

LA REVUE **forge et fonderie**

DEC I 2024

N°40

Au sommaire

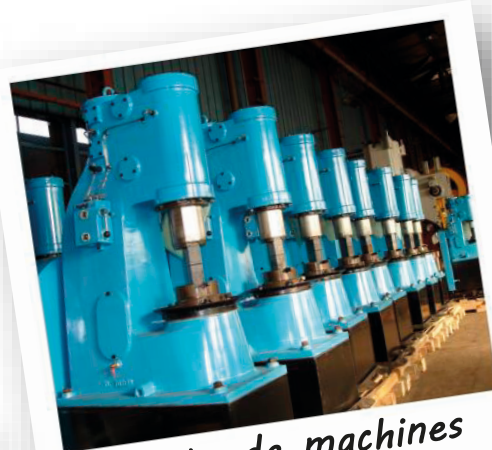
- 9** Développement de modèles avancés pour le Jumeau Numérique d'un procédé de forgeage
- 16** Fragilisation par l'hydrogène des matériaux métalliques
- 22** L'évolution de la sortie du statut de déchet, un parcours vers l'économie circulaire



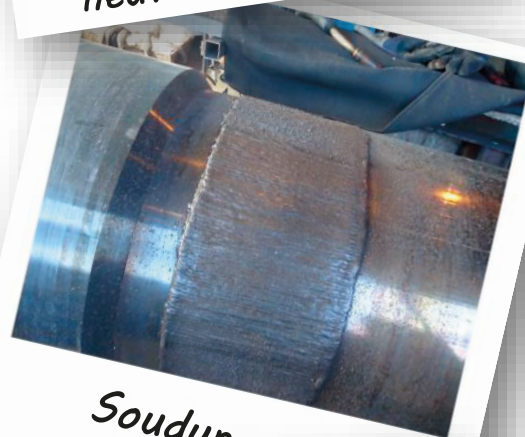
MAINTENANCE PRESSES
CLERMONT-FERRAND



Maintenance corrective et préventive



Vente de machines neuves et occasions



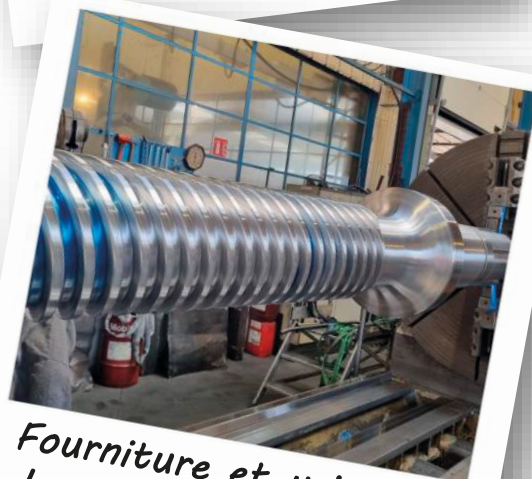
Soudure



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.aref.fr

A.R.E.F.

EDITORIAL

- 03** Comment prendrons-nous le quart ?
Hervé GESTAS et Wilfrid BOYAULT

BREVES

- 04** La conférence NRC NAFEMS au Cetim
- 05** Nouvelle Fonderie Gillet : les 10 ans de la SCOP
- 06** Assemblée Générale de la fédération européenne de fonderie (EFF) à Maastricht
- 06** ConFAIR EUROFORGE : événement incontournable qui façonne l'avenir de l'industrie de la forge en Europe
- 07** Retour sur la dernière commission Forge
- 08** La Fédération Forge Fonderie sera présente à Global Industrie à Lyon

TECHNIQUE

- 09** Développement de modèles avancés pour le Jumeau Numérique d'un procédé de forgeage
Camille DURAND, David URIBE, Cyrille BAUDOUIN et Régis BIGOT
- 17** Fragilisation par l'hydrogène des matériaux métalliques
Gouenou GIRARDIN et Daniella GUEDES

ENVIRONNEMENT

- 22** L'évolution de la sortie du statut de déchet, un parcours vers l'économie circulaire
Charlotte MOUGEOT

FORMATION

- 25** Remise des diplômes fonderie au Lycée Hector Guimard à Lyon
- 26** Besoin d'un spécialiste en conception et production de produits de fonderie et de forge ?

AGENDA

- 27** 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. Colliard, 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

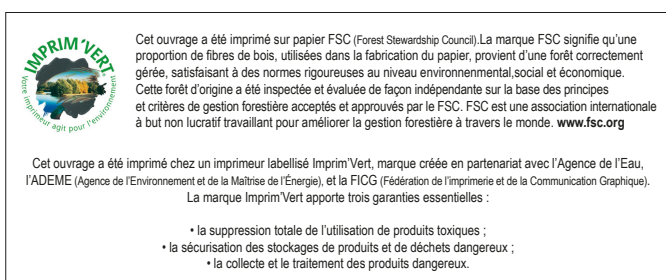
Responsable de publicité :
Isabelle de la Redonda
Tél. : 01 53 36 20 42, i.redonda@ffe.fr
Responsable technique :
Yael Sibony
Tél. : 01 53 36 37 97 yael.sibony@ffe.fr

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 Graphique
Imprimé sur papier recyclé et encres
100 % végétales

Photo de couverture
Dominique Sarraute



**GLOBAL
INDUSTRIE**

**11-14
MARS 2025**

**7^e ÉDITION
EUREXPO LYON
FRANCE**

LA VOIX ET LES SOLUTIONS DE L'INDUSTRIE

100 000 m²
d'exposition

50 000
industriels

2 500
exposants

+3 000
machines en
fonctionnement

84
pays

Plus de renseignements sur global-industrie.com



+33(0)5.53.36.78.78
contact.globalindustrie@gl-events.com
www.global-industrie.com

@gi_globalindustrie
 @salon_gi

Global Industrie
 Global Industrie

#GI25



Comment prendrons-nous le quart ?

C'est entendu : nous avons beau avoir inauguré 2025, nous ne passerons le cap du premier quart de 21^e siècle qu'à la fin de cette année.

Et pour celles et ceux de notre génération, ce n'est pas rien.

Arrêtons-nous, en effet, un instant, en cette période de bilan et de perspectives, pour tenter de nous rappeler l'imaginaire qui était le nôtre lorsqu'enfants ou adolescents, nous voyagions en pensées ... non seulement vers l'an 2000 que, si tout allait bien, nous atteindrions un jour, mais aussi, plus hardiment, bien au-delà, en ... 2025, par exemple.

Et ce petit voyage vers nos passés entrepris, de surgir cette question : 2025, l'imaginions-nous ainsi ?

Alors, à chacune et chacun d'entre nous sa réponse, faite de souvenirs véritables, ou écrans, d'espoirs comblés ou déçus, de l'histoire de notre vie telle qu'elle s'est faite.

Mais tout de même : réalisons-nous bien que nous y sommes déjà, finalement, arrivés, si vite, sans trop nous en être aperçu, à cette date qui nous semblait ne devoir advenir que dans un futur quasi de science-fiction ?

Le réalisons-nous bien, oui, mais surtout qu'en est-il de ce futur, aujourd'hui passé de l'imaginaire au réel ?

Voit-il se réaliser nos espoirs de progrès, de prospérité partagée, d'une technique libératrice et de paix ? Ou bien, plutôt, ce que nombre d'artistes et d'œuvres dystopiques avaient prophétisé, pour, nous l'espérons tous alors, conjurer ou au moins mettre en garde ?

Là encore, chacun, selon son histoire et son tempérament, jugera : technique libératrice et facilitatrice ou technique aliénante dont certains éléments sont même en passe de devenir comme des prothèses de nos corps ? Capitalisme qui a développé les richesses à distribuer ou capitalisme financier aux mains d'un nombre toujours plus restreint de détenteurs et dont le prochain objectif serait la prise du

pouvoir étatique (toute ressemblance avec l'histoire d'un grand pays d'outre-Atlantique etc...) ? Même si certaines réponses paraissent, elles, malheureusement devoir être peu équivoques qu'il s'agisse du dérèglement climatique ou de la multiplication des conflits armés à haut risque...

Mais quoi qu'il en soit, cette 25^e année du siècle nous devons nous y lancer.

Alors tâchons de faire en sorte qu'elle soit l'occasion pour chacun, pour nos entreprises, pour nos professions, de grandir, faire grandir, apprendre, comprendre, faire comprendre, échanger, collaborer, développer, se développer, assurer, transmettre, faire rayonner, préparer et se préparer ... à prendre avec confiance le prochain quart de notre siècle.

C'est dans cet esprit qu'à toutes et tous, à celles et ceux que vous aimez, à vos équipes et à vos entreprises, nous souhaitons une heureuse année 2025,

et vous assurons, plus que jamais, de notre soutien et de notre mobilisation sans faille à vos côtés.



Hervé GESTAS
Président de la Fédération
Forge Fonderie



Wilfrid BOYAULT
Directeur général de la
Fédération Forge Fonderie



Mohamed
BENNEBACH
Responsable R&D
Essais et Simulation
Multiphysiques
Cetim

La conférence NRC NAFEMS au Cetim : un rendez-vous bisannuel incontournable de la communauté simulation numérique



Senlis
19-20 Novembre 2024
Un événement co-organisé et sponsorisé par le Cetim



Formidable moteur de l'innovation, voilà des décennies que la simulation numérique contribue aux progrès techniques, économiques et sociétaux. Pour cela, elle doit sans cesse se renouveler et se réinventer. La conférence NRC (NAFEMS Regional Conference) permet tous les deux ans de faire le point sur les avancées majeures en modélisation et simulation, au travers de témoignages d'industriels, scientifiques et professionnels du domaine. Pour l'édition 2024, qui s'est tenue au Cetim Senlis les 19 et 20 novembre 2024, le comité de pilotage de NAFEMS France, présidé par le Cetim, a concocté un programme riche, qui couvre l'ensemble des disciplines de la simulation numérique pour l'ingénierie et les applications associées :

- Intelligence artificielle – Data analytics ;
- Méthodologies d'analyse structurales en mécanique, thermomécanique, dynamique et vibrations ;
- Réduction de modèles – Optimisation ;
- Nouvelles organisations et Méthodologies pour la simulation ;
- Comportement des matériaux ;
- Corrélation calcul essais- Virtualisation des essais ;
- Méthodologie numérique et standardisation ;
- Simulation des procédés de fabrication ;
- Jumeaux numériques ;
- CFD / Thermique / Energétique ;
- Biomédical – Bio ingénierie ;
- Modélisation et simulation des systèmes complexes ;
- Retour d'expérience sur des projets collaboratifs.

Ces différentes thématiques ont fait l'objet de sessions parallèles, enrichies par des keynotes :

- Stratégie IA & Simulations chez Renault, William Becamel et Rodolphe Gelin – Rençion of the future of engineering simulation, Joe Walsh (Nafems)
- Techniques d'apprentissage pour les jumeaux numériques industriels, outils et modèles, Alejandro Ribes Cortes – EDF ;
- Intelligence Artificielle : la révolution silencieuse et le temps du changement, Mickael Brossard – McKinsey ;
- Jumeaux numériques hémodynamiques & applications cliniques, Irène Vignon Clémentel – INRIA ;
- Digital twins for production and load analysis of wind energy assets, Jean Lou PFISTER – IFPEN;
- A vision of the future of engineering simulation, Joe Walsh (Nafems)

NRC24 en quelques chiffres 260 participants,
78 présentations, 2 tables rondes, 20 exposants.

Cette édition a mis en lumière des avancées impressionnantes, notamment dans les domaines des jumeaux numériques, de l'IA et du calcul haute performance, permettant de répondre aux nombreux défis liés à l'ingénierie.

Plus de détails sur:

<https://www.nafems.org/events/nafems/2024/nafems-france-conference-2024/>

Nouvelle Fonderie Gillet : les 10 ans de la SCOP

Le 15 novembre dernier, la nouvelle Fonderie Gillet fêtait sa première décennie sous forme de SCOP.

Lorsqu'en 2014 l'entreprise établie dans le Tarn, à Albi, est placée en liquidation judiciaire, une trentaine de ses salariés font le pari de reprendre leur fonderie, qui a commencé son activité en 1687, sous forme de société coopérative. C'est alors le début de l'aventure de la Nouvelle Fonderie Gillet Industrie, et 10 ans ça se fête !

Lorsqu'ils se lancent, les nouveaux co-actionnaires investissent chacun 5000€ au capital de la nouvelle société, et redémarrent la production pas à pas, « au début on partait pour 3 mois, puis 6 mois, puis 1 ans » précise le dirigeant actuel, Nicolas Pomarède. Il a fallu reprendre l'activité en mains, en ayant perdu des compétences, réorganiser, hiérarchiser, développer la polyvalence pour pallier aux différents besoins de l'entreprise.

Et 10 ans plus tard, on peut dire que la recette a fonctionné : SN Gillet Industries compte 35 salariés pour un chiffre d'affaire d'environ 3,5M€.

La fonderie propose des alliages non ferreux, aluminium, cuivreux, cupro-aluminium, ...en petites et moyennes séries.



De nombreux investissements, nécessaires à la remise à niveau de l'outil industriel, ont été réalisés depuis la reprise : chantier de moulage, sablerie, usinage, environnement, avec pour objectif de répondre au mieux à la demande client.

