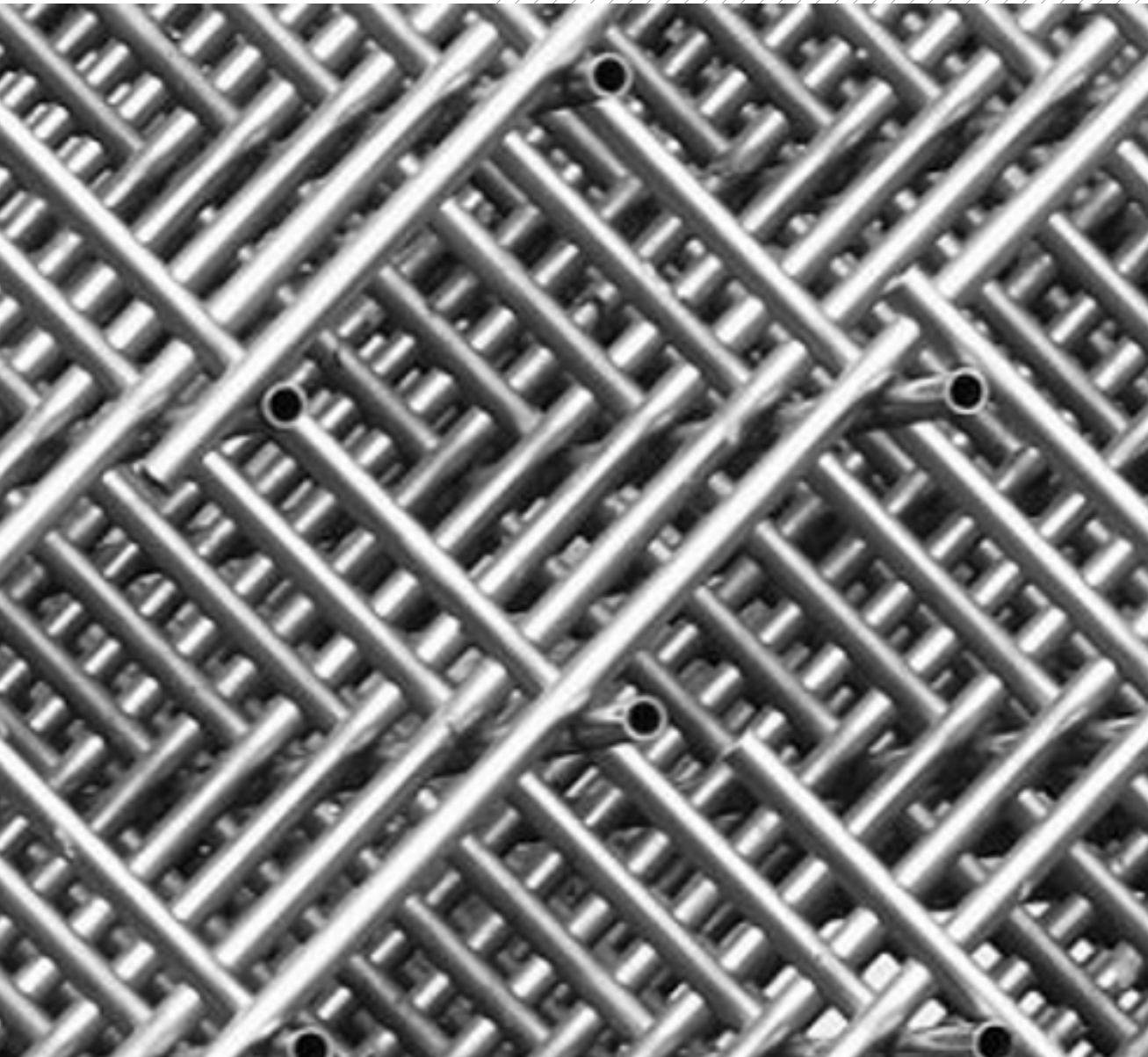




TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

LES FOCUS
TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR



MODÉLISER LA MICROSTRUCTURE DES MÉTAUX

avril / 2022

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
INTRODUCTION	3
LA MICROSTRUCTURE DES ALLIAGES MÉTALLIQUES, ENJEU IMPORTANT POUR L'INDUSTRIE MÉTALLURGIQUE	4
▪ MATÉRIAUX MÉTALLIQUES : QUELLES PROPRIÉTÉS POUR QUELLES APPLICATIONS ?	4
▪ LA DIVERSITÉ DES ALLIAGES MÉTALLIQUES : L'EXEMPLE DES ACIERS	6
▪ « DIVISER PAR 3 LE TEMPS DE DÉVELOPPEMENT DE NOUVEAUX MATÉRIAUX EN REMPLAÇANT DES EXPÉRIENCES PAR DES SIMULATIONS »	8
▪ LES USAGES DE L'ACIER DANS L'INDUSTRIE	12
POUR ALLER PLUS LOIN	14
▪ SIMULER L'INTERACTION FLUIDE-STRUCTURE	14
▪ « LES APPROCHES CLASSIQUE ET QUANTIQUE SONT COMPLÉMENTAIRES »	15
▪ LA FRANCE STRUCTURE LE SECTEUR DE L'IMPRESSION 3D MÉTAL	18
▪ L'IMPRESSION DE PIÈCES DÉTACHÉES CHERCHE SON MODÈLE	21
▪ LES SECRETS STRUCTURELS SOUS LA LOUPE DU NUMÉRIQUE	23
▪ LES THÈSES DU MOIS : MODÉLISATION DES MICROSTRUCTURES ET STRUCTURES DES MATÉRIAUX	24

INTRODUCTION

Depuis des siècles, l'étude de la structure des matériaux permet de développer des objets, notamment métalliques, toujours plus performants. En particulier en ce qui concerne les matériaux métalliques et leurs alliages, dont les propriétés secrètes ont été révélées, depuis que les forgerons les travaillent, bien avant notre ère. Au cours du temps, c'est l'échelle à laquelle on étudie ces matériaux qui a changé.

