

Formage à chaud : contribution de la simulation à l'étude de l'impact de la température sur l'endommagement des outillages HF-SPF

Améliorer le procédé hybride HF-SPF (Hot-Forming-SuperPlastic Forming) de mise en forme des outillages est possible via la simulation. Les résultats du projet de recherche collaboratif Sitcom mené à l'IRT Jules Verne, en partenariat avec Airbus, ACB et les Mines d'Albi, apporte quelques réponses.

Thomas Peret,
ingénieur R&T,
modélisation
et simulation,
IRT/Jules Verne

La diminution des coûts de fabrication des composants aéronautiques tout en garantissant la qualité est indispensable pour rester compétitif. Mais comment améliorer durablement ces procédés et faire les bons choix sans se risquer dans des campagnes expérimentales onéreuses ?

Cet article illustre l'intérêt de la simulation à travers une étude dans le cadre de l'amélioration continue du procédé de mise en forme HF-SPF. Il s'appuie sur les résultats du projet de recherche collaboratif Sitcom mené à l'IRT Jules Verne en partenariat avec Airbus, ACB et les Mines d'Albi.

FORMAGE À CHAUD : LA PROBLÉMATIQUE DE L'OUTILLAGE

Afin de mettre en forme des tôles métalliques on trouve majoritairement deux procédés pour le formage à chaud. En premier, on peut citer le Hot-Forming (HF) dans lequel une partie de l'outillage joue le rôle de poinçon et l'autre le rôle de matrice. La tôle est mise en forme par

contact, coincée entre les deux parties de l'outillage. Le second est le SuperPlastic Forming (SPF) qui utilise la déformation en fluage de la tôle par l'injection d'un gaz sous pression. Le HF est apprécié pour sa rapidité tandis que le SPF permet de garantir une géométrie de pièce complexe. Ils peuvent être combinés dans le procédé hybride HF-SPF et pallier à leurs inconvénients respectifs. Du fait que ces procédés requièrent tous d'être mis en œuvre à très haute température, la durée de vie des outillages est bien souvent un point critique de cette technologie. En effet, au cours des campagnes de production, des défauts (oxydation, fissuration par fatigue...) apparaissent à la surface et conduisent à des non-conformités ce qui impacte négativement l'aspect économique du procédé.

COMMENT TIRER PARTI DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE ?

La simulation numérique est le fait d'employer l'outil informatique pour prédire l'évolution ou l'état d'une

