



HAL
open science

Modélisation et simulation numérique des procédés d'assemblage par soudage et de mise en forme par grandes déformations

Olivier Asserin, Khemais Saanouni

► **To cite this version:**

Olivier Asserin, Khemais Saanouni. Modélisation et simulation numérique des procédés d'assemblage par soudage et de mise en forme par grandes déformations. EDP Sciences. Livre Blanc de la Recherche en Mécanique, EDP Sciences, 2015, 978-2-7598-1683-5. 10.1051/978-2-7598-1683-5 . cea-04381811

HAL Id: cea-04381811

<https://cea.hal.science/cea-04381811>

Submitted on 9 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

3.14.10. Bibliographie

- [1] « Comprendre, concevoir, agir : les trois finalités de la simulation », É Klein, *Clés CEA* 47, hiver 2002–2003.
- [2] « Simulation-Based Engineering Science. Revolutionizing Engineering Science through Simulation », T. Oden et al., NSF report, Feb. 2006, Blue Ribbon Panel on Simulation-Based Engineering Science.

3.15. Modélisation et simulation numérique des procédés d'assemblage par soudage et de mise en forme par grandes déformations

3.15.1. Descriptif de la thématique

Comme dans de nombreux autres domaines des sciences de l'ingénieur, la simulation numérique joue un rôle central dans le développement des sciences mécaniques en général, et des procédés d'assemblage par soudage et de mise en forme tels que les procédés de forgeage, emboutissage, etc., par grandes déformations. Pour les métaux, par procédés de fabrication par grandes déformations nous entendons tous les procédés qui visent à obtenir une forme finale plus ou moins complexe à partir d'une forme simple qui peut être une tôle (formage de structures minces), un tube (hydroformage), une poutre (pliage...), un lopin massif (forge, estampage...), de la poudre métallique (fabrication additive), de métal en fusion (fonderie) ou en état semi-solide (thixoformage). Par soudage nous entendons les procédés qui consistent à réunir deux ou plusieurs pièces issues de la fabrication (qui seront les parties constitutives d'un assemblage) de manière à assurer la continuité de la matière entre les parties assemblées. Ces procédés sont le soudage à l'arc (TIG MIG/MAG), le soudage par faisceau haute densité d'énergie (laser, faisceaux d'électrons), le soudage par résistance, mais aussi le soudage par friction inertielle et par friction malaxage. Pour les matériaux non métalliques, cela peut concerner l'obtention de pièces complexes à partir d'ingrédients comme des fibres, des étoffes, etc., noyés dans une matrice en polymère. La simulation numérique a permis des progrès colossaux dans le domaine de l'optimisation des procédés de fabrication, non seulement pour obtenir des pièces conformes aux cahiers des charges, mais également pour réduire les coûts de la mise au point des procédés et leurs impacts sur l'environnement.

Dans ce domaine, la simulation numérique permet d'éviter progressivement l'usage des méthodes purement expérimentales très coûteuses d'essais/correction, au profit d'une utilisation courante de la simulation numérique communément appelée « soudage », « formage » ou « fabrication virtuelle ». Ainsi, l'ingénieur ne passe à la réalisation d'un essai physique du procédé que lorsque le procédé virtuel est satisfaisant. Si ce dernier est conforme aux cahiers des charges, une exploitation industrielle du procédé est alors lancée, sinon on revient à la simulation numérique en modifiant les données de la simulation, et ainsi de suite jusqu'à l'obtention d'un procédé conforme aux cahiers des charges.

Pour améliorer les performances de fabrication et d'assemblage virtuels, la méthodologie numérique doit reposer sur :