Ainsi, la résistance plus grande d'un alliage métallique en comparaison des métaux purs est un savoir ancien. Depuis l'avènement de l'ère industrielle, les nombreux secteurs producteurs ou utilisateurs de ces alliages, automobile, ferroviaire, aéronautique, aérospatial, nucléaire et tant d'autres cherchent continuellement à innover sur des critères donnés, et dans des conditions données. Car aujourd'hui, chaque pièce métallique utilisée dans l'industrie l'est selon des critères de contraintes très stricts : poids, température, pression, déformation. Ainsi, chaque pièce métallique est développée pour une utilisation extrêmement spécifique, qui requiert des caractéristiques précises.

Aussi, certains critères viennent aujourd'hui s'ajouter à la fiabilité et à la performance : la recyclabilité par exemple, la ressource disponible des métaux, l'empreinte écologique et financière de l'extraction... Dans ce contexte, le développement d'outils de modélisation pour simuler le comportement des matériaux dans des conditions de températures et de contraintes semblables à la réalité offre de nombreux atouts. Tout d'abord, ces modélisations permettent de comprendre le comportement de la matière à des échelles encore jamais vues. Les chercheurs de l'ONERA, interviewés pour ce dossier, travaillent sur des modélisations à l'échelle du micron, qui leur permettent d'étudier le comportement des matériaux à des échelles nouvelles. Même si nous ne sommes pas encore à l'échelle de l'atome, qui paraît aujourd'hui inaccessible, le facteur limitant restant la puissance de calcul nécessaire pour y parvenir.

LA MICROSTRUCTURE DES ALLIAGES MÉTALLIQUES, ENJEU IMPORTANT POUR L'INDUSTRIE MÉTALLURGIQUE

MATÉRIAUX MÉTALLIQUES : QUELLES PROPRIÉTÉS POUR QUELLES APPLICATIONS ?

Les matériaux métalliques sont utilisés par de nombreuses industries de pointe : automobile, aéronautique, aérospatial... leurs propriétés ductiles, élastiques et de résistance permettent de créer des alliages de plus en plus performants.

L'imaginaire collectif nous fait souvent penser, à tort, que les solides, contrairement aux gaz et aux liquides, sont inactifs. Au niveau atomique, les solides sont constitués d'**atomes empilés en structures cristallographiques**. Cette disposition permet de minimiser l'énergie engendrée par une telle structure et d'en augmenter la stabilité.

Cependant, cette structure peut présenter différentes variations spatiales, selon les atomes mis en jeu, et la procédure utilisée pour mettre en forme l'objet désiré. **En découlent des propriétés différentes, qui vont intéresser l'industrie.**

Combiner les propriétés des métaux grâce aux alliages

En ce qui concerne les **matériaux métalliques industriels**, ces derniers sont souvent utilisés sous forme d'alliages, pour augmenter leur résistance. En effet, le fait de **mélanger deux métaux permet de combiner leurs propriétés**, et d'améliorer la résistance de l'alliage résultant, par rapport à l'usage de métaux purs.

Historiquement, trois familles d'alliages métalliques sont très utilisées dans l'industrie :

- les **alliages à base de fer** ;
- les **alliages à base de cuivre** ;
- les **alliages à base d'aluminium**.

Mais des alliages innovants sont également obtenus à partir du mélange d'un métal, avec un autre matériau non métallique, comme le carbone par exemple. Pour pouvoir fabriquer un alliage, il est indispensable que les deux métaux

soient miscibles entre eux, ce qui n'est jamais le cas de manière totale : ainsi, les alliages ne sont pas composés de deux métaux en quantités égales : l'évolution des proportions de l'un ou de l'autre va modifier le comportement physique du matériau, et ses propriétés.

Trouver la formule magique pour développer des alliages innovants

Bien sûr, les alliages aujourd'hui développés doivent répondre à des critères extrêmement stricts, qui vont être **définis selon la fonction de l'objet dont sera composé le matériau**.

Pour les secteurs comme l'aéronautique, l'aérospatial ou l'automobile par exemple, les enjeux sont importants : résistance des matériaux aux chocs, aux températures, poids, recyclabilité, coût, prix des ressources. Tous ces facteurs sont pris en compte, également dans d'autres secteurs industriels, testés et améliorés afin de développer de nouveaux alliages, en faisant varier leur **composition ou leur température de refroidissement, par exemple**.

La plupart des métaux sont ductiles, c'est-à-dire qu'ils ont la capacité de se déformer de manière élastique. Cela confère aux industriels la possibilité de développer des objets complexes, utilisant des procédés de mise en forme extrêmement variés : extrusion, laminage, forgeage, matriçage, tréfilage... Cette propriété est en grande partie responsable du succès industriel des métaux, depuis le début de l'ère industrielle.

Aussi, les matériaux métalliques sont très **tenaces**. Concrètement, l'énergie nécessaire pour aboutir au déchirement de la structure est très importante. Cette propriété a depuis longtemps fait des métaux la base des alliages développés

pour les objets métalliques subissant des contraintes continues ou répétées.

Ces objets sont très nombreux dans les industries aéronautiques et automobiles par exemple.

Dans le secteur de l'aviation par exemple, les très nombreux éléments composant un réacteur par exemple, sont soumis à des contraintes mécaniques et de températures très importantes. De nombreux alliages sont développés et testés pour intégrer à la structure des réacteurs des matériaux toujours plus performants dans le temps.

La mise en place d'outils de modélisation de la microstructure des matériaux permet aujourd'hui d'observer et de simuler le comportement de ces alliages à des échelles de l'ordre du micron.

Ces outils de modélisation, rouages essentiels pour développer des programmes de recherches et développement moins onéreux - en remplaçant une partie des tests expérimentaux par de la simulation - sont aujourd'hui un enjeu de compétitivité important. Et une voie pour développer des matériaux toujours plus performants et fiables.

