

LA REVUE **forge et fonderie**

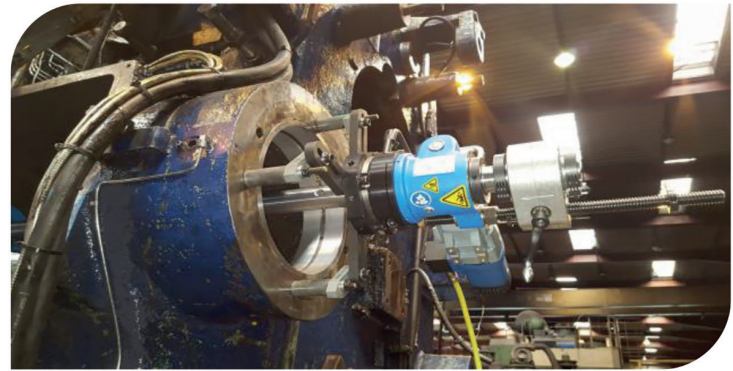
MARS | 2024

N°37

Au sommaire

- 4** Jumeaux numériques :
le projet JENII cherche à innover
dans la formation aux procédés de fabrication
- 12** Approche multi-échelles en métallurgie numérique
- 20** Panorama des études menées par le CETIM pour les
professionnels de la Fonderie

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



Solutions & Services pour l'Industrie



Actemium Maintenance Presses Clermont
Route de Courpière - 63920 PESCHADOIRES - France
Tél. +33 (0)4 73 80 17 68 - Fax. +33 (0)4 73 80 52 14
ampcf@actemium.com
www.actemium.fr

A.R.E.F.

EDITORIAL

- 03** Un retour du refoulé : la décarbonation ou lorsque l'inconciliable des impératifs remonte à la surface, comme une évidence
Wilfrid Boyault

TECHNIQUE

- 04** Jumeaux numériques :
le projet JENII cherche à innover dans la formation
aux procédés de fabrication
Cyrille Baudouin, David Uribe, Sylvain Fleury
- 12** Approche multi-échelles en métallurgie numérique
Patrick Hairy, Michel Stucky

- 20** Panorama des études menées par le CETIM
pour les professionnels de la Fonderie
Clotilde Macke-Bart

FORMATION

- 24** Initiation au moulage sable et remise des diplômes
au Lycée Hector Guimard à Lyon
Sergio Da Rocha
- 26** Retour sur l'enquête annuelle sur les effectifs en formation
Forge et Fonderie
Sergio Da Rocha

AGENDA

- 28** Les rendez-vous de la profession
et les formations du CETIM-Academy



**La revue complète
gratuitement à télécharger
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 Graphic
Imprimé sur papier recyclé et encres
100 % végétales

Photo de couverture
Dominique Sarraute



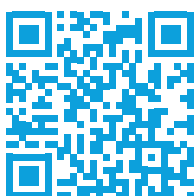
[linkedin.com/company/foseco](https://www.linkedin.com/company/foseco)



L'avenir de l'industrie passe par l'innovation.

Dans un monde en mutation, vous avez besoin d'un partenaire qui soit à l'aise lorsque les règles changent. Un partenaire qui est toujours à l'affût des défis de demain et qui s'assure que les solutions soient prêtes aujourd'hui. C'est nous. Nous sommes Foseco.

**Think beyond.
Shape the future.**



Découvrez notre
innovation „Busettes
VAPEX Fosflow”



VESUVIUS

A VESUVIUS GROUP COMPANY

Un retour du refoulé : la décarbonation ou lorsque l'inconciliable des impératifs remonte à la surface, comme une évidence

Il faut décarboner, c'est entendu.

Une évidence. Oui. Maintenant.

Parce qu'entendu, à en saturer les ondes, les images, les écrits, les événements... au cours d'un long chemin de sensibilisation qui se poursuit encore¹.

Mais évidence aussi parce que la nécessité s'en voit maintenant presque chaque jour dans le Réel : inondations, tempêtes, sécheresses, incendies...

Alors oui, il faut décarboner, c'est une évidence.

Mais ce qui l'est aussi c'est qu'aujourd'hui est le moment d'une autre dimension : l'incrémental n'y suffit plus ou n'y suffira très vite plus.

Parce que le dérèglement climatique s'emballe, parce que les pistes pour décarboner à faible coût d'investissement s'épuisent, nous arrivons au bout de cette première logique.

Il faut aller plus loin, plus fort, on est face à la nécessité d'un saut, pour lequel toutes les astuces et les guides ne suffisent plus.

Et, qu'on l'appelle de ses vœux ou qu'on le déplore, pour y aller vraiment, maintenant, force est en tout cas de constater que ce que la décarbonation requiert ce sont inévitablement deux choses : d'une part, des normes qui prescrivent, mais aussi qui autorisent, et, d'autre part, de l'argent pour financer les investissements lourds sans lesquels elle n'ira pas au-delà d'améliorations.

Et c'est alors que des inconciliables remontent à la surface...

D'abord, comment, en effet, admettre, serait-ce contraint et forcé par le Réel du dérèglement climatique mais, même comme cela, néanmoins admettre, que l'ampleur et l'urgence supposent maintenant un mouvement général et profond de décarbonation, sans admettre du même coup que des normes, pour être plus exact du droit², c'est-à-dire des textes (lois, décrets, arrêtés ...) ayant force obligatoire, doivent prescrire d'y aller, en poser les conditions³, mais aussi ouvrir le champ de nouveaux possibles en les autorisant⁴ ?

Et pourtant force est de constater que les dernières semaines ont vu flamber, reflamber, avec plus ou moins de bien fondé et de bonne foi, selon les cas, des appels solennels et martiaux à la réduction drastique des « normes », excessives en nombre, en détails.

Alors oui, certes, très certainement, on peut moins faire, on peut mieux faire, sous cet angle ... mais faire de la décarbonation une réalité ne passera pas sans l'édiction et l'application de règles de droit. On a pu, on peut, vouloir, tenter de, le refouler, un temps. Mais l'inconciliable de l'objectif climatique et d'une demande déraisonnable de dérégulation n'en sera pas moins, finalement, évident.

Inconciliables ensuite, et surtout, le saut quantitatif nécessaire vers une décarbonation fondamentale, pour sauver ce qui peut encore l'être, et donc les très lourds investissements que cela implique ... et les immenses contraintes économiques qui finalement réapparaissent au premier plan.

Un retour du refoulé qui, pour partie, ressemble aussi, beaucoup, à un retour de boomerang.

Parce que, oui, le « quoi qu'il en coûte » inauguré il y a 4 ans, au cœur d'un confinement qui a tout sidéré, n'était rien moins qu'un trompe-l'œil, provisoire, forcément provisoire, dont aucun refoulement ne pouvait espérer venir définitivement à bout.

Et le résultat est maintenant là, à ciel ouvert : fin du bouclier tarifaire sur l'énergie, c'est-à-dire fin (maquillée mais réelle) des aides sur le prix ou le paiement des factures d'énergie, augmentation substantielle de taxes sur l'énergie, mais aussi réduction drastique des aides possibles au financement des investissements et, plus généralement, plans et annonces de plans de coupes dans les dépenses publiques (à coups de 10, 20, 50 milliards ...).

Alors, peut-être, il pourrait ne pas être illégitime de se féliciter de ce retour vers l'orthodoxie⁵ ... si les industriels sur lesquels pèse essentiellement le poids de la décarbonation n'étaient aussi ceux dont le métier est hautement capitalistique, les marges et donc les capacités d'autofinancement le plus souvent modestes et (donc) le crédit bancaire pas des plus assurés.

Parce que, dans ces conditions, oui, l'évidence c'est l'inconciliable, d'une part, des besoins financiers de la décarbonation, d'autre part, de la quasi fin du soutien public pour accompagner un tissu industriel qui, pour l'essentiel, ne saurait y faire face seul.

Et s'il fallait encore se convaincre un peu plus de cet inconciliable, aujourd'hui absolument patent, entre l'impératif de décarbonation et les conditions économiques des industries, spécialement de fonderie et de forge, on rappellera ici aussi ce qu'il en est de ce qui est la clé d'une réelle décarbonation, outre les investissements dans des éléments de process qu'elle alimenterait, à savoir une électricité décarbonée.

Parce que là encore, comment concilier le besoin en masse d'une électricité décarbonée que suppose la décarbonation avec un coût de l'électron nucléaire tout à fait incertain à ce stade et ce, dès 2026⁶, puisqu'à ce jour, rien ne garantit même qu'un système, quel qu'il soit, viendra assurer la régulation de ce prix à un niveau raisonnable pour nos industries si elles s'engagent sur la voie de la décarbonation⁷ ?

Et quelles certitudes avoir sur la disponibilité même d'une telle énergie alors que les délais, coûts, sans parler des choix technologiques à valider, du « nouveau nucléaire » sont questionnés, repoussés et revus chaque semaine ? Quelle conciliation possible avec le choix que doivent opérer très vite les industries pour décarboner comme elles y sont « invitées » ?

Il n'est plus temps de refouler ces inconciliables. Il faut s'y attaquer. Et pour ce faire pas d'autres solutions que de regarder en face les solutions permettant de leur restituer la souplesse sans laquelle la catastrophe écologique et économique est certaine : aménager raisonnablement le pas de la décarbonation et son impérativité, d'une part, ne pas fuir en avant dans un rigorisme forcené des dépenses publiques et un jeu non régulé du marché de l'électricité, d'autre part. Il en est encore temps.

Et pour notre part, parce que chaque geste compte, nous vous rappelons que, pour limiter papier et routage, votre revue est désormais en accès libre sur le [site Internet de la Fédération Forge Fonderie \(www.forgefonderie.org/fr/la-federation/la-revue-forge-fonderie\)](http://www.forgefonderie.org/fr/la-federation/la-revue-forge-fonderie) et que, pour ne rien manquer et être informé immédiatement de sa parution, il vous suffit de nous laisser votre email à l'adresse suivante : revue@forgefonderie.org

Bonne lecture.

Wilfrid BOYAULT
Directeur général de la Fédération Forge Fonderie

¹ A titre d'exemple, Global Industrie 2024 voit aussi bien la Fédération Forge Fonderie axer sa participation autour de ce thème, et spécialement du [Guide de bonnes pratiques et de décarbonation en forge et fonderie publié à l'automne 2023](#) qu'elle a corédigé, que la FIM et le CETIM dévoiler leur guide de la décarbonation à l'usage des entreprises de la mécanique.

² Sans entrer ici dans l'intéressant débat suscité par l'opposition de ces deux termes posée par Michel Foucault

³ Poser des valeurs limite, taxer les émissions etc...

⁴ Quid des bornes de recharge dans certains environnements ou du stockage de l'hydrogène, par exemple ?

⁵ Budgétaire évidemment... il ne s'agit pas ici de Russie

⁶ Fin de l'ARENH le 31 décembre 2025

⁷ Des contrats pour différences (CFD) du début de l'automne, au supposé prix moyen de 70 € annoncé mi-novembre et aux dispositions incertaines d'un projet de loi dont on ne sait pas si elles seront maintenues ... à ce jour, rien ne garantit plus que les pouvoirs publics ne s'en remettront pas au simple jeu du marché et donc de la négociation, pour le plus grand avantage de celui qui détient le pouvoir dans ce cadre, savoir EDF ; et dès à présent, on note d'ailleurs des offres de contrats pour 2026 faites à des tarifs supérieurs de près de 40 % au CAL 26 à ce jour...



Cyrille BAUDOUIN,
Maitre de Conférences,
Arts et Métiers,
Campus de Metz,
Laboratoire de
Conception-
Fabrication-
Commande (LCFC)



David URIBE,
Doctorant, Arts et
Métiers, Campus de
Metz, Laboratoire
de Conception-
Fabrication-
Commande (LCFC)
sous contrat avec le
CETIM



Sylvain FLEURY,
Maitre de Conférences,
Arts et Métiers, Institut
de Laval, Laboratoire
Angevin de Mécanique,
Procédés et
innovAtion (LAMPA)

Jumeaux numériques : le projet JENII cherche à innover dans la formation aux procédés de fabrication

Introduction

À l'ère du numérique, les processus industriels bénéficient de plus en plus d'assistances technologiques, que ce soit en phase de conception avec des simulations avancées ou en cours de production grâce à des retours en temps réel provenant de capteurs. Dans ce contexte, le concept de jumeau numérique émerge comme une solution permettant de relier de manière intégrale le virtuel et le réel.

Il existe plusieurs définitions du jumeau numérique, allant du modèle de base (*un environnement physique et un environnement numérique avec un flux de données pour mettre à jour l'environnement numérique*) [1] à des modèles plus experts (*intégrant également une connexion permanente entre les deux environnements, des services de prédiction par des simulations ou des déductions via des outils d'IA* [2] *des interactions humaines ou des concepts de cycle de vie du produit*). Dans ce contexte, nous considérons qu'un jumeau numérique comprend cinq briques fondamentales (Figure 1) :

- 1) un environnement physique,
- 2) un environnement numérique immersif,
- 3) un système d'acquisition de données de capteurs pour mettre à jour l'environnement numérique,
- 4) des modèles avancés permettant de prédire le comportement futur de l'environnement réel,
- 5) Un flux de données des modèles avancés pour contrôler le système physique.