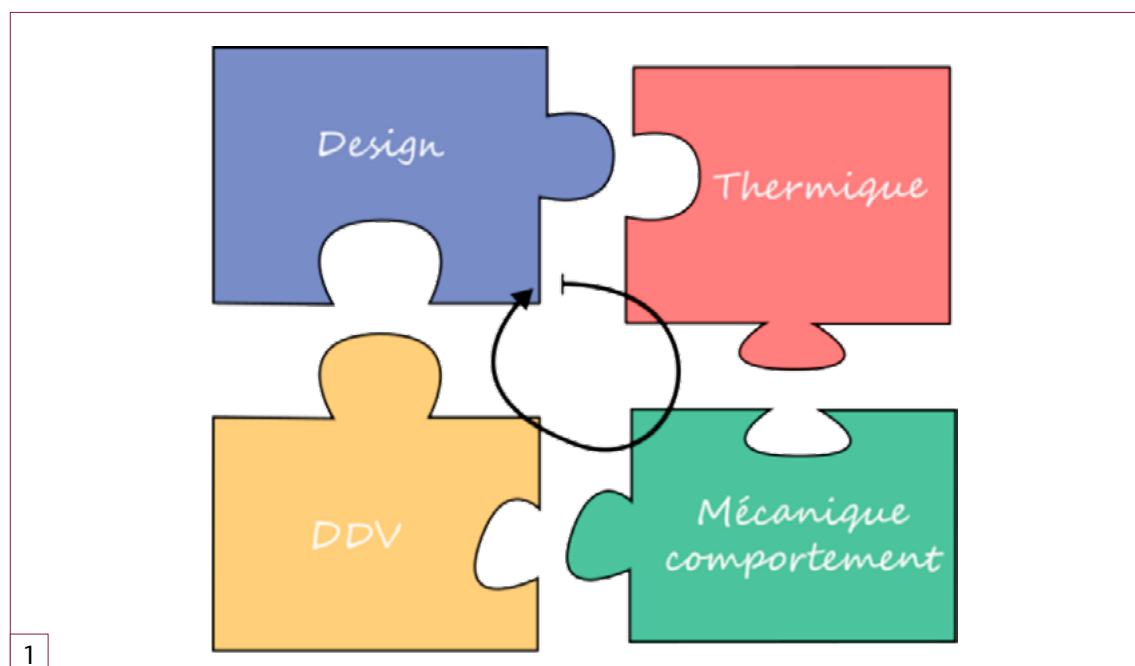


Figure 1.
Exemple de chaînage
numérique pour le
dimensionnement d'une
pièce de structure.

modélisation d'un système réel complexe. Ce n'est pas la réalité mais bien la prévision numérique d'un modèle théorique mathématique. Historiquement, la méthode des éléments finis a été mise en place pour des applications de résistance des matériaux ce qui explique la forte intégration de la simulation numérique dans les bureaux d'études structures. Le schéma de la **figure 1** présente un exemple de boucle numérique pour le dimensionnement d'une pièce de structure. À chaque étape la simulation numérique permet de tester le comportement de la pièce en conditions opérationnelles et d'indiquer si cette dernière répond bien au cahier des charges.

Avec l'explosion de la puissance de calcul, la simulation des phénomènes physiques complexes est devenue accessible et s'est démocratisée jusqu'à pénétrer dans le monde de la production où elle cherche encore parfois sa place. Il est important de garder à l'esprit que les modèles sont généralement spécifiques et que par conséquent ils ont des domaines de validité en dehors desquels leur utilisation n'est plus garantie. De plus, il est nécessaire de rappeler la dépendance de la qualité des prédictions aux données d'entrées.

La **figure 2** montre un exemple de flux d'entrées/sorties d'une simulation thermomécanique de mise en forme par le procédé HF.

Tous ces éléments font que la simulation numérique est à considérer comme un outil d'aide à la décision et à la compréhension des phénomènes physiques en support à l'expertise. Elle ne remplace pas mais complète l'expérience des opérateurs. Dans le domaine des procédés, où les campagnes expérimentales même petites ont souvent un coût prohibitif, la simulation se positionnera avantageusement en tant qu'outil exploratoire pour optimiser les paramètres et limiter le nombre d'essais sur l'outil de production. C'est en tout cas dans cette optique que la simulation numérique a été employée dans cette étude concernant l'effet de la température sur l'endommagement d'outillage HF-SPF.

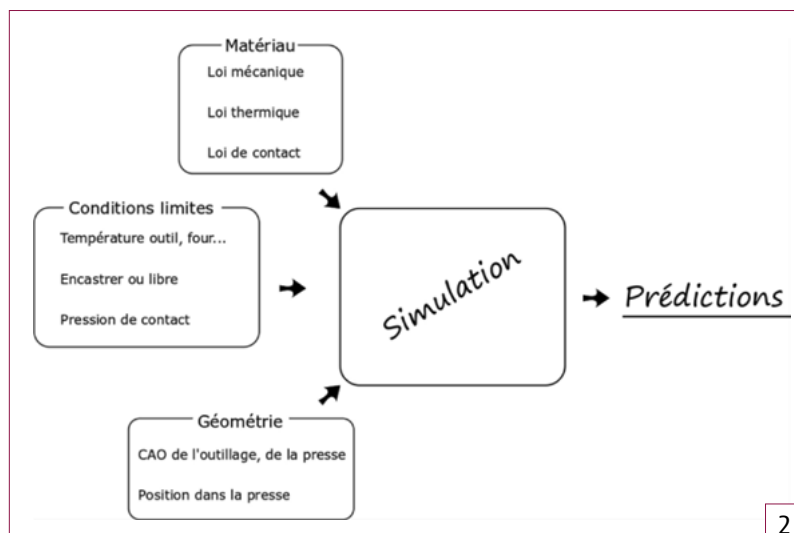
ÉLÉMENTS DE MODÉLISATION

Les prédictions qui sortent d'une simulation numérique sont à la fois dépendantes des données d'entrées mais également d'hypothèses faites pour modéliser le phénomène ou le système complexe que l'on cherche à étudier. La chaîne de calcul utilisée dans ces travaux est présentée schématiquement sur la **figure 3**.

