



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/25190>

To cite this version :

Cyrille BAUDOUIN, David URIBE, Sylvain FLEURY - Jumeaux numériques : le projet JENII
cherche à innover dans la formation aux procédés de fabrication - Revue Forge et Fonderie n°37,
p.4-10 - 2024

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu





Cyrille BAUDOUIN,
Maître 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,
Maître 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.

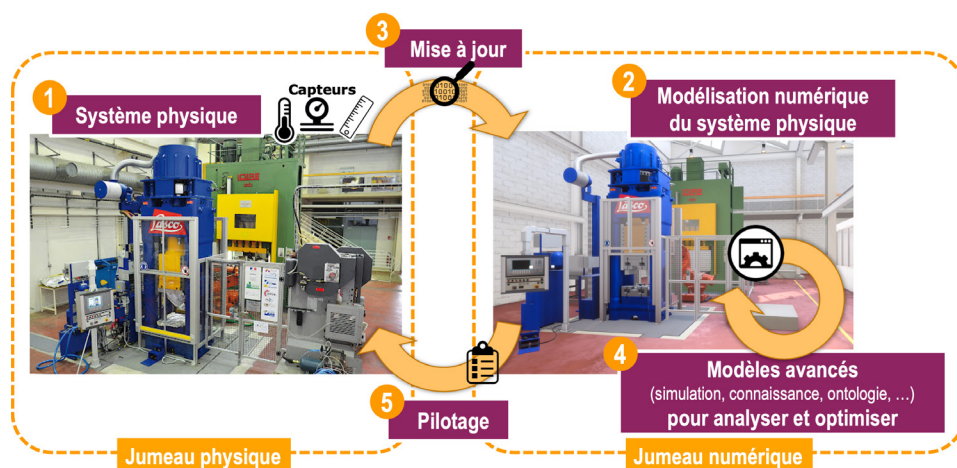


Figure 1 : Architecture d'un jumeau numérique pour la fabrication.

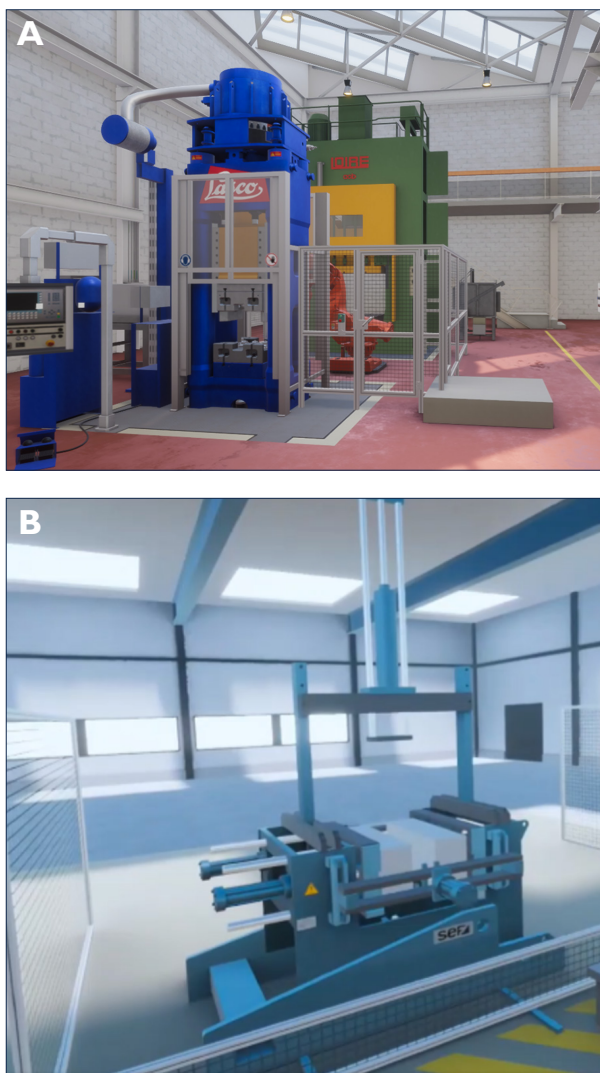


Figure 2 :
a) Environnement RV de la plateforme VULCAIN (Arts et Métiers Metz),
b) Environnement RV d'une coailleuse automatique (Arts et Métiers Angers)

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.