L'entreprise couvre aujourd'hui l'essentiel du secteur industriel, avec une présence sur la mécanique, l'hydraulique, le ferroviaire, le mobilier urbain, le militaire et bien d'autres secteurs d'activité.



Avec un carnet de commande bien rempli, une bonne visibilité, un projet de déménagement de la fonderie, on peut dire, après ces 10 ans de redressement, que le pari est gagné.

Bravo à l'ensemble des co-actionnaires, et bon vent pour les 10 prochaines années !

Film documentaire sur les 10 ans : LA NOUVELLE FONDERIE GILLET - LA SCOP 10 ANS APRÈS



L'HISTOIRE EXTRAORDINAIRE D'UNE SCOP 10 ANS APRÈS - LA NOUVELLE FONDERIE GILLET : <https://www.youtube.com/watch?v=8C4vCSV8WD4>

Assemblée Générale de la fédération européenne de fonderie (EFF) à Maastricht

Chiara Danieli a présidé l'assemblée générale d'EFF, la fédération européenne de fonderie (ex CAEF), qui s'est tenue à Maastricht, du 21 au 23 novembre 2024.



L'assemblée générale a réuni les acteurs clés de l'industrie de la fonderie. Elle a permis des échanges approfondis sur des sujets cruciaux tels les réglementations environnementales et touchant à la décarbonation (par exemple, BREF, CBAM, DPP) et l'état de l'industrie, essentiels pour façonner l'avenir, faire avancer les intérêts communs et renforcer la capacité à relever les défis de demain.

www.caef.eu

ConFAIR EUROFORGE : événement incontournable qui façonne l'avenir de l'industrie de la forge en Europe

Le 22 octobre 2024, Attilio Fresia, son président, et Tobias Hain, secrétaire général d'Euroforge ont inauguré au Palais des Congrès de Milan la ConFAIR EUROFORGE, l'événement de l'association européenne dédié à l'industrie de la forge sur le continent. Cette foire et programme de conférences a rassemblé les acteurs clés de la filière, ses industriels, ses fournisseurs et les scientifiques les plus innovants.

ConFAIR EUROFORGE a une fois encore été une occasion privilégiée de réflexion, d'approfondissement des connaissances et d'échanges professionnels. Elle a permis de renforcer les réseaux d'expertise et de travailler à l'avenir de la forge en Europe, de mettre l'accent sur le succès et la durabilité de cette industrie cruciale.



Un événement particulièrement riche en contenu, avec une série de présentations de haut niveau animées par des intervenants reconnus. Et côté français des présentations des travaux des Arts Métiers (Cyrille Baudouin, David Uribe, Camille Durand, Yoan Locard, Régis Bigot) : des perspectives innovantes et des réflexions approfondies sur les défis actuels et futurs de la forge.

www.euroforge-confair.com





Christophe GROSJEAN
Responsable R&D
Direction de la
recherche et des
programmes
CETIM

Retour sur la dernière commission Forge

La commission Forge du CETIM s'est réunie à St Etienne les 4 et 5 décembre 2024. La première demi-journée fut l'occasion d'aller à la rencontre des référents techniques de différents métiers et l'occasion de partager sur les travaux de R&D en cours. A titre d'exemple, cela a permis de visualiser des équipements de caractérisations avancées en métallurgie tels que la nano et la macro-dureté instrumentée, la sonde EBSD dans le MEB ou encore les essais de traction suivis par corrélation d'images. Ce fut aussi l'occasion de mentionner l'investissement prochain dans un dilatomètre de trempe. La visite de la partie finition de surface a permis d'identifier différentes technologies de finition (mécanique, chimique, électrochimique...) mais aussi la possibilité de recourir à un robot pour de l'ébavurage ou d'autres opérations habituellement manuelles. Côté fabrication additive, la diversité des procédés ainsi que l'évolution rapide des machines et matériaux a été largement souligné. Les technologies basées sur le frittage de poudre sont notamment largement étudiées à St Etienne car prometteuses pour démocratiser ces procédés souvent perçus comme onéreux et peu productifs. Un passage par les essais de fatigue a mis en lumière des essais standardisés de caractérisation mais aussi des essais sur des structures complètes parfois de grandes dimensions (bogies, remontés mécaniques...) et incluant de nombreuses étapes (essai statique, dynamique, contrôle non destructif, simulation, instrumentation...). Enfin, la plateforme Quatrium dédiée à la valorisation et au transfert des travaux collectifs dans l'industrie a été visitée.

Lors de la commission, la diversité des travaux de R&D pour la forge a été illustrée. On retrouve des travaux de ressourcement tel que le lancement d'une nouvelle thèse sur les jumeaux numériques en partenariat avec l'ENSAM de Metz dans le cadre du laboratoire commun LAMFM (Laboratoire de Mise en Forme des Matériaux). Ce fut l'occasion aussi de revenir sur l'avancement du projet stratégique sectoriel « Instrumentation en environnements sévères » dédié aux métiers de la forge et de la fonderie. D'autres sujets ont été présentés :

- la maîtrise de l'usure d'outil en ayant recours à des dépôts PVD
- la simulation avec un groupe de travail en lien avec le logiciel Forge ®.
- les jumeaux numériques
- la veille avec le retour sur la participation à EuroForge
- le forgeage isotherme
- le projet thématique transversal sur la fabrication additive à coût accessible
- le projet thématique transversal à venir sur le contrôle en ligne

La fédération Forge Fonderie a également contribué au succès de ces deux journées en fournissant les chiffres clés du domaine pour les dernières années.



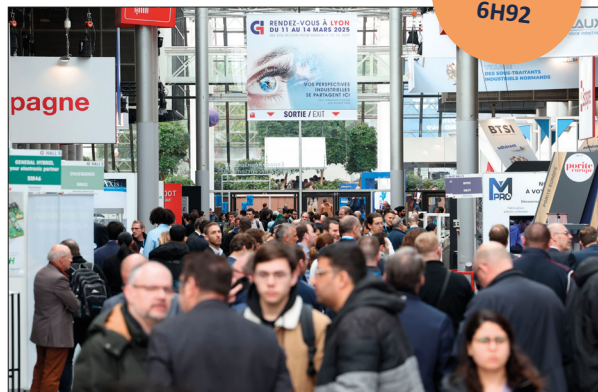
GLOBAL INDUSTRIE

La Fédération Forge Fonderie sera présente à Global Industrie à Lyon

Ce rendez-vous mondial de la sous-traitance industrielle donne l'opportunité aux entreprises industrielles de la forge et de la fonderie de promouvoir largement l'excellence de leur savoir faire. Pour cette nouvelle édition, la Fédération Forge Fonderie sera présente au coeur du Village Forge Fonderie Françaises, espace dédié aux forgerons et fondeurs français.

Les collaborateurs de la Fédération seront sur place pour informer et orienter visiteurs et donneur d'ordres, promouvoir nos professions, accueillir les institutionnels et aider les fondeurs et forgerons à nouer des contacts.

Des évènements d'ampleur et rassembleurs GL Events Exhibitions industrie réuni les acteurs et les actrices de l'Industrie pour leur donner un rayonnement d'ampleur en



France et à l'international. 2500 exposants sont attendus à ce grand rendez-vous international. Ils seront répartis sur 100 000 m² d'exposition en attendant 50 000 industriels.



L'OPTIMUM QUALITÉ EST NOTRE PRIORITÉ

Notre vaste gamme de machines-outils pour les techniques de formage comprend entre autres **des presses hydrauliques, des marteaux-pilons, des marteaux à contre-frappes, des presses à vis, des machines de préformage et des laminoirs transversaux et longitudinaux.** Un autre de nos atouts : **l'automatisation** clef en main des installations, lignes complètes ou simples machines. **Your needs. Our solutions.**

Domaine d'application actuel :

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



LASCO Umformtechnik GmbH
Hahnweg 139 • 96450 Coburg • Allemagne • Tél +49 9561 642-0

LASCO.COM



Camille DURAND
Laboratoire LCFC
Arts et Métiers
Campus de Metz



David URIBE
Laboratoire LCFC
Arts et Métiers
Campus de Metz



Cyrille BAUDOIN
Laboratoire LCFC
Arts et Métiers
Campus de Metz



Régis BIGOT
Laboratoire LCFC
Arts et Métiers
Campus de Metz

Développement de modèles avancés pour le Jumeau Numérique d'un procédé de forgeage

I. Introduction

Depuis quelques années déjà, on assiste, dans le milieu des procédés de mise en forme, à l'émergence du concept de Jumeau Numérique (ou Digital Twin en anglais). Plus qu'une simple simulation numérique d'un procédé, le Jumeau Numérique est « un ensemble de modèles adaptatifs qui émulent le comportement d'un système physique dans un système virtuel recevant des données en temps réel pour se mettre à jour tout au long de son cycle de vie. Le jumeau numérique reproduit le système physique afin de prévoir les défaillances et les possibilités d'évolution, de prescrire en temps réel des actions pour optimiser et/ou atténuer les événements inattendus en observant et en évaluant le système de profil d'exploitation » [1]. Pour le domaine de la mise en forme, le Jumeau Numérique peut être utilisé dans le pilotage, le contrôle, l'optimisation et l'aide à la décision. Conscient de ce que pourrait apporter cette digitalisation au service des procédés de fabrication, plusieurs projets de recherche ont été lancés au sein du LCFC (Laboratoire Conception Fabrication Commande) de l'ENSAM de Metz afin de progresser scientifiquement sur le sujet. C'est le cas notamment avec le projet Carnot intitulé DAMAS (Digitalisation au service des procédés de fabrication : des (méta) modèles à l'immersion virtuelle) lancé en 2022 avec 6 autres laboratoires partenaires (LAMIH Université de Valenciennes, LEM3 Université de Lorraine / ENSAM Metz, IRDL Université de Bretagne Sud, Vannes, LAMPA ENSAM Angers / Laval, LISPEN ENSAM Chalon sur Saône, PIMM ENSAM Paris) et qui ambitionne le développement de différents démonstrateurs de Jumeau Numérique adaptés à différents procédés de mise en forme.

Les travaux qui sont présentés ici font partis de ce projet et incluent les résultats de 2 thèses. Ces travaux visent plus particulièrement au développement d'un Jumeau Numérique pour le pilotage et le contrôle des opérations de forgeage à froid sous presse à vis [2]. Dans les opérations de forgeage avec ce type de presse, le pilotage implique la modulation de l'énergie attribuée à chaque frappe afin d'obtenir une pièce finale conforme. Le contrôle, quant à lui, consiste à connaître différents indicateurs du procédé tels que les champs de déformations, de températures, les efforts maximums de chaque opération, etc. Cela nécessite le développement et l'application de modèles de prédiction à la fois du matériau forgé mais aussi de la machine de forgeage et des phénomènes aux interfaces (Figure 1).

Dans cette étude, une approche en 4 étapes est proposée pour parvenir à une prédiction en temps réel des résultats d'opérations de forgeage. Tout d'abord, un modèle de substitution basé sur les données de simulations numériques est construit grâce à des réseaux de neurones artificiels. Ce modèle est capable de reproduire les caractéristiques clés du processus lié aux lopins avec une efficacité de calcul accrue [3]. Ensuite, ce modèle est couplé à un modèle masse-ressort-amortisseur de la machine de forgeage et des outils afin de capturer les interactions dynamiques [4]. Enfin, l'approche est validée en comparant les prédictions avec les résultats expérimentaux, ce qui permet de vérifier l'efficacité du modèle pour prédire les paramètres clés du processus de forgeage.

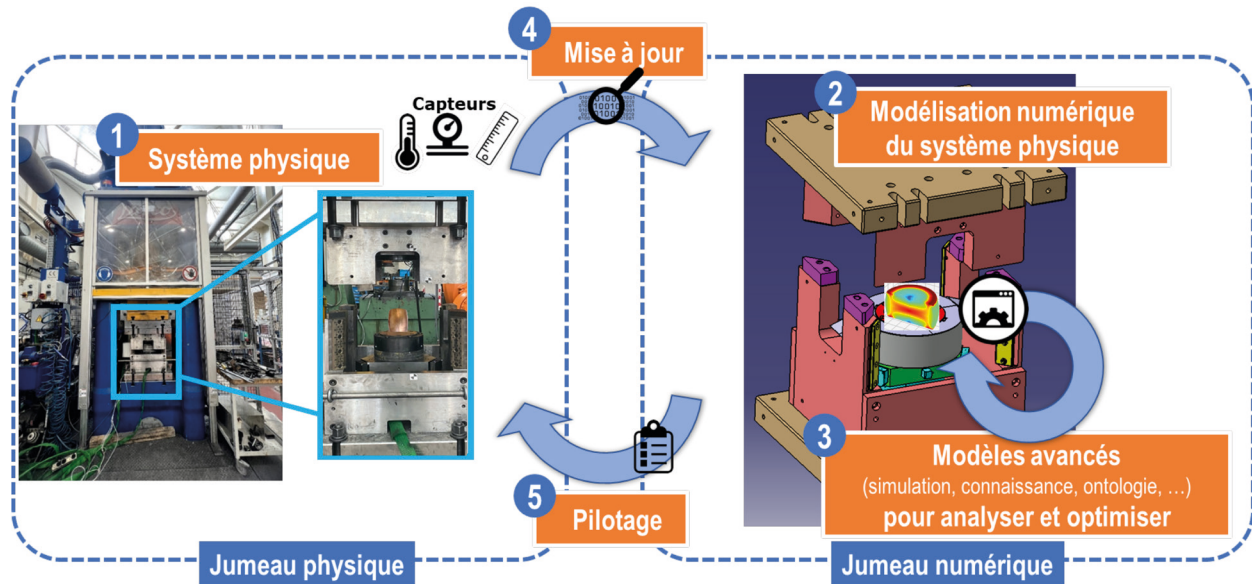


Figure 1: Schéma représentatif d'un jumeau numérique pour un procédé de forgeage

2. L'opération de forgeage

On s'intéresse au refolement multi-coups à froid d'un lopin cylindrique en cuivre à l'aide de presse la vis LASCO SPR400 de la plate-forme VULCAIN des Arts et Métiers de Metz. Les lopins ont des géométries initiales avec un diamètre initial D_0 pouvant varier entre 15 à 35 mm et un rapport d'élanement $SR = H_0/D_0$ variant de 1,5 à 2 mm.