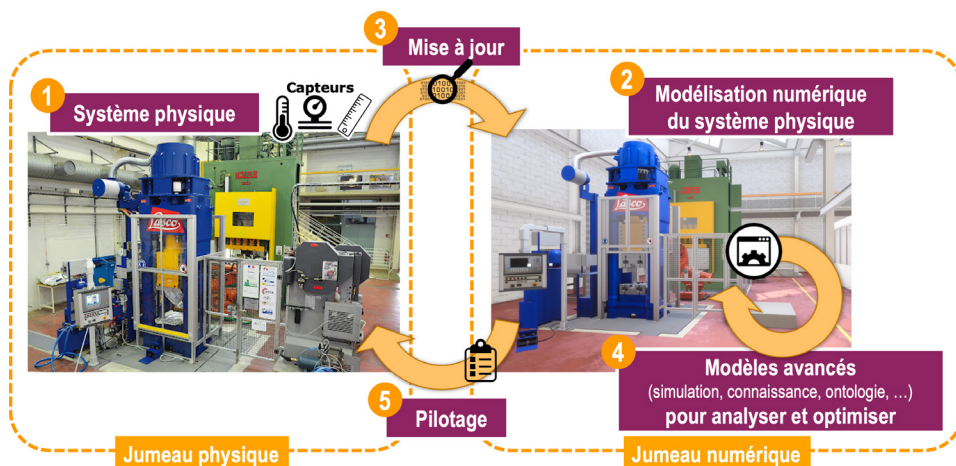


Figure 1 : Architecture d'un jumeau numérique pour la fabrication.

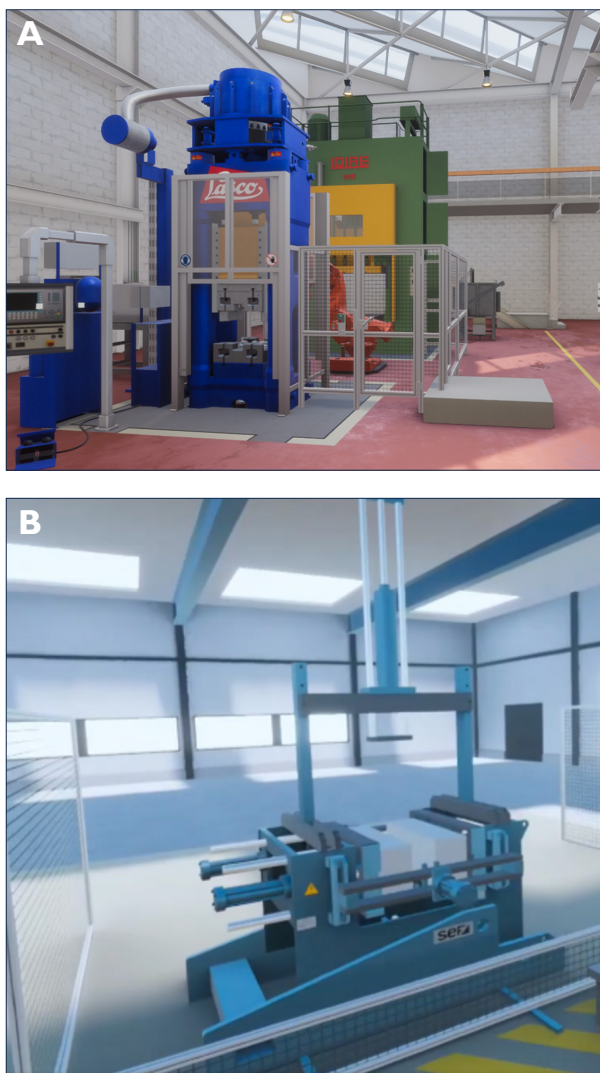


Figure 2 :
 a) Environnement RV de la plateforme VULCAIN (Arts et Métiers Metz),
 b) Environnement RV d'une coailleuse automatique (Arts et Métiers Angers)

Le concept de jumeau numérique offre une multitude d'applications et d'utilisations dans divers domaines. Tout d'abord, il permet de simuler et de tester des scénarios virtuels avant de les implémenter dans le monde réel. Cela peut être particulièrement utile dans le domaine de la conception et du prototypage, où les ingénieurs peuvent explorer différentes configurations et identifier les problèmes potentiels avant même de commencer la production physique. De plus, les jumeaux numériques sont largement utilisés dans la fabrication prédictive. En utilisant des modèles avancés alimentés par des données en temps réel, ils peuvent prédire les performances futures des équipements industriels, anticiper les pannes et optimiser les paramètres de fonctionnement pour améliorer l'efficacité opérationnelle.

Dans le contexte spécifique de la formation, les jumeaux numériques offrent des avantages significatifs. Ils permettent aux apprenants de s'immerger dans des environnements virtuels réalistes où ils peuvent acquérir des compétences pratiques sans risque pour leur sécurité ni pour les équipements réels. Cette approche est particulièrement précieuse dans les domaines nécessitant une manipulation d'équipement complexe ou dangereux, où les apprenants peuvent pratiquer et se familiariser avec les procédures avant de les mettre en œuvre dans des situations réelles.

Le projet JENII (Jumeaux d'Enseignement Numériques Immersifs et Interactifs), mené par l'ENSAM en collaboration avec le CESI, le CNAM et le CEA, et financé par l'ANR, vise à développer des jumeaux numériques pour la formation, particulièrement pour les procédés comme la forge et la fonderie (Figure 2), entre autres. JENII vise à révolutionner l'éducation, en créant une suite de jumeaux numériques pour des cas d'applications d'ingénierie. En intégrant des environnements virtuels avec des interactions en temps réel, ce projet offre aux apprenants une expérience d'apprentissage innovante qui complète les méthodes traditionnelles d'enseignement.

Dans cet article, nous aborderons trois aspects clés du développement des jumeaux numériques dans le domaine spécifique du forgeage, en mettant l'accent sur leurs applications dans la formation. Tout d'abord, nous explorerons les technologies utilisées pour créer des environnements virtuels immersifs (Brique 2). Ensuite, nous discuterons sur le développement des modèles de prédiction (Brique 4) qui assurent la réactivité des jumeaux numériques et leur intégration dans l'environnement virtuel. Enfin, nous examinerons différents exemples d'études pour la formation en forgeage mettant en évidence à la fois leurs avantages et leurs limites.

Création d'un environnement de réalité virtuelle (RV)

La création d'environnements RV numériques suit un processus classique. Tout d'abord, toutes les machines sont conçues à l'aide d'un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) (Figure 3b). Ensuite, les modèles sont intégrés dans Unity® où des textures provenant de photos de l'environnement réel sont appliquées pour obtenir un rendu réaliste (Figure 3c). Pour gérer les mobilités de corps rigides et les interactions entre les composants, la physique 3D intégrée à Unity® (Nvidia PhysX) et le moteur physique interactif XDE développé par le CEA-LIST, partenaire du projet, sont utilisés.

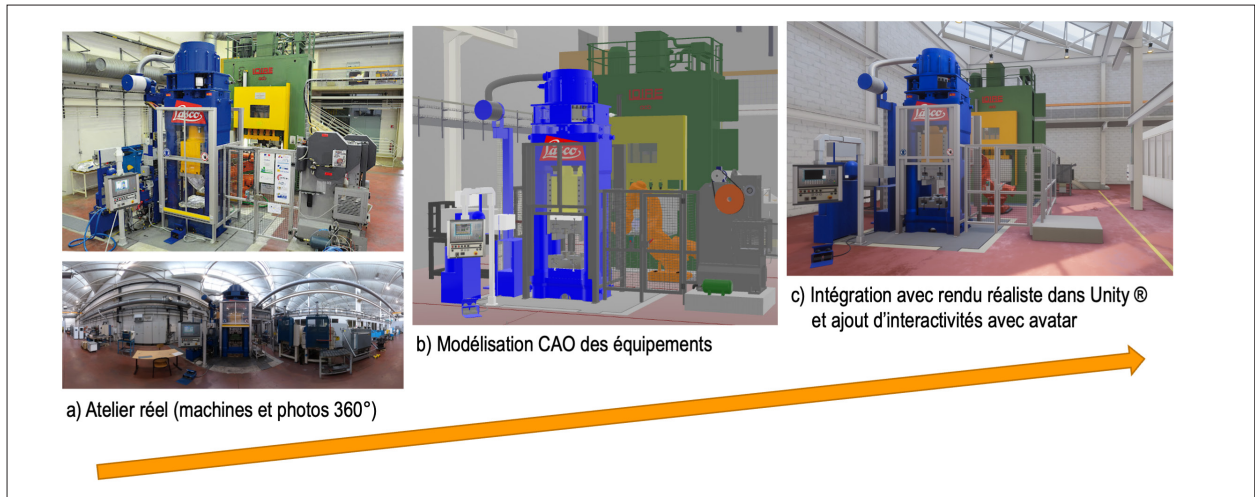


Figure 3 : Étapes de création d'un environnement de réalité virtuelle

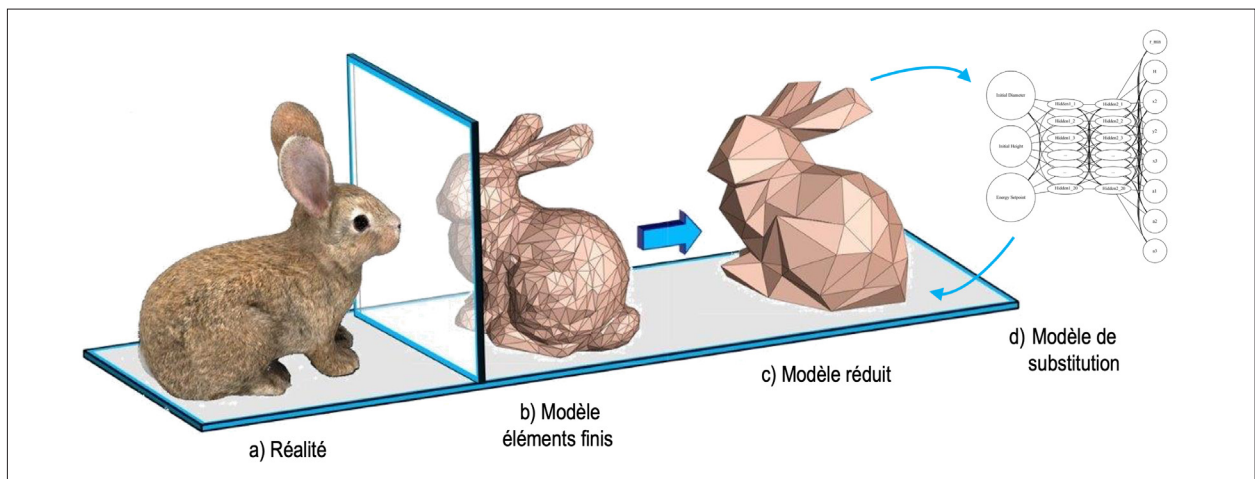


Figure 4 : Étapes de création d'un modèle de prédiction réactif pour un jumeau numérique (Exemple sur la représentation d'un lapin). Edité de [3].

Méthodologie de développement des modèles de prédiction

Un aspect essentiel pour le développement des jumeaux numériques réside dans la capacité à prédire avec précision le comportement des pièces réelles (Figure 4a). Les modèles de prédiction existants, comme les simulations numériques, offrent une vision détaillée du comportement des pièces forgées (Figure 4b). Toutefois, lorsqu'ils sont utilisés dans le cadre d'un jumeau numérique, ces modèles peuvent poser des défis en termes de réactivité, car les temps de calcul sont trop longs. Pour un appreni immergé dans un environnement virtuel, il est crucial d'avoir un retour immédiat sur ses actions afin de comprendre rapidement les conséquences de ses choix et de pouvoir ajuster son processus en conséquence. En l'absence de ce retour

en temps réel, l'engagement de l'appreni dans l'environnement virtuel est compromis, ce qui limite son apprentissage et son expérience pratique.

A ce point, les techniques de réduction de modèles interviennent. Elles permettent de simplifier les modèles complexes, tels que les simulations numériques, en conservant uniquement les variables essentielles pour la prédiction du comportement des pièces forgées. En réduisant la dimension du modèle, on obtient une représentation paramétrable simplifiée (Figure 4c), ce qui facilite l'obtention de résultats en temps réel. Dans le cas de la forge, des techniques comme les réseaux de neurones convolutifs (CNN *en anglais*) ou la Décomposition Orthogonale aux Valeurs Propres (POD *en anglais*) peuvent être utilisés pour réduire des champs internes (*température ou déformation par exemple*) dans les

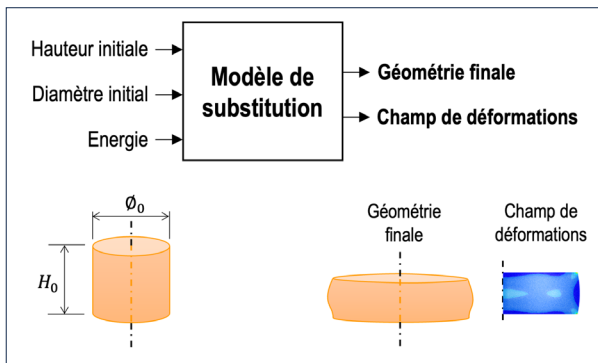


Figure 5 : Cas d'étude : compression uni-axiale d'un lopin avec prédiction de géométrie et du champ de déformation.

pièces. Cette dernière technique consiste à décrire la prédiction à l'aide d'une somme vectorielle à la manière d'une série de Fourier. En ne gardant que les premiers modes de la série, le résultat dépend des coefficients scalaires appliqués à chaque mode. Le nombre de modes conservés renseigne le niveau de détails de la représentation finale. Le calcul est linéaire, et donc instantané. En ce qui concerne la géométrie des pièces, des techniques comme l'analyse statistique des formes (SSA *en anglais*) ou les courbes de Bézier permettent de faire une paramétrisation de la géométrie. Des exemples d'application de ces techniques dans le cas de la forge peuvent être trouvés sur [4].

