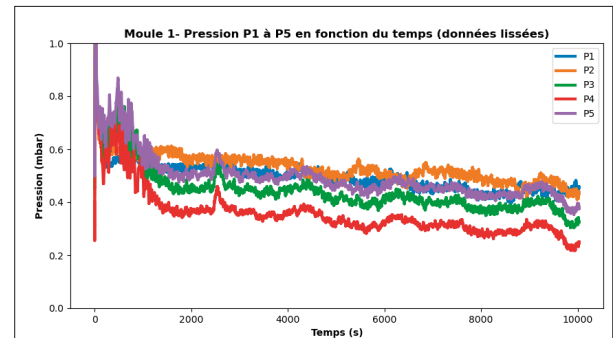


Figure 12 : Pression très faibles mais non nulles, une fois passé les pics initiaux

Les pressions enregistrées, une fois passé les 15 premières secondes, sont très faibles (< 1 mbar), mais non nulles (Fig. 12). Elles sont en diminution constante au fil du temps. On peut également superposer les courbes de pression et de température pour mieux comprendre si la montée en pression correspond à la décomposition des liants des moules.

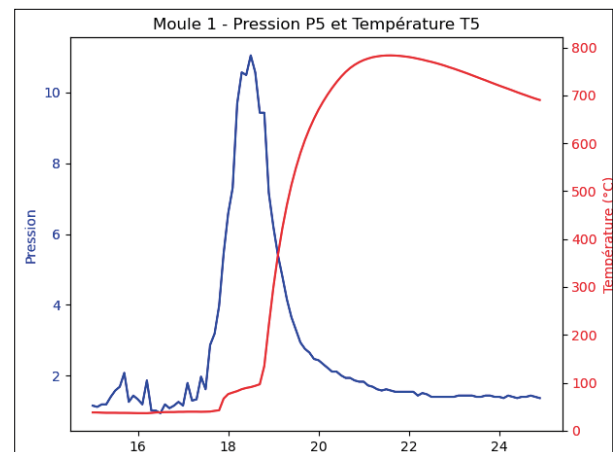
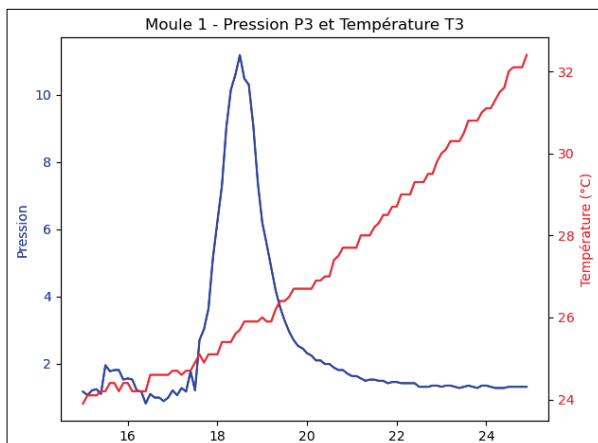


Figure 13 : Courbe pression et température en début d'enregistrement (moule 1) : point 3 (gauche) dans le noyau latéral et point 5 (droite) dans la cavité

On s'aperçoit (Fig. 13) que, pour le moule 1, le pic de pression au point 3 (5 mm de l'interface moule/métal) est atteint vers 19 s alors que la température est encore à 25°C, c'est-à-dire trop faible pour avoir commencé à dégrader les liants dans le moule. Seule la température au point 5 (dans la cavité au-dessus du moule) monte assez rapidement en lien avec la montée du métal dans l'empreinte et l'échauffement du thermocouple par rayonnement.

Interprétation et discussion

Si les données en température sont assez faciles à interpréter, il n'en est pas de même pour les données en pression car le retour d'expérience sur ce type de mesure est très faible. Le seul capteur qui donne pour les 2 moules une réponse assez marquée est le capteur débouchant dans l'empreinte (via le tube métallique au-dessus du moule). Néanmoins, les valeurs de pression sont relativement réduites (< 20 mbar). Cette faible pression est sans doute en lien avec une évacuation de l'air facilitée par des masselottes débouchantes et un temps de remplissage conséquent (15 secondes environ) qui crée une faible contre-pression dans l'empreinte. Les capteurs dans le noyau latéral ont donné des réponses différentes entre les 2 moules.

Pour le moule 1 où les 4 capteurs de pression ont enregistré des valeurs qui semblent pertinentes, les valeurs enregistrées sont faibles et les signaux les plus significatifs sont concentrés en tout début d'enregistrement. Les 2 capteurs situés dans la partie haute du noyau - soit P3 et P4 - ont le plus réagi et ont présenté un signal très similaire au capteur P5 (en contact avec l'empreinte). Ces capteurs ne peuvent pas avoir enregistré une pression en lien avec la dégradation des liants du moule car P5 est en surface, et la température en P3 et en P4 n'a pas encore augmentée suffisamment pour commencer la dégradation des liants. De plus, le signal de ces 3 capteurs retombe à des valeurs très réduites une fois passé un pic.

Nous faisons donc l'hypothèse que les signaux de pression enregistrés pendant les 15 premières secondes sont provoqués par le remplissage du moule et correspondent à des pressions dynamiques liées au remplissage de l'empreinte pas le métal liquide. Le pic n° 1 de la figure 10 pourrait être provoqué par l'arrivée du métal dans le moule alors que le pic n° 3 - le plus important - serait provoqué par la pression dynamique de fin de remplissage. La remontée en pression du capteur 5 du moule n°2 après 700 s nous semble délicate à interpréter car elle n'est pas apparue pour le moule n°1. Elle pourrait-être en lien, mais sans certitude, avec la décomposition des liants.

Une fois passé le remplissage du moule pendant lequel les variations de pression sont plus importantes (3 pics de pression), les valeurs de pression mesurées sont très faibles, mais non nulles (< 1 mbar) et semblent être en lien avec la dégradation des liants. Ils sont en effet cohérents avec les niveaux de pression de l'état de l'art et diminuent

régulièrement dans le temps. En effet, une étude [1] en lien spécifiquement avec la mesure de la pression de gaz dans des moules éprouvettes de petites dimensions (Φ 50 x 50 mm) a comparé différents sables de moulage (sable à vert, sable à prise chimique organique et inorganique) et les pressions de gaz atteintes. Cette étude a mis en évidence (Fig. 14) que le niveau de pression (hors pic initial) atteint est de 120 Pa pour le sable à vert avec bentonite et noir minéral, 60 Pa pour le sable à vert avec bentonite, 30 Pa (soit 0.3 mbar) pour le sable à prise chimique organique et enfin 20 Pa pour le sable à prise chimique inorganique.