Au fur et à mesure des coups, les propriétés métallurgiques et la géométrie du lopin changent avec l'apparition d'un Profil Bombé (BP). Pour obtenir un contrôle précis de la géométrie finale de la pièce refoulée, il faut comprendre le réglage de l'énergie de forgeage pour chaque coup (Energie), en tenant compte de l'état initial, intermédiaire et final de la pièce (Figure 2).

La presse à vis utilisée peut fournir une énergie de forgeage maximale de 28,9 kJ pour une vitesse de coulisseau de 680 mm/s et est contrôlée par

une énergie de réglage ajustable de 1 % à 100 % de sa capacité maximale. Des matrices plates lisses et un lubrifiant aérosol à base de graphite ont été utilisés pour les opérations de refolement. Pendant les opérations de forgeage, le déplacement du coulisseau est mesuré à l'aide de 3 capteurs laser et l'effort de forgeage est mesuré à l'aide d'un capteur d'effort situé dans l'outil inférieur [5]. Les géométries expérimentales des lopins après chaque coup ont été obtenues à l'aide d'un scanner optique 3D à haute résolution, pour extraire le profil bombé.

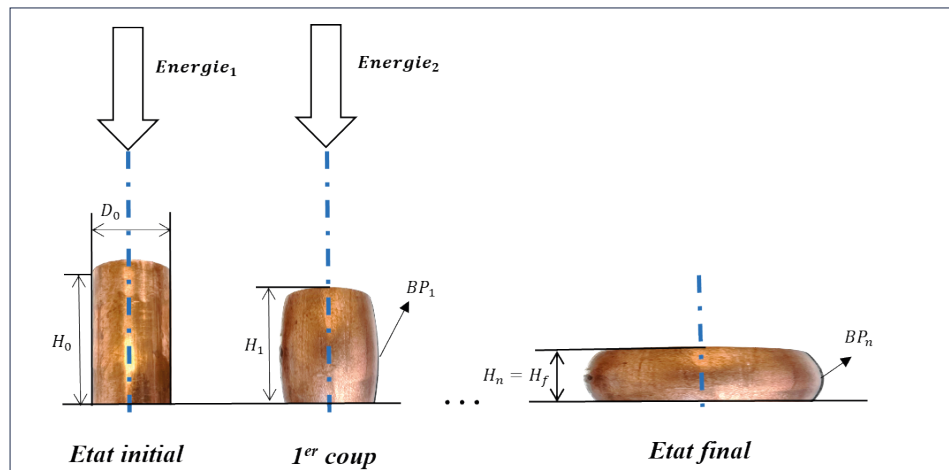


Figure 2 : Evolution de la géométrie d'un lopin de cuivre lors d'un refolement multi-coups

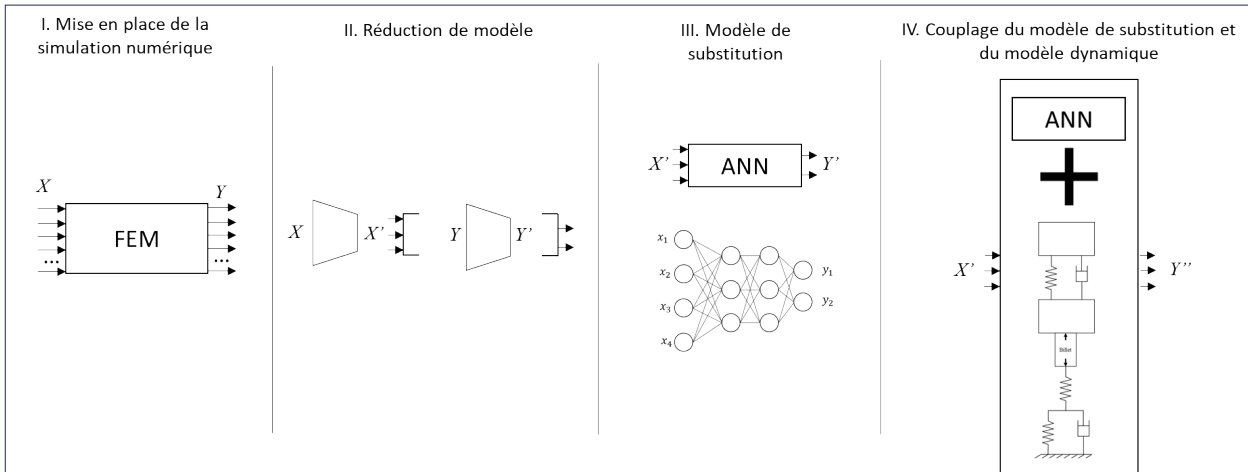


Figure 3 : Schéma des 4 étapes de création d'un modèle prédictif pour une opération de forgeage

3. Méthodologie

Pour parvenir à créer un modèle prédictif des opérations de forgeage, il faut 4 étapes : premièrement, mettre en place une simulation numérique, soumettre la simulation à des techniques de réduction de modèle, créer un modèle de substitution à partir du modèle réduit, et enfin coupler le modèle de substitution, qui reflète le comportement du lopin, à un modèle dynamique représentant le comportement de la machine de forgeage (Figure 3).

1. Mise en place de la simulation numérique

Les opérations de refoulement correspondantes sont simulées en 2D axisymétrique grâce au logiciel Eléments Finis Forge® 4.0, avec entre 6000 à 12000 éléments selon les dimensions du lopin et les calculs dureraient en moyenne 15 minutes. Le choix a été fait d'analyser uniquement les géométries, les champs de déformation et les courbes effort-déplacement (Figure 4).

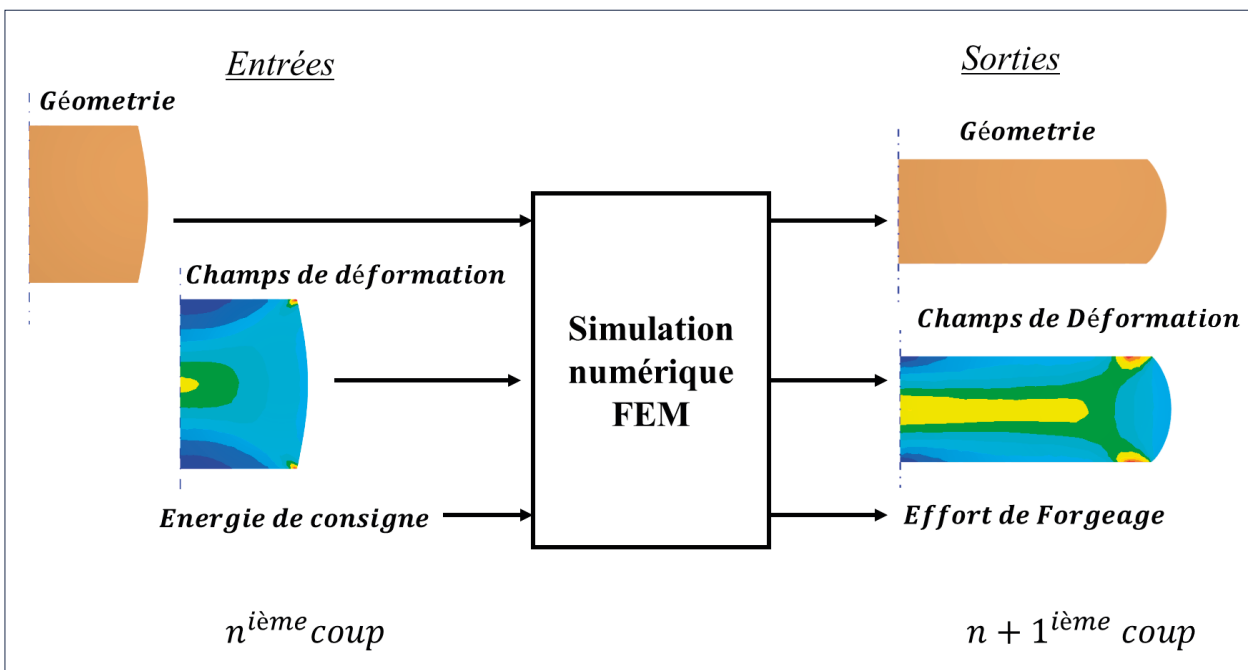


Figure 4 : Choix des grandeurs d'intérêts en entrée et en sortie pour la simulation numérique

2. Réduction de modèle

Ici, des techniques de modélisation et de paramétrisation d'ordre réduit sont employées pour obtenir une représentation simplifiée de l'opération (Figure 5). La complexité de la géométrie des lopins a été simplifiée en utilisant une représentation par des courbes paramétrées avec des points de contrôle de Bézier [6]. Cette approche a facilité

la réduction de l'information en condensant la représentation à seulement 5 points de contrôle. En ce qui concerne le champ de déformation, il a été discrétisé sur la base de la géométrie du lopin. Ce processus de discrétisation [7] est appliqué à chaque champ de déformation de chaque incrément, ce qui facilite la construction des matrices d'instantané utilisées dans la réduction par Décomposition Orthogonale aux valeurs Propres (POD) [8].

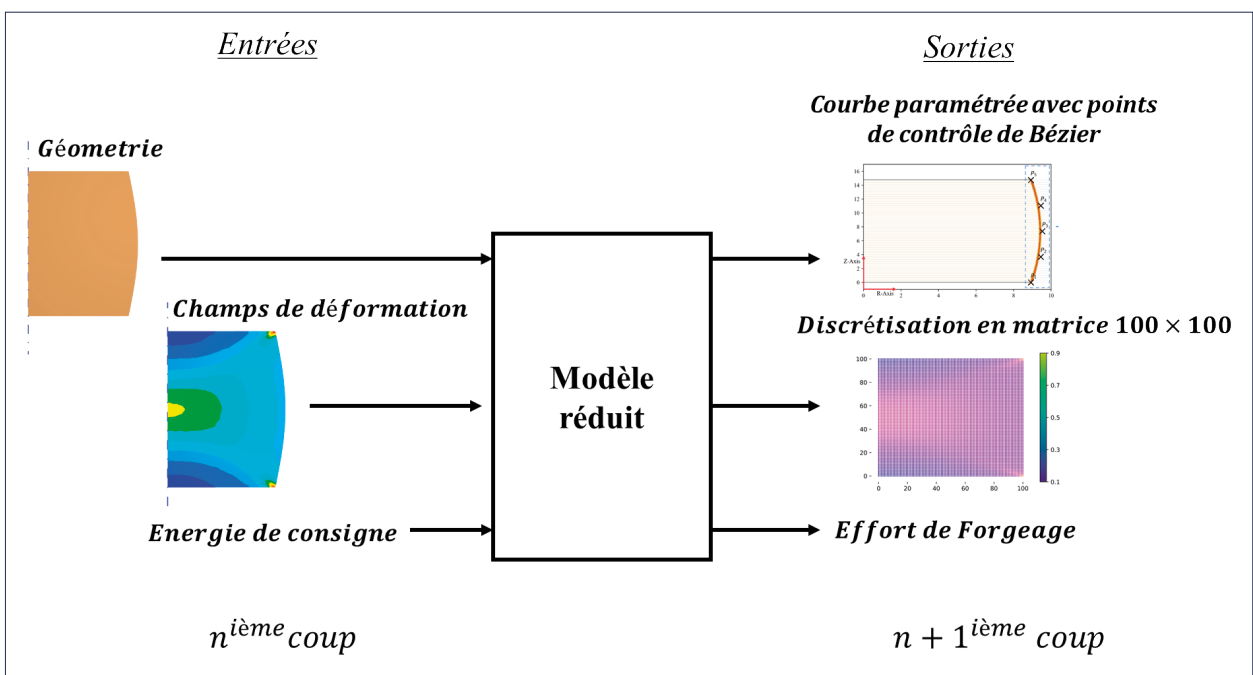


Figure 5 : Schéma représentant la réduction du modèle

3. Modèle de substitution

Le modèle, une fois réduit, est ensuite utilisé pour former et valider un modèle de substitution. Pour cela, une base de données basée sur la simulation est construite à l'aide d'une méthode d'échantillonnage. Au total, 2000 combinaisons ont été générées, chacune représentant une simulation numérique. L'architecture du modèle de substitution est construite à l'aide de réseaux de neurones artificiels à perceptron multicouche (MLP-ANN) choisi comme algorithme d'apprentissage (Figure 6). A ce stade, le temps de calcul est désormais inférieur à 200 ms.