Une fois que le modèle a été réduit et paramétré, il est alors possible d'utiliser des modèles de substitution. Ces modèles sont construits pour être rapides et réactifs sur un domaine d'usage défini au préalable. Ils s'appuient sur des résultats de simulations numériques où les variables d'entrées sont tirées aléatoirement dans un intervalle donné, en veillant à respecter une densité homogène des tirages sur l'ensemble de l'hyper-espace mathématique créé par la base de ces variables d'entrées. Le modèle de substitution a pour objectif de reconstruire une surface réponse continue entre les entrées et les sorties à partir des informations issues de ces quelques tirages. Les réseaux de neurones artificiels (ANN) sont l'une des techniques les plus couramment utilisées pour élaborer ces modèles de substitution en raison de leur capacité à capturer des relations complexes entre les variables d'entrée et de sortie [5]–[7].

Pour intégrer les réseaux de neurones artificiels (ANN) dans l'environnement virtuel, différentes étapes sont nécessaires. Tout d'abord, le réseau de neurones, généralement construit à l'aide de bibliothèques de programmation telles que Keras® pour Python®, doit être converti dans un format compatible avec le moteur graphique utilisé. Dans notre cas, le modèle est converti au format ONNX® à l'aide

de l'outil tf2onnx®. Ce format ONNX® sert d'import pour Unity® Sentis [8], le moteur graphique utilisé dans l'environnement virtuel. Ensuite, le modèle est déployé à travers la création du moteur d'inférence (travailleur GPU), assurant ainsi son fonctionnement dans l'environnement virtuel. Une fois cette conversion et ce déploiement effectués, le modèle est prêt à être utilisé pour générer des prédictions en temps réel sur le comportement des pièces forgées.

Pour la visualisation de la géométrie, un maillage 3D triangulé est généré, et la position des sommets est dynamiquement mise à jour en fonction des prédictions du modèle. Pour la représentation des champs, une carte UV correspondante est assignée et des textures sont appliquées en fonction des prédictions du modèle.

Cas d'étude : Compression uni-axiale d'un lopin cylindrique

Dans cette étude, un lopin forgé est soumis à un refoulement sous presse à vis. Les paramètres d'entrée sont des valeurs scalaires représentant le diamètre initial, la hauteur initiale et l'énergie appliquée lors de la compression uni-axiale. En revanche, les sorties ne sont pas des valeurs scalaires, mais plutôt des données plus complexes. Elles comprennent la géométrie finale de la pièce, y compris le bombé résultant de la compression, ainsi que le champ de déformation généré par la force appliquée (Figure 5).

Pour simplifier ces sorties complexes, les techniques de réduction de modèle sont utilisées :

- La géométrie, en particulier le bombé dû à la compression, est réduite en utilisant les courbes de Bézier [4]. Avec un nombre de points de contrôle constant, quelle que soit la hauteur du lopin en cours de déformation, la géométrie du bombé peut être reconstruite avec un nombre réduit d'informations. La qualité de la description du bombé est déterminée par le nombre de points de contrôle choisi pour décrire la courbe de Bézier.
- Le champ de déformation est réduit à l'aide de la méthode de décomposition en modes propres (POD) [4]. L'image du champ dans une section du lopin est décrite par une matrice dont les coefficients représentent le niveau de déformation à reporter sur les pixels de l'image. La recherche des vecteurs propres sur l'ensemble des matrices générées par tirages aléatoires permet de décrire chaque image à partir d'une combinaison linéaire d'une même base vectorielle. Cette technique est utilisée dans le traitement d'images, notamment dans la compression numérique [9].

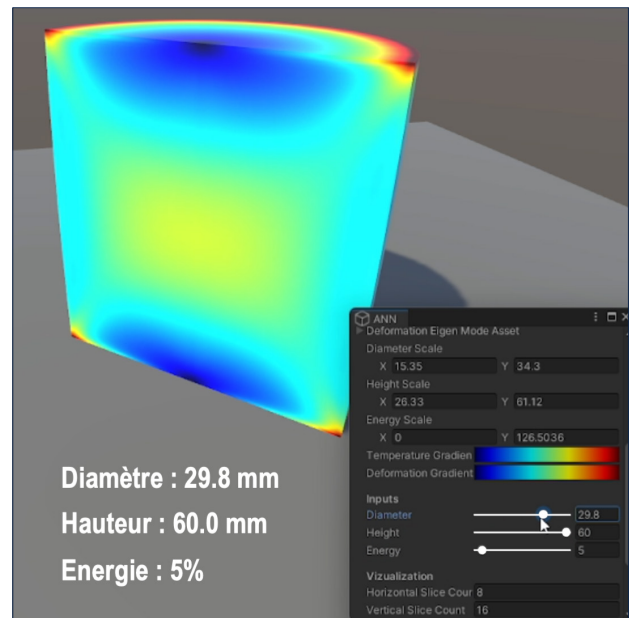
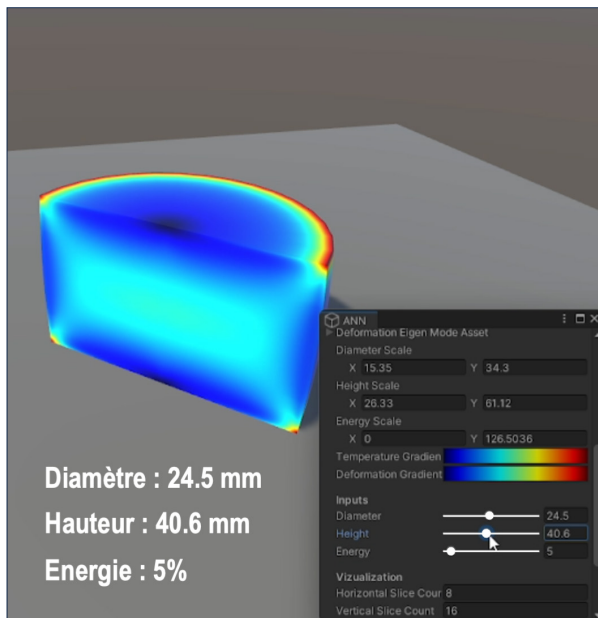


Figure 6 : Mise à jour en temps réel du champ de déformation lors de la modification des entrées par déplacement de curseurs.

Une base de données est générée à partir de simulations numériques par éléments finis, fournissant ainsi les informations pour décrire la géométrie et le champ pour chaque cas traité. Ces données servent ensuite à l'entraînement d'un modèle continu permettant une interpolation entre les cas étudiés. Un réseau de neurones perceptron multicouche est utilisé pour cela, afin de faire les liens entre paramètres d'entrées et grandeurs de sortie. Le modèle ainsi entraîné est ensuite validé à l'aide de résultats expérimentaux, garantissant sa précision et sa fiabilité. Enfin, une fois validé, le modèle est intégré dans l'environnement virtuel où il peut être utilisé pour générer des prédictions en temps réel sur le comportement des pièces forgées lors de la compression uni-axiale (Figure 6).

Usage du jumeau numérique en formation

Les modèles de substitution ainsi développés et validés, peuvent alors prédire les comportements lors de la déformation en temps réel et peuvent donc être utilisés à des fins de pilotage du processus de fabrication pour en optimiser leur résultat. Dans cet objectif, le développement de l'environnement numérique RV (brique 2) n'est pas obligatoirement nécessaire. En revanche, pour la formation d'un nouveau public d'apprenants, l'environnement immersif a été développé car il présente plusieurs avantages comme par exemple :

- **L'attractivité** : la réalité virtuelle, démocratisée par le jeu vidéo, attire les jeunes populations. Le jumeau nu-

mérique devient alors un outil pour montrer aux plus jeunes des métiers trop souvent méconnus et pour démystifier les préjugés sur ces professions.

- **La disponibilité** : l'apprentissage réalisé via une réalité virtuelle évite d'immobiliser une installation de production. L'environnement numérique est disponible partout et à tout moment. Le coût d'une expérimentation en simulateur sera toujours plus faible qu'un arrêt de production.
- **Le réalisme** : l'environnement visuellement réaliste est un moyen efficace de proposer une expérience crédible. Les utilisateurs sont amenés à prendre des postures plus ou moins équivalentes à celles qu'ils adopteraient lors de la réalisation d'une activité similaire en situation réelle. La réalité virtuelle est donc adaptée à appréhender un environnement et à l'apprentissage de gestes ou de procédures techniques (Figure 7).



Figure 7 : Apprenant manipulant un lopin avec une pince dans l'environnement RV.

- **La sécurité** : la formation avec simulateur numérique plutôt qu'en situation réelle permet aux apprenants de tester plusieurs configurations dans une démarche d'essais-erreurs. Il est possible d'aller jusqu'à l'accident sans prendre de risque ni pour lui-même, ni pour les machines.
- **La pédagogie interactive** : comme en travaux pratiques, l'apprenant est en situation active et son attention est donc focalisée sur le geste à faire. Il peut, le cas échéant, être accompagné visuellement et/ou par l'audio pour découvrir la bonne pratique ou analyser une situation qu'elle soit réussie ou en échec. Ces explications peuvent s'appuyer sur une visualisation enrichie comme la décomposition des mouvements internes d'une machine (Figure 8a) ou l'application d'un champ à un lopin (Figure 8b) par exemple pour rendre le propos plus facilement compréhensible. Ces usages peuvent être répétés à l'envie jusqu'à une bonne maîtrise avant le passage en situation réelle, et peuvent être éventuellement enregistrés pour être analysés par l'apprenant lui-même sous forme d'autocritique.
- **L'endurance** : les études montrent que la durée moyenne pour supporter des lunettes de réalité virtuelle est d'environ trente minutes actuellement [10]. Les séquences d'apprentissage doivent donc tenir compte de cette limite pour être efficaces.
- **La charge cognitive** : le maniement des contrôleurs manuels nécessite un temps d'adaptation pour assimiler l'action liée à chaque commande. Pendant que la charge cognitive est focalisée sur les contrôleurs, l'apprentissage sur les phénomènes mis en œuvre dans le jumeau numérique est dégradé.
- **L'absence de formateur** : aucune discussion pour examiner la séquence d'apprentissage n'est possible sans la présence de formateur. Les messages préétablis en fonction des situations ne peuvent pas générer d'échanges approfondis.

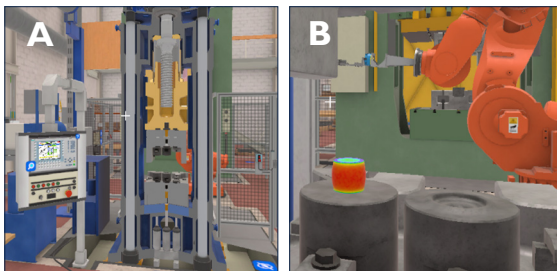


Figure 8 : Visualisation enrichie dans un environnement VR.
a) Cinématique interne de la presse à vis, b) Champ de températures appliqué au lopin

- **L'accessibilité** : la réalité virtuelle facilite l'accès aux postes de travail pour les personnes en situation de handicap. Sans pour autant vouloir en faire des opérateurs de terrains, leur offrir cette possibilité d'expérimenter ouvre à ces personnes des perspectives de travail en bureau d'études par exemple.

Il faut néanmoins avoir conscience que la réalité virtuelle n'a pas que des avantages. Certaines limites existent par ailleurs comme par exemple :

- **La perception sensorielle incomplète** : l'ensemble des sens ne peut pas être sollicité dans un environnement immersif. La chaleur, les odeurs, par exemple, ne peuvent pas être ressentis dans un environnement immersif classique.
- **La démocratisation** : l'accès à des lunettes de réalité virtuelle n'est pas encore suffisamment répandu. Posséder un ordinateur portable est aujourd'hui banal mais des lunettes avec un portable suffisamment puissant pour faire fonctionner les applications développées en environnement immersif est encore assez rare.

Une réflexion plus approfondie sur ces environnements immersifs pour l'apprentissage, leurs conditions de déploiement, leurs spécificités et leur potentiel pédagogique a été synthétisée dans un livre blanc sur l'enseignement avec les jumeaux numériques [11].

Dans le cas particulier du jumeau numérique de forge, un premier scénario pédagogique de découverte du processus de mise en forme est fonctionnel. Guidé par des instructions sur une tablette tactile, l'apprenant s'équipe de protections individuelles puis conduit le processus en enchaînant des étapes de chauffage d'un lopin jusqu'à l'estampage en passant par une opération de préparation par refoulement. Les plus curieux peuvent s'intéresser au fonctionnement des machines. Le second scénario, en cours de développement, vise des acquis d'apprentissage plus spécifiques autour d'un fil conducteur sur la maîtrise de l'énergie. L'apprenant pourra comprendre la notion d'énergie, la production d'une énergie cinétique, la conversion d'énergie cinétique en énergie de déformation plastique et la notion d'efficacité énergétique du procédé. Conçu de manière modulaire et pour différents niveaux d'enseignements, le jumeau numérique pourra être utilisé en lycée. Un enseignant de physique pourra illustrer la notion d'énergie, un enseignant de sciences industrielles pourra parler de transformation d'énergie cinétique de rotation en énergie cinétique de translation et évoquer les modèles équivalents, un enseignant de génie électrique pourra faire du traitement du signal pour filtrer un bruit de mesure, un enseignant de mathématique ou d'informatique pourra faire de l'intégration numérique sur une courbe effort-déplacement pour calculer une énergie, etc... Dans ces cas-là, le forgeage ne sera qu'illustration mais avec une intention de susciter la curiosité des jeunes, qui, peut-être, s'orienteront vers la profession.