Elle est constituée d'une simulation thermique qui est suivie d'un calcul mécanique post-traité pour déterminer la durée de vie en fatigue thermomécanique des outils. Ceci dans le but de procéder à des modifications du design de l'outil ou des modifications des paramètres procédés afin de maximiser la tenue mécanique de l'outillage.

MODÈLE NUMÉRIQUE DE L'OUTIL DE PRODUCTION

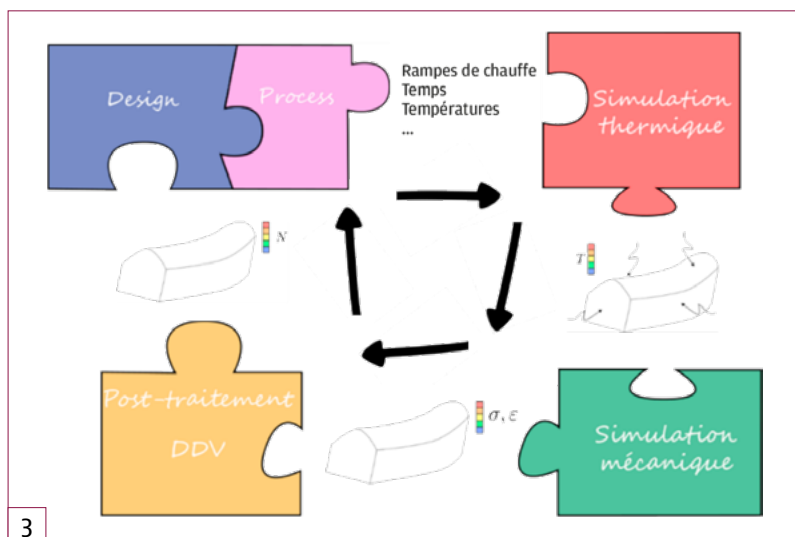
La température au sein des outillages est la donnée d'entrée du calcul mécanique préalable à la prédiction de la durée de vie de l'outillage. C'est donc un paramètre critique pour la qualité des prédictions numériques de



l'ensemble de la chaîne de calcul. Dans le cadre de cette étude, nous avons mis en place un double numérique de la presse de formage à chaud sur laquelle nous réalisons la partie expérimentale. Bien que cette approche du type jumeau numérique demande un travail de modélisation et de qualification important, elle permet dans un second temps de pouvoir simuler la production de pièce dans des conditions au plus proche du réel. Cet outil est également intéressant pour le fabricant, car cela lui permet de connaître l'impact d'une modification

Figure 2.

Exemple d'entrées d'une simulation de formage à chaud.



Équation 1.

Modèle viscoplastique de Chaboche.

$$\sigma = \mathbb{D} : (\varepsilon^t - \varepsilon^p)$$

$$F(\sigma, X) = (\sigma - X)_{eq} - R(p) \quad \dot{p} = \left\langle \frac{F}{K} \right\rangle^m$$

$$R(p) = R^\infty + (R^0 - R^\infty) \exp(-bp)$$

$$\dot{\varepsilon}^p = \dot{p} \mathbf{n} \quad \text{avec} \quad \mathbf{n} = \frac{3}{2} \frac{\bar{\sigma} - X}{(\sigma - X)_{eq}}$$

$$X_i = \frac{2}{3} C_i \alpha_i \quad \text{et} \quad \dot{\alpha}_i = \dot{\varepsilon}^p - \gamma_i \alpha_i \dot{p}$$

$$\text{avec} \quad A_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \bar{A} : \bar{A}} \quad \text{et} \quad \langle a \rangle = \max(0, a)$$

du système sur la production des pièces. L'outil de production du projet ainsi que son double numérique sont présentés sur la **figure 4**.

Les matériaux constitutifs de la presse ont été caractérisés et cette dernière a également été modifiée afin de recevoir des systèmes de mesure thermique présentés sur la **figure 5** (thermocouples et caméra thermique).