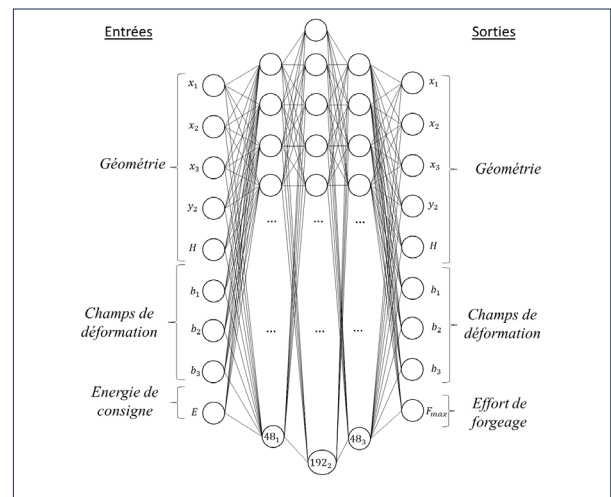


Figure 6 : Représentation du modèle de substitution construit grâce à un réseau de neurones artificiels MLP-ANN

4. Couplage des modèles

Le modèle de substitution facilite la prédiction de la géométrie, du champ de déformation et de l'effort de forgeage, mais il suppose que toute l'énergie fournie en entrée est transformée en énergie de déformation pour le forgeage du lopin, ce qui n'est pas toujours vrai. Il faut alors coupler le modèle de substitution, qui reflète fidèlement le comportement du lopin, à un modèle dynamique du comportement de la presse à vis et de ses outillages.

Dans le cadre des travaux de la thèse de M. Heyu Song au LCFC, une méthode a été développée afin de déterminer le modèle dynamique d'un système de production pilotée en énergie, comme la presse à vis [9]. Pour cela, l'effort d'une opération de forgeage doit être analysé à l'aide d'une transformée de Fourier rapide (FFT) pour déterminer le nombre de pics de fréquence correspondant au nombre minimum de degrés de liberté du modèle. Sur la base des résultats de la FFT et en connaissant les conditions aux limites du système, un modèle masse-ressort-amortisseur est défini et les paramètres du modèle sont ensuite identifiés grâce à des méthodes d'optimisation numérique.

Pour ce qui concerne la presse à vis, l'analyse FFT des signaux de l'effort de forgeage, conduit à la définition d'un modèle masse-ressort-amortisseur à 2 degrés de liberté.

Ce modèle est constitué de 2 masses, de 2 amortisseurs et de 2 ressorts en plus du ressort du capteur d'effort (Figure 7). Grâce à la méthode de descente de gradients, les paramètres du modèle ont été identifiés.

Cela a mis en évidence que pour chaque coup, l'énergie cinétique provenant du mouvement du coulisseau est transformée en 4 types d'énergie : l'énergie plastique consommée pour déformer plastiquement le lopin, l'énergie de frottement dissipée à l'interface entre les outils et le matériau, l'énergie élastique stockée par les ressorts et l'énergie amortie dissipée par les amortisseurs. L'efficacité du forgeage est définie comme le rapport entre l'énergie plastique transmise au lopin et l'énergie cinétique. Pour les premiers coups, l'énergie cinétique est principalement transformée en déformation plastique du lopin, donc l'efficacité est élevée pour les premiers coups, puis elle diminue de manière significative après chaque coup. L'énergie de frottement et l'énergie d'amortissement restent en général assez faibles au fil des coups. L'énergie élastique, presque négligeable aux premiers coups, augmente de façon significative avec le nombre de coups. Il apparaît que lors du forgeage sous une presse à vis, le lopin absorbe de moins en moins d'énergie cinétique sous forme de déformation plastique, l'énergie restante étant donc principalement dissipée dans la déformation élastique de la machine et de ses outils.

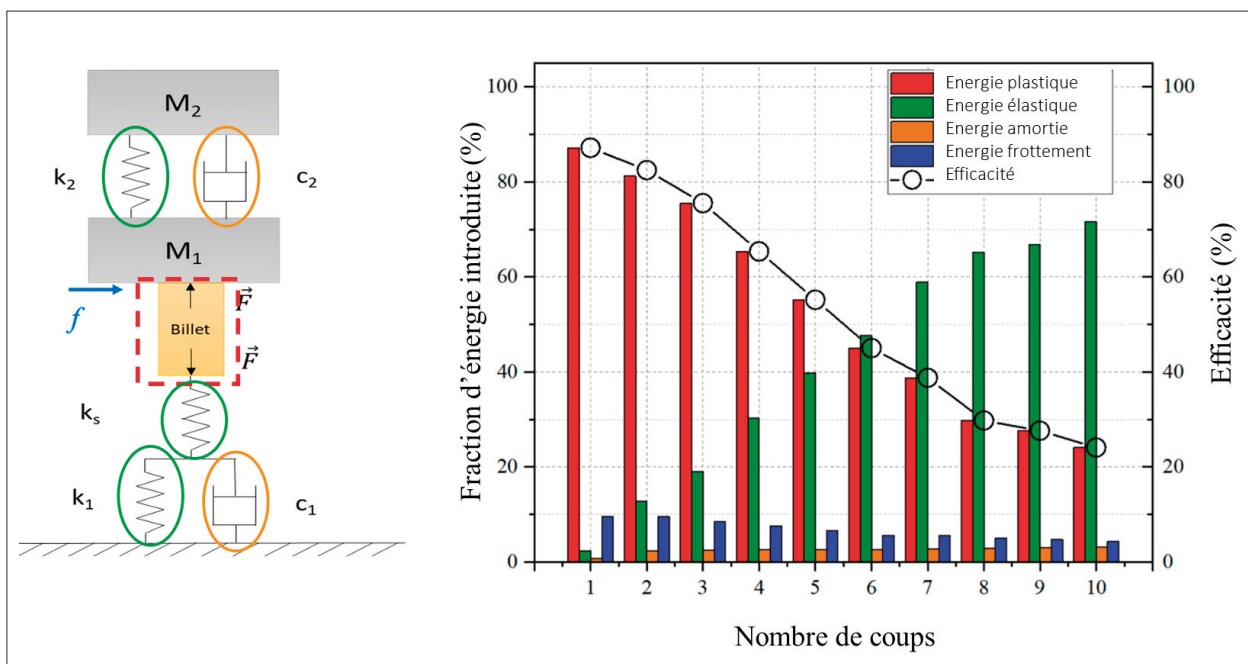


Figure 7 : Modèle dynamique masse-ressort-amortisseur identifié pour la presse à vis et bilan énergétique et évolution de l'efficacité au cours d'un refoulement de cuivre multi-coups

Pour le calcul, le modèle dynamique masse-ressort-amortisseur doit avoir accès à l'effort de forgeage pour un déplacement donné. La courbe effort-déplacement obtenue à partir du modèle de substitution est l'entrée du modèle dynamique, qui fournira une prédiction en temps réel des hauteurs finales, des efficacités, de la répartition de l'énergie et d'une courbe effort-déplacement corrigée pour une opération multi-coups.

4. Résultats

L'évolution de la géométrie pour 4 lopins différents est illustrée Figure 8: les résultats issus de la Méthode des Eléments Finis (FEM) et du Modèle de Substitution (SM) sont comparés aux résultats expérimentaux. Il apparaît clairement que les géométries prédites par la FEM présentent une déforma-

tion plus importante que celles prédites par le SM, qui lui est proche de l'expérience. Cette divergence vient du fait que la FEM ne tient pas compte du comportement dynamique de la machine contrairement au modèle SM. Malgré les erreurs cumulatives potentielles dans les prédictions SM après 4 coups, les prédictions restent justes avec un pourcentage d'erreur absolue moyenne inférieur à 1 %.

Pour aller plus loin, les champs de déformation obtenus par le modèle SM pour un lopin ayant subi 4 frappes sont comparés avec les résultats obtenus par FEM (Figure 9). On s'aperçoit que la différence est faible, ce qui montre la bonne prédiction des champs de déformation par le modèle SM. Pour toutes les billettes, les résultats indiquent une erreur absolue moyenne inférieure à 0,05 [mm/mm] sur une plage de champ de déformation de [0-1,5].

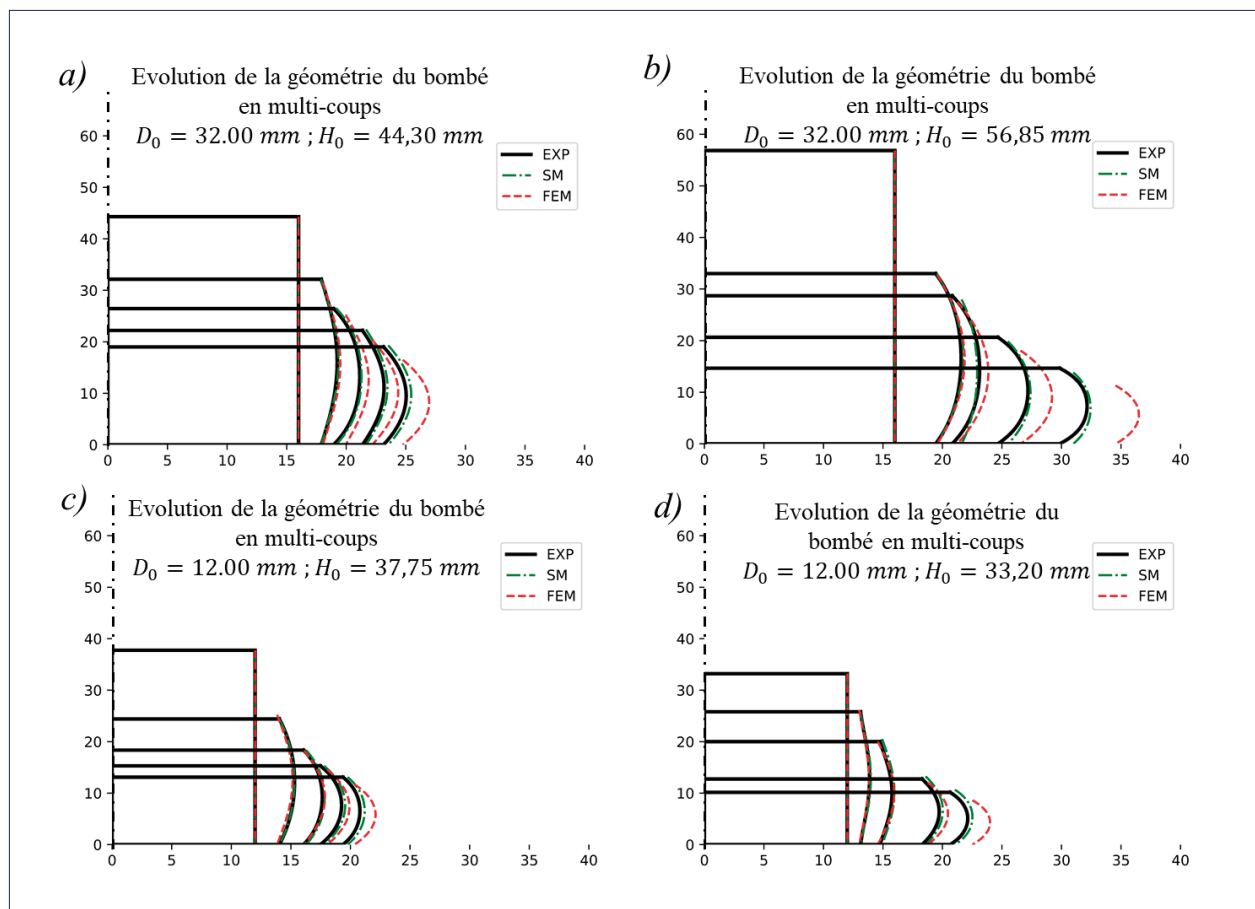


Figure 8 : Evolution de la géométrie du bombé de différents lopins ayant subi un refoulement multi-coups