Conclusion et perspectives

Le concept du jumeau numérique offre une multitude d'application. Le projet JENII (Jumeaux d'Enseignement Numériques Immersifs et Interactifs), mené par l'ENSAM en collaboration avec le CESI, le CNAM et le CEA, vise à développer des jumeaux numériques pour la formation. L'environnement numérique immersif offre à l'apprenant une mise en situation réaliste et attractive, il permet une pédagogie interactive et ludique. Le verrou du temps de calcul pour adapter les résultats numériques aux conditions renseignées par l'apprenant a été levé en utilisant, d'une part, des techniques de réduction de modèles telle que la Décomposition Orthogonale aux Valeurs Propres (POD) pour obtenir un résultat paramétré simplifié, et d'autre part, la création de modèles de substitution avec des réseaux de neurones artificiels pour générer des surfaces de réponses continues sur un domaine. Des scénarios de formation sont en cours de développement avec ce jumeau numérique.

Des travaux sont encore à explorer, notamment pour la mise en forme de pièces estampées aux formes complexes, ou la prise en compte du temps pour l'évolution de la microstructure ou des champs comme celui de la température par exemple. La connexion de l'environnement numérique à l'environnement réel pour une expérience d'immersion synchrone avec la réalité est aussi à l'étude. Piloter le processus à partir d'informations captées et des modèles avancés aux temps de calculs instantanés devrait pouvoir devenir une réalité dans un avenir proche avec les jumeaux numériques.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier sincèrement l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) qui finance le projet JENII par le Programme d'Investissement d'Avenir (ANR-21-DMES-00006) et le CETIM pour le financement de la thèse sur l'obtention des modèles de substitution en forgeage dans le cadre du Laboratoire de Mise en Forme des Matériaux (LaMFM, CETIM – Arts et Métiers). Les remerciements s'adressent aussi à Florian BARATTO et Yoan LOCARD pour le développement de l'environnement immersif, Christophe GABRION pour la réflexion sur les scénarios pédagogiques et enfin à Sébastien BURGUN et Alexandre FENDLER pour leur soutien technique lors des différents tests réalisés.

Bibliographie

[1] M. Grieves et J. Vickers, « Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems », in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*:

New Findings and Approaches, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, et A. Alves, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2017, p. 85-113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.

[2] R. Stark, C. Fresemann, et K. Lindow, « Development and operation of Digital Twins for technical systems and services », *CIRP Annals*, vol. 68, n° 1, p. 129-132, 2019, doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.024.

[3] « Forschungsprojekt COMPAS will Digitalisierung in der Industrie beschleunigen », *Der Jade Newsroom - Pressemeldungen, News und Social Media Postings*. <https://newsroom.jade-hs.de/magazin/forschungsprojekt-compas-will-digitalisierung-in-der-industrie-beschleunigen> (consulté le 6 février 2024).

[4] D. Uribe, C. Baudouin, C. Durand, et R. Bigot, « Predictive control for a single-blow cold upsetting using surrogate modeling for a digital twin », *Int J Mater Form*, vol. 17, n° 1, p. 7, déc. 2023, doi: 10.1007/s12289-023-01803-x.

[5] K. Slimani, M. Zaaf, et T. Balan, « Accurate surrogate models for the flat rolling process », *International Journal of Material Forming*, vol. 16, mars 2023, doi: 10.1007/s12289-023-01744-5.

[6] T. Falk, C. Schwarz, et W. G. Drossel, « Realtime Prediction of Self-Pierce Riveting Joints - Prognosis and Visualization Based on Simulation and Machine Learning », *KEM*, vol. 926, p. 1479-1488, juill. 2022, doi: 10.4028/p-5fjp40.

[7] D. Uribe, C. Durand, C. Baudouin, P. Krumpige, et R. Bigot, « Towards the Real-Time Piloting of a Forging Process: Development of a Surrogate Model for a Multiple Blow Operation », in *Proceedings of the 14th International Conference on the Technology of Plasticity - Current Trends in the Technology of Plasticity*, Cham, 2023, p. 377-388. doi: 10.1007/978-3-031-41341-4_39.

[8] *onnx/tensorflow-onnx*. Open Neural Network Exchange, 2024. Consulté le: 5 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://github.com/onnx/tensorflow-onnx>

[9] S. L. Brunton et J. N. Kutz, *Data-Driven Science and Engineering: Machine Learning, Dynamical Systems, and Control*, 1^{re} éd. Cambridge University Press, 2019. doi: 10.1017/9781108380690.

[10] « Here's why virtual reality should not be used every day », *World Economic Forum*, 16 mars 2023. <https://www.weforum.org/agenda/2023/03/metaverse-virtual-reality-ignore-the-hype/>

[11] F. Cedric et S. Fernagu, « Livre Blanc « Enseigner avec des jumeaux numériques immersifs et interactifs » », report, CESI, 2023. Consulté le: 20 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-04105705>

JOHN COCKERILL, SPÉCIALISTE DE LA MAINTENANCE DES MACHINES DE FORGE ET D'ESTAMPAGE

Fin 2024, les équipes de John Cockerill ont réalisé la réparation d'une masse supérieure de pilon à contre-frappe 200KJ de marque BECHE.



Fort de plus de 20 ans d'expérience dans la maintenance et l'amélioration des machines de forge et notamment des pilons à contre-frappe, John Cockerill Services réalise très régulièrement l'entretien de nombreux pilons en France.

Les équipes de John Cockerill Services en Lorraine maîtrisent un large éventail de prestations de maintenance qui gravitent autour du pilon à contre-frappe. De l'usinage sur site, au réglage du jeu aux glissières en passant par la réparation de masses fissurées en atelier ; et ce sur toute la gamme de puissance et variantes possibles (pilons à 2 montants, 4 montants, accouplement à bandes ou accouplement hydraulique...) ; c'est tout l'univers du pilon qui est maîtrisé en interne.

Réparation de masse sous contrôle en un temps record !

La dernière réparation majeure sur un pilon réalisée chez John Cockerill Services remonte à la fin d'année 2023.

Une masse supérieure de pilon DG20 à bandes, fissurée au niveau de ses deux oreilles est arrivée en urgence dans les ateliers de Thionville pour une réparation express entre les fêtes. Au programme des travaux :

- CND (MT/US) 100 % pour cartographie des dégâts,
- Affouillement par usinage sur machine-outil pour limiter les altérations de la microstructure que l'on

rencontre habituellement sur des affouillements par procédé arc-air,

- Rechargement sous contrôle de la cellule d'Ingénierie Soudage John Cockerill (QMOS, DMOS, QS, Procédure de rechargement spécifique définie par l'Institut de Soudure),
- CND de contrôle après réparation,
- Traitement thermique de détentionnement pour supprimer les contraintes internes liées au soudage,
- Usinage sur machine-outil pour remettre la masse au nominal du plan.

Le client en a profité pour repartir avec une masse « comme neuve » en réalisant en parallèle des réparations de :

- Rechargement et remise au nominal des queues d'aronde et du plan de pose outillage
- Réalésage en côte réparation et remplacement des deux bagues d'oreille usagées
- Retouche au mini du plan de pose amortisseurs
- Ajustement en atelier et montage d'un jeu de segments neuf sur le piston de la masse

La prestation de dépannage a été réalisée dans un temps record pendant les fêtes de fin d'année, et le délai initial annoncé respecté malgré plus de 250kg de matière usinée à l'affouillement et rechargée.

Et quoi d'autre ?

Le champ d'expertise de John Cockerill sur les pilons à contre-frappe permet également de proposer aux propriétaires de ces « Rois de la Forge » un panel d'améliorations qui touchent à la fois, la maintenabilité, l'ergonomie, la sécurité, l'automatisme, la fourniture de pièces de rechange (y compris des masses). Rien n'arrête les experts de John Cockerill Services !



Contact

- Valentin BRACH
- +33 (0) 6 61 21 71 90
- valentin.brach@johncockerill.com
- John Cockerill Route de Volkrange
Beuvange sous St Michel
57100 Thionville



Patrick HAIRY
Responsable Activité
Métallurgie et
Elaboration
Cetim



Michel STUCKY
Ingénieur métallurgie
non ferreux
Cetim

Approche multi-échelles en métallurgie numérique

Les plus grands défis de la recherche industrielle contemporaine sont marqués par cette volonté de pouvoir concevoir et définir, majoritairement par le calcul, un matériau possédant des propriétés désirées dans un environnement donné. Une telle évolution dans les attentes des industriels vis-à-vis de la métallurgie numérique a bien été pressentie il y a maintenant plus de 10 ans. En effet, dans sa présentation intitulée « La Métallurgie : un héritage, une ressource, un avenir » [1], Yves Bréchet préconise une stratégie de développement en termes « de défis scientifiques et de compétences nécessaires », plutôt qu'en termes de réponse immédiate aux appels d'offres souvent trop ciblés. Parmi les 5 défis scientifiques identifiés, l'un relève de la modélisation et de la simulation des matériaux, à aborder, selon lui, de manière multi-échelles et multi-physiques.

Ces concepts doivent être appréhendés au-delà du domaine de la métallurgie moderne, en les élargissant à la discipline de la science des matériaux dont la métallurgie est une partie intégrante. Entre autres, dans le Livre Blanc [2] de la SF2M (Société Française de la Métallurgie et de Matériaux), les experts font mention d'une « révolution numérique » qui est en marche dans le secteur des matériaux. Ils soulignent que les matériaux sont au cœur des enjeux stratégiques (TEE, souveraineté national, électrification...) et qu'aujourd'hui, l'importance de la simulation numérique pour la recherche n'est plus à démontrer. Cette discipline est clairement au cœur de l'industrie 4.0, tant pour l'élaboration, la transformation que pour les visées environnementales (recyclage...). Depuis une trentaine d'années, la simulation numérique en science des matériaux a concouru à atteindre trois objectifs industriels : la conception et le développement de matériaux ou alliages en rupture, le développement incrémental de matériaux ou alliages existant vis-à-vis de leurs propriétés et enfin l'optimisation des procédés en termes d'efficacité (meilleure gestion d'énergie et de matière) et de robustesse.

Par conséquent, la capacité à simuler les matériaux et les procédés associés contribue à un gain de temps considérable en phase de R&D et développement. Aujourd'hui, le « matériau numérique » commence à être employé pour des pièces à haute valeur ajoutée. Il est destiné à se généraliser et à court terme conditionnera la compétitivité des industriels français. Ainsi, de nouvelles stratégies de modélisation commencent à apparaître où la physique considérée dans les simulations à l'échelle macroscopique se nourrit de simulations réalisées à l'échelle de la microstructure et où les méthodes sont hybridées (Figure 1).

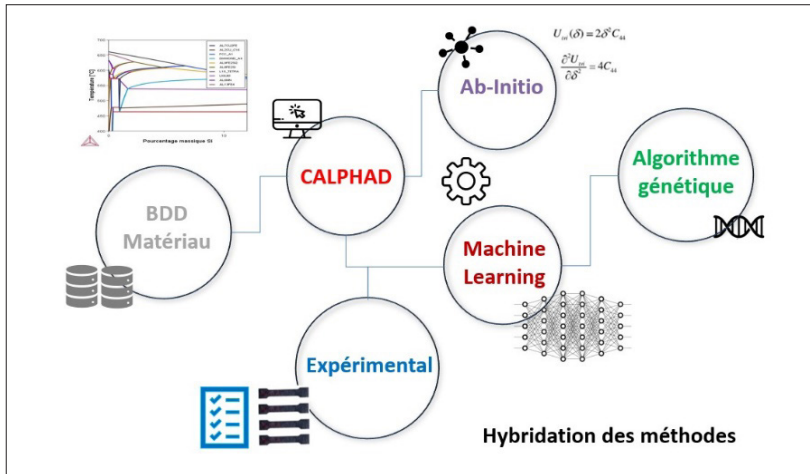


Figure 1 : Hybridation des méthodes en métallurgie numérique

Ces concepts s’adressent à tous types de matériaux, et donc tous les secteurs industriels seront à termes impactés par cette révolution. Avec un accroissement continu de la puissance des moyens de calcul (supercalculateurs), il est désormais possible d’envisager des simulations de plus en plus réalistes et précises à une échelle donnée. Ces progrès en termes de capacité de calcul ont conduit aux développements de nouvelles méthodologies en simulation numérique, notamment concernant les matériaux de structure. Ont été développés en particulier les simulations multi-échelles (approche partant des propriétés de l’atome pour prédire le comportement de la pièce) et multiphysiques (méthode globale associant différents domaines de la physique : thermique, fluide, mécanique...). Les méthodes dites ICME (Integrated Computational Materials Engineering) intègrent ainsi l’ensemble des maillons de la chaîne de production et d’utilisation d’un matériau. De ce fait, toutes les échelles sont prises en compte dans la méthode ICME, et les simulation multi-échelles trouvent naturellement leur place dans une telle approche.

La simulation multi-échelle des matériaux

La simulation multi-échelle a, avant tout, pour vocation de prédire le comportement d’un matériau en associant différentes techniques de modélisations opérant à différentes échelles d’espace et de temps. Les

échelles à considérer (Figure 2) vont de quelques nanomètres (quelques distances interatomiques) au millimètre ou au mètre (échelle des composants industriels), et de la picoseconde (période de vibration d’un atome dans un solide) à quelques années, voir dizaines d’années (durée de fonctionnement d’un composant). Cette approche est profondément liée au caractère intrinsèquement multi-échelles des phénomènes qui régissent l’évolution des propriétés des matériaux. En effet, ce sont les énergies des défauts présents à l’échelle atomique (lacunes, substitution d’atomes, interstitiels, dislocations, ...) qui gouvernent les évolutions et les cinétiques de la microstructure du matériau et en corollaire les propriétés macroscopiques qui en découlent.