20/04/2022

LA DIVERSITÉ DES ALLIAGES MÉTALLIQUES : L'EXEMPLE DES ACIERS

Les alliages métalliques offrent une grande diversité. Leurs propriétés varient, selon leur composition et leur mode de production. Exemple avec l'acier, l'alliage le plus utilisé par l'industrie.

De très nombreux secteurs industriels utilisent des **alliages métalliques** pour fabriquer leurs produits, quels qu'ils soient. L'étude de la microstructure des alliages métalliques et leur **modélisation** permettent d'améliorer les propriétés de ces derniers en maîtrisant mieux leur comportement sous contrainte. Ces améliorations continues des performances des matériaux métalliques offrent aux industriels la possibilité d'opter pour un matériau plutôt qu'un autre, selon ses propriétés, pour fabriquer des objets industriels.

Parmi les alliages utilisés dans l'industrie, les **aciers** sont historiquement parmi les plus répandus. La France produit d'ailleurs de l'acier, entre **14 et 16 millions de tonnes par an** depuis 2010. Malgré des **difficultés en 2016 et 2017** en raison des prix propulsés à la baisse par le marché chinois - qui produit 50% de l'acier mondial -, l'hexagone a vu sa production repartir à la hausse depuis, pour revenir relativement rapidement au niveau de 2015.

Les aciers, stars des alliages

Les aciers sont les alliages métalliques les plus utilisés dans l'industrie. Ils offrent une **variété de matériaux très diverse** : Ferraille, acier galvanisé, aciers inoxydables... ces alliages, très utilisés dans les industries automobiles, ferroviaires ou aéronautiques, voient leurs propriétés évoluer selon leur composition et leurs **conditions de fabrication**.

Un acier est généralement constitué en majorité de fer, de carbone en faible quantité - moins de 2% -, et d'autres matériaux métalliques. La faible quantité de carbone présente

dans les aciers explique que **ces derniers sont considérés comme des alliages métalliques**. La composition chimique des aciers permet de les distinguer en trois catégories.

Tout d'abord, les aciers non alliés, sont des aciers pour lesquels les teneurs en un certain nombre d'éléments ne dépassent pas les **valeurs fixées par la norme NF EN 10020**. Viennent ensuite les aciers inoxydables, qui contiennent au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2% de carbone. La dernière catégorie regroupe les autres aciers alliés qui ne répondent pas aux critères des deux premières catégories citées.

Dans le domaine des aciers non alliés, on distingue les aciers de qualité répondant à des exigences spécifiques de ténacité, de formabilité ou de grosseur de grain : aciers magnétiques, aciers de décolletage par exemple. À côté, les aciers spéciaux non alliés, présentant une plus grande pureté, et qui présentent des propriétés leur permettant de répondre à des contraintes sévères.

Les méthodes de production

Il existe deux méthodes permettant de produire des aciers : les **hauts fourneaux** et les fours à arc électrique. Avec des **hauts fourneaux**, on réduit le carbone dans un convertisseur, en présence de minerai de fer. La fonte obtenue est oxydée sélectivement pour éliminer les composants indésirables, puis le mélange est au choix coulé, laminé pour obtenir des produits en acier. Ces aciers pourront être constitutifs d'objets comme les barres, les tôles ou les tuyaux.

La seconde méthode permet de produire, grâce à un arc électrique, de l'acier de recyclage et de l'acier **électrique** (acier avec des propriétés électriques). L'acier est fondu

grâce à l'électricité circulant **entre le matériau chargé et les électrodes**. Cette méthode produit des quantités relativement faibles d'un acier connu pour ses propriétés de durabilité. Si la méthode par arc électrique ne permet pas de produire de l'acier en grandes quantités, elle est un outil de plus en plus utilisé pour sa **capacité à traiter les déchets d'acier, et donc de les recycler**.

Ainsi, la composition exacte de l'acier, mais également son mode de fabrication, vont déterminer la spécificité de ses performances. La modélisation de ces facteurs permet de développer des produits à base d'acier dont les paramètres de fonctionnement sont de mieux en mieux maîtrisés.

26/04/2022

« DIVISER PAR 3 LE TEMPS DE DÉVELOPPEMENT DE NOUVEAUX MATÉRIAUX EN REMPLAÇANT DES EXPÉRIENCES PAR DES SIMULATIONS »

L'étude de la microstructure des matériaux métalliques et leur modélisation constituent une thématique de recherche prépondérante pour mieux comprendre le comportement des matériaux à l'échelle micronique.

Alphonse Finel (Département Matériaux et Structures, ONERA et Laboratoire d'Etude des Microstructures, ONERA-CNRS) et Mikael Perrut (Département Matériaux et Structures, ONERA) sont chercheurs à l'ONERA dans le domaine des matériaux et structures. Responsables au sein de ce domaine de la thématique « Physique des comportements : de l'atome à la microstructure », les deux chercheurs développent des modèles de simulation du comportement de matériaux métalliques subissant des contraintes mécaniques et de températures, afin de mieux comprendre la détérioration de leurs propriétés avec le temps. Leur but est de simuler et de modéliser ces phénomènes le plus finement possible, afin de développer des alliages plus performants, et de limiter les expérimentations, au profit de la modélisation, pour mieux connaître le comportement des matériaux sous contraintes.

Alphonse Finel et Mikael Perrut ont expliqué aux Techniques de l'Ingénieur comment ces modélisations sont développées, et ce qu'elles nous apprennent sur le comportement des matériaux métalliques à l'échelle du micron.

Techniques de l'Ingénieur : Présentez-nous les recherches sur lesquelles vous travaillez au sein de

l'ONERA ?

Alphonse Finel et Mikael Perrut : Nos recherches portent sur la modélisation, pour comprendre et prédire le comportement de matériaux métalliques qui résistent à suffisamment haute température et avec des contraintes mécaniques importantes.