- **une modélisation à fort potentiel prédictif** sous forme d'équations de mouvement représentatives du procédé et des phénomènes physiques qui s'y développent. Il s'agit :
 - o d'EDP (équations différentielles aux dérivées partielles) et de leurs conditions initiales et aux limites appropriées, résultant des diverses lois de conservation dans le cadre de la mécanique des milieux continus (solides et fluides) en présence de multiples phénomènes : équilibre dynamique, transfert thermique, transport de masse, transformation de phase, électromagnétisme, écoulement de fluide... Ces équations dérivent en général de lois de conservation de la physique des milieux continus comme la conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie ou toute équation de bilan en relation avec les phénomènes physiques pris en compte ;
 - o d'équations d'évolution (équations différentielles ordinaires ou EDO) de tous les phénomènes physiques tenant compte des diverses interactions (ou couplages) et représentant, aussi finement que possible, les phénomènes physiques intrinsèques à chaque phénomène. Des modélisations mono- ou multiéchelles peuvent être utilisées ;
 - o d'équations de comportement des interfaces de contact entre outils et pièces ou entre diverses parties d'une même pièce. Il s'agit là de modèles de contact frottement aux interfaces de contact compte tenu des nombreux phénomènes physiques qui y siègent : phénomènes thermique, état de surface (rugosité), pression de contact, environnement de contact (lubrification)... ;
- **des méthodes numériques robustes** et adaptées à la nature des équations de mouvement pour la résolution globale du problème et à la nature des équations d'évolution des phénomènes dissipatifs. Des schémas adaptatifs de discrétisation de l'espace 3D par éléments finis (EF) ou par des méthodes sans maillage (*meshless*) sont indispensables pour la résolution des EDP. Pour la résolution des EDO localement en chaque point de quadrature, l'utilisation de schémas implicites est souvent incontournable. Pour les besoins de l'adaptation des discrétisations de l'espace et du temps, des méthodes appropriées doivent être développées concernant les estimateurs d'erreurs, la sélection de la taille pertinente du pas de l'espace ou du temps en chaque point et à chaque instant, la génération de la nouvelle discrétisation, le transfert des champs entre les discrétisations successives, la création de nouvelles frontières dues à des propagations de fissures...

Ces modélisations avancées et ces méthodes numériques performantes doivent être intégrées dans des plates-formes qui permettent de simuler numériquement toutes sortes de procédés de fabrication par grandes déformations ou d'assemblages par soudage. Ces plates-formes sont plus larges qu'un logiciel de calcul de structures et doivent en conséquence contenir plusieurs outils pour répondre

aux besoins de l'ingénieur, lui permettant d'obtenir des pièces conformes aux cahiers des charges tout en minimisant le coût global (coût de mise sur le marché, coût carbone...). Ces besoins industriels sont liés à des critères de performance et de sûreté ; on recherche principalement l'augmentation de la productivité et de la fiabilité du procédé, de l'assemblage et du produit. Finalement, il s'agit pour l'industriel d'atteindre un haut niveau de qualité avec un processus fiable pour un coût minimum, un temps de mise sur le marché minimum et un impact sur l'environnement conforme aux exigences des nouvelles normes.

Ces plates-formes numériques doivent permettre de combiner : (i) des modèles discrétisés, (ii) des méthodes numériques appropriées pour résoudre globalement des EDP et/ou pour intégrer localement des EDO, (iii) une base de données de résultats expérimentaux pour l'identification des paramètres et pour la validation, (iv) des outils d'optimisation multiobjectifs, d'aide à la décision, de visualisation et d'analyses, des outils d'exploration de l'espace de conception, de simplification de modèles (métamodèles) et d'analyse des incertitudes et de la sensibilité des modèles, tout en facilitant l'intégration de nouvelles fonctionnalités. Elles doivent offrir des solutions de communication/intégration performantes avec les systèmes de CFAO du marché.

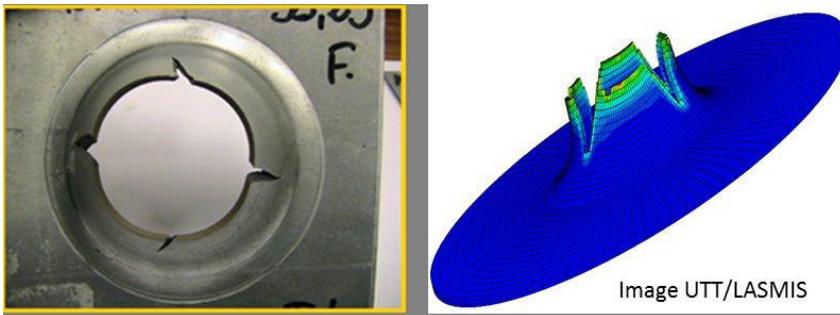


FIGURE 3.6. – Formatage virtuel.