Les méthodes ab-initio

Les méthodes dites ab-initio sont moins connues des industriels car elles sont encore très majoritairement utilisées par le monde académique. Les résultats des logiciels de simulation moléculaire de mécanique quantique ab initio comme VASP (Vienna Ab-initio Simulation Package) ou Open Quantum Materials ou les codes internes développés par les laboratoires de R&D permettent d’alimenter de plus en plus les bases de données thermodynamiques des modèles Calphad (Figure 3) en complément de données expérimentales, historiquement les seules disponibles.

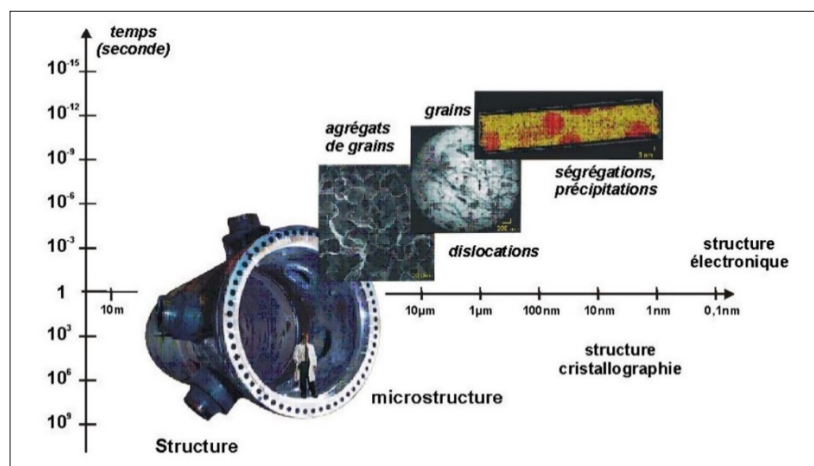


Figure 2 : Interaction des échelles de temps et d’espace pour une pièce métallique

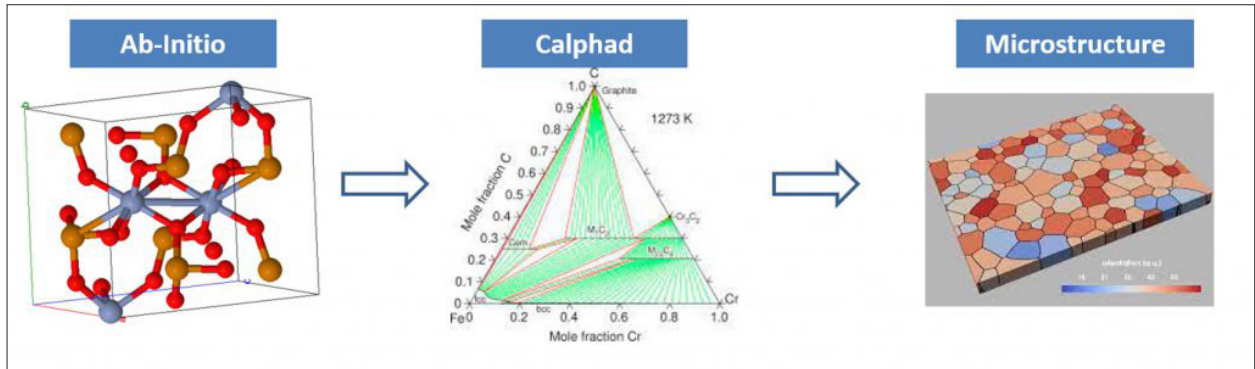


Figure 3 : De l'ab-initio jusqu'à la simulation de la microstructure

Les méthodes ab-initio, basées sur la physique quantique (équation de Schrödinger, Hamiltonian du système électron-ion, équations de Kohn-Sham), sont complexes, nécessitent des fortes compétences en physique théorique et demandent enfin une puissance de calcul très importante (Cloud Computing, cluster de PC, Cray, calculs parallélisés...) car les pas de temps (picoseconde) et les dimensions spatiales (10^{-12} m) sont très petits. Pour essayer de contourner ce problème numérique, les physiciens ont développé des approches dites « de champ moyen » [4]. Au lieu de chercher à décrire tous les électrons simultanément, on regarde le comportement d'un seul électron soumis à un potentiel électronique moyen qui reproduirait l'effet de tous les autres électrons sur cet électron test. Ces méthodes ab-initio ont l'avantage de ne pas nécessiter l'existence de bases de données matériaux (d'où leur nom d'ab-initio) car elles modélisent les propriétés intrinsèques du matériau au niveau atomique. Si les méthodes ab-initio qui résolvent l'équation de Schrödinger (Figure 4) sont les plus utilisés, il existe également des méthodes dites de dynamique moléculaire classique qui permettent de suivre l'évolution d'un ensemble d'atomes dans le cadre de la mécanique Newtonienne et enfin des approches probabilistes ou stochastiques (basées sur la méthode de Monte-Carlo). On peut penser qu'avec l'arrivée probable des ordinateurs quantiques dans les décennies à venir, l'ab-initio prendra une place de plus en plus importante en métallurgie numérique et pourrait sortir des laboratoires de recherche.

Les méthodes CALPHAD

La modélisation des diagrammes de phases (stables ou métastables) par la méthode CALPHAD (pour CALCulation

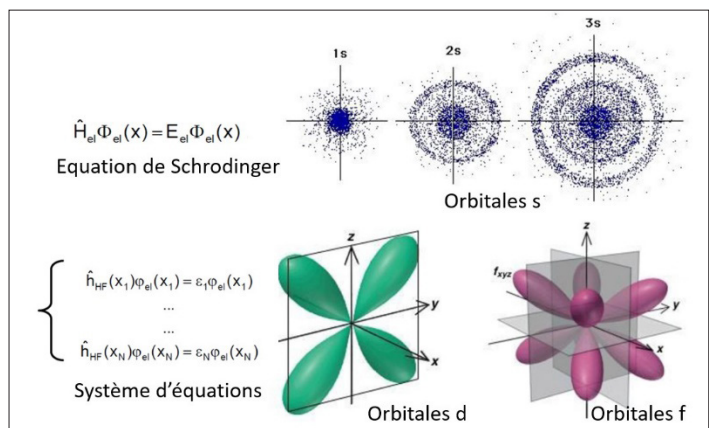


Figure 4 : Méthode ab-initio avec résolution de l'équation de Schrödinger

of PHase Diagram) fait appel aux modèles de la thermodynamique couplée à des bases de données expérimentales. Dans un système à phases multiples, l'équilibre entre les phases est obtenu en minimisant l'énergie libre de Gibbs. Les outils de type CALPHAD permettent, pour une composition chimique donnée, de calculer le diagramme d'équilibre (binaire, ternaire...), les phases en présence en fonction de la température (et de la pression), la température de liquidus et solidus de l'alliage et diverses propriétés dérivant de l'énergie de Gibbs (masse volumique, capacité thermique, tendance à la crique, contraction à la solidification...). Depuis quelques années, les bases de données ont été enrichies et permettent désormais d'estimer les propriétés thermophysiques telles que la conductivité thermique ou la viscosité et la limite d'élasticité ($Rp_{0,2}$) en fonction de la température ou de la pression. Ainsi, sur des alliages AlSi-Cu, l'ajout ou le retrait d'un ou plusieurs éléments d'alliage et d'impuretés (Figure 5) modifie l'intervalle de solidification ($T_{liquidus}$ et $T_{solidus}$), les phases en présence, le point eutectique et les paramètres thermo-physiques (viscosité...).

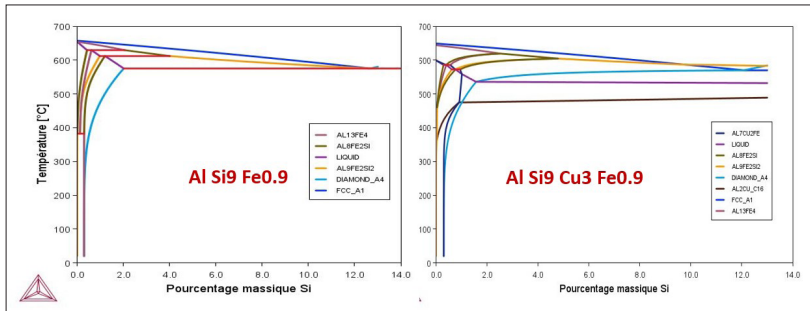


Figure 5 : Influence des éléments d'alliage sur les phases en présence (famille AlSiCu)

de Thermo-Calc permettent d'appréhender la diffusion d'éléments au sein d'une matrice (module DICTRA) et ou la prédiction des précipités (module TC-PRISMA). Dans l'approche Calphad, la complétude et la qualité de la base de données sont primordiales pour une prédiction pertinente.

La simulation du traitement thermique

De nombreux logiciels du commerce sont disponibles pour réaliser des calculs CALPHAD : Thermo-Calc, JMatPro, Factage, Matcalc, Mtdata, Pandat, Seqsy, ChemApp, ChemSage... La plupart sont généralistes et prennent en compte les différentes familles d'alliages alors que d'autres, plus rares, sont spécialisés (acier). Il existe aussi des codes open-source comme OpenCalphad ou des bibliothèques Python dédiées (Py-Calphad) ou encore Thermochimica. Les méthodes Calphad nécessitent des compétences de métallurgiste tout comme l'utilisation de codes de simulation de CFD (Computational Fluid Dynamics) ou de thermique nécessite de connaître les lois de la fluidique ou de la thermique. Il y a lieu en effet de sélectionner les modèles ad-hoc et les hypothèses de calcul et d'interpréter les résultats en fonction de la problématique à résoudre. Les méthodes CALPHAD sont utilisées actuellement par les laboratoires académiques, par les centres techniques industriels et par des grands donneurs d'ordre (Eramet, Safran, Aubert & Duval, Onera...). En revanche, ces outils n'ont pas encore diffusé dans le tissu industriel des PME et des ETI.

La simulation des évolutions dimensionnelles mais aussi de la microstructure lors du traitement thermique peut être également réalisée à l'aide de logiciels comme Forge (Transvalor). Ceci permet (figure 6) de suivre les évolutions de la microstructure en fonction de la température de la pièce, de sa géométrie, du fluide de trempé (eau, huile) ou de la vitesse de trempé. Là encore, des bases de données sont nécessaires sur le matériau métallique et les liquides de trempé. La simulation de la trempe par exemple peut être utile pour une grande pièce afin de déterminer en amont les meilleurs paramètres (position, vitesse...) ou pour optimiser un traitement thermique pour des pièces de grande série et évaluer l'impact de variation de process (température de l'opin, température de fluide, vitesse de trempé) pour mieux contrôler si besoin les paramètres sensibles. Ce type de simulation peut être couplée à une approche Calphad afin de prédire l'apparition de phases fragilisantes ou limiter le grossissement de grain.

L'alloy Design avec Thermo-Calc, permet au CETIM d'assister les industriels en utilisant la méthode Calphad sur l'amélioration d'un alliage ou la détermination des propriétés optimales sous certaines contraintes (températures, pression, modification d'un élément d'alliage ou diverses impuretés). Les diagrammes d'équilibre sur les différentes bases (fer, nickel, aluminium, oxydes) positionnent les phases en présence et en particulier les phases bénéfiques et les phases à limiter. Des calculs en batch peuvent être lancés permettant d'explorer également des compositions ou des températures variées. Enfin des modules spécialisés

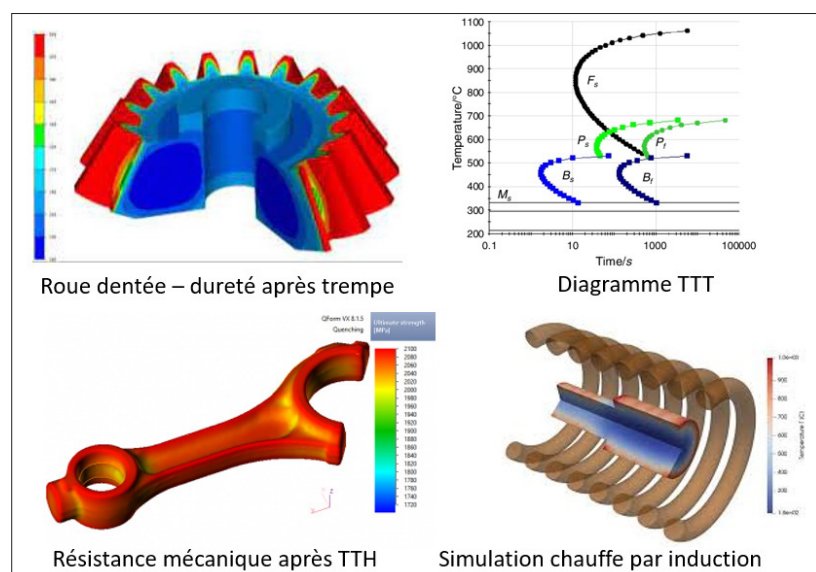


Figure 6 : Simulation des opérations d'une gamme de fabrication (code Forge)

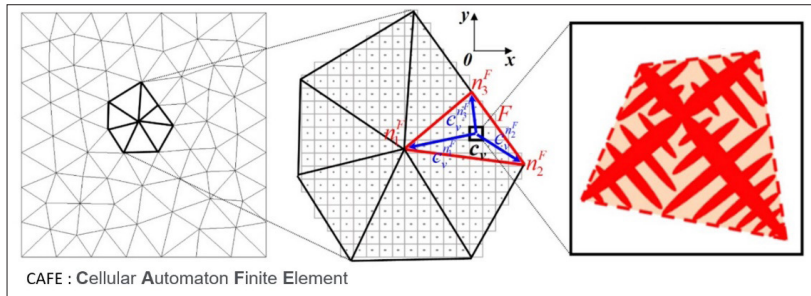


Figure 7 : Principe de la méthode CAFE

La simulation de la microstructure

La description mathématique de la dynamique de l'interface solide-liquide lors de la solidification est loin d'être triviale et les modèles ont longtemps buté sur ce verrou. La méthode de champ de phase s'est avérée être l'une des plus fécondes [8] jusqu'à devenir une « méthode standard » de simulation pour la dynamique à l'échelle des microstructures. Deux variantes sont utilisées pour simuler les propriétés à l'échelle de la microstructure : des méthodes dites de champ total ou « Full Field » (peu de simplification, interactions complètes entre variables et temps de calcul très importants) et des méthodes dites de champ moyen ou « Mean Field » (avec une plus forte simplification, mais des temps de calcul plus réduits). Pour simuler la microstructure lors de la solidification, différents codes de calcul sont disponibles : Digimu (Transvalor), Micress ou encore CAFE pour Cellular Automaton Finite Element (Figure 7).