En complément, une étude de sensibilité du modèle numérique a été réalisée afin de garantir la qualité des champs de température prédits dans les outillages au cours du temps.

Modèle de comportement thermomécanique À haute température le comportement mécanique réel des aciers constitutifs des outillages est élasto-viscoplastique. Il est donc indispensable que le modèle de la loi de comportement soit suffisant pour simuler des phénomènes comme l'effet de vitesse sur les contraintes, leur relaxation ou bien le fluage de la matière. Il a été proposé dans la littérature de nombreux modèles plus ou moins complexes pour tenir compte de ces effets. Un des plus connus est celui dit de Chaboche dont les **équations sont rappelées ci-contre**.

Ce dernier n'est pas disponible en standard dans le logiciel de calcul par éléments finis Abaqus qui a été retenu dans le cadre du projet. Toutefois, moyennant la non prise en compte de l'écrouissage isotrope ($R(p)$) il est possible de se rapprocher de ce modèle de référence avec l'outil Abaqus. De plus, nous n'avons considéré dans cette étude qu'un unique écrouissage isotrope non-linéaire (X_i). Les paramètres du modèle ont été identifiés sur une base d'essais de traction réalisés à différentes températures et la cohérence du comportement en relaxation a été vérifiée numériquement.

RÉSULTATS

La **figure 6** présente une cartographie de durée de vie d'un outillage HF-SPF obtenue après avoir réalisé l'ensemble de la boucle de simulation. Le champ de température à un instant au cours de la mise en chauffe de l'outil est également présenté sur la **figure 6**. Il est possible de mettre en avant les zones de faiblesse et de visualiser les probables zones endommagées en fonction du nombre de campagnes de productions subies par l'outil. Grâce à ces résultats, il est possible de modifier le design afin de diminuer les effets liés à la géométrie. De plus, en poussant l'analyse des différents champs de résultats, il est possible de déterminer les sources probables de l'endommagement qui dans le scénario exposé est issu des forts gradients thermiques générés lors de la mise en chauffe. Sans exhaustivité, on peut citer la possibilité de tester, grâce à cet outil, les effets du positionnement de l'outillage dans la presse, de la durée d'une campagne de production, de la température de fabrication (et bien d'autres) sur la durée de vie des outils. Dans le cadre du projet, nous nous sommes dans un second temps intéressés à la recherche d'une rampe optimale pour la mise en chauffe qui minimiserait le temps de cette étape tout en garantissant l'intégrité de l'outillage. Pour ce faire, nous avons placé notre outil dans notre presse virtuelle et testé différentes vitesses de

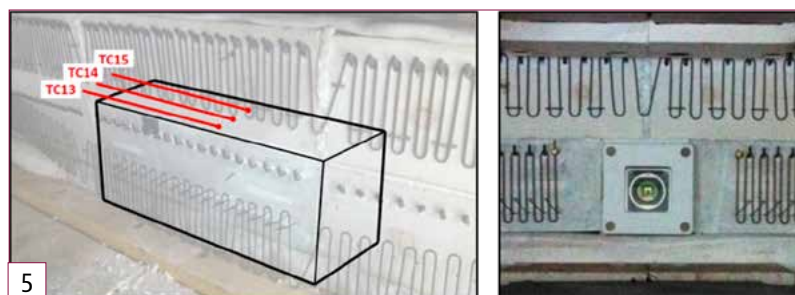
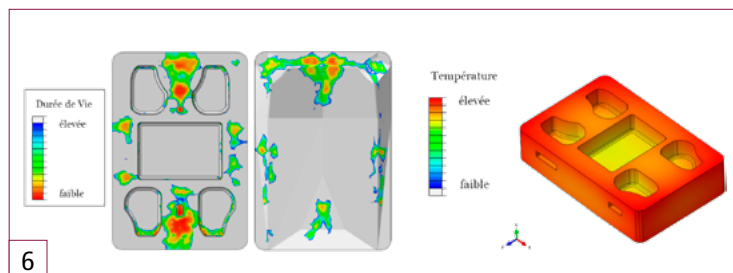