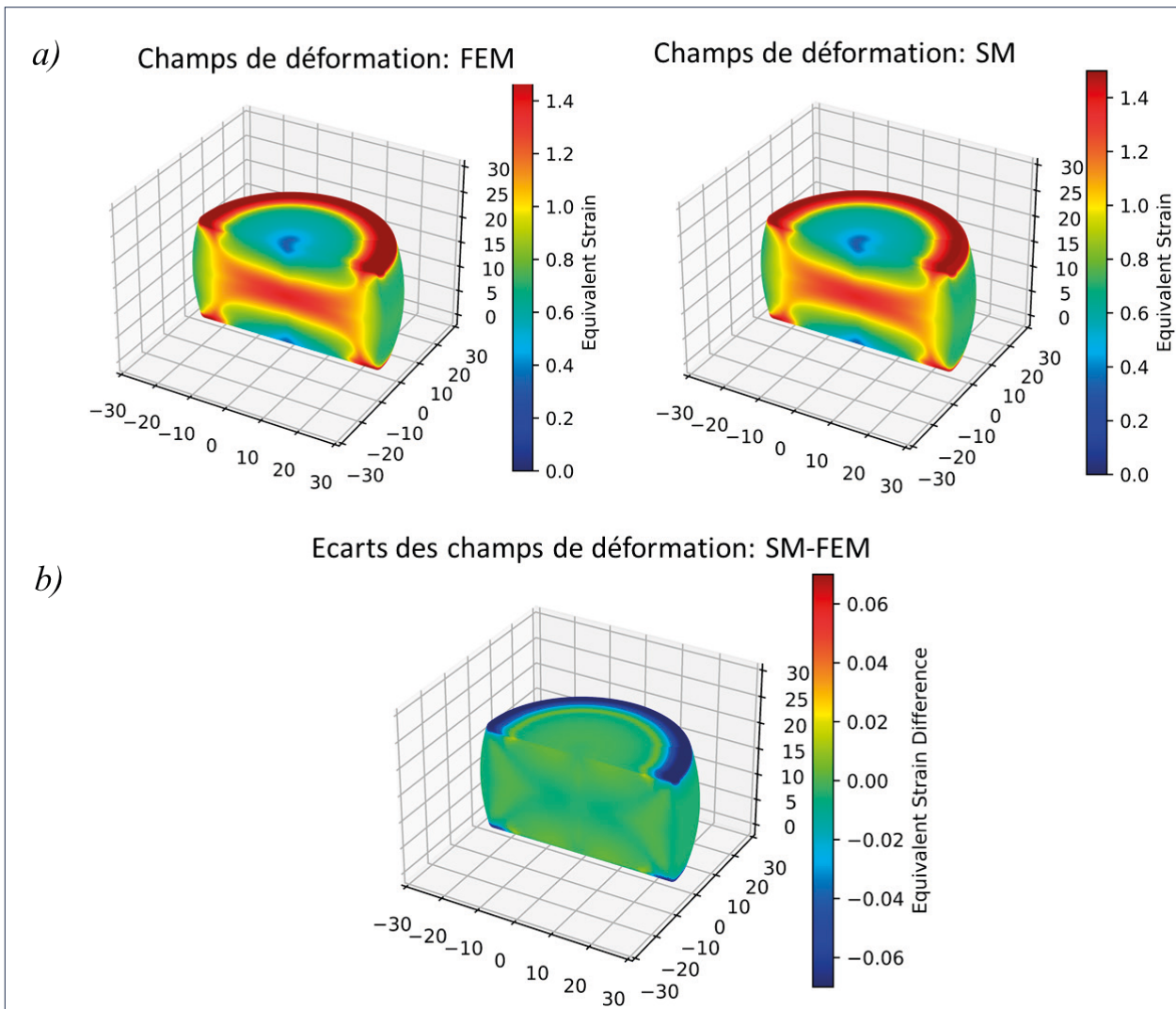


Figure 9 : Comparaison des champs de déformation pour un lopin de $D_0 = 32\text{mm}$ et $H_0 = 44.3\text{ mm}$ après le 4^e coup obtenus par FEM et par SM

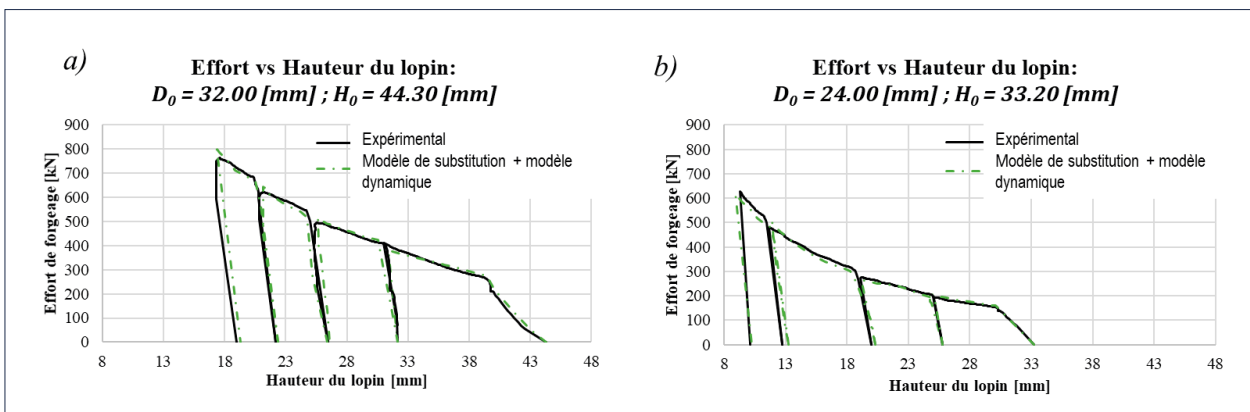


Figure 10 : Courbes effort-hauteur du lopin obtenues expérimentalement et par couplage des modèles pour différentes géométries de lopins

Les courbes effort-déplacement obtenues à partir du modèle couplé correspondent étroitement aux données expérimentales, la prédiction des hauteurs des billettes montrant une erreur inférieure à 5 %, correspondant à 0,6 mm (Figure 10).

La prédiction de l'efficacité du coup a été évaluée, révélant des erreurs maximales inférieures à 2,5 % et une erreur absolue moyenne de 1,1 %.

5. Conclusions et perspectives

Le modèle couplé a fait preuve d'une grande justesse dans la prédiction de la géométrie, des champs de déformation et des courbes effort-déplacement pour les opérations de refoulement multi-coups, prouvant ainsi la pertinence et la fiabilité du modèle de substitution mis au point et soulignant la nécessité de prendre en compte le comportement dynamique des machines de forgeage pilotées en énergie.

Dans les travaux futurs, l'affinement continu du modèle couplé après chaque coup sera essentiel pour minimiser la propagation des erreurs. Ce processus d'affinement itératif peut conduire au développement d'un modèle dit hybride, qui prend en compte les incertitudes inhérentes présentes dans chaque modèle individuel, garantissant ainsi la précision et la fiabilité du modèle. Une thèse vient d'ailleurs de commencer sur le sujet au sein du LCFC et en partenariat avec le CETIM.

6. Remerciements

Les auteurs remercient le CETIM pour leur support financier à nos projets de recherche. En particulier Valérie Sulis, Pierre Krumpipe, Christophe Grosjean et Stéphane Magron pour leur suivi de projets et leurs conseils. Nous tenons également à remercier l'institut Carnot ARTS pour son soutien financier sur le projet DAMAS. Nous remercions également Francisco Chinesta, Professeur des universités dans le Laboratoire Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux (PIMM) pour sa contribution et son expertise dans la réduction dimensionnelle et les jumeaux numériques. Enfin, nous tenons particulièrement à remercier Sébastien Burgun, Daniel Boehm et Alexandre Fendler pour leur soutien technique lors des différents essais réalisés.

7. Références

- [1] C. Semeraro, M. Lezoche, H. Panetto, and M. Dassisti, "Digital twin paradigm: A systematic literature review," *Comput. Ind.*, vol. 130, p. 103469, May 2021, doi: 10.1016/j.compind.2021.103469.
- [2] C. Baudouin, D. Uribe, and S. Fleury, "Jumeaux numériques : le projet JENII cherche à innover dans la formation aux procédés de fabrication," *Revue Forge et Fonderie n°37*, p. p.4-10, 2024.
- [3] P. Benner, S. Grivet-Talocia, A. Quarteroni, G. Rozza, W. Schilders, and L. M. Silveira, Eds., *System- and Data-Driven Methods and Algorithms*, vol. 1. De Gruyter, 2021. doi: 10.1515/9783110498967.
- [4] S. Vajpayee and M. M. Sadek, "Effects of Structural and Forming Parameters on the Efficiency of Energy Transfer in Impact Forming Machines," *J. Eng. Ind.*, vol. 100, no. 2, pp. 113-118, May 1978, doi: 10.1115/1.3439397.
- [5] C. Durand, L. Freund, C. Baudouin, R. Bigot, and J.-D. Guerin, "Instrumentation d'un procédé de forgeage : comparaison de différentes technologies de capteurs," in *17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA, LAVAL VIRTUAL WORLD*, France: Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], Mar. 2021. Accessed: Jan. 25, 2022. [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03296122>
- [6] H. N. Fitter, A. B. Pandey, D. D. Patel, and J. M. Mistry, "A Review on Approaches for Handling Bezier Curves in CAD for Manufacturing," *Procedia Eng.*, vol. 97, pp. 1155-1166, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.394.
- [7] D. Uribe, C. Baudouin, C. Durand, and R. Bigot, "Predictive control for a single-blow cold upsetting using surrogate modeling for a digital twin," *Int. J. Mater. Form.*, vol. 17, no. 1, p. 7, Dec. 2023, doi: 10.1007/s12289-023-01803-x.
- [8] W. Schilders, "Introduction to Model Order Reduction," in *Model Order Reduction: Theory, Research Aspects and Applications*, W. H. A. Schilders, H. A. van der Vorst, and J. Rommes, Eds., in *Mathematics in Industry*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, pp. 3-32. doi: 10.1007/978-3-540-78841-6_1.
- [9] H. Song, C. Durand, C. Baudouin, and R. Bigot, "Dynamic modelling and efficiency prediction for forging operations under a screw press," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 134, no. 1, pp. 645-656, Sep. 2024, doi: 10.1007/s00170-024-14145-y.



Gouenou GIRARDIN
Responsable technique
projet Hymeet



Daniella GUEDES
Experte matériau
métallique hydrogène
CETIM

Fragilisation par l'hydrogène des matériaux métalliques

Introduction

Parmi les solutions envisagées pour accompagner la transition vers une décarbonation de l'économie, l'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique prometteur. L'hydrogène décarboné est en effet une des solutions clés pour atteindre la neutralité carbone en substitution de l'hydrogène fossile actuellement utilisé dans l'industrie (430kt/an correspondant à l'émission de près de 5Mt de CO₂) et le développement de nouveaux usages (sidérurgie, e-carburants, stockage d'énergie, mobilité lourde...). Le déploiement d'une filière industrielle de l'hydrogène représente un enjeu de taille pour le secteur de la forge et de la fonderie non seulement par les enjeux liés à la décarbonation de leur industrie (en particulier des fours) mais aussi par les opportunités qu'apporte ce secteur compte tenu du développement de nouveaux usages dans des secteurs aussi exigeants que la mobilité lourde (aéronautique, maritime voire terrestre) mais aussi la production et le transport et le stockage. Si les usages de l'hydrogène sont bien connus et maîtrisés par certains secteurs de niche depuis de nombreuses années (secteur du spatial), la massification de ces usages va créer de nouvelles opportunités et de nouvelles demandes de pièces de fonderie ou de forge (tuyauterie, corps de vannes, robinets...) nécessitant une parfaite maîtrise de la métallurgie des pièces associées compte tenu des risques inhérents à cette molécule.

En raison de sa petite taille, l'hydrogène peut pénétrer dans les aciers et autres matériaux métalliques. Selon les applications industrielles et les usages, il peut provenir de sources internes, telles que l'élaboration, le nettoyage ou le décapage, ou de sources externes, comme la corrosion, la protection cathodique ou l'environnement gazeux. Depuis leur fabrication jusqu'à leur mise en service, les composants métalliques sont presque inévitablement exposés à l'hydrogène. En fonction des conditions de fonctionnement, l'hydrogène est susceptible de provoquer une dégradation des propriétés mécaniques des alliages. Bien que ces dommages soient étudiés depuis de nombreuses années, les nouveaux usages de l'hydrogène nécessitent une attention particulière dans la sélection des matériaux pour prévenir les risques d'endommagement des composants.

Les dommages causés par l'hydrogène

L'un des modes de dégradation susceptibles d'affecter les systèmes métalliques exposés à l'hydrogène est la fragilisation par l'hydrogène (FPH). Ce phénomène est généralement défini comme une réduction de la ductilité, une baisse de la ténacité ou une accélération de la propagation des fissures de fatigue dans un métal, en raison de la présence d'atomes d'hydrogène dans le matériau. Ce processus nécessite généralement la présence de contraintes, qu'elles soient appliquées ou résiduelles.

La fissuration induite par hydrogène (plus communément désignée pour la désignation HIC pour Hydrogen Induced cracking) est généralement observée sur des matériaux présentant une faible propreté inclusionnaire ou une résistance mécanique moyenne ou faible, et dans des conditions d'exposition relativement agressives telles que celles rencontrées en environnements aqueux en présence de sulfure d'hydrogène (H_2S) ou autre élément promoteur de l'hydrogène. De grandes quantités d'atomes d'hydrogène pénètrent dans le matériau et se recombinaient au niveau d'une discontinuité de l'acier sous forme moléculaire (H_2). La taille de cette molécule étant trop importante pour diffuser à travers l'acier, la pression en dihydrogène augmente jusqu'à la formation de cloques, ce qui peut provoquer l'apparition de fissures planes s'étendant dans le sens de laminage de l'acier, parallèlement à la surface (NACE TM0284, 2003). A noter que le HIC peut se produire en l'absence totale de contrainte appliquée.