Ces codes s'appuient sur des modèles de germination et de croissance des grains et sur les gradients thermiques dans le moule lors de la solidification. De nouveaux, ces calculs mettent en œuvre une base de données de matériaux. Ces modèles intègrent les transformations en phase pâteuse mais ne permettent en général pas de modéliser les transformations très rapides à l'état solide (austénite/martensite). Les paramètres du modèle peuvent demander un recalage si l'alliage n'est pas documenté. En général, pour limiter le temps de calcul, on simule la microstructure localement dans une ou plusieurs zones d'une pièce et non pas dans l'ensemble de la pièce.

Une étude du Cetim conduite sur une zone massive (75 kg) avec le module CAFE du code ProCAST (en mode

couplage faible et avec une taille des cellules de l'automate cellulaire de 500 μm) a investigué l'impact de différents refroidisseurs métalliques (100x100x100 mm, 100x100x25 mm et 212x212x100 mm) utilisé lors de la solidification sur la microstructure d'un acier 304. On observe (Figure 8) sur coupe longitudinale (yz) que les grains s'orientent dans le sens perpendiculaire au refroidisseur

et que l'épaisseur et la surface du refroidisseur joue un rôle majeur dans la modification de la microstructure. Le refroidisseur influe principalement sur la répartition, la forme et la cinétique de croissance des grains.

Les plans d'expérience numériques et réseaux de neurones

Bien que les calculs de simulation (Calphad, microstructure...) puissent être lancés et analysés unitairement, leur intérêt est décuplé lorsqu'ils sont enchaînés automatiquement : calculs en série à partir d'un tableau Excel ou en interaction via un programme Python ou encore avec un couplage avec une approche Intelligence Artificielle.

Dans la première approche, le métallurgiste peut réaliser des plans d'expériences numériques (par exemple plans Taguchi), ce qui permet de limiter le nombre de calculs (si ceux-ci sont « gourmands » en CPU) et tirer profit de la méthode bien éprouvée des plans d'expériences. En retour, il obtient une corrélation entre réponse et paramètres d'entrée, pour le domaine étudié, généralisable sans recours aux outils numériques.

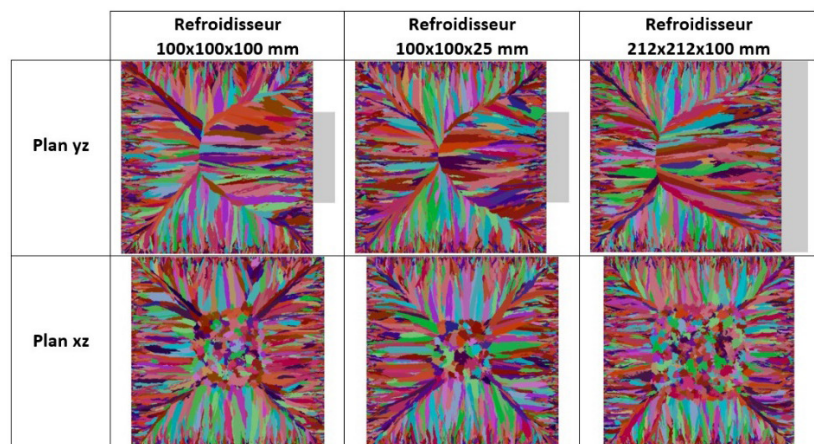


Figure 8 : Microstructure d'un acier avec différents refroidisseurs – module CAFE

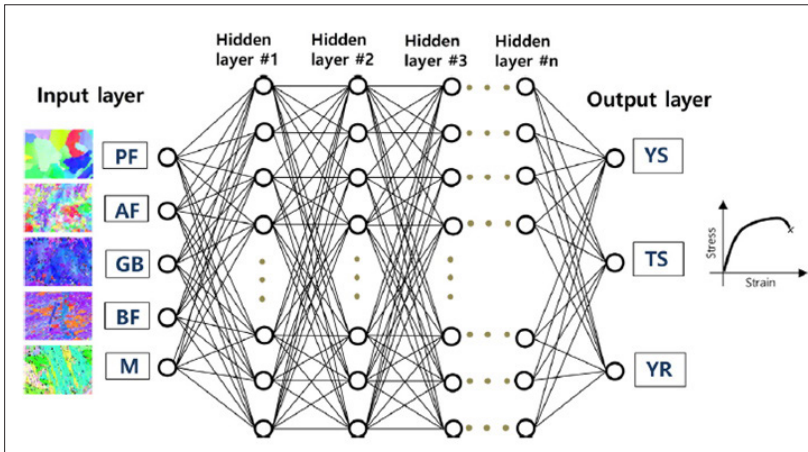


Figure 9 : Réseau de neurones appliqué à une base de données matériaux [10]

Dans le second cas, le métallurgiste peut faire appel soit à un algorithme génétique afin d’optimiser un jeu de paramètres vis-à-vis d’une ou plusieurs réponses (les solutions, en nombre réduit, sont ensuite validées expérimentalement), soit aux approches Machine Learning ou Deep Learning, qui partant d’un jeu de données (expérimentales, Calphad, littérature) va déterminer une corrélation entre réponses et paramètres d’entrée et générer un modèle statistique.

Les réseaux de neurones (Machine Learning) permettent ainsi de prédire [3] la limite d’élasticité, la résistance mécanique et le module de Young (Figure 9) à partir de la microstructure et des phases présentes (% ferrite, % bainite, % martensite...). Si certains modèles utilisent la composition chimique en données d’entrées, l’utilisation uniquement de la microstructure (et des phases) nécessite moins de données d’entrée et permet en plus de tenir compte du process de transformation (traitement thermique y compris). Le Machine Learning peut cependant être limitatif car il nécessite une base d’apprentissage conséquente et il ne permet que très difficilement la prédiction de nouveaux alliages (hors périmètre de la base d’apprentissage initiale). Enfin, le Machine Learning possède un biais d’explicabilité (« effet boîte noire »). Les modèles basés sur la physique sont sans doute plus performants et généralisables.

La méthode Calphad et la simulation de microstructure peuvent aussi être couplés et avec du traitement de données issues de l’Intelligence Artificielle (Deep Learning ou algorithmes génétiques). Le Deep Learning, qui nécessite de nombreuses données, peut être ainsi avantageusement alimenté par l’interrogation des outils Calphad. Ainsi un travail récent [5] de développement d’alliage austénitique en fusion laser sur lit de poudre (fabrication additive) a

permis de coupler un ensemble d’outils informatiques : algorithmes bayésiens d’apprentissage automatique (ML), CALPHAD et modèles physiques intégrés dans un algorithme génétique multi-objectif (NSGA-II).

L’approche expérimentale, complémentaire du numérique

La métallurgie numérique est évidemment complémentaire à l’approche expérimentale (Figure 10). Les avantages de l’approche numérique – qui précède souvent l’expérimental – sont

multiples : un plus faible coût, des résultats rapides et non dispersés, la possibilité d’explorer de multiples compositions ou microstructures et de tester des hypothèses difficiles à appréhender par l’expérimental et enfin une meilleure compréhension des paramètres de premier ordre. Comme nous l’avons souligné précédemment, la qualité des simulations est en lien direct avec celle des bases de données et des modèles implémentés. Pour des alliages connus et donc bien documentés, les résultats sont en général très performants. En revanche, pour des alliages moins documentés, il y a lieu d’avoir plus de recul sur la qualité des résultats. L’approche expérimentale doit, in fine, venir confirmer ou préciser les résultats de l’approche numérique et peut déployer micrographie, EBSD, mesure de dureté, $Rp_{0,2}$, dureté, tenue en sollicitation statique et/ou en dynamique ou tout autre caractéristique qui pourra être comparée avec son double numérique. L’expert métallurgiste doit également interpréter et préciser le domaine de validité des résultats.

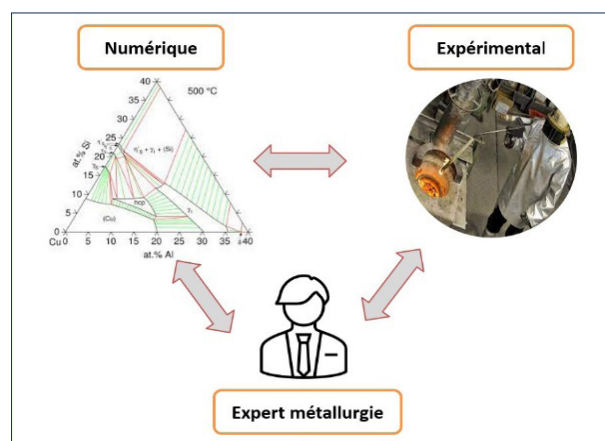


Figure 10 : Complémentarité de la métallurgie numérique et expérimentale

Vers une chaîne numérique complète

Dans l'idéal, l'ingénieur souhaiterait pouvoir simuler à la suite et de manière très fluide les opérations de transformation (fonderie, coulée continue, forge, ..., fabrication additive), récupérer les imperfections (internes, externes) et la microstructure dans toutes les zones de pièce, lui appliquer un traitement thermique, simuler les opérations d'usinage et utiliser les résultats pour in fine réaliser un calcul de tenue mécanique (statique, fatigue). A l'heure actuelle, cette chaîne numérique complète n'existe pas ou uniquement dans de très rares cas. Elle est en effet complexe à déployer car elle fait intervenir des logiciels issus d'éditeurs divers (pas d'interopérabilité), des modèles à différentes échelles (micro, meso, macro), plusieurs types de maillage (différences finis, éléments finis), des bases de données thermodynamiques qui peuvent être différentes (structuration, contenu...) et enfin elle peut faire appel à des phénomènes physiques encore incomplètement compris et modélisés.

Echelle	Logiciels
Modélisation à l'échelle atomique (ab-initio)	WIEN2K ,VASP, Quantum Espresso, LAMMPS, ATK, ...
Modélisation à l'échelle de la microstructure	Thermo-Calc, ParaDis, FiPy, MICRESS, OOF, MatCalc, ...
Modélisation à l'échelle de la macrostructure (pièce/sous ensemble)	Abaqus, Ansys, LS-DYNA, Moldflow, ProCast

Figure 11 : Logiciels de modélisation à différentes échelles selon [9] - (liste non exhaustive)

Les briques individuelles – dont fait partie intégrante la métallurgie numérique – sont cependant en train de se mettre en place peu en peu (Figure 11) à différentes échelles avec de nombreux codes déjà disponibles [9]. C'est sans doute davantage leur interfaçage automatique et le couplage [6] entre les différentes échelles et entre les différents codes qui fait défaut. Différents domaines industriels sont concernés par ce type d'outils : la sidérurgie, la fonderie et la forge, le recyclage ou encore la fabrication additive. On peut imaginer que ces outils de métallurgie numérique permettront de développer plus rapidement et à moindre coût des alliages sur-mesure comme le montrent différents programmes de recherche pour les HEA (alliage à haute entropie) [11], poudre pour fusion laser sur lit de poudre [5], superalliages [13], alliages recyclés [12], verre métallique [14]. L'approche métallurgie numérique est aussi très performante pour la mise au point ou l'optimisation des processus de transformation (température, durée, pression...).

Pour le métallurgiste, les outils numériques vont devenir de plus en plus indispensables au fur et à mesure de la complétude des bases de données, de l'amélioration de la performance des modèles et de la puissance de calcul disponible (CPU). On l'a dit cependant, l'expérimental sera toujours nécessaire pour valider les meilleurs candidats d'alliages numériques, tester des hypothèses (non modélisables) ou pour recalibrer les modèles. Enfin, l'expertise humaine est indispensable pour mettre en œuvre expérimental et numérique, déployer des plans d'essai et interpréter les résultats. Le pôle FMC (Fonderie Forge et Métallurgie Numérique) du Cetim a démarré en début 2024 un projet collectif à l'aide des outils Thermo-Calc et CAFE sur la métallurgie numérique des alliages d'aluminium et des aciers qui permettra d'explorer le potentiel de cette technologie au service des industriels.