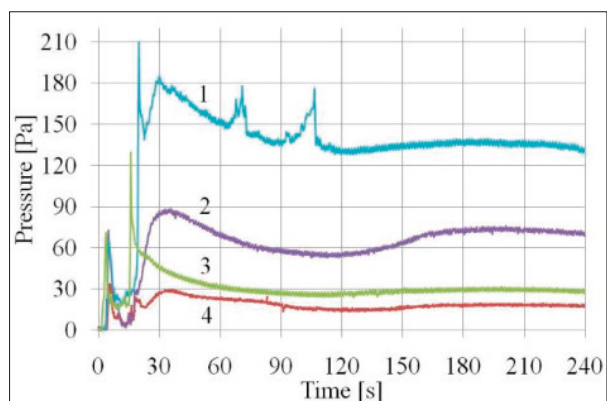


Figure 14 : Comparatif de pression de gaz (1 sable à vert, 2 sable à vert et bentonite, 3 sable à prise chimique organique, 4 sable à prise chimique inorganique)

Les auteurs ont superposé (Fig. 15) la pression et la température dans le noyau pour le sable organique base silice. On constate que l'on retrouve 2 pics de pression (70 Pa et 140 Pa) en début d'enregistrement qui interviennent avant que la température du noyau ne s'élève et correspondent aux pics initiaux retrouvés dans l'étude avec SAFE METAL. Ces 2 pics sont cependant plus réduits (140 Pa soit 1.40 mbar contre 10 mbar dans notre cas) en lien sans doute avec la très faible taille de l'éprouvette utilisée par les auteurs. Les niveaux de pression de décomposition des liants sont également très faibles (30 Pa, soit 0.3 mbar) et relativement proches des niveaux de pression constatés dans la présente étude.

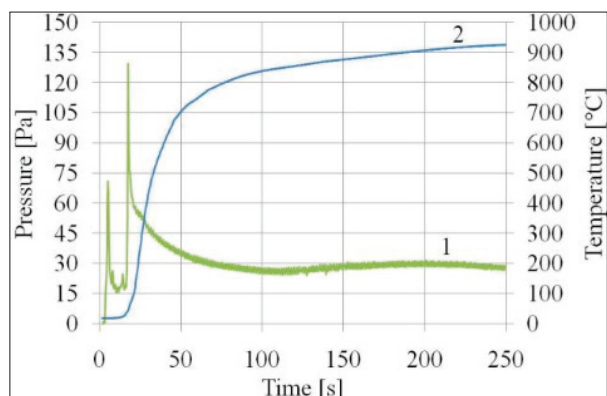


Figure 15 : Température et pression (sable organique)

Les auteurs ont utilisé un tube en métal pour collecter les gaz et les amener aux capteurs de pression à l'extérieur du moule. L'article met en évidence que l'impact le plus important sur la valeur de la pression maximale dans le sable est la teneur en humidité du mélange de sable et la quantité d'argile ou de liant. Le métal coulé était une fonte avec une température de coulée de 1350-1380°C. En l'absence d'eau, la pression maximale se produit dans le sable de moulage lors de l'évaporation rapide du liant à des températures beaucoup plus basses et donc dans un temps plus court que dans les moules fabriqués à partir du mélange de sable contenant de l'eau (sable à vert). Dans tous les cas, pour les moules en sable à prise chimique, la pression mesurée est très réduite.

Maximiser la quantité de gaz de décomposition du sable

Pour maximiser la quantité de gaz de liant décomposée et faciliter la mesure, plusieurs solutions pourraient être envisagées. Tout d'abord, on pourrait concevoir un noyau qui soit entouré de métal liquide (Fig. 16) et qui impose un parcours préférentiel des gaz de décomposition du liant. Ce noyau pourrait être positionné au-dessus du métal coulé (Fig. 17) pour diriger les gaz vers le haut et on pourrait créer une enceinte étanche captant la totalité des gaz. Ce serait sans doute l'option à privilégier. Enfin, on pourrait rapprocher le capteur de pression (Fig. 16) des zones d'évacuation des gaz (en le protégeant thermiquement si besoin ou en choisissant un capteur qui tient à chaud) afin de réduire les interfaces (tube céramique, raccord).

Conclusions

Les essais industriels chez SAFE METAL ont permis de mettre en évidence des niveaux de pression dans les noyaux en sable, dans la configuration géométrique testée, qui sont très faibles (1 à 2 mbar) sauf pendant la phase de remplissage (5 à 20 mbar au maximum). Cela corrobore les données de l'état de l'art (30 Pa soit 0.3 mbar en liant organique) qui montre de tels niveaux de pression. Cela valide le choix de la plage de mesure (0-140 mbar) des capteurs retenus. Des capteurs avec une étendue de mesure trop importante (0-3 bars) auraient conduit à une erreur de mesure de 30 mbar (avec 1 % de précision) supérieur à l'ordre de grandeur des phénomènes mesurés.

Les pressions enregistrées sont plus importantes en tout début d'enregistrement, sur un laps de temps court (15 s. environ). Ce temps correspond au temps de remplissage du moule. De plus, pour le moule 1, trois capteurs de pression à différentes positions (capteur dans l'empreinte, capteur à 5 mm de l'interface moule/métal et capteur à 25 mm) suivent une courbe similaire alors même que le front de chaleur n'a pas atteint ces positions. Les signaux de pres-

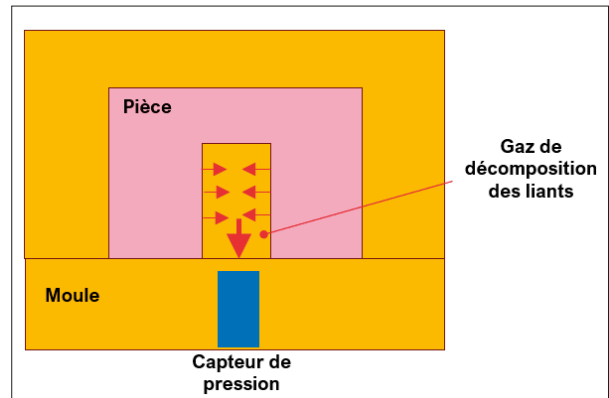


Figure 16 : Noyau entouré de métal liquide

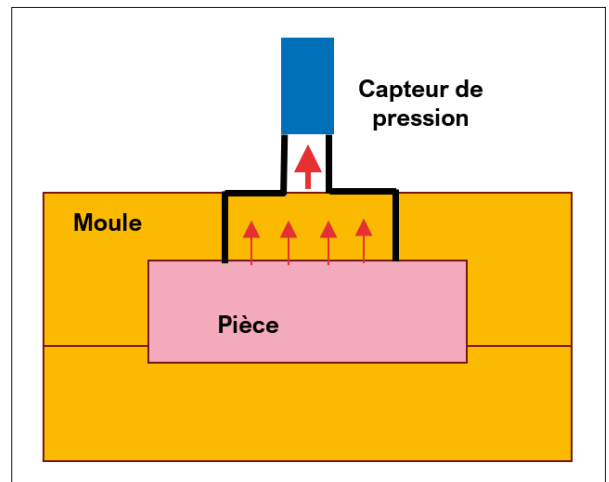


Figure 17 : Noyau au-dessus du métal coulé

sion enregistrés en début de remplissage ne sont pas liés, d'après notre analyse, à la décomposition des liants du noyau, mais vraisemblablement à une pression dynamique dans le moule en lien avec le début de remplissage et la pression de fin de remplissage. Ensuite, on enregistre un très faible niveau de pression, provoqué par la décomposition du liant.