3.15.2. État de l'art

Actuellement, de nombreux logiciels industriels dédiés à la simulation numérique des procédés de mise en forme sont proposés. Ils permettent de modéliser et de simuler des procédés 3D : mise en forme de structures métalliques minces ou massives par grandes déformations, usinage par enlèvement de copeaux ou de moulage par fonderie, etc. La grande majorité de ces logiciels sont basés sur la MEF et permettent des représentations 3D des procédés avec analyses adaptatives (voir par exemple [1, 2]). Quelques logiciels proposent même des résolutions par des méthodes sans maillage (*meshless*) (voir [3]). Cependant, les équations de mouvement et de comportement utilisés dans ces logiciels ne permettent pas une représentation fine des nombreux phénomènes physiques et de leurs interactions mutuelles.

La tendance qui se développe cette dernière décennie vise à proposer des logiciels basés sur des modélisations plus fines (voir [4]) qu'il convient d'encourager.

Pour aller dans ce sens, il faut s'appuyer sur les avancées récentes dans de nombreux domaines connexes :

- le domaine des sciences des matériaux qui propose des méthodes performantes d'observation 3D et de mesure de champs in situ pour mieux caractériser les phénomènes physiques et mesurer leurs évolutions ;
- le domaine de la mécanique des solides et des structures qui propose des formulations avancées dans le cadre de la mécanique des milieux continus généralisés, des modélisations multiphysiques et multiéchelles qui s'appuient sur des observations fines des mécanismes physiques des divers phénomènes ;
- le domaine de l'analyse numérique qui propose des méthodes numériques particulièrement bien adaptées aux fortes non-linéarités des problèmes de valeurs initiales et aux limites (PVIL), et des méthodes de simulation adaptatives performantes (voir le chapitre « Simulation numérique en mécanique des solides et des structures »). Malgré les grands progrès réalisés par les logiciels de simulation des procédés du marché, il reste encore des progrès à faire sur les méthodologies de formage ou d'assemblage virtuel complètes, prédictives et conviviales permettant, dans une même analyse adaptative, de :
 - simuler de manière itérative un procédé de fabrication jusqu'à l'obtention du procédé optimal validé ;
 - optimiser le procédé de fabrication par référence à de nombreux critères : obtenir une forme idéale (sans défauts), minimiser la quantité de matière utilisée, minimiser le nombre de passes (donc le nombre d'outillages) nécessaires à l'obtention de la pièce voulue, maximiser la durée de vie des outillages de fabrication... Tout cela contribue à la recherche d'une gamme de fabrication à faible coût (coût de revient, coût carbone...) ;
 - maximiser la durée de vie en service des pièces fabriquées, en fonction des champs mécaniques résiduels dans la pièce en fin de procédé de fabrication. Cela revient à tenir compte de l'histoire des procédés de fabrication des pièces et de son incidence sur leur tenue en service.

Concernant la simulation des distorsions de la structure et des contraintes résiduelles engendrées par l'opération de soudage [7, 8, 9, 11], menés activement depuis plus de trente ans, ces travaux ont acquis une bonne maturité et ont concerné une grande diversité de matériaux, de procédés, de configurations et de structures. Les limitations sont principalement d'ordre technologique pour les modèles de grande taille comme les multicomposants monopasses (turbomachine, automobile) comportant de l'ordre d'une centaine de soudures, les composants de grosse épaisseur multipasses (nucléaire) et les très grandes structures monopasses (aéronautique, naval, offshore) comportant plusieurs dizaines de mètres de soudure. Une autre limite se trouve dans la confrontation expérimentale en vue de la validation car la mesure des contraintes résiduelles reste difficile et très dépendante de la méthode.

Concernant la simulation du procédé de soudage [5, 6, 10], des modèles indirects dits de « source de chaleur apparente », représentant l'énergie apportée par le procédé dans la pièce, existent pour les principales technologies de soudage (à l'arc, laser, par résistance, hybride, friction, malaxage, etc.) ; des modèles multiphysiques

sont utilisés pour simuler plus finement le procédé directement à partir des paramètres de ce dernier. Lorsque le procédé est directement modélisé, il faut alors tenir compte des phénomènes physiques dans le bain de fusion et dans l'arc. L'état de l'art propose quelques approches qui sont principalement en 2D ou 2D axisymétrique, des calculs 3D émergent mais la validation demeure difficile par manque d'observables de la scène de soudage. En effet, il semble peu crédible de valider une simulation magnétohydrodynamique des écoulements dans le bain en fusion par une simple macrographie du cordon de soudure (coupe transverse du bain fondu solidifié).