Un autre mode de dégradation couramment rencontré dans l'industrie est l'attaque par l'hydrogène à haute température (High Temperature Hydrogen Attack, HTHA). Ce type d'endommagement, affectant principalement les aciers au carbone ou faiblement alliés, entraîne une perte de résistance et de ductilité du matériau dans des environnements à haute température (>200°C) riches en hydrogène (comme dans les raffineries, les installations pétrochimiques ou les chaudières à vapeur haute pression). À ces températures, l'hydrogène se dissocie et diffuse dans le matériau. Le carbone de l'acier réagit alors avec l'hydrogène, provoquant en surface un dégagement de méthane (CH_4) qui entraîne une décarburation et une perte de résistance en surface. À l'intérieur du matériau, l'hydrogène réagit avec le carbone pour former des poches de méthane localisées au niveau des joints de grains ou des défauts. Le méthane formé ne peut pas diffuser hors de l'acier, ce qui génère des contraintes internes élevées, conduisant à la formation de fissures ou de cloques.

Dans des environnements gazeux hydrogénés, la FPH survient à des températures plus basses que celles liées à l'HTHA. La fragilisation par l'hydrogène résulte de l'interaction synergique de plusieurs facteurs, regroupés dans le triptyque suivant :

- La source d'hydrogène,
- Le matériau depuis de sa composition chimique jusqu'à sa microstructure en passant par la présence d'hétérogénéités, ses propriétés mécaniques voire l'état de surface,
- Le troisième facteur crucial est l'état de sollicitation mécanique, incluant le type de chargement (monotone ou cyclique), l'état des contraintes appliquées et la présence de contraintes résiduelles.

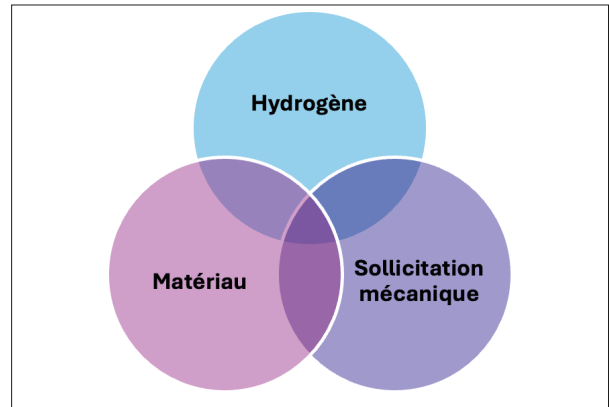


Schéma présentant des facteurs qui entraînent la fragilisation par l'hydrogène (FPH)

Si ces trois éléments sont présents en quantités suffisantes, sur une durée suffisamment longue, les dommages causés par l'hydrogène entraînent l'initiation et la propagation de fissures jusqu'à la rupture. Le temps jusqu'à la rupture peut varier en fonction du matériau, de la sévérité des conditions et de la source de l'hydrogène. Les contraintes et l'hydrogène sont considérés comme des déclencheurs, tandis que la sensibilité du matériau est souvent la condition fondamentale pour que la fragilisation par l'hydrogène se produise.

L'occurrence des dommages causés par l'hydrogène est directement liée à la facilité d'absorption de l'hydrogène dans les métaux et à sa grande mobilité. Dans les environnements gazeux, l'hydrogène ne peut pas pénétrer dans les composants métalliques sous forme moléculaire. La molécule d'hydrogène doit donc se dissocier en atomes à la surface avant de pouvoir pénétrer en subsurface et diffuser dans le volume du matériau comme schématisé ci-après (Figure 1).

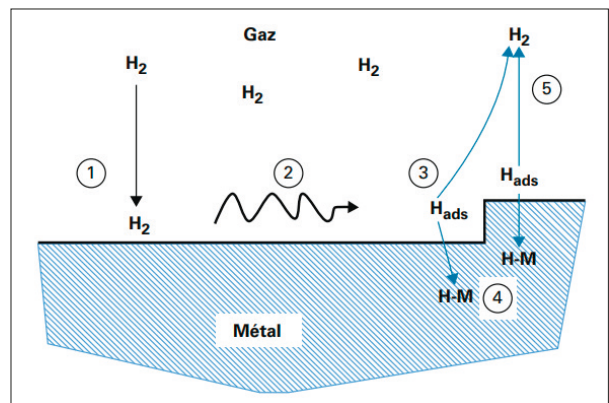


Figure 1 : Schéma des étapes de pénétration de H dans le métal (M178 -VI, Techniques de l'Ingénieur)

Une fois dans le matériau, l'hydrogène peut interagir avec les défauts microstructuraux du métal (dislocations, joints de grain, interfaces, lacunes, précipités, etc.) et ces interactions jouent un rôle fondamental dans les mécanismes de diffusion et de fragilisation. Ainsi des contraintes appliquées, même bien en deçà de la limite d'élasticité macroscopique, peuvent alors entraîner la fissuration et la rupture fragile catastrophique d'un matériau chargé en hydrogène, même à des concentrations de quelques ppm.

Il est important de souligner que l'endommagement causé par l'hydrogène affecte davantage les matériaux à faible solubilité en hydrogène tels que les métaux à structure cubique centrée (ex : acier au carbone). En outre, le degré de fragilisation par l'hydrogène (FPH) dépend, entre autres, de la résistance mécanique et de la microstructure du matériau ; les matériaux à haute résistance mécanique sont considérés plus sensibles à la FPH. Pour cette raison, les aciers ductiles ont été privilégiés dans des applications liées à l'hydrogène. Les aciers avec une faible teneur d'impuretés, comme le soufre et le phosphore, présentent une meilleure tenue vis-à-vis de la fragilisation par l'hydrogène. D'une manière générale, les préconisations métallurgiques suivantes sont attendues pour réduire les risques de FPH quels que soient les alliages considérés (AIGA) :

- Privilégier l'utilisation d'alliages à microstructures homogènes à grains fins ;
- Éviter les alliages excessivement durs ou à haute résistance mécanique ;
- Privilégier les aciers à propreté renforcée sans inclusions non métalliques qui réduisent la ténacité et la résistance à la fragilisation par l'hydrogène ;
- Utiliser des composants exempts de défauts superficiels et/ou internes importants.

Il est à noter que la sensibilité des matériaux métalliques à la fragilisation par l'hydrogène augmente avec l'élévation de la pression de l'hydrogène gazeux. En effet, une pression partielle d'hydrogène plus élevée accroît la concentration d'hydrogène dans les métaux. Comme indiqué ci-dessous (Figure 2), l'augmentation de la pression en hydrogène, ou la réduction de la vitesse de déformation, entraîne une diminution de l'allongement à la rupture pour les aciers L485 (grade X70), couramment utilisés dans les systèmes

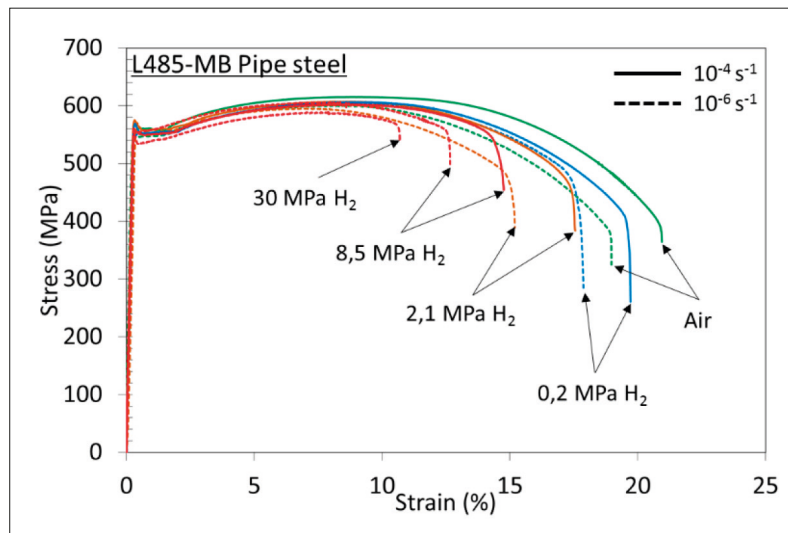


Figure 2 : Effet de l'hydrogène sur la résistance à la traction de l'acier X70 (L485) : effet de la pression et de la vitesse de déformation sur la courbe de traction (chargement gazeux) (Ez-Zaki, 2020)

de transport par pipeline. Outre la pression, d'autres facteurs externes influencent également la dégradation des propriétés mécaniques des matériaux par l'hydrogène, tels que la température, les impuretés du gaz, les sollicitations mécaniques et la vitesse de déformation. Ces facteurs contrôlent la quantité d'hydrogène pénétrant dans le matériau ainsi que la rapidité avec laquelle la dissolution et la distribution de l'hydrogène se produisent dans celui-ci. En outre, les procédés de mise en forme ou d'assemblage peuvent aussi jouer un rôle vis-à-vis de la sensibilité à la FPH, c'est notamment le cas des zones fortement écrouies (coudes) mais aussi des zones soudées.

Un autre facteur externe important à considérer est la température. En effet, pour une pression en hydrogène donnée, les propriétés mécaniques évoluent en fonction de la température, comme le montre la Figure 3. La réduction relative de section (RRA, pour Relative Reduction of Area) sert d'indicateur de la sensibilité à la FPH. Plus le RRA est faible, plus le matériau montre une sensibilité élevée à l'hydrogène. Les courbes en cloche indiquent une température à laquelle la dégradation atteint son maximum ; au-dessus et en dessous de cette température, la dégradation est réduite dans ces conditions de sollicitation. Ainsi, certains matériaux affichent une sensibilité maximale à l'hydrogène à température ambiante, tandis que d'autres, comme les aciers austénitiques inoxydables, présentent une sensibilité accrue dans une plage de température d'environ -80°C. Par ailleurs, ces travaux illustrent aussi l'influence des éléments d'alliage sur la sensibilité à la FPH.

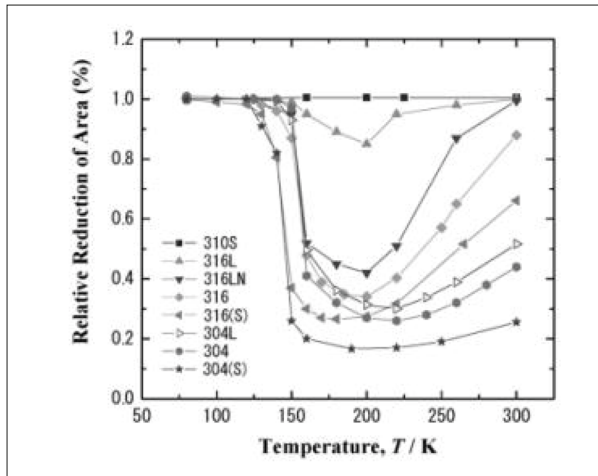


Figure 3 : Effet de la température sur la réduction d'air sur différents aciers inoxydables austénitiques sous 1,1 MPa d'hydrogène (Fukuyama, 2003)

Pour faire face au risque de FPH, il est primordial de choisir un matériau qui soit approprié aux conditions environnementales attendues, qui ne soit pas affecté de manière significative par l'hydrogène, comme c'est le cas pour les bouteilles de gaz. Pour la FPH liée à la présence d'hydrogène résiduel provenant des procédés de fabrication (par exemple, dans le cas de certaines pièces forgées), des traitements de dégazage (déshydrogénation) peuvent être utilisés pour diminuer la teneur en hydrogène des pièces. Une solution pour des composants métalliques en contact avec un environnement hydrogéné consiste à chercher à diminuer l'activité en hydrogène dans le matériau par une barrière constituée d'un matériau à bas coefficient de diffusion ou à faible solubilité en hydrogène (M175 - 1, Techniques de l'Ingénieur). Une telle barrière empêcherait (ou au moins réduirait de manière significative) la pénétration de l'hydrogène, suivie de sa diffusion dans le film/revêtement et plus loin dans le substrat. Des revêtements de Cu, Mo, Co, Ni, Pt-Ir, W peuvent constituer des barrières efficaces à la diffusion d'hydrogène (Figure 4).

Évaluation de la sensibilité à la FPH

Afin de caractériser la compatibilité des matériaux métalliques avec l'hydrogène, il convient notamment d'être en mesure de caractériser le coefficient de diffusion, la solubilité et la perméabilité de l'hydrogène. Plusieurs techniques expérimentales sont disponibles, les plus courantes étant la perméation électrochimique et la perméation gazeuse. Cependant, pour évaluer et caractériser un matériau métallique en ce qui concerne la fragilisation par l'hydrogène dans un environnement spécifique, il est nécessaire de réaliser des essais mécaniques.