Il nous paraît intéressant de pouvoir disposer du « top » de début et fin de remplissage dans un moule et ce type de capteur de pression assez peu onéreux pourrait être un outil utilisable sur certains moules à fort enjeu. La position la plus simple pour laquelle le signal de pression enregistré est le plus important est le haut de l'empreinte (débouchant dans la cavité) par un tube métallique inséré dans la cavité supérieure.

Bibliographie

[1] J. Mocek, J. Samsonowicz, *Changes of gas pressure in sand mould during cast iron pouring*, Volume 11 Issue 4/2011, Foundry Engineering 2011

Lucas A. DUQUEVARGAS
LCFC, Arts et Métiers,
Université de Lorraine,
Metz

Sophie BERVEILLER
LEM3 (UMR CNRS 7239)
Arts et Métiers, Université
de Lorraine, CNRS, Metz

Régis BIGOT
LCFC, Arts et Métiers,
Université de Lorraine,
Metz

Marc WARY
LEM3 (UMR CNRS 7239)
Arts et Métiers, Université
de Lorraine, CNRS, Metz

Stéphane MATHIEU
LCFC, Arts et Métiers,
Université de Lorraine,
Metz

Sandra CHEVRET
LCFC, Arts et Métiers,
Université de Lorraine,
Metz

Laurent LANGLOIS
LCFC, Arts et Métiers,
Université de Lorraine,
Metz

Étude de forgeabilité d'une préforme obtenue par Fabrication Additive Arc-Fil

Introduction

La fabrication de pièces de grandes tailles, dans des secteurs industriels comme l'énergie ou le transport, met en œuvre des gammes de mise en forme consistant, par exemple, à estamper une ébauche obtenue préalablement par forgeage libre. De façon à obtenir un processus fiable, il est souvent considéré un surdimensionnement du lopin initial de façon à « absorber » l'effet des variabilités des conditions du processus de mise en forme. Ce surdimensionnement nuit aux rendements matière et énergétique de la fabrication. De plus, ce processus met en œuvre un lopin constitué d'un seul matériau. Ce dernier est choisi de façon à répondre aux sollicitations de la pièce en service tout en respectant les contraintes de fabrication. Si les modes de sollicitations sont hétérogènes dans la pièce, le choix du matériau résulte d'un compromis entre les différentes propriétés attendues. C'est ainsi que le matériau peut être choisi avec des caractéristiques élevées pour répondre à des exigences ne s'appliquant qu'à une partie seulement de la pièce. Ceci peut également conduire à un surdimensionnement du produit forgé du fait du compromis adopté.

L'idée des travaux présentés dans cet article est d'étudier la possibilité d'obtenir des pièces multi-matériaux par forgeage d'une préforme réalisée par WAAM [1]. Ce procédé permet une grande diversité de forme et, par l'utilisation de matériaux d'apport différents, d'obtenir une préforme multi-matériaux avec des propriétés locales adaptées aux sollicitations réelles. L'optimisation de la matière première entrante, ainsi que celle de la gamme de forgeage, permet non seulement de réduire les coûts de fabrication et de diminuer l'empreinte environnementale — notamment les émissions de CO₂ — mais aussi de produire des pièces à haute valeur ajoutée, tout en restant compétitif. Il s'agit donc d'une technologie essentielle à développer pour réduire globalement l'impact environnemental dans le secteur de l'industrie mécanique (automobile, aéronautique, etc.).

Le WAAM, fait partie des procédés de fabrication additive les plus productifs avec un taux de dépôt de l'ordre de quelques kg/h. Sa productivité est toutefois faible par rapport aux procédés de forgeage. Dans le cadre d'une gamme combinant WAAM et forgeage, il apparaît important de minimiser les volumes de matière à déposer en optimisant son placement sur l'ébauche avant mise en forme.

La minimisation des volumes à apporter peut passer dans un premier temps par l'utilisation d'un substrat de forme simple (tôles, barres) sur lequel sont déposés les cordons de soudage. L'utilisation de formes simples permet de faciliter la robotisation du WAAM. La maîtrise de l'évolution de la distribution des matériaux au cours de la mise en forme est aussi un point important. Ceci permet d'optimiser le placement des zones de dépôt WAAM pour obtenir en fin de forgeage le matériau voulu dans les zones à renforcer. Enfin, la connaissance du comportement en déformation à chaud du matériau est importante pour s'assurer que le matériau de la pièce après forgeage possède la bonne structure métallurgique et que, par exemple, la structure initiale issue du WAAM a entièrement été recristallisée.

Les principales difficultés viennent de la méconnaissance de la forgeabilité d'une structure issue de WAAM [2]. Les zones déposées par WAAM ont une composition chimique et une structure initiale non conventionnelle pour le forgeage. Par conséquent, leur contrainte d'écoulement, leur limite de ductilité ainsi que leur comportement métallurgique sous déformation à chaud (recristallisation dynamique, restauration...) ne sont pas connus a priori. De plus, la différence de comportement thermomécanique et métallurgique entre les couches déposées et le substrat rend difficile la maîtrise de la répartition des matériaux au cours de la mise en forme et peut être une source de contraintes résiduelles au cours du refroidissement.

Les résultats présentés concernent la mise en forme à chaud (1250°C) d'un dépôt WAAM (MAG-CMT) avec un fil d'apport en ER100 sur un lopin cylindrique en acier non allié C55. Les pièces mises en forme ont été caractérisées à différentes échelles avec dans un premier temps une étude macrographique permettant d'observer la répartition des matériaux et certains défauts (défauts de surface, replis). Cette étude macrographique a ensuite été complétée par

l'observation des microstructures aux différentes étapes de la gamme depuis l'état initial issu de WAAM.

Méthodes

Le synoptique de la gamme de fabrication est illustré sur la figure 1. La première étape de fabrication additive par Arc-Fil concerne le dépôt de cordon de soudage sur un lopin. L'essai de forgeage étudié est le filage direct d'une préforme correspondant à un lopin dont le diamètre a été augmenté par dépôt de cordons de soudure (Figure 2).