Concernant les outils logiciels utilisables pour la simulation du soudage, il existe des logiciels dédiés à la simulation des effets thermométallurgiques et thermomécaniques (contraintes résiduelles, distorsions) du soudage tels que SYSWELD ou MORPHEO, mais les outils plus généralistes tels que Abaqus, ANSYS, Code-Aster, Cast3M sont aussi couramment utilisés. Pour la simulation des procédés de soudage à proprement parler des « codes multiphysiques » sont nécessaires ; on peut citer les outils dédiés DB-LASIM WProcess (sur la base de Cast3M [12]) ou bien l'outil généraliste COMSOL.

Cela donne une idée sur les perspectives des travaux à conduire par la communauté scientifique qui doit s'attaquer aux verrous scientifiques s'opposant encore à ces objectifs, tout en travaillant avec les ingénieurs pour intégrer ces nouveaux développements dans des plates-formes de formage virtuel à usage industriel. En effet, de plus en plus de modèles et de méthodes performants sont développés et « éprouvés » par les chercheurs mais restent, hélas, à l'état embryonnaire faute de moyens et d'intérêt pour les transférer dans des outils industriels performants et indispensables pour l'innovation technologique.

3.15.3. Les orientations scientifiques nécessaires en fonction des enjeux

Sur le plan de la modélisation avancée des procédés de fabrication et d'assemblage, il convient de :

- mettre plus de physique dans les modèles décrivant les évolutions des phénomènes dissipatifs en se basant soit sur des méthodes macroscopiques ou monoéchelle (approches inductives), soit sur des méthodes micro/mésomacro ou multiéchelles (approches déductives). L'objectif étant de mieux décrire les fortes hétérogénéités et anisotropies initiales et induites des matériaux en fonction de leur composition microstructurale ;
- s'orienter vers des schémas de modélisation qui dépassent le cadre de la mécanique des milieux continus matériellement simples (milieux de Cauchy) au profit des théories plus générales basées sur les milieux « discontinus » généralisés comme les milieux d'ordre supérieur (milieux micromorphiques), les milieux à gradients supérieurs ou les milieux non locaux. Les théories à

champs de phase permettent également de traiter élégamment les milieux fortement discontinus ;

- ces modélisations fines sont indispensables pour les matériaux déjà élaborés à partir de procédés métallurgiques préalables, mais sont également indispensables pour développer des structures fortement hétérogènes à architectures contrôlées comme les structures à base de matériaux composites ou des structures métalliques à base de déchets métalliques (copeaux...) recyclables. Ces structures sont directement obtenues à partir d'ingrédients appropriés pour lesquelles la simulation numérique est indispensable afin de les concevoir et les tester virtuellement avant de se lancer dans des investissements lourds de production.

Sur le plan des méthodes numériques, de nombreux points de blocage résistent encore et méritent un effort pour les résoudre :

- des formulations variationnelles pour des problèmes couplant un grand nombre de phénomènes physiques différents, ce qui rend complexe la nature mathématique du problème ;
- la discrétisation spatiale 3D par EF ou par méthodes sans maillage adaptatives en fonction des évolutions spatiales et temporelles des champs physiques sur des domaines à fortes variations géométriques. Les discrétisations spatiales par éléments finis compatibles avec la description CAO des pièces et outils impliqués dans le procédé sont très prometteuses car elles permettent une sorte de couplage entre la physique d'un problème et sa représentation CAO. Dans ce sens, les éléments isogéométriques connaissent actuellement un développement intense ;
- le traitement numérique des conditions de contact aux interfaces entre solides 3D sans négliger les modèles de frottement où des couplages forts entre des phénomènes mécaniques, thermiques, géométriques, métallurgiques et même chimiques sont souvent présents ;
- le développement de méthodes d'approximation nodales 3D des champs d'inconnues par EF ou par méthode sans maillage bien adaptées aux spécificités des équations de mouvement et aux inconnues nodales additionnelles ;
- les méthodes robustes de résolution des problèmes à grand nombre d'inconnues. Les techniques de décomposition de domaines, de parallélisation massive et de réduction de modèles sont sûrement d'un grand intérêt pour la résolution robuste et à moindre coût de ces problèmes.