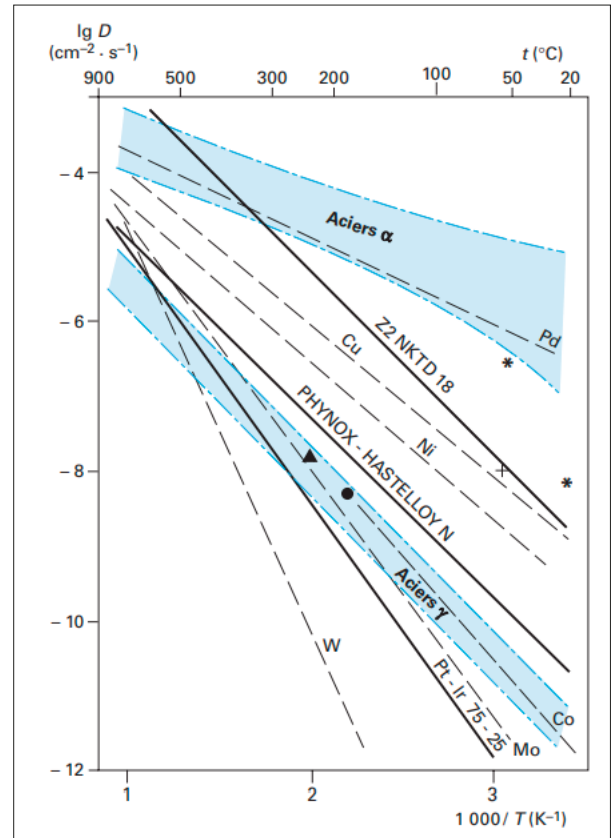


Figure 4 : Évolution du coefficient de diffusion de l'hydrogène dans différents métaux et alliages industriels en fonction de la température (M175 - 1, Techniques de l'Ingénieur)

Différentes méthodologies d'essais ont été développées pour évaluer la fragilisation par l'hydrogène. La caractérisation *in-situ* consiste à exposer simultanément le matériau à une sollicitation mécanique et à l'hydrogène. Ce mode de caractérisation s'oppose à la stratégie *ex-situ*, qui expose d'abord le matériau à l'environnement pour le « charger » en hydrogène, avant de lui appliquer une sollicitation mécanique. Le choix entre ces deux stratégies dépend de l'usage visé, bien qu'il soit souvent pertinent, dans les premières étapes d'évaluation de la sensibilité à l'hydrogène, de privilégier une stratégie *ex-situ*, moins coûteuse. A noter toutefois que tous les matériaux métalliques ne sont pas compatibles avec l'utilisation d'une stratégie de caractérisation *ex-situ* et qu'il est pertinent de limiter cette approche aux matériaux présentant une faible diffusivité de l'hydrogène à température d'essai (M178 - V1, Techniques de l'Ingénieur) (Gangloff, 2012). D'autres part, il existe de nombreuses normes traitant de la compatibilité des matériaux à la fragilisation hydrogène. Leurs domaines d'application varient en fonction du domaine de fonctionnement ou de la famille de composants concernée.

Parmi elles, la norme (ASME B31.12, 2019) se distingue en fournissant des directives spécifiques pour les structures gazeuses, avec un accent particulier sur les recommandations concernant la résilience des matériaux. La norme (SAE J2579) établit des exigences pour la conception, la construction, le fonctionnement et la maintenance des systèmes de stockage et de manipulation d'hydrogène dans les véhicules routiers, avec des protocoles de test complémentaires pour la qualification des produits. En ce qui concerne la réalisation d'essais mécaniques sous pression d'hydrogène, des normes telles que l' (ASME B31.12, 2019) ou l' (ANSI/CSA CHMC-1, 2014) définissent des règles à suivre. Ces normes constituent des références pertinentes pour les professionnels de l'industrie cherchant à garantir la sécurité et la fiabilité des installations dans des environnements sujets à la fragilisation par l'hydrogène.

Références

AIGA. (s.d.). *Hydrogen Pipeline Systems*. Singapore: Asia Industrial Gases Association.

ANSI/CSA CHMC-1. (2014). Test methods for evaluating material compatibility in compressed hydrogen applications - Metals. *CSA Group*. CSA Group.

ASME B31.12. (2019). *Hydrogen Piping and Pipelines*, ASME Code for Pressure Piping. *American National Standard*. New York: American National Standard.

Ez-Zaki, H. (2020). Effect of hydrogen content in natural gas blend on the mechanical properties of a L485 MB low alloyed steel. *PVP2020-21228*. Minneapolis, Minnesota, USA: ASME.

Fukuyama, S. (2003). Effect of Temperature on Hydrogen Environment Embrittlement of Type 316 Series Austenitic Stainless Steels at Low Temperatures. *J. Japan Inst. Metals*.

Gangloff, R. P. (2012). *Gaseous Hydrogen Embrittlement of materials in energy technologies*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.

M175 - 1, Techniques de l'Ingénieur. (s.d.). *Fragilisation des aciers par l'hydrogène : étude et prévention*. Techniques de l'Ingénieur.

M178 - V1, Techniques de l'Ingénieur. (s.d.). *Comportement mécanique des alliages métalliques pour le stockage et le transport de l'hydrogène gazeux*. Techniques de l'Ingénieur.

NACE TM0284. (2003). Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels.



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

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

www.ficep-france.fr



Charlotte MOUGEOT
Responsable
Environnement,
Hygiène et Sécurité
Fédération Forge
Fonderie

L'évolution de la sortie du statut de déchet, un parcours vers l'économie circulaire.

La loi Industrie Verte de 2023 a modifié la législation sur la sortie du statut de déchet, reflétant la volonté politique d'accélérer la transition vers une économie circulaire en France. Cette loi permet désormais l'utilisation de déchets comme matières premières, y compris certains déchets dangereux sous conditions spécifiques. L'Art. L541-4-3 du Code de l'environnement, créé en 2010, a été révisé pour clarifier la procédure correspondante dite « de sortie du statut de déchet », tout en préservant un haut niveau de protection environnementale et sanitaire.

Avant 2010, les cas de sortie de statut de déchet étaient rares puisqu'ils devaient forcément être encadrés par un arrêté ministériel ou un règlement européen spécifiques. En l'occurrence, il existe 9 arrêtés ministériels français dont aucun ne concerne les sous-produits de nos secteurs d'activités. Seul au niveau européen, [le règlement n°333/2011](#) concerne la Forge et la Fonderie, puisqu'il permet à certains débris métalliques de ne plus être un déchet sous certaines conditions.

À cette période, la procédure de sortie de statut de déchet identifiait une catégorie spécifique de déchet (qui cessait de l'être par conformité aux critères de la réglementation en question) et était par conséquent destinée à être mise en œuvre à l'échelle nationale ou européenne.

Des tentatives ont été menés pour faire sortir d'autres déchets de leur statuts, portées par les syndicats professionnels ou les entreprises, mais ces dossiers très lourds n'ont pas pu aboutir devant l'impossibilité de trouver un cadre général applicable à tant de situations différentes et de déchets hétérogènes.

C'est à partir de 2010 avec la création de l'article L541-4-3, que les fondements de la procédure actuelle de sortie du

statut de déchet ont été établis dans le code de l'environnement. Au fur et à mesure des modifications apportées à cet article, la procédure de sortie de statut déchet s'est individualisée en passant d'un cadre général impossible à atteindre à un cadre particulier beaucoup plus accessible au détenteur des déchets lui-même.

VERSION INITIALE de 2010 à 2020

Dans sa version initiale de [l'Art. L.541-4-3](#) du code de l'environnement établie en 2010, et restée en vigueur jusqu'en 2020, la législation encadrant la sortie du statut de déchet reposait sur trois conditions.

Premièrement les opérations de valorisation devaient être réalisées exclusivement au sein d'Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE).

Deuxièmement les opérations devaient viser la réutilisation.

Enfin, troisièmement, ces opérations devaient répondre à quatre critères détaillés au I. de l'Art. L.541-4-3 : a) utilisation à des fins spécifiques b) existence d'un marché et d'une demande c) respect d'exigences techniques et de normes produits d) absence d'effet néfaste sur la santé humaine et l'environnement.

Cette version de l'Art. L.541-4-3 n'apportait pas un cadre pertinent pour faire aboutir favorablement les demandes de sortie de statut déchet. En effet, les valorisations de déchet n'étaient permises qu'au sein des installations ICPE alors que le rôle des Directions Régionales de l'Environnement, l'Aménagement et le Logement (DREAL) dans cette procédure n'était que partiellement défini.

VERSION EN VIGUEUR ETRE 2020 et 2023

La [deuxième mouture](#) de la législation, restée en vigueur entre 2020 et 2023, est marquée par la suppression de l'obligation de réaliser les opérations forcément au sein des ICPE. Ainsi le législateur a ouvert la voie de ce processus à un plus grand nombre d'installations. Le terme « *d'exploitant d'une ICPE* » est remplacé par celui de « *détenteur ou producteur de déchet* ».

En contrepartie, cette ouverture s'est accompagnée d'un renforcement du contrôle par les DREAL. Alors que jusque-là le rôle des DREAL se cantonnait à fixer des teneurs limites à respecter contre les effets nocifs pour la santé et l'environnement, leur champ d'action s'est élargi pour englober l'appréciation des quatre critères cités ci-avant (au I. de l'Art. L.541-4-3), lesquels sont d'ailleurs restés inchangés au fil des modifications de l'article.

Pour le respect de ces critères, il était aussi introduit la possibilité de prévoir des contrôles par un tiers, devant être accrédité dans le cas de déchets dangereux.

C'est aussi l'occasion d'introduire pour la première fois une définition plus précise de la sortie du statut déchet dans le code de l'environnement :

« II. Les objets ou composants d'objets qui sont devenus des déchets et qui font l'objet d'une opération de préparation en vue de la réutilisation pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus, sont réputés remplir l'ensemble des conditions mentionnées au I du présent article, dès lors qu'ils respectent la législation et les normes applicables aux produits. Ils cessent alors d'être des déchets à l'issue de l'opération de préparation en vue d'une réutilisation. »

Dans cette version du texte, le législateur précise néanmoins aussi le fait que, si les produits qui n'ont plus le statut déchet ne sont plus soumis à la législation sur les déchets, ils devront toutefois respecter les exigences fixées pour les produits, celles fixées par le droit européen pour les produits et les substances dangereuses et chimiques (REACH, CLP notamment).

Malgré ces modifications, le cadre réglementaire n'était donc pas encore suffisamment opérationnel puisqu'il ne précisait ni les responsabilités du détenteur du déchet ni celles de la DREAL. Dans la pratique, cette seule définition de la sortie du statut déchet, bien que constituant déjà une avancée majeure, s'est ainsi également révélée insuffisante.

VERSION 2023, ACTUELLEMENT EN VIGUEUR

C'est pourquoi dans le cadre de la Loi Industrie Verte en 2023, une nouvelle version de l'Art. [L541-4-3](#) est entrée en vigueur. Ce nouveau texte est venu ajouter le paragraphe ci-dessous afin de compléter la précédente définition ; un paragraphe qui précise le rôle du détenteur du déchet et celui des autorités, ainsi que les éléments devant être soumis à examen. Grâce à ces précisions, une approche sur mesure est désormais possible.

Le texte dispose désormais :

« Une substance ou un objet élaboré dans une installation de production qui utilise pour tout ou partie des déchets comme matières premières n'a pas le statut déchet si cette substance ou cet objet est similaire à la substance ou à l'objet qui aurait été produit sans avoir recours à des déchets, sous réserve que l'exploitant de l'installation respecte les conditions mentionnées au I.

L'exploitant de l'installation de production mentionné au I ter transmet à l'autorité administrative compétente les éléments de justification nécessaires, notamment les essais réalisés lorsque l'exploitant utilise comme matières premières des déchets susceptibles d'être dangereux. »

C'est ainsi que le législateur inscrit pour la première fois dans le code de l'environnement ; que des déchets, y compris de façon inédite des déchets dangereux, peuvent d'être utilisés en tant que « *matières premières* » dans les installations de production, faisant de cette procédure un outil pour tendre vers une économie circulaire et répondre au contexte de raréfaction des matières premières vierges.

Pour l'heure, il reste encore des incertitudes quant au gain financier qu'il serait possible de réaliser à l'issue des opérations pour le détenteur des déchets, si l'on considère notamment la charge de la réalisation d'un dossier et les prix à payer, très élevés, pour la reprise du déchet par les sites pouvant les recevoir en tant que matières premières.

En effet, jusqu'à présent, ce sont les détenteurs des déchets qui payent pour leur valorisation. Les sites ayant la possibilité de les accueillir en tant que matières premières, qui étaient encore trop peu nombreux sur le marché jusqu'à présent, donnent le « la » sur ce marché et appliquent des tarifs de prise en charge des déchets souvent même plus élevés que le prix d'achat de matières neuves. Ils profitent ainsi du fait que les détenteurs de déchets sont tenus de les valoriser en vertu des réglementations tels que les MTD des BREFS ou d'incitation financières comme la TGAP, en forte hausse pour les enfouissements des déchets.

Est-ce que cette 3^e modification du code de l'environnement, réhaussant le statut de déchet à celui d'une matière première permettra d'inverser les mécanismes actuels du marché des déchets, notamment par la multiplication des sites ayant la possibilité de les utiliser en tant que matières premières ? Impossible de répondre encore mais à l'heure actuelle, quelques adhérents ont initié des demandes en ce sens et la Fédération s'attache à les suivre, notamment dans la levée des points bloquants.