Le matériau du lopin est un acier non allié de type C55. Le métal d'apport est un acier ER100. Les compositions chimiques des deux aciers sont données dans le tableau 1.

Pour le filage, l'opération de WAAM permet d'obtenir un diamètre de préforme de 48mm en partant d'un lopin de diamètre 36mm. Le filage réduit le diamètre à 18mm représentant un taux de réduction de la section de 6,5. Le schéma de l'opération de filage est donné sur la figure 2. Le lopin est partiellement rechargé, la longueur rechargée correspondant à la longueur filée.

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo	Cr
Substrat (C55)	0,59	0,63	0,23	0,01	0,02	0,11	0,04	
Apport (ER100)	0,05	1,60	0,45	0,01	0,01	1,50	0,25	0,30

Tableau 1 : Composition chimique (% massique) de l'acier du substrat (lopin) et de l'apport (ER100) – complément en fer

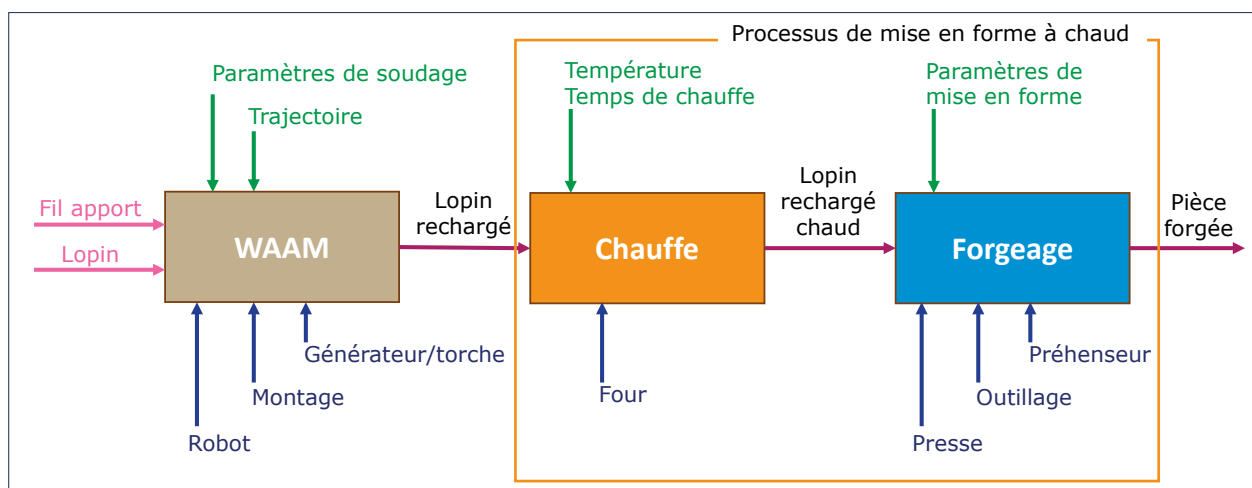


Figure 1 : Synoptique de la gamme de fabrication comprenant une première phase de fabrication de la préforme multi-matériaux par WAAM suivie par l'opération de forgeage à chaud.

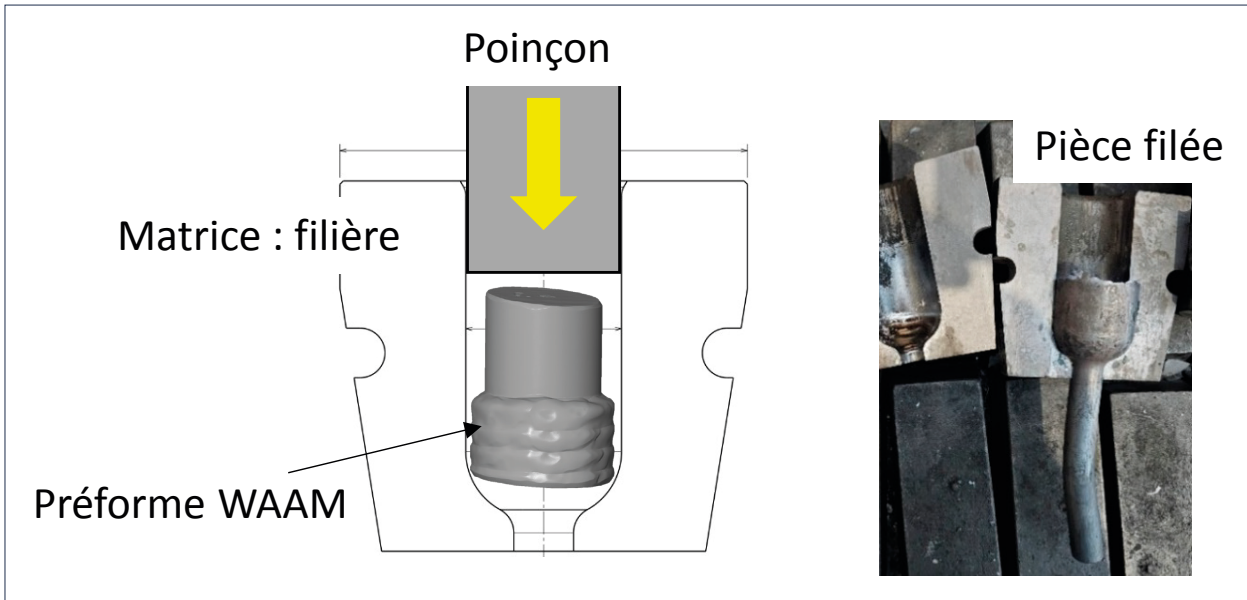


Figure 2 : Schéma de l'opération de filage de la préforme multi-matériaux obtenue par WAAM

Le lopin de diamètre 36mm est rechargé par WAAM avec les conditions du tableau 2. La soudure WAAM est réalisée en MAG-CMT (Générateur Fronius TPS 320i) avec un diamètre de fil de diamètre 1,2mm sous gaz de protection

Argon (82%) – CO₂ (18%). Le diamètre de 48mm est obtenu après le dépôt de 2 couches, chacune constituée de 4 cordons juxtaposés.

Diamètre lopin (mm)	Nombre couches déposées	Nombre de cordons par couche	Espacement entre les cordons (mm)	Vitesse de fil (m/min)	Vitesse d'avance (mm/s)	Stick out (mm)
36	2	4	6,6	4	6	13

Tableau 2 : conditions de soudage pour l'obtention de la préforme WAAM

Afin d'éviter une surchauffe de la pièce, une température entre passes de 200°C a été imposée. Le corroyage apporté par le forgeage à chaud devrait produire un affinement de la structure dans les zones de surchauffe de la soudure. Cet effet permet donc d'accepter des températures entre passe plus importante que ce qui est communément admis en soudage et en rechargement.