Le but étant de recréer les conditions d'utilisation de pièces mécaniques, comme celles subies par les matériaux dans les parties les plus chaudes des moteurs d'avions. Nous travaillons donc sur des matériaux métalliques ayant un comportement maîtrisé sous haute température et sous contrainte. Pour maîtriser le vieillissement et le comportement de ces matériaux à haute température, il faut comprendre comment le matériau se comporte à une échelle très réduite, de l'ordre du micron.

Quelle est la structure de ces matériaux, qui sont tous des alliages métalliques ?

Ces matériaux sont multi-constitués (constitués de plusieurs types d'atomes), au minimum de 5 ou 6 métaux différents. Si on prend l'exemple des superalliages à base de nickel, ils sont majoritairement constitués de nickel et contiennent également de l'aluminium ainsi que d'autres métaux, parfois dans des proportions très faibles.

Ces matériaux sont également multiphasés : la distribution locale des différentes espèces atomiques n'est pas homogène. Cela crée une hétérogénéité spatiale, qui est une

des composantes principales nous permettant de contrôler les propriétés mécaniques du matériau. C'est cette hétérogénéité que nous cherchons à modéliser, à générer.

Comment vous y prenez-vous ?

Pour illustrer notre démarche, prenons l'exemple d'un superalliage à base de nickel, dont voici ci-dessous l'image obtenue par microscopie électronique, à l'échelle du micron :

Les zones noires et blanches représentent les hétérogénéités du matériau. Les phases noires sont plus pauvres en nickel et plus riches en aluminium, la phase blanche, visible sous forme de ligne, est quant à elle riche en nickel et pauvre en aluminium.

Que dit cette hétérogénéité quant au comportement du matériau en question ?

Cette hétérogénéité, visible sur l'image, est souhaitée, car elle assure au matériau résistance et ductilité. Le matériau sur cette image est utilisé pour fabriquer des **aubes de turbines** destinées à équiper des avions. Il est donc soumis à des conditions extrêmes de température et de sollicitations mécaniques lors de son fonctionnement. Sur cette image, le matériau n'a pas encore été soumis à ces conditions.

Ces contraintes déforment les matériaux. Physiquement, cette déformation s'opère par le glissement d'objets qu'on appelle des dislocations. Quand on applique une pression sur un matériau, les dislocations qu'il contient vont se mettre à glisser : c'est ce phénomène qui va déformer le matériau.

Pour limiter la **déformation**, il va falloir mettre des obstacles sur le chemin que prend cette dislocation au sein du matériau. Ces obstacles sont les interfaces entre les différentes phases du matériau, en noir et blanc sur l'image. Ces dislocations, qui vont pour l'essentiel passer par les zones blanches visibles sur l'image, ont donc un potentiel de propagation réduit, du fait de la prééminence des

zones noires. Ces nombreux obstacles aux dislocations rendent donc le matériau plus résistant mécaniquement, il se déforme moins.

Pourquoi dans ce cas ne pas développer des matériaux constitués uniquement de cette phase noire ?

Le matériau résultant serait fragile. Bloquer l'ensemble des dislocations revient à créer très rapidement des fissures dans le matériau. Ici, la présence de deux phases, dont l'une ductile, permet de moduler la ductilité globale, les interfaces entre les phases permettant de limiter le glissement des dislocations. La ductilité est en fait une propriété qu'il faut maîtriser, car un matériau trop ductile, qui se déforme trop, ne conviendrait pas non plus pour l'usage industriel que l'on en fait. Il est nécessaire de trouver un compromis, un équilibre, entre résistance et ductilité.

Comment va évoluer la microstructure de ce matériau sous contraintes ?

Sous l'action des températures et de la contrainte, les atomes composant la structure du matériau vue dans l'image ci-dessus - composant l'aube de turbine d'un avion - vont bouger.

La microstructure (image n°1) que nous voyons à l'image, qui est celle souhaitée pour résister aux contraintes, va changer et être dégradée. Et si on laisse cette structure se dégrader suffisamment, le matériau va acquérir la structure que l'on peut observer sur cette autre image obtenue (image ,°2, ci-dessous) par microscopie électronique : la distribution des phases a complètement changé. Et les propriétés mécaniques du matériau également.

Cette évolution de la microstructure du matériau est en soi inévitable et irréversible, au vu des contraintes qu'il subit. Ce qui est possible par contre, c'est de ralentir ce processus, de le freiner. Pour faire cela, il nous faut donc comprendre quels sont les mécanismes et les forces motrices qui font passer la microstructure du matériau de la première à la seconde image.

C'est cette évolution que vous cherchez à modéliser ?

Exactement. La démarche de l'ONERA est d'essayer de décrire les équations cinétiques que les atomes suivent quand la température est haute et que l'on impose des contraintes au matériau. Le problème qui se pose alors est la quantité astronomique d'atomes en jeu. Il est impossible de modéliser cela. C'est pour cela que nous avons décidé de travailler directement à l'échelle du micron (c'est l'échelle utilisée pour les images illustrant cet article), en oubliant les atomes et les équations qui les gèrent. Il nous faut donc inventer de nouvelles équations, les développer ; c'est la finalité des recherches que nous menons sur ce thème.

Pour faire cela, nous allons prendre en compte non pas des atomes de manière individuelle mais par paquets, en étudiant des champs de concentration de chacune des espèces atomiques, et d'autres champs, qui décrivent comment les atomes sont rangés les uns par rapports aux autres, mais sans pour autant considérer explicitement ces atomes. Notre but va être de développer des méthodes pour trouver les équations décrivant le comportement de ces champs, directement à l'échelle mésoscopique.

Quel est l'aboutissement de ce travail ?

Nous avons mis au point une modélisation, appelée PFM (Phase Field Method, méthode des champs de phase). C'est l'un des outils que nous développons à l'Onera.