Références

- [1] Y. Brechet, « La Métallurgie : un héritage, une ressource, un avenir », 2016 (<https://rnm-metallurgie.fr/wp-content/uploads/2016/07/metallurgie-heritage-et-avenir.pdf>)
- [2] M. Bernacki, N. Bozzolo, B. Appolaire, « Livre Blanc de la Société Française de Métallurgie et de Matériaux - Les Matériaux, au cœur des enjeux stratégiques Post COVID – Chapitre 7 », 2021 (<https://sf2m.fr/wp-content/uploads/2021/03/Livre-blanc-chap-7.pdf>)
- [3] Patrick Hairy, Michel Stucky, Approche data-driven en métallurgie aluminium, La revue Forge et Fonderie, n° 36, dec. 2023, p.14-25
- [4] Xavier Blase, Les calculs ab initio en physique du solide
- [5] Mariam Assi, Alloys Design for Additive Manufacturing (ADAM), Thèse Ecole des Mines de St Etienne, 2022
- [6] Lionel Gendre, La simulation multi-échelle, 2011, EDUSCOL-STI : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-pa-ri-saclay>
- [7] Jacky Ruste, La Simulation Numérique en science des matériaux : Principes et applications,

[8] Jihene Ghmadh, Etude par la méthode du champ de phase à trois dimensions de la solidification dirigée dans des lames minces, Thèse Université Aix / Marseille, 2014, champ de phase explication file:///C:/Users/hairy.CETIM3/Downloads/141215_GHMADH_OH6BKI013N9_TH.pdf

[9] Modeling Across Scales: A Roadmapping Study for Connecting Materials Models and Simulations Across Length and Time Scales, The Minerals, Metals & Materials Society, 2015

[10] Im Doo Jung a , Da Seul Shin and Alii, Artificial intelligence for the prediction of tensile properties by using microstructural parameters in high strength steels, Materialia 11 - 2020

[11] Franck Tancret - Conception computationnelle d'alliages par intelligence artificielle et thermodynamique, Techniques de l'Ingénieur, dec. 2022.

[12] Evgueni Jak, Dr. Taufiq Hidayat, Dr. Viktoria Prosta-kova and alii, Integrated experimental and thermodynamic modelling research for primary and recycling pyrometallurgy, EMC, Dusseldorf, 2019

[13] O.A. Glotka, Modelling the composition of carbides in nickel-based superalloys of directional crystallization, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2020

[14] A. Saksena, Quantum mechanically guided design of noble metal coatings for precision glass molding technology, Publications, rwth-aachen, 2020



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



Clotilde MACKE-BART
Responsable R&D
Direction de la
Recherche et des
Programmes
CETIM



Michael BRISON
Responsable Pôle
d'Activité FMC
(Fonderie Forge et
Métallurgie à Chaud)
CETIM

Panorama des études menées par le CETIM pour les professionnels de la Fonderie

Après l'enquête menée auprès des fondeurs français sur leurs attentes et besoins vis-à-vis de leur Centre Technique, la 1^{re} Commission Sectorielle CETIM accueillant les industriels de la Fonderie s'est tenue en décembre 2023, actant l'intégration de sujets identifiés comme prioritaires pour la Profession, aux actions collectives menées par le CETIM pour les entreprises. Cet article dresse un panorama des actions menées dans ce cadre et intéressant directement les domaines de la fonderie et de la métallurgie.

3 axes prioritaires avaient préalablement été identifiés en accord avec la Profession:

1. Les nouvelles métallurgies et l'approche numérique de la métallurgie
2. La prédiction produit-process, le contrôle et la défectologie
3. Les enjeux de recyclage et de valorisation des matériaux (métaux, sables) et de la TEE (Transition Ecologique & Energétique)

L'enquête menée auprès des fondeurs sur les 12 derniers mois a confirmé deux natures de besoins prioritaires en phase avec ces 3 axes : des besoins sectoriels en lien avec les évolutions métier (les sables, l'énergie, la décarbonation des produits et des procédés, la maîtrise des outillages...) et des besoins de transformation (automatisation, collecte et exploitation des données, numérisation...).

Ces actions s'inscrivent dans un continuum que porte le CETIM pour ses cotisants, au service de la transformation des entreprises, via ses actions et dossiers de veille, ses projets de R&D, les grands projets stratégiques (CEDRE, HyMEET, Transition Numérique, e-Mobility), les projets stratégiques sectoriels (PSS) et projets thématiques transversaux (PTT) jusqu'à la normalisation et la transformation via des actions d'accompagnements auprès des industriels (R&D partenariale, formation, appropriation), notamment via ses plateformes Quatrium.

Relance de l'action pour les professionnels de la Fonderie

Relancées en 2023, les actions ont été structurée en coordination avec la Fédération Forge Fonderie, avec l'instruction de premiers projets que nous rappellerons dans le présent article, en réponse aux besoins identifiés dans le cadre de l'enquête précitée. Outre les actions de veille pilotées sur la GIFA (salon international de la fonderie), les gigapresses et la métallurgie numérique, deux Rendez-Vous de la Mécanique (RVM)



Nov.2023 - 1^{er} Atelier PERFOND accueilli sur le site de Stellantis Sept-Fons à Dompierre-sur-Besbre

ont réuni industriels et développeurs de solutions dès 2023, respectivement à Pont-à-Mousson et à Nantes, sur le thème de **l'agilité énergétique en fonderie**. Le CETIM a aussi participé à la journée d'information et d'échanges organisée à Saint Dizier par la Fédération en collaboration avec le GIFEN et Nuclear Valley sur **les marchés du nucléaire pour les industries de la forge et de la fonderie**. Enfin, en 2023, ont été initiés les premiers ateliers, respectivement avec les fondeurs ferreux (Photo), et non ferreux, pour l'instruction du projet PERFOND : **PERformance environnementale en FONderie**.

Le cadre élargi de l'action Collective du CETIM

L'ensemble de ces actions pour les professionnels de la fonderie s'inscrit désormais dans le cadre du Programme d'Activité Collective du CETIM couvrant notamment les enjeux de décarbonation, d'économie circulaire, de transformation numérique, de maîtrise des énergies et de mobilité bas carbone qui impactent directement les différents métiers de la mécanique, et notamment ceux de la métallurgie et de la fonderie.

A compter de 2024, le pilotage de cette action collective est structuré autour de 6 piliers, au rang desquels un nouveau Pilier « **élaboration à l'état liquide, traitements et transformations à chaud des matériaux métalliques** », dans lequel s'inscriront plus directement les développements en métallurgie, en forge et en fonderie.

Les autres piliers, également d'intérêt pour la Profession sont :

- Le Pilier « **conceptions et simulation multiphysiques** », couvrant la fiabilisation des outils et mé-

thodes de conception (et éco-conception), les modélisations et simulations multi-physiques (impactant les procédés), l'optimisation et la virtualisation des essais.

- Le Pilier « **mise en forme, usinage, assemblage et excellence opérationnelle** » couvrant les métiers de la forge à froid, de la mise en forme des tôles, de l'usinage, du décolletage, du soudage, et des assemblages mécaniques (rivetage, vissage, collage ...), et les approches visant l'excellence opérationnelle (lean, automatisation / robotisation, intégration de l'humain / sécurité des machines)
- Le Pilier « **fabrication additive, fonctionnalisation des surfaces et mécanique du contact** », intéressant autant les potentiels de la fabrication additive que celui de l'ingénierie des surfaces sur procédé et sur produit métallique, sous l'angle fonctionnel (échanges thermiques, corrosion, finition, texturation nettoyage, tribologie, fatigue de contact, lubrification, étanchéité dynamique ...)
- Le Pilier « **caractérisation des matériaux, des systèmes et des structures** », dédié à la caractérisation avancée des propriétés physiques et lois de comportement des matériaux jusqu'à l'évaluation de la tenue fonctionnelle des produits et des structures, et déploiement des méthodes associées (statique, dynamique, thermique, combinées ...), dans des environnements variables (haute pression, hydrogène, haute température ...) pour des exigences fonctionnelles multiples (étanchéité, frottement, rendement, ...)
- Le Pilier « **mesures, contrôles, data et IA** », centré sur la métrologie multi-physique, le contrôle non destructif et le contrôle en ligne, la connectivité et le traitement de données, et l'application de l'IA au service de la machine intelligente, et via notamment la mise en œuvre du concept du jumeau numérique.

Avec l'ambition d'accompagner les entreprises cotisantes dans leur réponse aux enjeux de la transition écologique et énergétique, de leur transformation numérique vers l'industrie du futur et de la souveraineté industrielle des entreprises mécaniciennes, les projets qui sont pilotés dans ces différents piliers ont pour vocation d'accompagner les entreprises face aux défis de ces transformations.

Parmi ces actions, les projets en cours rappelés dans le numéro précédent (*revue forge et fonderie n°35, décembre 2023, article page 27 : projets CEDRE, Fabrication additive métal à cout accessible, Instrumentation en milieu sévère, Finition des surfaces, les projets sur les CND, IIOT*) et les nouveaux projets en instruction sur lesquels les industriels de la Profession ont d'ores et déjà manifesté leur intérêt (traitement thermique et contraintes résiduelles, caractérisation matériaux et modèles associés, contrôle en ligne produits et procédés, continuité numérique (de la conception au recyclage), IA et procédés de fabrication) intéresseront directement les professionnels de la fonderie.

De nouveaux projets et actions en 2024 dans ce cadre

Pour 2024, la veille dédiée au secteur de la fonderie s'intéressera en particulier au salon Euroguss de janvier, aux manifestations de la SF2M, au colloque fonderie d'Aix-La-Chapelle en mars, à CastForge en juin et au Congrès Mondial de Fonderie qui se tiendra cette année en Chine en octobre. Les thématiques de veille proposées pour la Profession pour 2024 sont par ailleurs (sans être exhaustives) : la réparabilité des pièces issues de megacasting, la métallurgie numérique, la fusion et les énergies, les matières métalliques et leurs boucles de recyclage, les sables.

En termes de projets, le lancement de 3 projets de R&D, 4 actions sectorielles, d'un Projet Thématique Transversal (PTT) sur la thermique des outillages, et d'un Projet Stratégique Sectoriel (PSS) sur la performance environnementale en fonderie, ont été actés à la Commission Technique Fonderie de décembre :

R&D – Métallurgie Numérique : cette première action de R&D aura pour objectif d'améliorer par la prise en main des outils numériques, la capacité à prédire la microstructure, les phases en présence et les propriétés thermo-physiques et mécaniques d'une pièce industrielle en lien avec sa composition chimique. Dans le cadre de ce projet, des moyens numériques et expérimentaux seront mobilisés pour répondre aux objectifs de dresser un état de l'art

exhaustif des outils numériques utilisés et/ou en développement dans le domaine de la métallurgie numérique, et confronter les simulations à l'échelle microstructurale et macroscopique à l'aide des logiciels mis en œuvre aux fins notamment de prédire les effets des traitements thermiques sur les caractéristiques microstructurales des systèmes étudiés et optimiser les conditions de mise en forme à chaud des pièces afin d'obtenir la microstructure appropriée pour avoir les propriétés de service visées.

R&D – Caractérisation Physique des Matériaux (de moulage) et des Alliages : la fiabilisation de la métallurgie numérique nécessite une consolidation des bases de données matériaux (alliages et matériaux de mise en forme) et l'utilisation de techniques d'analyses et de modèles de prédiction (notamment pour la solidification) plus pertinents. Ce sont ici 2 projets de R&D qui seront lancés en 2024 pour répondre à cette problématique, dédiés respectivement à la fiabilisation de la caractérisation des matériaux du process, et des alliages mis en œuvre. La démarche de R&D proposée visera de fiabiliser la mesure à haute température des propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés dans les logiciels de simulation numérique, de déterminer le domaine de validité des données matériaux qui seront consolidées, et de cadrer le cahier des charges pour structurer la capitalisation de ces données et leur exploitation.

Action sectorielle – Expansion Graphitique : cette 1^{ère} action sectorielle visera de mieux comprendre et modéliser l'influence des paramètres intrinsèques et extrinsèques propres à l'expansion graphitique des fontes GS. Il s'agira de confronter la simulation numérique et l'expérimental afin d'identifier les approches permettant de limiter les quantités de métal nécessaires à leur mise en œuvre, et fiabiliser davantage qualité produit et délais de mise au point. L'étude devra permettre de développer et d'enrichir les bases de données nécessaires à cette fiabilisation pour des nuances choisies. L'étude reposera notamment sur la confrontation de plusieurs outils de simulation numérique mis en œuvre par le Cetim et les fondeurs partenaires.

Action sectorielle – Performance des Manchons : de nombreuses fonderies sable constatent une hétérogénéité de la qualité des pièces coulées avec des manchons exothermiques, qu'elles utilisent de façon assez généralisée. Dans la continuité des premières actions initiées sur la qualification des manchons, cette 2^{de} action sectorielle vise de mieux caractériser chimiquement et thermiquement les manchons en termes de qualité et d'efficacité, de dé-

montrer leur impact par l'étude de la variabilité de la mise en œuvre des manchons sur la qualité pièce (métallurgie et caractéristiques mécaniques), et de développer des contrôles d'atelier simples et pertinents pour permettre leur contrôle qualité au sein des fonderies. La simulation numérique sera utilisée pour évaluer l'impact de la variabilité des caractéristiques thermiques des produits sur les temps de solidification et la qualité des pièces coulées (retassure).