L'opération de filage a été effectuée sur une presse hydraulique d'une capacité de 6000kN avec une vitesse de mise en forme de 30mm/s. Les filières sont réalisées sous la forme de deux demi-coquilles pour faciliter l'éjection de la pièce. L'ébauche rechargée est chauffée à 1250°C pendant 30 minutes dans un four électrique. La pièce est refroidie à l'air calme à l'issue du forgeage.

Résultats :

La première analyse concerne le lopin rechargé. Une coupe longitudinale a été effectuée sur laquelle plusieurs constats ont été effectués (voir figure 3) :

- La juxtaposition des cordons de soudure engendre une ondulation de la surface extérieures de l'ébauche rechargée ;
- Les interfaces entre le substrat et la première couche, ainsi qu'entre la deuxième et la troisième couche, présentent des ondulations caractérisées par la présence de lobes, appelés "doigts de gant" ;
- Une hétérogénéité de la structure métallurgique des couches rechargées et du substrat est observée, liée à l'alternance et à l'enchevêtrement de zones affectées thermiquement et de zones fondues.

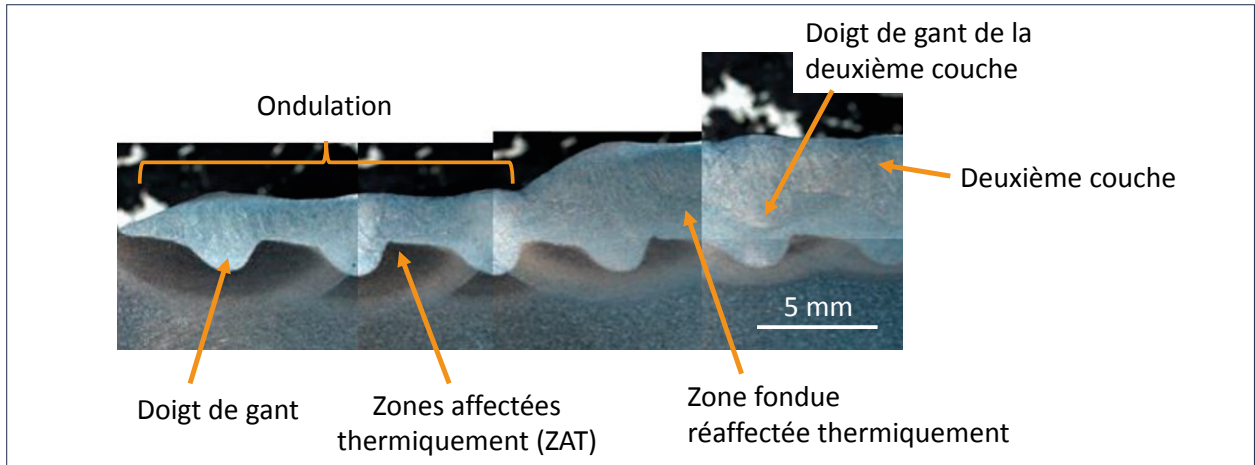


Figure 3 : Macrographie de la zone de dépôt WAAM et de son interface avec le substrat avant opération de filage

Le taux de dilution du rechargement se situe autour de 30% environ. Ceci donne comme composition chimique moyenne pour chaque couche les valeurs reportées dans le tableau 3.

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo	Cr
1 ^{ère} couche	0,21	1,31	0,38	0,01	0,01	1,08	0,19	0,21
2 ^{nde} couche	0,10	1,51	0,43	0,01	0,01	1,38	0,23	0,27

Tableau 3 : estimation des compositions chimiques des couches de rechargement

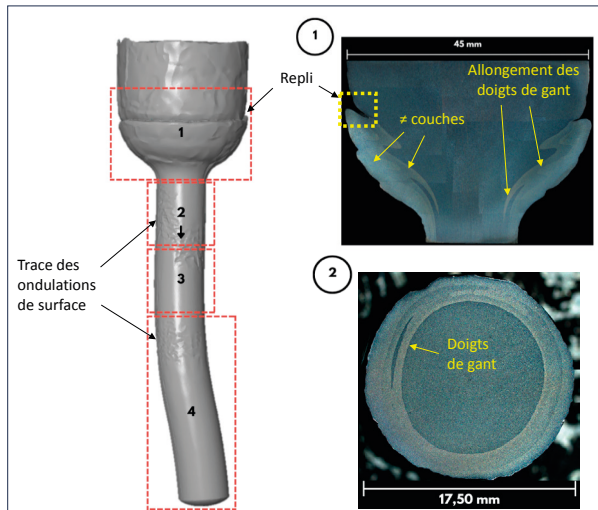


Figure 4 : Scan 3D de la pièce après filage direct. (1) Macrographie d'une section longitudinale dans la filière. (2) Macrographie d'une section transverse dans la zone filée

On peut noter que la première couche est un acier avec 0.2% de carbone et des teneurs en Ni, Cr et Mo qui peuvent lui conférer une certaine trempabilité. La deuxième couche est plus riche en éléments d'alliage mais la teneur en carbone devient faible proche de celle du métal d'apport. Cette hété-

rogénéité de composition chimique peut générer des différences de comportement au cours du refroidissement après forgeage avec des couches intermédiaires plus trempantes.

Après filage, le scan 3D de la pièce filée montre un repli à l'endroit de la jonction entre la zone de rechargement et le substrat. L'angle de mouillage initial de l'ordre de 90° est probablement à l'origine de ce défaut (voir Figure 4). Ce repli pourrait sans doute être évité si l'ensemble du substrat était rechargé.

La surface de la pièce dans la zone filée présente encore des traces correspondant à l'ondulation initiale du lopin. La déformation et la pression de contact outil/matière ne semblent pas avoir permis une correction complète de ce défaut de surface.

Les coupes macrographiques de la pièce filée (voir figure 4. (1) et (2)) permettent d'observer la distribution des matériaux dans la pièce. On observe à nouveau les replis au pied à la jonction entre le substrat et la couche de rechargement. On peut noter également que les lobes (doigts de gant) se sont allongés et courbés par la déformation. En sortie de filière ceux-ci ont pris une forme très fine et orientée dans le sens du filage.

L'interface entre les deux couches est toujours observable, ceci étant probablement dû à la différence de composition chimique entre les deux couches. Les doigts de gant à l'interface entre les deux couches ont subi les mêmes déformations que ceux de l'interface entre la première couche et le substrat. La température et le temps de maintien à haute température ne semblent pas avoir permis une diffusion des éléments chimiques au travers de l'interface sur des longueurs significatives. Ceci explique pourquoi les différentes interfaces sont toujours visibles après le forgeage.