Enfin pour ceux qui souhaiteraient initier des demandes de sortie de statut déchet, voici quelques précisions techniques relatives aux éléments qu'un dossier à destination de vos DREAL devrait comporter en ce sens :

Il s'agit d'un dossier réalisé à partir du [CERFA 14831-03](#) comprenant les pièces jointes suivantes :

- Une présentation détaillée du type d'installation qui est susceptible d'être concernée par la sortie du statut de déchet.
- Une description complète des déchets entrant dans l'opération de valorisation, comprenant notamment leur origine, leur mode de collecte, les propriétés de danger qui leur sont associées ainsi qu'une caractérisation complète.
- Une description complète et détaillée de l'opération de valorisation.
- Les informations détaillées qui permettent d'établir que les déchets issus de l'opération de valorisation respectent les conditions de l'article L. 541-4-3 du code de l'environnement
- Des critères de sortie du statut de déchet proposés par le demandeur permettant de respecter les conditions énoncées à l'article L. 541-4-3 du code de l'environnement et leurs justifications.
- Une proposition de modèle et de contenu d'attestation de conformité, mentionnée à l'article D. 541-12-13 du code de l'environnement.
- Une description détaillée de la proposition de système de gestion de la qualité mentionnée à l'article D. 541-12-14 du code de l'environnement.
- Un résumé non confidentiel du dossier qui sera diffusé.
- Une description du contrôle par un tiers pour les demandes relatives aux déchets dangereux, terres excavées et sédiments.

Remise des diplômes fonderie au Lycée Hector Guimard à Lyon



Ce samedi 7 décembre, le Lycée polyvalent Hector Guimard de Lyon a été le théâtre d'une journée dédiée à la transmission des savoir-faire de la fonderie. Organisée en collaboration avec l'Association Technique de Fonderie (ATF) et l'Association des Anciens Elèves de l'École Supérieure de Fonderie et de Forge (AAESFF). Cette matinée a permis aux participants de découvrir et de s'initier aux techniques traditionnelles du moulage sable.

Dans une ambiance conviviale, petits et grands ont eu l'opportunité de mettre les mains dans le sable, découvrant ces gestes professionnels méconnus. Au terme de cet atelier, les participants sont repartis avec leurs créations, souvenirs de leur immersion dans le monde de la fonderie.

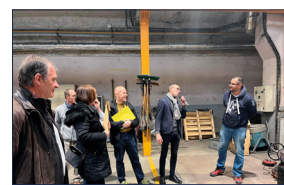
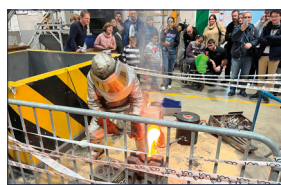
Cérémonie de remise des diplômes

L'événement s'est poursuivi avec la remise des diplômes aux étudiants des promotions 2023/2024 du BTS Fonderie et de la Licence Fonderie, formations proposées respectivement par le Lycée Hector Guimard et l'Université Lyon 1.



Ce moment a été marqué par les discours de Madame Carine ROUSSOT-OGOUNCHI, Proviseure du Lycée Hector Guimard, de Monsieur Olivier DEZELLUS, Responsable de la licence Fonderie de l'Université Lyon 1, de Monsieur Sergio DA ROCHA, Responsable Formation de la Fédération Forge Fonderie et de Monsieur Mourad TOUMI, Président de l'AAESFF.

Tous ont souligné l'importance de transmettre les savoir-faire et de former une nouvelle génération de professionnels, tout en rappelant l'engagement commun des établissements et de la Fédération Forge Fonderie pour soutenir et valoriser la filière fonderie.



Ensemble, forgeons l'avenir de la profession !

La Fédération tient à remercier chaleureusement l'ensemble des intervenants, étudiants, enseignants et partenaires qui ont contribué au succès de cet événement. Cette journée est un bel exemple de collaboration entre les acteurs de la formation et de l'industrie, unissant leurs forces pour préserver et transmettre nos savoir-faire industriels d'excellences.

Sergio DA ROCHA



Besoin d'un spécialiste en conception et production de produits de fonderie et de forge ?

Et si votre futur EXPERT faisait déjà partie de votre entreprise ?

Préparation au certificat d'expert en conception et production de produits de fonderie et de forge

Déroulement de la formation

L'année de spécialisation comprend un programme académique de 772 h de formation à l'ESFF (8 mois), placé en amont d'un stage en entreprise de 4 mois (voir le planning général). Le but de cette filière est d'offrir une formation ciblée sur la conception et la réalisation de pièces moulées et forgées. Les enseignements relevant du domaine de la science des matériaux et de celui du génie des procédés sont très présents dans cette filière. Une part significative du volume horaire de cette formation a cependant été consacrée à la gestion d'entreprise et au management. Un projet d'étude, mené en collaboration avec un industriel pendant la période à l'école, permet aux étudiants d'appliquer leurs connaissances théoriques à un problème concret émanant de l'entreprise. Ils participent aux séminaires fonderie et forge organisés pour les élèves de deuxième année de la filière initiale par apprentissage.

Étudiants concernés

- Jeunes ingénieurs diplômés, titulaires d'un master 2 ou d'un diplôme BAC+5 à dominante mécanique ou matériaux
- Les candidats devront justifier d'une formation équivalente à 300 ECTS

Conditions d'admission

Sur titre et entretien. L'admission à l'ESFF suppose des connaissances de base dans les domaines de la métallurgie, de la mécanique et du dessin industriel. Une bonne maîtrise du français est nécessaire pour les ingénieurs étrangers.

Parrainage industriel

Les salariés peuvent bénéficier d'un parrainage de leur entreprise. Ce parrainage peut comprendre :

- La prise en charge des droits de scolarité
- Une proposition d'évolution à la sortie de l'école
- En contrepartie, une période d'engagement vis à vis de l'entreprise qui a assuré le parrainage.

Les élèves ingénieurs de l'année de spécialisation, parrainés ou non, possèdent un statut étudiant.

Droits de scolarité

- 10000 € pour les entreprises

... et l'ESFF c'est aussi de la formation continue !

Déroulement de la formation

La formation continue a pour rôle essentiel de promouvoir au titre d'ingénieur et à des fonctions de haut niveau des salariés volontaires et particulièrement motivés. La formation s'articule en deux cycles : un cycle préparatoire (un an) et un cycle terminal (2 ans).



Le cycle préparatoire est une année de suivi des cours avec les élèves de première année. Le salarié doit réaliser l'ensemble des examens et à l'issue, un jury décide du passage en cycle terminal. Les élèves intègrent alors la deuxième année de la filière initiale par apprentissage. Leur formation à l'école est totalement identique à celle des élèves apprentis de cette filière, pour la deuxième année comme pour la troisième année.

Cependant, en ce qui concerne les périodes en entreprise, les élèves de formation continue préparent dès la première période un travail de recherche qu'ils poursuivront sur les deux autres périodes, de telle sorte à présenter en fin du cycle terminal un véritable mémoire d'ingénieur.

Les élèves de formation continue participent aux voyages d'études organisés pour la filière initiale par apprentissage.

Personnes concernées

Salariés depuis 1 an au minimum d'une entreprise de fonderie, de forge ou plus largement relevant des industries de la métallurgie, et titulaires d'un diplôme bac+2 ou bac+3 à caractère scientifique ou technologique (BTS, DUT...).

Conditions d'admission

Sur titre et entretien. L'admission définitive ne peut être prononcée sans la présentation d'une lettre de soutien du candidat par son entreprise pour la formation envisagée.

Droits de scolarité

- 4500 € pour le cycle préparatoire
- 24000 € pour le cycle terminal (2 ans)

Comment s'inscrire ?


Pour plus de détails : contact@esff.fr

JANVIER 25

21 **FÉDÉRATION FORGE FONDERIE** 
Commission EHS
 Courbevoie
 Réservé adhérents FFF
 Pour plus d'informations :
c.mougeot@forgefonderie.org

28 au 30 **SEPEM INDUSTRIES NORD**
 Douai (France)
douai.sepem-industries.com/fr
 Salon des services, équipements, process et maintenance pour les industries du Nord de la France

29 **LES LUBRIFIANTS EN MÉCANIQUE FACE À DES DÉFIS ÉCONOMIQUES ET ÉCOLOGIQUES**
Journées techniques
Organisé par CETIM
Bilan du PTT contacts lubrifiés
 CETIM Senlis
<https://www.cetim.fr/agenda/les-lubrifiants-en-mecanique-face-a-des-defis-economiques-et-ecologiques/>
 Une journée technique au programme riche alternant conférences, table ronde, visite des bancs d'essais et démonstrations, présentation des pièces obtenues pendant le projet et échanges entre industriels et experts.

29 **Working Group X.0** 
 Union Des Forgerons (91)
 Réservé adhérents FFF
 Pour plus d'informations :
o.vasseur@forgefonderie.org

FÉVRIER 25

04 **JOURNÉE DE CLÔTURE DU PSS TRAITEMENTS DE SURFACE ET ENVIRONNEMENT**
Organisé par Cetim
 Saint-Etienne
<https://lnkd.in/ePCu3ee7>
 En plus des conférences, des espaces de discussions sont organisés autour de la plateforme Quatrium et des exposants. Vous aurez également l'occasion de rencontrer les spécialistes du Cetim en rendez-vous individuel.

MARS 25

04 au 05 **H2 FORUM**
 Berlin
<https://www.h2-forum.eu/>
 Forum dédié à la filière Hydrogène. Les fournisseurs d'énergie, l'automobile, les entreprises industrielles et les instituts de R&D prennent contacts et discutent avec les fournisseurs de solutions H2: fabricants d'électrolyseurs, fournisseurs, service...

04 au 06 **JEC WORLD '2025**
 Paris Villepinte
jec-world.events
 Salon international des composites

11 au 14 **Global Industrie Lyon 2025** 
 Eurexpo Lyon
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

Venez nous voir au village forgefonderie
 Hall 6 Stand N° 6H92

11 au 14 **Subcontracting fair Z**
 Exhibition Centre Leipzig
www.zuliefermesse.de
 Salon de la sous-traitance - Pièces et composants

31 au 04 **HANNOVER MESSE**
 Hanovre (Allemagne)
<https://www.eventseye.com/fairs/f-hannover-messe-1184-0.html>
 Salon international des industries et des techniques. Démontrer la puissance d'innovation des entreprises de génie mécanique, électrique et informatique

AVRIL 25

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

JUIN 25

03 au 05 **SEPEM Industries Sud Est**
 Martigues, La Halle de Martigues
<https://martigues.sepem-industries.com/fr>
 Le Rendez-vous industriel de la région Sud-Est

03 au 05 **SUBCONTRATACIÓN 2025**
 Bilbao (Espagne)
<https://subcontratacion.bilbaoexhibitioncentre.com/>
 Salon international de la sous-traitance et de la coopération dans les affaires

03 au 05 **International Railway Summit 2025**
 13th International Railway Summit
 Vienne (Autriche)
www.irits.org
 Salon international de la sous-traitance et de la coopération dans les affaires

04 **SUBCON**
Salon international de la sous-traitance en fabrication
 Vienne (Autriche)
www.subconshow.co.uk
 Le salon Subcon est une foire professionnelle de premier plan pour l'approvisionnement industriel et l'externalisation, qui a lieu chaque année au NEC Birmingham en Grande-Bretagne.

JUIN 25

16 au
22

Salon International de l'Aéronautique et de l'Espace (SIAE)

Bourget
www.siae.fr/
Le Salon international de l'aéronautique et de l'espace de Paris-Le Bourget, plus connu sous le nom de Salon du Bourget, ou sous le sigle SIAE, est une des plus importantes manifestations internationales de présentation de matériels aéronautiques et spatiaux, se déroulant à l'aéroport du Bourget, au nord-est de Paris.



24 au
26

**SIFER 2025
14^e Salon International de l'Industrie Ferroviaire**

Lille Grand Palais
www.sifer-expo.com
Organisé tous les deux ans depuis 1999, SIFER est l'unique événement international dédié au ferroviaire en France, permettant aux fournisseurs et fabricants de rencontrer les plus grands acheteurs du marché.

SEPTEMBRE 25

24 au
26

SEPTEM Toulouse 2024

Toulouse MEETT
toulouse.sepem-industries.com/

OCTOBRE 25

07 au
09

Sepem Angers

ANGERS - Parc des expositions
angers.sepem-industries.com/fr
Le Rendez-vous industriel de la région Centre-Ouest

FORMATIONS

Cetim Academy Catalogue 2025 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.

Retrouvez nos chaînes de valeur Métallurgie :



Fonderie Ferreux




Fonderie Non-Ferreux



Fonderie Forge

N'hésitez pas à contacter
Laurent Parin,
Réfèrent Formations Forge Fonderie Laurent.parin@cetim.fr
Veuillez télécharger le catalogue
sur le site de la fédération
ou sur le site du CETIM
<https://www.cetim.fr/formation/Cetim-Academy>



OBJECTIF économies d'énergie!

ENTREPRISES INDUSTRIELLES,
VOICI **2 SOLUTIONS**
POUR PASSER **À L'ACTION!**

Conceptojob - Agence Bastille - Crédit photo : Cravetiger (Gettyimages)

PROREFEI

LE dispositif de formation
des référents énergie
dans l'industrie.

→ Subvention possible jusqu'à **80 %**

www.prorefei.org



LA prime pour mettre en place
la norme ISO-50001
dans votre entreprise.

→ Jusqu'à **40 000 €**

www.pro-smen.org



FOSECO



www.foseco.com



Foseco vous souhaite
un *joyeux Noël* et un
excellent début d'année
2025 !



VESUVIUS

A VESUVIUS GROUP COMPANY