La modélisation en 3D représentée ci-dessous est celle du matériau que l'on peut observer sur l'image 1. Ce matériau, constituant l'aube de turbine, est ici modélisé avant l'application des contraintes :

Les deux grands ingrédients de la physique utilisés pour cette modélisation sont la thermodynamique - réversible et irréversible -, et les phénomènes de déformations élastiques. Cette déformation élastique est due aux variations spatiales des champs de concentration qui, associées aux différences de volume atomique, vont déformer la matrice du matériau sur une très longue portée. Aussi la déforma-

tion est anisotrope, l'amplitude de la déformation va donc être différente selon la direction ou elle se propage.

Nous avons ajouté dans notre modèle cette déformation, qui permet d'obtenir l'image 3D présentée ici.

Les deux avantages de cette modélisation sont tout d'abord la possibilité de voir l'évolution de la structure au cours du temps, ce qui n'était pas possible auparavant. Second avantage, la possibilité d'ajouter ou d'enlever certaines forces motrices à notre simulation, pour voir quels sont leurs effets relatifs sur la structure du matériau et sa déformation.

Qu'est ce qui fait que la microstructure est aussi perturbée sur le long terme, et que l'on passe d'un quadrillage régulier à une structure totalement différente ?

Ce que l'on constate, c'est que l'une des forces motrices importantes opérant sur la microstructure des matériaux, à haute température, est le déplacement des dislocations. Ces dislocations vont avoir un mouvement limité - grâce à la structure en quadrillage - qui va entraîner une redistribution des atomes dans la structure. Nous avons ajouté à notre modèle cette plasticité, qui nous a permis d'aboutir à ce type de modélisation, figurant la structure du matériau après contraintes :

En comparant à l'image obtenue par microscopie électronique (image 2), on voit que les forces que nous avons prises en compte sont bien celles qui déforment la structure. Bien que ce modèle doit être encore amélioré, il montre que les phénomènes qui gouvernent le vieillissement des matériaux sont aujourd'hui identifiés.

Une des applications qui découlerait de ces modèles est la prédiction de la composition exacte des alliages à développer pour obtenir le comportement attendu du matériau en question, en remplaçant, en partie, l'expérience par la modélisation.

Cela dit, il n'est pas question de substituer l'expérimentation par la modélisation. Notre objectif, à l'ONERA, est de diviser par 2 ou 3 le temps de développement de nouveaux

matériaux, en diminuant le nombre d'expérimentations grâce aux simulations. Sans oublier que la validation expérimentale reste une étape fondamentale de la recherche.

22/04/2022

Quelle est votre stratégie pour améliorer encore ces modélisations ?

Aujourd'hui, nous développons d'autres démarches, en utilisant des bases de données et du machine learning, pour ajouter les possibilités offertes par les techniques d'intelligence artificielle (IA) à nos modèles. Cela permettra d'alimenter et d'accélérer le développement de nos modèles.

L'IA nous permet d'accélérer de plusieurs ordres de grandeurs nos calculs, mais aussi de coupler les échelles. C'est un point fondamental, puisque le modèle que nous venons de présenter s'applique à une échelle qui reste très petite par rapport à la taille des pièces industrielles dont nous voulons connaître le comportement. Les développements actuels extrêmement rapides de l'IA et du machine learning vont nous permettre de faire nos simulations à différents endroits de la pièce mécanique que nous voulons étudier. C'est ce changement d'échelle - de l'échelle micronique à l'échelle centimétrique - que les techniques d'IA vont nous permettre d'opérer, dans les années qui viennent, et permettre ainsi d'opérer une rupture dans nos capacités de prédiction à l'échelle des pièces industrielles utilisées dans les avions ou les hélicoptères.

Propos recueillis par Pierre Thouverez

Source des illustrations utilisées dans cet article :

- Gaubert, Modélisation des effets de l'évolution microstructurale sur le comportement mécanique du superalliage monocristallin AM1. Ph.D. Thesis, Mines ParisTech (2009).
- M. Cottura, Y. Le Bouar, A. Finel, B. Appolaire, K. Ammar, S. Forest, A phase field model incorporating strain gradient viscoplasticity : Application to rafting in Ni-base superalloys, J. Mech. Phys. Solids, 60 (2012).

Crédit image de une : ONERA

(1) Échelle de grandeurs entre l'échelle macroscopique et l'échelle nanométrique

LES USAGES DE L'ACIER DANS L'INDUSTRIE

La composition exacte d'un acier va avoir une influence fondamentale sur ses propriétés et sur l'usage qui en sera fait industriellement. Voyons quelques exemples.

L'acier est un alliage de fer et de carbone. En cela [il diffère des autres alliages métalliques](#), constitués uniquement d'un mélange de métaux, l'un de ces derniers étant présent en quantité très majoritaire dans l'alliage. Les aciers contiennent donc une majorité de fer et un peu de carbone (2 % en général), mais également, dans des proportions très fines, d'autres types de métaux, ou encore des inclusions non métalliques. Ce sont ces éléments, présents en très petites quantités, qui déterminent, entre autres, les caractéristiques précises de l'acier obtenu, et l'usage industriel qui lui sera réservé.

Outre la composition exacte de l'acier, les conditions dans lesquelles va être obtenu l'alliage déterminent également ses propriétés : température, temps de préparation, obtention via un haut fourneau ou un arc électrique... Ce sont donc bien les ingrédients et la recette qui influent sur le [type d'acier obtenu](#).

Au niveau de l'industrie, l'acier est l'alliage métallique le plus utilisé : automobile, aéronautique, construction... Quelles sont les propriétés des alliages qui vont intéresser les industriels ?

En tout premier lieu, c'est l'[élasticité](#) qui fait de l'acier un matériau prisé par les industriels. L'élasticité est la capacité qu'a un matériau à retrouver sa forme d'origine, une fois qu'il n'est plus soumis à la force qui provoque la déformation. Cette propriété est très utile dans l'industrie automobile ou aéronautique par exemple. Aujourd'hui, les secteurs R et D développent des aciers à très haute limite d'élasticité pour ces secteurs. La [limite d'élasticité](#) est la limite à partir de laquelle un matériau va se déformer définitive-

ment, sans reprendre sa forme initiale. Elle définit donc les [contraintes limites qui peuvent être subies par un matériau](#), pour un usage précis.