Action sectorielle – Sables de Fonderie : en complément de l'avancement du projet européen Green Casting (2022-2026) dédié au développement des liants inorganiques en fonderie ferreux, et auquel plusieurs fonderies seront associées en phase d'essais (sélection en cours après sondage élargi), une action sectorielle sur les sables est proposée à l'instruction pour 2024 en réponse aux besoins et attentes formulés dans le cadre de l'enquête pré-citée. Des ateliers et réunions d'échanges (une 1^{ère} journée le 4 avril 2024, en collaboration avec l'ATF et la FFF sur la valorisation des sables) seront organisés au 1^{er} semestre 2024 avec les industriels aux fins de hiérarchiser les actions à mettre en priorité dans le cadre de l'action sectorielle. Plusieurs axes sont d'ores et déjà cités dans les besoins et voies à qualifier : réduction, captation et traitement des COV, identification et qualification de sables de substitution, évaluation de solutions de réduction des consommations d'énergie et pollutions, traitement des sables et identification/évaluation de nouvelles filières de valorisation.

Action sectorielle – Fonderie Sous Pression : dans la continuité des principales tendances observées sur la fonderie sous pression au salon de la GIFA 2023 (Gigapresses, nouveaux alliages, périphériques et alternatives), et en synergie avec l'intégration sur la plateforme fonderie de l'ENSAM Chalons d'une machine FSP Bühler Carat 130 compact, d'une cellule de fabrication additive Trumpf TruePrint 5000 (LML) et d'un tomographe Zeiss Metronom 1500, une action sectorielle sur la fonderie sous pression est proposée à l'instruction pour 2024 en collaboration avec l'ENSAM. Des ateliers seront organisés au 1^{er} semestre 2024 avec les industriels pour actualiser les thématiques et les sujets prioritaires à développer dans le cadre d'actions mutualisées sur ces nouveaux moyens. Les travaux seront à coordonner avec les actions pilotées dans le cadre des **PTT's Thermique Outillage** (en instruction) et **Instrumentation en milieu sévère** (en cours de lancement).

PSS PERFOND – Performance Environnementale en Fonderie : au lendemain des premiers ateliers & groupes de travail initiés en 2023, ce nouveau Projet Stratégique Sectoriel en instruction sera focalisé en priorité sur les processus de fusion, et structuré autour de 3 axes : la décarbonation, la performance énergétique et l'économie circulaire. Les ateliers se poursuivront au 1^{er} semestre 2024 pour mener à terme l'instruction du contenu de chaque axe et aboutir au cahier des charges finalisé du PSS PERFOND dont les travaux seront à coordonner avec les actions pilotées dans le cadre plus large du projet stratégique CEDRE.

PTT THERMOUT – Thermique Outillage : élargi aux métiers de la fonderie et de la forge, et enrichi des besoins formulés dans le cadre de l'enquête auprès des fondeurs, ce projet en instruction se structure autour de 3 axes, outre l'état de l'art actualisé sur la thématique : un axe dédié à l'optimisation des conceptions et de la simulation thermique (couplage fluide de la thermique outillage et simulation process), un axe dédié à l'amélioration des couples matériau-process (durée de vie) et protocoles/bancs de caractérisation) et un axe dédié à la mesure de performance sur cas applicatifs (forge, fonderie, autres). L'instruction du projet sera avancée au 1^{er} semestre 2024 en intégrant d'une part le retour d'expérience des actions et projets antérieurs (DECISIFF, GTFA, INFINITE, NumPhy, OUMOISS, échangeurs, bancs instrumentés) d'autre part le lien avec les projets en cours ou en montage : FAMCA (solutions en fabrication additive exploitables à coût accessible sur outillages), INSTRU (instrumentations pour mesures sur outillage et process), FONCSURF (fonctionnalisation des surfaces qui pourra intéresser les surfaces d'outillages).

En résumé

Des actions sectorielles aux projets stratégiques, de la métallurgie numérique aux problématiques très opérationnelles « métier » des manchons ou de l'expansion graphitique, les études menées par le CETIM, y compris dans le cadre plus élargi de ses projets thématiques transversaux (traitement thermique, thermique outillage, caractérisation matériaux et modèles associés, instrumentation en milieu sévère...), adressent très directement les problématiques techniques des professionnels de la fonderie. Aussi, si ces thématiques vous intéressent directement, n'hésitez pas à nous contacter pour rejoindre la communauté de ces projets.

Instance Fonderie CETIM

contact : Clotilde.macke-bart@cetim.fr

Initiation au moulage sable et remise des diplômes au Lycée Hector Guimard à Lyon

La Fédération s'est rendue le 9 décembre au Lycée polyvalent Hector Guimard de Lyon afin de participer à la matinée d'initiation au moulage sable organisée avec l'ATF et l'AAESFF et rencontrer les acteurs de la formation et les industriels de la région. Cette matinée fut également l'occasion pour la Fédération de remettre les diplômes aux promotions 2022/2023 du BTS Fonderie ainsi que de la Licence Fonderie en partenariat avec l'Université Lyon 1.



C'est dans une ambiance conviviale au sein du plateau technique du lycée que petits et grands se sont initiés aux techniques du moulage sable. Les participants ont ainsi pu repartir avec leurs réalisations et profiter d'un buffet festif.



Afin de clore cette matinée sous le signe de la fonderie, la direction de l'école a organisé la cérémonie de remise de diplômes aux promotions 2022/2023 du BTS Fonderie ainsi que de la Licence Fonderie en partenariat avec l'Université Lyon 1.



La Fédération remercie Madame Carine ROUSOT-OGOUNCHI, Proviseure du Lycée, Monsieur Lionel BARRIQUANT, Directeur Délégué aux formations professionnelles et technologiques pour cette matinée de promotion de nos savoir-faire ainsi que Monsieur Mourad TOUMI pour son engagement pour la profession.

Sergio Da Rocha



Messe Stuttgart
Key to Markets



CastForge

Le salon professionnel des
pièces moulées, pièces forgées
et leur usinage



Du 4 au 6 juin 2024
Messe Stuttgart, Allemagne

L'internet est grand. Beaucoup trop vaste pour mener directement au but lorsqu'il s'agit de pièces moulées et forgées spéciales. À CastForge, vous trouverez plus rapidement ce que vous cherchez : plus de 400 exposants internationaux proposent des produits et services, de l'ébauche au produit fini. Vous y découvrirez aussi un réseau fertile propice aux échanges personnels et au transfert de connaissances.

Votre billet gratuit :
scannez le code QR
et utilisez le code
CASTFORGE24FFF



www.castforge.eu/secure-ticket
#CastForge



Sergio DA ROCHA
Responsable Formation
Fédération Forge Fonderie

Retour sur l'enquête annuelle sur les effectifs en formation Forge et Fonderie

La Fédération Forge Fonderie a réalisé son enquête annuelle sur les effectifs en formation Forge et Fonderie dans les établissements scolaires du Ministère de l'Education Nationale et de l'Enseignement Supérieur qui forment à ses métiers pour l'année 2023/2024. Premiers enseignements de l'enquête :

Des effectifs en légère baisse avec 499 élèves en formation pour l'année 2023/2024. A noter :

- Légère augmentation des effectifs Bac Pro liée à la comptabilisation des effectifs de la seconde famille de métiers « Réalisation d'ensembles Mécaniques Industriels » (REMI) alimentant potentiellement plusieurs bac pro (fonderie mais aussi usinage, chaudronnerie, modelage etc...)
- Baisse importante des effectifs en licence pro (2 sections ouvertes sur 3 par manque de candidats)
- 29% des effectifs en apprentissage
- 19 sections de formation réparties sur 11 établissements

Récapitulatif des effectifs	Nombre de sections de formation	Effectifs	% scolaire	% apprentissage	Effectifs N-1	Variations %
CAP FONDERIE D'ART	1	12	42%	58%	12	
BAC PRO FONDERIE	7	237	98%	2%	231	+2,60%
BTS FONDERIE	6	126	69%	31%	135	-6,67%
BTS FORGE	1	24	75%	25%	26	-7,69%
Licence FONDERIE & FORGE	2	12	17%	83%	21	-42,86%
Ingénieur FONDERIE & FORGE	2	88	3%	97%	88	
TOTAL	19	499	69%	29%	513	-2,73%

8 établissements scolaires proposant une ou plusieurs sections de formation fonderie allant du CAP au BTS :

ÉTABLISSEMENT	CP	VILLE	TOTAL	CAP FONDERIE D'ART	BAC PRO (2 nd REMI)	BAC PRO FONDERIE (1 ^{re})	BAC PRO FONDERIE (Terminale)	BTS FONDERIE (1 ^{re})	BTS FONDERIE (2 ^e)
Lycée François Bazin	08000	CHARLEVILLE MEZIERES	34		8	8	5	6	7
Lycée Henri Brisson	18100	VIERZON	71		48	10	6	4	3
Lycée Jean Prouvé	54000	NANCY	26		24	2			
Lycée Loritz	54000	NANCY	59					28	31
Lycée Gustave Eiffel	59427	ARMENTIERES	47		22	2	7	8	8
Lycée Marie Curie (fonderie)	60180	NOGENT SUR OISE	59		28	8	7	6	10
Lycée Hector Guimard	69007	LYON	58	12	12	12	7	11	4
Lycée Jean-Baptiste Colbert	76140	LE PETIT QUEVILLY	21		14	6	1		
TOTAL			375	12	156	48	33	63	63

Une section BTS Forge unique en France qui fait le plein :

ETABLISSEMENT	CP	VILLE	TOTAL	BTS FORGE (1 ^{re})	BTS FORGE (2 ^e)
Lycée Marie Curie (forge)	60180	NOGENT SUR OISE	24	12	12

100 élèves en formation Forge & Fonderie dans l'Enseignement Supérieur :

ÉTABLISSEMENT	CP	VILLE	LICENCE PRO	INGENIEUR (1 ^{re})	INGENIEUR (2 ^e)	INGENIEUR (3 ^e)	Spécialisation ESFF	TOTAL
Licence pro Métiers de l'Industrie : Mise en forme des matériaux (parcours «Métallurgie Forge Fonderie») Université de Reims (EISiNe)	08000	CHARLEVILLE MEZIERES	5					5
Licence pro Métiers de l'Industrie : Mise en forme des matériaux (parcours «Fonderie») Université Claude Bernard Lyon 1	69622	VILLEURBANNE	7					7
Titre d'ingénieur de l'Ecole supérieure de fonderie et de forge (ESFF)	92310	SEVRES		28	31	26	3	88
TOTAL			12	28	31	26	3	100



Données complètes de l'étude téléchargeable sur notre site.

<https://www.forgefonderie.org/presse-telecharger.php?l=fr&n=51a94296-ca78-11ee-8a2c-cae520ec4182>

MARS 24

25 au 28 | **Global Industrie** 
 Paris Nord Villepinte
www.global-industrie.com
 Salon mondial de l'industrie

Venez nous voir au village Forge
 Fonderie Hall 6; Stand n°6D13

AVRIL 24

04 | **Journée Technique**
 Valorisation des sables de fonderie :
 Où en est-on ?
 St-Dizier (52)
 Infos : g.kozubski@forgefonderie.org
 Organisé par FFF, ATF et CETIM

20 au 21 | **Metal AMS 2024**
 Cetim/ Senlis, Hauts-de-France
<https://www.cetim.fr/agenda/metal-ams-2024/>
 Symposium international français sur la Fabrication Additive Métallique

22 au 26 | **Foire de Hanovre**
 Hanovre (Allemagne)
www.hannovermesse.de
 Salon des technologies et de l'innovation du monde de l'industrie

MAI 24

29 au 30 | **Commission Forge CETIM**
 ENSAM de Metz
 29 mai : Workshop sur le jumeau numérique 14H00-18H00 + dîner en commun
 30 mai : Commission Forge 9H00-16H00

JUIN 24

04 au 06 | **CASTFORGE** 
 Stuttgart (Allemagne)
<https://www.messe-stuttgart.de/castforge/en/>
 Salon professionnel des pièces moulées et forgées avec transformation

Venez nous voir au village Forge
 Fonderie Hall 3; Stand n°3E16

JUIN 24

27 | **Commission Fonderie CETIM**
 Lieu à déterminer
 (réunion hybride
 présentiel/visio)

OCTOBRE 24

22 au 23 | **3rd EUROFORGE | conFAIR**
 Allianz MiCo
 Milano Convention Center,
 Milan, Italie
www.euroforge-confair.com
 This event bring together the best suppliers, the most innovative scientists and the leaders of the forging industry in order to discuss the threats and opportunities of the current industrial megatrends and their effects on the forging world.

FORMATIONS

Cetim Academy Catalogue 2024 Fondateurs 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,
 Référent 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>

SEPT.
30
—
OCT.
02

TISD 2024

40TH ANNIVERSARY
SEPT. 30 - OCT. 02
CANNES - MANDELIEU

40th
ANNIVERSARY

You're invited to celebrate
40 years of dedication to
material forming,
collaborations, and
pioneering solutions.



www.tisd.transvalor.com

 **TRANSVALOR**

I N T E R N A T I O N A L S I M U L A T I O N D A Y S

PRO-SME_n soutient les entreprises dans la mise en place d'un système de management de l'énergie.



POUR QUI ?

Les entreprises industrielles : PME, ETI, grande entreprise, filiale de groupe. Retrouvez toutes les conditions à remplir sur www.pro-smen.org



COMMENT ?

La demande de prime s'effectue en **2 étapes** : inscription dans le dispositif avant le 31 décembre 2025 ; puis, demande de prime une fois le certificat ISO 50001 obtenu.



COMBIEN ?

La prime est égale à 20 % des dépenses énergétiques annuelles des sites certifiés, plafonnée à 40 000 €.



www.pro-smen.org

ATEE - PRO-SME_n - PACTE INDUSTRIE
Tour Eve, CS 20067 - 92800 Puteaux tél. : 01 46 56 41 49 - mail : pro-smen@atee.fr