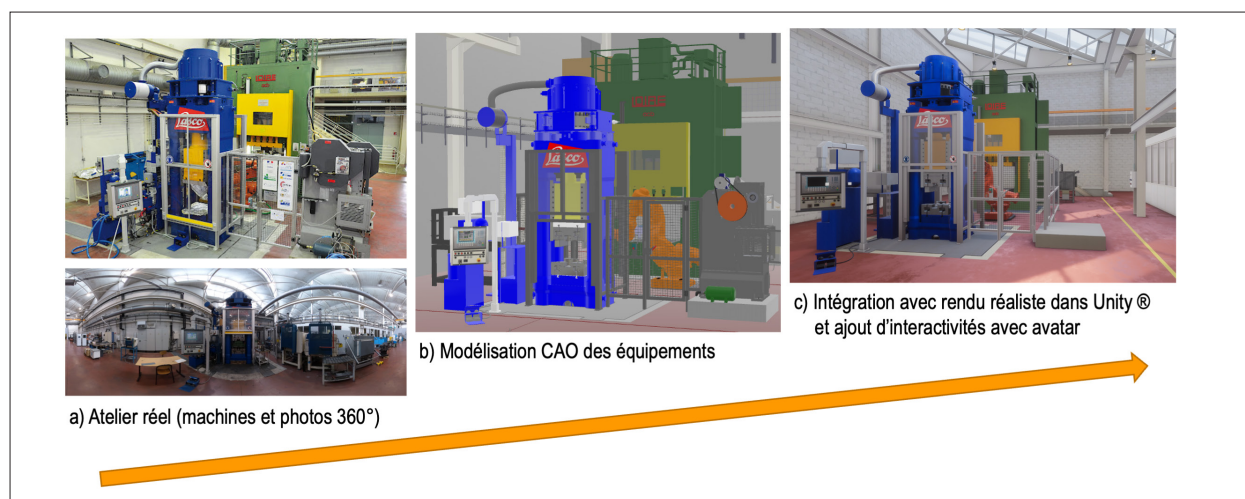


Figure 3 : Etapes de création d'un environnement de réalité virtuelle

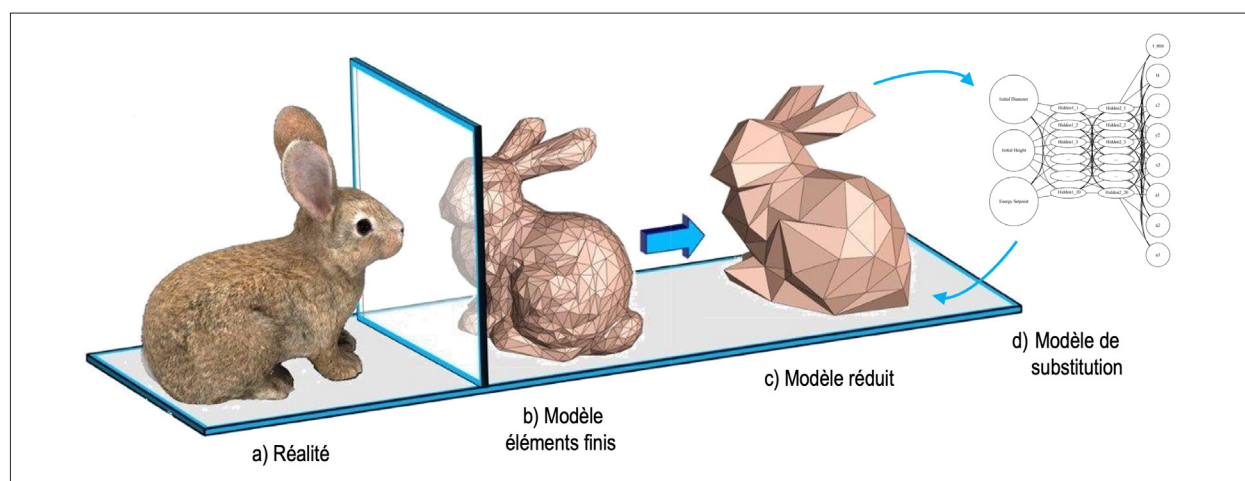


Figure 4 : Étapes de création d'un modèle de prédiction réactif pour un jeu numérique (Exemple sur la représentation d'un lapin). Edité de [3].