Les contraintes exercées sur un alliage métallique vont entraîner sa déformation. Cette déformation peut être élastique, mais [elle peut également être plastique](#), si l'acier conserve de manière permanente une déformation, une fois que la contrainte cesse d'être appliquée. Cette propriété va être utilisée pour développer des aciers destinés aux secteurs de l'agroalimentaire ou de la pharmacie, par exemple.

Autre [propriété qui intéresse l'industrie](#), la résistance à la traction. Cette propriété permet aux aciers d'être très résistants aux contraintes de traction, notamment en ce qui concerne les risques de [rupture des matériaux lors de ces tractions](#). Cette propriété intéresse de nombreux secteurs industriels, aux premiers rangs desquels les industries de la construction et de l'automobile.

La [résistance à la corrosion](#) est l'apanage des aciers inoxydables. Ces derniers ont de nombreuses propriétés : ils peuvent être utilisés dans une large plage de températures, sont résistants aux produits chimiques et biologiques, faciles à nettoyer... ce qui en fait un alliage très utilisé dans les secteurs des technologies médicales ou de l'industrie agroalimentaire.

La ténacité, qui est la [capacité de l'acier à résister et à garder ses propriétés](#) pendant l'emboutissage, le pliage, et le redressage par exemple, représente une propriété qui explique en grande partie le succès industriel des aciers. Cette capacité à être usiné et travaillé industriellement est fondamentale, pour de nombreux secteurs industriels fabriquant des pièces métalliques extrêmement diversifiées.

Enfin, d'autres propriétés des aciers, considérées comme

secondaires par rapport à celles que nous venons d'évoquer, méritent d'être soulignées. La **résistance aux chocs** par exemple, qui permet aux aciers de résister à des charges dynamiques répétées, est très prisée pour certaines pièces développées dans l'industrie aéronautique par exemple.

La dureté de l'acier, c'est-à-dire la force à laquelle l'acier s'oppose lorsqu'il subit la force des matériaux plus durs que lui, et la soudabilité, qui est la capacité de créer des connexions permanentes par soudage, sont deux propriétés également fondamentales pour l'industrie. En effet, la **soudabilité** par exemple, va permettre l'usage des aciers pour la fabrication d'objets industriels composés de plusieurs pièces que l'on va ensuite souder, ce qui n'est possible que pour certains types d'alliages métalliques.

On constate donc que les multiples propriétés d'un alliage métallique comme l'acier, sont non seulement tributaires des conditions de fabrication de l'alliage, mais aussi et surtout de sa composition précise. Ces propriétés vont permettre d'orienter le matériau vers l'usage industriel le plus adapté.

28/04/2022

POUR ALLER PLUS LOIN

SIMULER L'INTERACTION FLUIDE-STRUCTURE

Webinar du 17 mars, organisé par Comsol

La conception d'une voiture nécessite de prendre en compte l'écoulement de l'air autour du véhicule à différentes vitesses. Le but est d'optimiser l'aérodynamisme mais aussi de limiter les modes de vibrations indésirables, par exemple, de ses portes.

Ce dernier est un exemple d'**interaction fluide-structure** et est présenté lors de ce [webinaire](#) sur une modèle de voitures de sport. Cet exemple utilise un modèle de **simulation grandes échelles de turbulence (LES)** pour calculer le champ d'écoulement turbulent détaillé autour de la voiture, qui est ensuite utilisé pour effectuer une analyse structurelle de la porte afin d'évaluer ses contraintes et déformations.

Plus généralement, l'**interaction fluide-structure** intervient dans une multitude de systèmes physiques, de très petites tailles, comme dans des **dispositifs MEMS** à application biomédicale, et de plus grandes, comme dans des **véhicules** ou des **systèmes de production d'énergie** où interviennent des turbines, des vannes et des pompes. Les fluides en jeu peuvent être l'air, l'eau ou des fluides complexes comme des polymères, des métaux et des fluides biologiques. Les éléments de structure peuvent être fixes ou mobiles, et leur loi de comportement matériaux linéaire ou non-linéaire. Un cas complexe est l'écoulement du sang dans un cœur.

Ce [webinar](#) aborde les points les plus importants à prendre en compte lors de la **simulation de l'interaction fluide-structure** avec COMSOL Multiphysics® et ses modules Structural Mechanics et CFD : choix du régime de l'écoulement, mise en place d'un couplage multiphysique, hypothèses et fonctionnalités de mécanique des structures, maillage, exécution d'une séquence de calcul et post-traitement.

Pour compléter ce [webinar](#), un atelier de prise en main sur cette thématique a eu lieu le 25 Mars dernier. Une fois votre inscription au webinar "[Simuler l'Interaction Fluide-Structure](#)" finalisée, cet événement associé vous sera proposé.

Animé par :

04/02/2022

« LES APPROCHES CLASSIQUE ET QUANTIQUE SONT COMPLÉMENTAIRES »

Les modèles physiques classique et quantique permettent d'obtenir des modélisations de systèmes moléculaires. Ces deux approches, complémentaires, répondent à des objectifs précis.

Rachel Schurhammer est directrice de la faculté de chimie de Strasbourg. Elle est également enseignant-chercheur, spécialiste en modélisation moléculaire de solutions complexes.

Avec son équipe du [laboratoire de modélisation et simulations moléculaires](#) (UMR 7140) de l'université de Strasbourg, Rachel Schurhammer, qui a commencé à travailler sur la modélisation moléculaire au début des années 2000, utilise modèles et méthodes de simulations moléculaires pour étudier au niveau nano-scopique la structure et les propriétés de liquides moléculaires.

Pour les Techniques de l'ingénieur, elle a accepté de revenir sur les avancées technologiques en termes de modélisation, et plus particulièrement sur l'importance, aujourd'hui, d'adapter les méthodes aux objectifs recherchés.