On note toutefois que les zones affectées thermiquement dans le substrat et les interfaces entre les cordons d'une même couche n'apparaissent plus. La chauffe à 1250°C avec la transformation austénitique associée ainsi que la déformation à chaud ont provoqué une recristallisation complète de la structure métallurgique des couches et du substrat. Le taux de corroyage appliqué semble avoir « effacé » la structure initiale.

L'observation de la microstructure (Voir Figure 5) dans les différentes couches confirme l'homogénéisation et la recristallisation complète des couches et du substrat. La différence de structure entre les couches peut provenir à la fois de la différence de composition chimique et de la différence de vitesse de refroidissement. La pièce étant refroidie à l'air calme après filage, cette dernière est probablement limitée. La structure plus fine obtenue dans les couches par rapport au substrat est très probablement imputable à la composition chimique des couches et la teneur en éléments d'alliage (Ni, Cr, Mo).

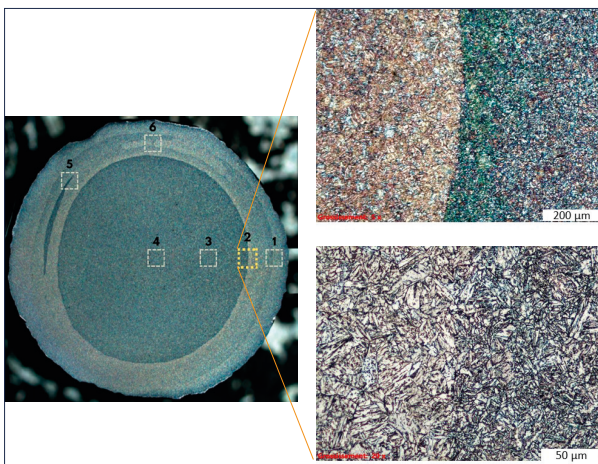


Figure 5 : Microstructure à l'interface entre le substrat et la première couche de rechargement dans la zone filée après filage.

Conclusions

D'autres essais de forgeage ont été réalisés avec le même couple de matériaux (substrat / métal d'apport). Il s'agit de l'estampage d'une roue et de l'étrépage d'une barre. Dans les deux cas, le lopin de départ est un cylindre en acier C55 revêtu de plusieurs couches WAAM avec l'acier ER100.

Pour ces pièces, de même que pour le filage, on constate la persistance en surface de la pièce de la trace des ondulations initiales de la surface WAAM. Leur suppression nécessiterait de devoir usiner ou meuler la surface de la préforme rechargée avant forgeage.

L'évolution de la forme des doigts de gant dépend fortement de la gamme de mise en forme. Dans le cas du filage et de l'étrépage, ceux-ci ont pris une forme fine et allongée dans le sens de l'écoulement. Dans le cas de l'étrépage, ces derniers sont au contraire aplatis. L'impact de la présence de ces formes fines et allongées dans le substrat doit être pris en compte dans l'étude des propriétés mécaniques de la pièce forgée.

Dans tous les cas, on note un affinement et une homogénéisation des couches déposées par WAAM avec le corroyage apporté par le forgeage à chaud. Les zones fondues, les zones affectées thermiquement et les interfaces entre les cordons d'une même couche, observables sur la préforme rechargée, disparaissent totalement au profit d'une structure fine et homogène.

Ces conclusions sont issues d'une première étude de faisabilité du forgeage d'une préforme réalisée par WAAM. Les travaux futurs vont être développés suivant deux volets. Le premier concerne la caractérisation du comportement thermomécanique et métallurgique du matériau avec sa structure micro et macroscopique issue du WAAM. Il s'agira, par exemple, de mettre en place le protocole d'identification des coefficients d'une loi de comportement rhéologique qui pourrait ensuite être utilisée en simulation. Le deuxième volet va concerner la mise en place de la simulation par éléments finis de la mise en forme d'une ébauche multi-matériaux obtenue par WAAM. La question de la prise en compte des interfaces et des couches intermédiaires entre le substrat et les zones hors dilution fera partie des verrous de cette partie du travail.

Références

- [1] A. K. Maurya, Y. Jong-Taek, K. Seung Won, P. Chan Hee, H. Jae-Keun, N.S. Reddy, *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 894 16245
- [2] J. Wang, L. Langlois, R. Rafiq, R. Bigot, H. Lu *Journal of Materials Processing Technology*, 2013 214-2 365-37



Sergio DA ROCHA
Responsable Emploi Compétences
Fédération Forge Fonderie

Loi de finances pour 2026 : Évolutions en matière d'apprentissage et de formation professionnelle

La loi de finances pour 2026 s'inscrit dans un contexte de maîtrise des dépenses publiques et prévoit plusieurs ajustements concernant les politiques d'emploi, d'apprentissage et de formation professionnelle. Ces orientations ont un impact direct pour les entreprises. La mission « Travail, emploi et administration des ministères sociaux » est dotée d'un budget global d'environ 17,7 milliards d'euros pour 2026. Dans ce cadre, les moyens consacrés à certains dispositifs font l'objet d'arbitrages et de mesures de rationalisation.

Financement des opérateurs de compétences (OPCO)

Les moyens consacrés au fonctionnement des OPCO font l'objet d'un effort de rationalisation. Une trajectoire de réduction progressive des frais de gestion est engagée, dans le cadre du pilotage financier du système de formation professionnelle par France compétences.

Plan d'investissement dans les compétences (PIC)

Les crédits consacrés au Plan d'investissement dans les compétences sont en diminution en 2026. Cette évolution s'inscrit dans la perspective d'une extinction progressive du dispositif à l'horizon 2027.



Évolutions du Compte personnel de formation (CPF)

L'utilisation du Compte personnel de formation fait l'objet d'un encadrement renforcé afin de mieux cibler les financements publics. Certaines catégories d'actions, notamment celles présentant un fort volume de mobilisation ou un enjeu de régulation des coûts, peuvent faire l'objet de conditions particulières (cofinancement, plafonnement ou modalités spécifiques d'accès), définies par voie réglementaire. Les certifications professionnelles inscrites au RNCP, les actions de validation des acquis de l'expérience (VAE) ainsi que les certifications de compétences de base demeurent au cœur du dispositif.

Aides au permis de conduire pour les apprentis

Dans le cadre des mesures d'économies, les aides publiques liées au financement du permis de conduire font l'objet d'une réévaluation. Les modalités d'évolution ou de suppression éventuelle de ces dispositifs seront précisées par les textes d'application.