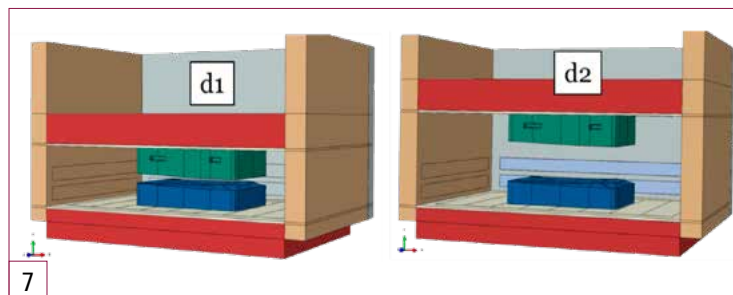
Figure 3. Chaîne de calcul dans le cadre du projet Sitcom.

Figure 4. Presse de formage à chaud et son jumeau numérique.

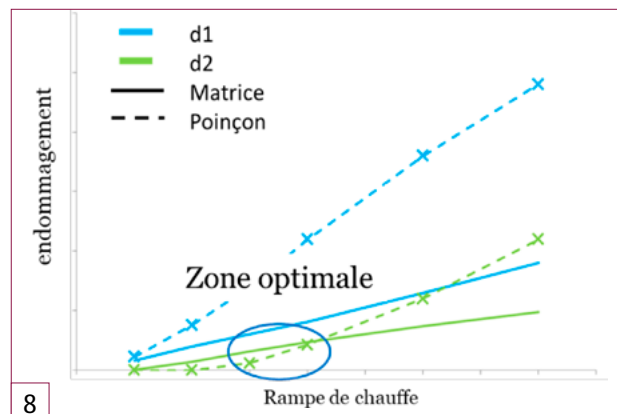
Figure 5. Instrumentation de la presse.



6



7



8

Figure 6. Cartographie de durée de vie et champ de température au cours de la mise en chauffe.

Figure 7. Positionnement des outils dans la presse virtuelle.

Figure 8. Évolution de l'endommagement avec la rampe de chauffe et de la disposition des outils.

chauffage ainsi que deux positions relatives du poinçon et de la matrice comme le montre l'image de la **figure 7**. Un plan d'expérience numérique a été réalisé pour les deux configurations et une dizaine de rampes de chauffage ont été testées. Une fonction indicatrice de l'endommagement dans les outils a été calculée pour l'ensemble des configurations. Cette dernière est utilisée pour comparer les différents cas afin de trouver un compromis optimal entre-temps de chauffe et santé matière dans les outillages. Les résultats sont présentés sur le graphe de la **figure 8**. Il est intéressant de noter l'évolution croissante de l'endommagement avec la vitesse de chauffage. Ce point est assez intuitif car une plus forte rampe de chauffage va engendrer un plus grand gradient thermique et donc des contraintes plus intenses mais il permet de vérifier le bon comportement du modèle.

Deuxièmement, il apparaît sur ce graphe, que l'impact de la position relative des deux outils est non négligeable. Les simulations montrent l'intérêt d'écarter les deux parties pour homogénéiser le chauffage ce qui réduit, ainsi, les contraintes d'origine thermique et par conséquent limite la dégradation prématurée des outils.

CONCLUSION

Bien que relativement récente, l'étude des procédés à l'aide de la simulation numérique semble indispensable de nos jours afin de pouvoir espérer une maîtrise plus fine des phénomènes physiques mis en jeu et une optimisation de ces derniers avec des budgets contraints. Toutefois, la simulation numérique n'est pas gratuite mais utilisée à bon escient elle permet de compléter l'expertise métier et de limiter les coûts des essais expérimentaux indispensables mais généralement exorbitants. Les apports de la simulation numérique dans le domaine des procédés vont, entre autres choses, de la réalisation de plans d'expérience numériques et l'étude d'influence pour la recherche des paramètres optimaux en passant par de la mise en situations non prévues

afin d'aider à prédire et comprendre les non-conformités en production. L'IRT Jules Verne souhaite remercier les partenaires du projet collaboratif Sitcom pour leurs expertises et support dans la réalisation des travaux que partiellement présentés dans cet article. ■