Techniques de l'Ingénieur : Quelles sont les modélisations qui mobilisent le plus la recherche à l'heure actuelle ?

Rachel Schurhammer : Il y a beaucoup de modélisations de phénomènes [chimiques](#) bien sûr, mais aussi des modélisations touchant au domaine de la biologie, des polymères, ou bien encore des [matériaux](#).

Ces dernières sont de plus en plus répandues dans le domaine pharmaceutique pour modéliser le docking des molécules, les interactions substrat/protéine, la conforma-

tion des protéines...

Ces activités de modélisation sont extrêmement liées à la performance des machines, bien évidemment.

La modélisation pour l'industrie chimique s'est beaucoup développée également, même si moins de spécialistes travaillent dessus, pour étudier par exemple pour le développement ou l'optimisation de nouveaux matériaux (matériaux pour le stockage de l'énergie, catalyseurs, isolants), de procédés (extraction, séparation, conversion de la biomasse) ou de nouveaux produits chimiques ([solvants](#), additifs, remplacement de solvants dangereux pour une chimie verte).

Qu'en est-il au sein de votre laboratoire ?

Dans notre laboratoire, nous sommes spécialisés dans l'étude de solutions chimiques complexes à base de solvants « néotériques ».

Ces nouveaux liquides, tels que les liquides ioniques ou les solvants eutectiques profonds, sont souvent plus écologiques, plus faciles à retraiter, peu chers... et sont très attendus par les industriels pour faire évoluer leurs pratiques.

Microscopiquement, nous ne savons pas grand-chose de ces solutions. Il y a encore aujourd'hui un gros pan de recherche fondamentale à effectuer, pour expliquer leurs structures, propriétés de solvation et dynamiques, leurs interfaces avec l'eau et comprendre leur apport à la chimie actuelle...

D'un point de vue chimique, ces solutions et leurs systèmes biphasiques avec lesquelles nous travaillons vont

être étudiées et testées par les expérimentateurs, dans notre cas, principalement dans le cadre d'applications dans le domaine de l'extraction liquide/liquide ou des processus de catalyse par transfert de phase..

Quelles sont les applications potentielles de ces recherches ?

Les champs d'applications de ces nouveaux liquides sont nombreux et visent soit à l'optimisation de procédés connus soit au développement de nouvelles applications. On peut citer par exemple l'utilisation des liquides ioniques pour l'extraction ou **retraitement des métaux** ou des matériaux nucléaire (tels que le lithium ou les terres rares de nos composés électroniques). La nécessité de trouver des procédés industriels de retraitement pour ces matériaux, qu'on utilise massivement depuis quelques années, devient en effet de plus en plus pressante.

Notre laboratoire travaille également sur l'extraction des polyphénols pour l'industrie cosmétique : savoir comment on va pouvoir extraire des matériaux organiques à base de déchets végétaux par exemple, dans des conditions plus « vertes », pour satisfaire des clients de plus en plus regardants quant à l'aspect écologique des produits cosmétiques.

Vous travaillez sur de la modélisation dite classique. Quels en sont les particularités ?

La modélisation moléculaire est un ensemble de techniques permettant de modéliser ou de simuler le comportement de molécules. La modélisation moléculaire dite « classique » correspond à l'utilisation de la mécanique newtonienne pour modéliser des systèmes moléculaires. Typiquement, les modèles consistent en des atomes sphériques reliés par des ressorts qui représentent les liaisons. Les forces internes considérées dans la structure modélisée sont décrites en utilisant des fonctions mathématiques simples.

Ce modèle a montré sa puissance dans la prédiction et la compréhension de phénomènes à l'échelle micro ou nanoscopique depuis le début des années 1980. A l'époque, il a été développé pour traiter des systèmes plus

gros que ce que l'on pouvait obtenir à l'aide de la chimie quantique, comme des systèmes en solution. Ces modèles fonctionnent très bien, tant qu'on ne leur demande pas des choses qu'ils ne sont pas capables de faire...

Ces deux modèles, classique et quantique, sont-ils d'une certaine façon en concurrence pour faire de la modélisation ?

Il faut avoir à l'esprit que le modèle classique et la chimie quantique sont complémentaires. Les deux ont leurs avantages. Ceux qui travaillent sur les modélisations tentent de faire converger ces deux modèles le plus possible, bien que l'on soit encore loin à l'heure actuelle d'une réelle unification.

La chimie quantique traite du calcul de la structure électronique des atomes et molécules. Il s'agit de résoudre l'équation de Schrödinger indépendante du temps pour le mouvement des électrons dans les systèmes poly-électroniques. Elle permet la description du comportement électronique des atomes et des molécules pour expliquer leurs réactivités. Il est alors possible de prédire des spectres électroniques, la faisabilité d'une réaction, les chemins réactionnels, et de nombreux paramètres physico-chimiques qui dépendent de la structure électronique du système étudié.

Le problème de la chimie quantique est qu'elle est très gourmande en termes de temps de calcul, au point d'être très limitée dans l'étude des grands systèmes. Il faut donc travailler sur des petits systèmes moléculaires – généralement d'une centaine d'atomes - pour lesquelles il sera compliqué d'obtenir des informations sur les effets de l'environnement composant le système.

On reste également souvent sur des modèles statiques, pour lesquels on va obtenir des vues statiques, qui correspondent à des états où la structure étudiée est dans une configuration d'énergie minimale, ou celle d'un état excité par exemple.

Qu'en est-il pour le modèle classique ?

Dans le domaine de la modélisation dite classique, étant donné que nous travaillons avec un modèle simple, nous

avons la possibilité de simuler sur des systèmes beaucoup plus gros, de l'ordre du million d'atomes de manière dynamique. Cela va par exemple permettre de décrire une protéine dans un solvant, des systèmes biphasiques, ou encore un virus, pour prendre un exemple d'actualité.