La prise en compte du procédé de soudage dans la tenue en service des assemblages est maintenant bien admise. Les liens en aval avec d'autres disciplines comme la fatigue des assemblages soudés, le contrôle non destructif, la mécanique de l'endommagement et de la rupture sont à établir. Mais des liens en amont aussi sont à créer pour prendre en compte l'état résiduel avant soudage, par exemple l'usinage. Ainsi la maîtrise du procédé complet permettra une meilleure maîtrise des aléas, de limiter les mises au rebous et de réduire les matières premières utilisées.

Pour accroître la productivité, il est donc nécessaire de mieux comprendre les limitations dans la simulation des procédés et de les améliorer. Là où l'Homme de l'art a atteint ses limites, la modélisation directe (à partir des paramètres du soudeur), et *in extenso* du procédé de soudage, semble incontournable. Cette modélisation est bien souvent un problème couplé de type magnétohydrodynamique qui sort du seul cadre de la mécanique, mais qu'il est nécessaire d'entreprendre.

Outre les couplages multiphysiques forts évoqués ci-dessus qui sont coûteux et fastidieux à implémenter, des méthodologies complètes couplant plusieurs logiciels performants (couplage de codes) pour traiter des problèmes multiphysiques peuvent être d'une grande utilité industrielle. En effet, ces méthodologies à couplage faible peuvent permettre la résolution de problèmes multiphysiques à moindre coût et sont souvent préférées par les industriels aux méthodologies de couplage fort plus rigoureuses mais plus coûteuses.

3.15.4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever

De nombreux verrous scientifiques et technologiques entravent encore les développements de la simulation numérique des procédés de fabrication ou fabrication virtuelle :

- détermination des valeurs des nombreux paramètres intervenant dans les équations de mouvement et dans les modèles de comportement volumiques (dans le volume de la matière) ou surfaciques (aux interfaces de contact). Plus ces modèles sont « multiphysiques », plus ils font intervenir un grand nombre de paramètres dont les valeurs sont à déterminer avec précision faute de diminuer leur potentiel prédictif. Ainsi, la caractérisation de propriétés mécaniques et thermophysiques, de surcroît à haute température, la caractérisation en condition de soudage ou de fabrication des matériaux sont des enjeux importants. De plus, le développement d'instrumentations fines multiphysiques multicapteurs synchrones des essais avec des mesures sans contact doit être intensifié pour permettre la validation de modèles de plus en plus gros et la prise en compte des incertitudes, à tous les niveaux de la modélisation, expérimentales, théoriques, numériques et même d'utilisation ;
- démocratisation des codes pouvant faire du calcul distribué et développement des méthodes de réduction des modèles pour pouvoir réaliser des calculs multiphysiques à très grand nombre de degrés de liberté et faciliter la validation et la vérification des codes développés *via* des plans d'expériences numériques ;
- méthodes hybrides couplant la MEF (avec éventuellement des éléments isogéométriques) avec des méthodes sans maillage adaptées. De nombreux verrous liés à l'intégration numérique, à la prise en compte des conditions aux limites et au raccordement entre les méthodes d'approximation sont encore actifs ;

- couplage des codes spécialisés pour réaliser des simulations à couplage faible ou chaînage de codes spécialisés afin de réaliser des chaînes complètes de calculs multiphysiques ;
- construction de plates-formes numériques complètes à utilisation industrielle conviviales, multiphysiques, permettant de simuler un procédé avec des modèles à fort pouvoir prédictif et de l'optimiser vis-à-vis de nombreux critères liés à la résistance mécanique de la pièce et des outillages, et au coût global en moyens et en impact sur l'environnement.