Apprentissage, de nouvelles aides à l'embauche en 2026

Le décret n°2026-168 du 6 mars 2026, publié au Journal officiel du 7 mars, met en place une aide exceptionnelle pour les contrats d'apprentissage conclus à partir du 8 mars 2026. Ce dispositif, dans une logique de contrainte budgétaire, vise à soutenir l'embauche d'apprentis tout en adaptant les aides selon la taille de l'entreprise et le niveau de qualification préparé.

Maintien de l'aide unique pour les petites entreprises

Les entreprises de moins de 250 salariés continuent de bénéficier de l'aide unique à l'apprentissage pour les contrats visant un diplôme ou titre professionnel jusqu'au niveau 4 (CAP, bac professionnel). Le montant est fixé à 5 000 € pour la première année du contrat (6 000 € lorsque l'apprenti est reconnu travailleur handicapé (RQTH))

Une aide exceptionnelle pour les autres contrats revue à la baisse

Pour les contrats qui ne relèvent pas de l'aide unique, le décret crée une aide exceptionnelle applicable aux contrats conclus depuis le 8 mars 2026. Elle concerne :

- les entreprises de moins de 250 salariés pour les formations de niveau 5 à 7 (BTS à master ou diplôme d'ingénieur)
- les entreprises d'au moins 250 salariés pour les formations de niveau 3 à 7 (CAP à master ou diplôme d'ingénieur)

Montants de l'aide selon la taille de l'entreprise et le diplôme préparé

Entreprises de moins de 250 salariés :

- 4 500 € pour une formation de niveau 5 (BTS)
- 2 000 € pour une formation de niveau 6 ou 7 (licence professionnelle, master, diplôme d'ingénieur)

Entreprises d'au moins 250 salariés :

- 2 000 € pour une formation de niveau 3 ou 4 (CAP, bac professionnel)
- 1 500 € pour une formation de niveau 5 (BTS)
- 750 € pour une formation de niveau 6 ou 7

Dans tous les cas, l'aide est portée à 6 000 € lorsque l'apprenti bénéficie d'une reconnaissance de travailleur handicapé (RQTH).

Conditions d'attribution

Pour bénéficier de cette aide exceptionnelle, plusieurs conditions doivent être respectées :

- le contrat doit commencer avant le 1er janvier 2027
- il doit être transmis à l'opérateur de compétences dans les six mois suivant sa conclusion
- l'employeur ne doit pas avoir déjà perçu une aide pour le même apprenti et la même certification

Pour les entreprises de moins de 250 salariés, aucune condition supplémentaire n'est exigée.

Des obligations spécifiques pour les entreprises de 250 salariés et plus

Les entreprises de 250 salariés et plus doivent en revanche respecter des objectifs d'alternance. Elles doivent notamment justifier, au 31 décembre 2027, de 5 % de contrats favorisant l'insertion professionnelle (apprentissage, professionnalisation, VIE, CIFRE) dans leur effectif ou 3 % d'alternants, avec une progression d'au moins 10 % par rapport à l'année de conclusion du contrat. À défaut, l'aide pourra être récupérée.

Modalités de versement

L'aide est versée mensuellement par l'Agence de services et de paiement (ASP), sur la base des informations transmises via la déclaration sociale nominative (DSN). Elle cesse en cas de rupture du contrat ou de suspension sans rémunération. Pour les grandes entreprises, une déclaration sur l'honneur attestant du respect des engagements devra être transmise avant le 31 mai 2028 pour les contrats conclus en 2026.

MARS 26

25 au 26 | **METAL AMS 2026**
Cetim Senlis
<https://www.cetim-engineering.com/metal-ams-2026>
La prochaine édition du congrès Metal AMS, premier événement scientifique français entièrement dédié aux technologies de fabrication additive métallique se déroule les 25 et 26 mars 2026 à Senlis. Organisé par Metal AMS (Additive Manufacturing Synergy) en collaboration avec des acteurs majeurs de la R&D du monde entier, il couvre toutes les étapes de la chaîne de valeur de la fabrication additive métallique.

30 au 02 | **Global Industrie Paris 2026**
Parc des expositions, Paris
www.global-industrie.com
Global Industrie est l'un des tout premiers salons mondiaux consacrés à l'industrie. Son positionnement résolument moderne est orienté à la fois vers l'industrie du futur et vers l'international. Comme chaque année, la fédération met en place un village forge fonderie.

Venez nous voir au village Forge Fonderie Hall 6; Stand n°6D35

AVRIL 26

03 | **LES MATINALES EHS**
La matinale dédiée aux pratiques environnementales industrielles – échanges entre pairs
Thème d'avril : Equipement de Protection Individuel et collectif en prévention de l'exposition à la silice
Un format court pour ce nouveau rendez-vous mensuel dédié aux pratiques opérationnelles des sites industriels face aux enjeux environnementaux, d'hygiène et de sécurité. A partir du témoignage d'un industriel, les entreprises échangent librement durant une heure, des solutions et des bonnes pratiques. Un temps d'échanges dédié aux adhérents, organisé chaque premier vendredi du mois de 8h à 9h. Pour recevoir les invitations contactez c.mougeot@forgefonderie.org



AVRIL 26

16 au 17 | **Euroforge Spring Forum**
Nice
www.euroforge.org
L'association européenne EUROFORGE organise son « congrès de printemps » (EUROFORGE Spring Forum) à Nice. Réunissant les industriels européens des organisations membres, cet événement s'organise autour de l'actualité des actions d'EUROFORGE et d'interventions d'experts sur des sujets d'ordre économique, technique et juridique avec cette année le thème de la défense commerciale de l'Union Européenne comme fil conducteur.



24 au 25 | **MACH2026**
Birmingham (Royaume-Uni)
www.machexhibition.com
Exposition internationale sur les outils d'usinage de métaux et machines-outils.

MAI 26

07 | **LES MATINALES EHS**
La matinale dédiée aux pratiques environnementales industrielles – échanges entre pairs
Thème de mai : La sensibilisation environnementale des salariés
Un temps d'échanges dédié aux adhérents, organisé chaque premier vendredi du mois de 8h à 9h. Pour recevoir les invitations contactez c.mougeot@forgefonderie.org



27 | **Commission Forge CETIM St Étienne**
La réunion de la Commission Forge (2 par an) est l'occasion pour les participants de s'exprimer sur les sujets et projets CETIM en cours et de participer aux orientations pour leur secteur professionnel (toutes les sociétés ressortissantes du CETIM qui le souhaitent peuvent intégrer ces groupes sur simple demande).

MAI 26

19 au 21 | **Journées COFREND**
Centre de Congrès, Lyon
Les Journées COFREND sont le rendez-vous incontournable du Contrôle Non Destructif en France. Organisées tous les 3 ans par la COFREND (Confédération Française pour les Essais Non Destructifs), elles rassemblent l'ensemble de la filière professionnelle des END.
cofrend2026.com
Le Cetim participe à la 11^e édition des Journées COFREND qui rassemblera, l'ensemble de la filière professionnelle des END autour d'une thématique : "les END, Voir et Prévoir". L'occasion de faire le point sur les évolutions technologiques et de présenter les nouvelles possibilités et applications des diverses techniques END dans les secteurs industriels, par le biais de conférences techniques et d'une exposition.