Méthodologie de développement des modèles de prédiction

Un aspect essentiel pour le développement des jeux 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 jeu numérique, ces modèles peuvent poser des défis en termes de réactivité, car les temps de calcul sont trop longs. Pour un apprenant 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'apprenant 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

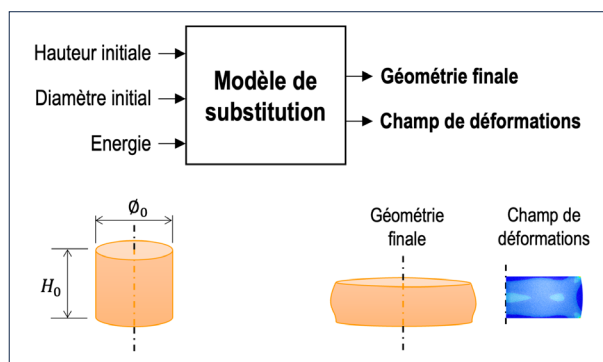


Figure 5 : Cas d'étude : compression uni-axiale d'un lopin avec prédiction de géométrie et du champ de déformation.

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].

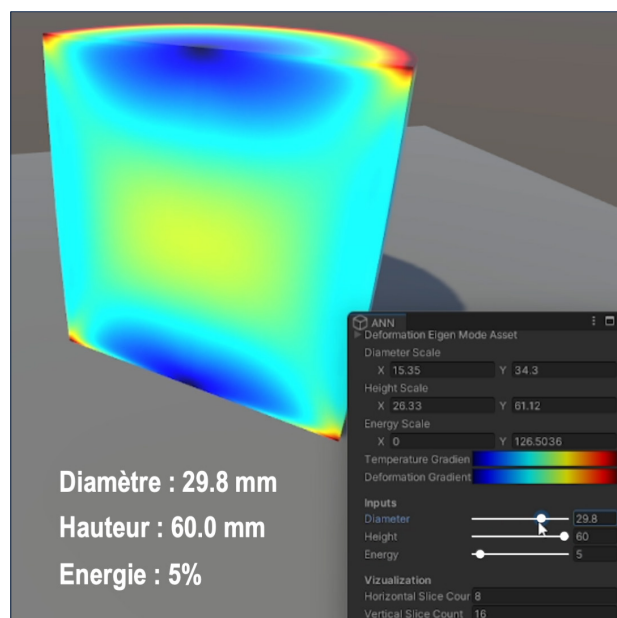
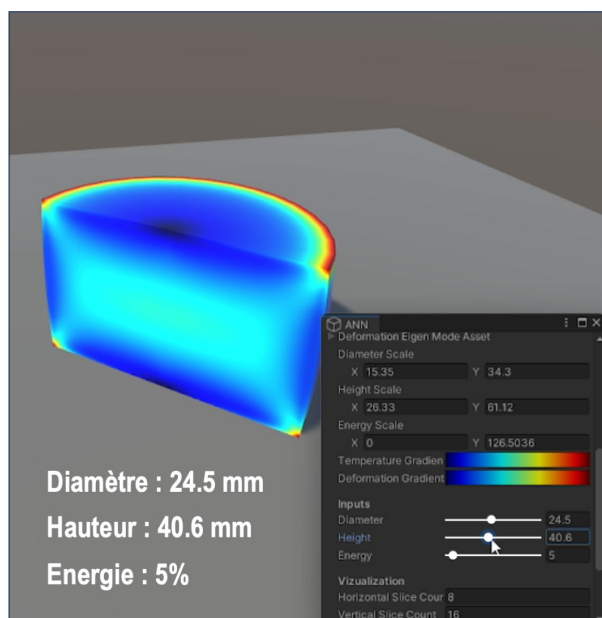


Figure 6 : Mise à jour en temps réel du champ de déformation lors de la modification des entrées par déplacement de curseurs.

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.

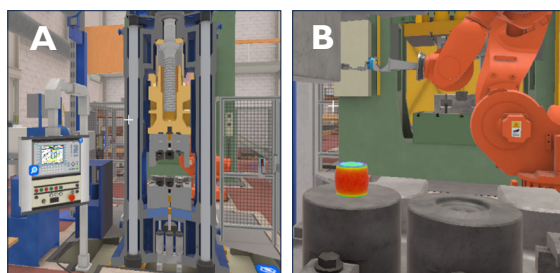


Figure 8 : Visualisation enrichie dans un environnement VR.
a) Cinématique interne de la presse à vis, b) Champ de températures appliqué au lopin

- **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.
- **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.

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. Freseemann, 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. Krumpke, 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>