3.15.5. Les laboratoires concernés

CEMEF Mines ParisTech, LASMIS UTT, Roberval UTC, ENSAM ParisTech Paris, Metz et Angers, FEMTO-ST Besançon, GeM Nantes, LMT Cachan, CdM Mines ParisTech, LTDS/ENISE de Saint-Étienne, LPMM Metz, LaMCoS INSA Lyon, INPG, URCA Reims, TEMPO Valenciennes, LAMSID EDF/CNRS, LIMATB UBS, ENSTA Palaiseau, LMGC IUT Nîmes, IJL Nancy, I2M Bordeaux, CEA, CETIM.

3.15.6. Les enjeux industriels et sociétaux par domaines d'application

Pour les industriels, le premier enjeu est de pouvoir concevoir ou choisir l'outillage qui va permettre d'obtenir la pièce voulue, en limitant le nombre d'essais. Le second enjeu est de rechercher la durée de vie la plus longue possible de cet outillage et de la pièce en service.

Il faut aussi être conscient que chaque procédé implique des phénomènes particuliers que les logiciels doivent être capables de simuler, par exemple l'écoulement de la matière dans les moules de plasturgie afin de concevoir des canaux garantissant une répartition homogène de la matière, les replis fréquents dans le forgeage d'une pièce, la limite de formabilité d'un matériau afin d'éviter le déchirement de la matière emboutie...

Pour ce faire, il semble nécessaire de :

- doter les industriels de plates-formes numériques pour la simulation des procédés de fabrication pour produire vite et à moindre coût des composants mécaniques performants afin d'augmenter leur compétitivité en proposant, plus vite que la concurrence, des produits à forte valeur ajoutée ;
- disposer, sur ces plates-formes, d'outils et d'expertises spécifiques aux différents procédés de fabrication ou d'assemblage, voire spécialiser celles-ci par type de procédé ;
- mettre en place des procédés « propres » qui contribuent aux économies d'énergies et de ressources, et réduisent l'impact sur l'environnement en optimisant par la simulation numérique les procédés de fabrication pour obtenir des pièces légères et résistantes sans gâcher les énergies et les ressources naturelles ;

- dynamiser l'industrie française de la mise en forme pour accroître sa compétitivité face à la concurrence internationale et préserver ainsi le marché du travail ;
- renforcer le rayonnement international de la communauté française de la mise en forme par des développements scientifiques nouveaux, pour être actifs en la matière et non de simples suiveurs des développements des autres nations.

3.15.7. Les liens et concertations nécessaires avec les autres disciplines

- Science des matériaux :
 - o métallurgie physique ;
- mécanique des solides et des structures :
 - o milieux continus généralisés,
 - o thermodynamique physique,
 - o modélisation des structures mécaniques,
 - o la mécanique de l'endommagement et de la rupture,
 - o la fatigue des assemblages soudés ;
- mécanique des fluides ;
- physique des plasmas ;
- le génie logiciel ;
- la métrologie ;
- mathématiques :
 - o algèbre et analyse tensorielle,
 - o EDO et EDP ;
- mathématiques appliquées :
 - o méthodes numériques pour la résolution des EDP et EDO,
 - o algorithmie géométrique,
 - o optimisation multiobjectifs, minimisation, méthodes inverses,
 - o réduction de modèles, incertitudes ;
- CAO / CFAO.

3.15.8. La position française par rapport à l'international

La communauté française de formage virtuel, bien que relativement petite, est très active et très présente sur la scène internationale. Elle est très impliquée dans l'organisation de nombreuses conférences internationales dédiées aux procédés de fabrication et de mise en forme en général, et à la simulation numérique de ces

procédés en particulier comme ESAFORM, NUMIFORM, NUMISHEET, IDDRG, ICTP, Metal Forming.

La communauté française est également très impliquée dans le journal lié à ESAFORM et intitulé *International Journal of Material Forming*, ISSN 1960-6206 (Elsevier), dont le poste de rédacteur en chef a été majoritairement assuré par un chercheur français.

Les chercheurs français dans le domaine de la modélisation et de la simulation numérique des procédés de fabrication et de mise en forme sont à l'origine de nombreux développements scientifiques majeurs dans le domaine : modèles de comportement avancés macro et micro/macro en transformations finies, méthodes numériques adaptées aux grandes déformations, maillage adaptatif des structures subissant de grands changements géométriques, développement de logiciels entiers dédiés à la simulation des procédés de mise en forme comme FORGE, PAM/STAMP, etc., ou de routine dans le cadre de plates-formes généralistes (ABAQUS, LS-DYNA, DEFORM...).