JUIN 26

02 au 03 | **SEPEM INDUSTRIES**
Brest Expo
<https://brest.sepem-industries.com/>
Dédié aux solutions « cœur d'usine », le salon présentera des technologies liées à la maintenance, aux process industriels, à la sécurité, à la transition énergétique et à l'industrie 4.0.

05

LES MATINALES EHS
La matinale dédiée aux pratiques environnementales industrielles – échanges entre pairs
Thème de juin : Retour d'expérience concernant la gestion des accidents technologiques
Un temps d'échanges dédié aux adhérents, organisé chaque premier vendredi du mois de 8h à 9h. Pour recevoir les invitations contactez c.mougeot@forgefonderie.org



JUN 26

13^{au}
15**CASTFORGE**

Stuttgart (Allemagne)

<https://www.messe-stuttgart.de/castforge/en/>

Salon professionnel des pièces moulées et forgées avec transformation. La fédération organise un village forge et fonderie.

Venez nous voir au village Forge
Fonderie Hall 10; Stand n°10B38



OCTOBRE 26

13^{au}
15**SIANE INDUSTRIES**

MEETT - Parc expo de Toulouse

<https://www.salonsiane.com/>

Carrefour des compétences industrielles, le salon SIANE Industries constitue un véritable lieu de rencontres et d'échanges pour les professionnels. Cet événement industriel se déroulera au MEETT à Toulouse et mettra en avant les leviers d'une nouvelle croissance industrielle.

24

Commission Fonderie

Lieu à déterminer

La Commission Fonderie, qui se réunit deux fois par an, constitue un moment d'échange pour les participants autour des thématiques et des projets en cours au CETIM. Elle leur permet également de contribuer à la définition des orientations futures pour leur secteur d'activité. La participation à ces groupes est ouverte à toutes les entreprises relevant du CETIM qui souhaitent s'y associer, sur simple demande.

NOVEMBRE 26

17^{au}
18**Conférence NAFEMS France**

Senlis CETIM

www.nafems.org

En 2026, l'ensemble des disciplines de la simulation numérique pour l'ingénierie ainsi que leurs applications associées seront abordées, dans la continuité des années précédentes. Des témoignages industriels et des présentations académiques, sélectionnés par le Comité de Programme, seront proposés. Les communications seront regroupées par thématique au sein de sessions parallèles, organisées en partenariat avec les acteurs associés à l'événement.

Certaines interventions seront également présentées en sessions plénières par des intervenants principaux. Ces sessions seront complétées par un espace d'exposition permettant de rencontrer des prestataires, fournisseurs et éditeurs de logiciels de premier plan, et d'échanger avec eux lors des pauses ainsi que pendant le dîner de la conférence, prévu le mardi 17 novembre.

Des visites des laboratoires du CETIM seront proposées aux participants intéressés le 17 novembre.

La simulation numérique est un outil essentiel pour accompagner ou encourager les évolutions technologiques, notamment grâce à l'IA. Elle aide à gérer des systèmes complexes, à prendre en compte l'impact environnemental, et à répondre aux nouveaux défis rencontrés par les entreprises.

SEPTEMBRE 26

20^{au}
24**59th ICFG Plenary Meeting!**

Darmstadt, Allemagne

icfg2026.org/

The International Cold Forging Group is a non-profit organization bringing together experts from industry and science in order to promote the economic and technical advancement of cold forging.

Hosted by Prof. Peter Groche at TU Darmstadt, this event offers an opportunity to exchange ideas, foster collaborations, and drive forward progress in forming technologies.

OCTOBRE 26

12^{au}
14**GAZELEC**

CNIT Forest Paris La Défense

www.congresgazelec.com

Depuis environ 15 ans, cet événement réunit des professionnels du marché de l'énergie en France et en Europe pour discuter des stratégies d'achats d'énergie, des évolutions du marché et des enjeux du secteur. Il permet également des échanges entre acheteurs, fournisseurs, distributeurs, transporteurs et experts de différents secteurs.

FORMATIONS

Cetim Academy

Catalogue 2026

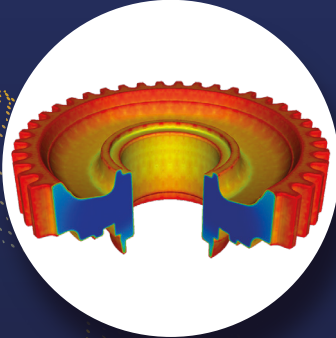
Fondeurs et Forgerons



Pour aider les entreprises à trouver le parcours pédagogique adapté au profil de leurs salariés, le Cetim sera à votre écoute et vous orientera dans les solutions de formations possibles.

- Demandes de formation Intra ou toutes autres demandes d'informations : Mouloud CHERCHOUR – Responsable Commercial Formation mouloud.cherchour@cetim.fr, Tél. 06 86 45 97 98
- Demandes relatives aux CQPM : Pascal Germain – Chargé d'Affaires en ingénierie formation pascal.germain@cetim.fr Tél. 06 83 01 99 15
- Demandes de formations Inter : Sylvia PAGE – Responsable ADV et inscription aux formations dites « catalogue » sylvia.page@cetim.fr, Tél. 03 44 67 35 66

Email : formation@cetim.frSite : <https://www.cetim.fr/formation/>
Cetim-Academy



- **Réduisez** vos cycles de développement et **accélérez** la mise sur le marché.

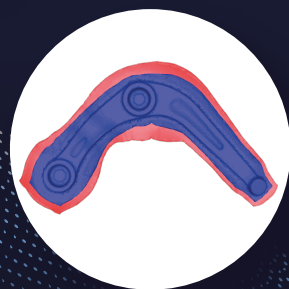
- Identifiez les paramètres process optimaux pour assurer la **conformité** de vos produits.

- **Anticipez** les propriétés mécaniques et métallurgiques de vos pièces afin de **satisfaire** les exigences clients.

- Démarquez-vous grâce à des produits **innovants, performants et fiables**.

”
**UNE DEMANDE
SPÉCIFIQUE EN TÊTE ?**

À l’instar de nombreux partenaires industriels, gagnez en efficacité industrielle grâce à des outils spécifiques conçus, développés et intégrés aux solutions Transvalor afin de répondre à vos exigences uniques.



**Scannez le QR code et découvrez comment
simuler efficacement vos procédés !**

Optimisez dès maintenant les performances de vos simulations numériques avec FORGE®