Malgré « le déclin » relatif de l'industrie française de transformation des matériaux ces dernières décennies, la collaboration entre les chercheurs et les industries de la mise en forme reste dynamique. Mais les développements les plus innovants ne sont pas suffisamment encouragés par la demande industrielle. Des efforts restent donc à faire dans ce domaine pour que les chercheurs français puissent obtenir le soutien financier nécessaire pour proposer de nouveaux développements scientifiques et technologiques indispensables à la création des outils de formage virtuel de demain.

Concernant le soudage : les principales équipes se situent en Allemagne, aux États-Unis au Japon, en Suède, mais la Chine et la Corée commencent à proposer des travaux concernant l'état de l'art. La France est à un très bon niveau mais accuse un léger retard sur la simulation 3D multi-physique du procédé et manque de publications marquantes à l'international. Elle peut profiter cependant de moyens expérimentaux de qualité, ainsi que d'un regain d'intérêt de l'industrie française pour la simulation numérique du soudage, notamment dans l'automobile, l'aéronautique et l'énergie.

3.15.9. Recommandations et perspectives

- Favoriser une véritable transversalité des recherches en renforçant les collaborations entre les communautés des sciences des matériaux, de mécanique des matériaux, de mécanique des solides et des structures, de mathématiques appliquées, de CAO/CFAO, etc., indispensable moteur à l'innovation scientifique et technologique.
- Chercher le bon équilibre entre développements scientifiques fondamentaux et développements applicatifs en favorisant le transfert des technologies innovantes au profit des industries de la mise en forme.
- Encourager la communauté industrielle de la mise en forme à utiliser des méthodologies innovantes de formage virtuel en mettant à sa disposition des plates-formes intégrant les derniers développements scientifiques.

- Donner les moyens humains et matériels aux chercheurs français pour qu'ils soient force de propositions innovantes dans le domaine de la simulation et de l'expérimentation.
- Entretenir et renforcer la présence de la communauté française sur la scène internationale par une participation accrue dans des comités et consortium européens et internationaux.

3.15.10. Bibliographie

- [1] Wagoner R.H., Chenot J.L., *Metal Forming Analysis*, Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- [2] Dixit P.M., Dixit U.S., *Modeling of Metal Forming and Machining Processes by Finite Element and Soft Computing Methods*, Springer-Verlag, London, 2008.
- [3] Chinesta F., Cescotto S., Cueto E., Lorong P., *La méthode des éléments naturels en calcul des structures et simulation des procédés*, Hermes, Paris, 2009.
- [4] Saanouni K., *Modélisation et simulation numériques en formage virtuel*, Hermes, Paris, 2012.
- [5] Cerjak H. et al., Editors, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena*, Verlag der technischen Universität Graz.
- [6] Cockcroft S., Maijer D., *Modeling of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes*, John Wiley & Sons, 2009.
- [7] Feng Z., *Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion*, Woodhead Publishing in Materials, CRC Press, 2005.
- [8] Goldak J., Akhlaghi M., *Computational Welding Mechanics*, Springer, 2005.
- [9] Lindgren L., *Computational Welding Mechanics : Thermomechanical and Microstructural Simulations*, Woodhead Publishing in Materials, Woodhead, 2007.
- [10] Radaj D., *Heat Effects of Welding : Temperature Field, Residual Stress, Distortion*, Springer, 1992.
- [11] Radaj D., *Welding Residual Stresses and Distortion : Calculation and Measurement*, English Edition, DVS-Verl., 2003.
- [12] Cast3M, CEA, DM2S, <http://www-cast3m.cea.fr/>.

3.16. Calcul haute performance et intensif en mécanique des fluides

3.16.1. Descriptif de la thématique

En sciences de l'ingénieur, la mécanique des fluides et l'énergétique jouent un rôle particulier en raison de l'étendue de leurs domaines d'application et des couplages nécessaires avec les disciplines voisines. La représentation mathématique de ces phénomènes se fait via les équations de Navier-Stokes, qui régissent le comportement des milieux fluides et traduisent des principes élémentaires de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. La résolution