22/01/2021

Mais dans ce modèle il est impossible d'avoir une modification de la structure électronique au cours du temps, on ne verra pas de rupture et de création de liaisons, car le modèle est basé sur des interactions non covalentes.

Peut-on imaginer aboutir à une approche "unifiée" ?

Nous en sommes encore loin. A l'heure actuelle, le travail des chercheurs en termes de modélisation est en effet d'essayer de faire converger ces deux approches : il existe ainsi aujourd'hui une multitude de méthodes mêlant les approches classiques et quantiques pour décrire un système chimique.

Un des désavantages de la dynamique moléculaire classique est qu'il faut des paramètres pour décrire les atomes : il faut donc développer des modèles pour décrire les systèmes chimiques. Ces modèles, s'ils sont de plus en plus précis, doivent également être transférables, pour avoir un champ d'application moins limité que ce pour quoi ils ont été développés.

De nombreuses méthodes sont développées à l'heure actuelle, et un des enjeux de la recherche est d'arriver à adapter les méthodes aux modèles avec lesquels nous travaillons : c'est un point très important, sur lequel nous insistons beaucoup, notamment avec les étudiants que nous formons. Il existe aujourd'hui quantité de logiciels, dont beaucoup sont en accès libre : il est assez facile aujourd'hui de lancer des calculs et d'obtenir des résultats... mais selon la méthode choisie, le système, les paramètres, les résultats obtenus varient du tout au tout et peuvent n'avoir aucun sens. D'où l'importance de savoir quels types de méthodes appliquer pour une problématique donnée. Cela permet de savoir ce que l'on peut attendre de chaque méthode en termes de résultats, en fonction des objectifs recherchés.

Propos recueillis par P.T

LA FRANCE STRUCTURE LE SECTEUR DE L'IMPRESSION 3D MÉTAL

Les pouvoirs publics et les centres techniques se mobilisent pour structurer et construire une véritable filière de qualité dans la fabrication additive métallique. Accompagnement technique et financier, mutualisation, toutes les solutions sont désormais développées.

En 2017, les pouvoirs publics ont fait entrer le sujet de la [fabrication additive](#) dans le champ de leurs priorités pour soutenir la modernisation de l'industrie française. Dans ce cadre, le gouvernement s'est appuyé sur une feuille de route rédigée sous l'animation de l'Alliance Industrie du futur. Les soutiens vont à la R&D, notamment via les dispositifs d'aides aux programmes investissement d'avenir (PIA) ainsi qu'à l'équipement des entreprises avec pour objectif affiché en 2017 de faire grimper le pays de la 7e à la 5e place en terme de machines industrielles installées, c'est-à-dire de passer de 3 à 9 % du parc mondial dans les 5 ans.

Le soutien passe alors par des dispositifs fiscaux avantageux comme le suramortissement exceptionnel en faveur des investissements de transformation numérique des PME industrielles ([loi de finances](#) de 2019) ou encore des prêts « industrie du futur ». En parallèle, le gouvernement a initié le programme [3D Start PME](#) visant à accompagner des PME vers l'utilisation de la [fabrication additive](#). Il favorise le développement d'un réseau de plateformes (mutualisation d'équipements et de compétences) permettant à la fois un soutien à la recherche, une diffusion et un accompagnement des PME et des grands groupes vers l'adoption des technologies de fabrication additive. C'est le groupe « Fabrication additive » de l'Alliance Industrie du futur qui est chargé d'animer et coordonner les initiatives, projets et plateformes dédiés à la FA. Un volet formation a aussi été prévu comportant l'inventaire des formations existantes et la création de référentiels métiers / formations.

3D Start PME : passage à l'acte pour une douzaine d'entreprises

Le programme 3D Start PME est piloté par le CETIM, le CEA et le Symop. Il est soutenu par le programme des investissements d'avenir (PIA) mis en œuvre par Bpifrance. Actuellement en phase pilote, ce programme propose aux PME volontaires et sélectionnées un accompagnement pas à pas pour évaluer l'intérêt d'intégrer l'impression 3D dans leur processus de fabrication et connaître les impacts sur leur stratégie, leur organisation, les compétences et toute la chaîne numérique. L'initiative est ouverte aux entreprises manufacturières (PME) de moins de 250 salariés et dont le chiffre d'affaires est inférieur à 50 millions d'euros. À ce jour, 32 entreprises ont été choisies pour bénéficier du diagnostic d'opportunité et une douzaine devraient finalement passer à l'acte et se lancer réellement dans la fabrication additive. Ces dernières pourront recevoir une aide à la décision, un accompagnement à la mise en œuvre de la [fabrication additive](#) par des experts indépendants et la réalisation d'une preuve de concept (POC) financée à hauteur de 50 % sur une plateforme de faisabilité.

Outre le dispositif d'accompagnement des PME, ce projet pilote permettra l'élaboration de supports de sensibilisation et de formation, intégrant notamment le volet HSE (hygiène sécurité environnement) qui constitueront un socle d'outils disponibles pour le déploiement de l'action dans les territoires. La première phase du projet s'est achevée avec le développement d'un outil de diagnostic et la mise en place d'une base de données de consultants formés à l'utilisation de l'outil.

Le réseau des plateformes prend forme

Le réseau des plateformes technologiques dédiées à la fabrication métallique prend forme petit à petit. Le Symop a lancé en mars 2018 un portail sur la [fabrication additive](#)

qui référence les acteurs du secteur (tous matériaux), qu'ils soient fournisseurs de logiciels, matériaux, gaz, machines, solutions de post-traitement, bureaux d'études etc. Début 2019, il a ajouté une cartographie des plateformes technologiques consacrées à la FA. Chaque plateforme possède sa fiche détaillant sa vocation principale, ses moyens et ressources humaines, ses équipements et les financements éventuels lui permettant de mettre en œuvre des actions collectives et/ou privées.

Le nombre de plateformes dédiées à la fabrication additive métallique ne cesse de progresser. Le Cetim y est un acteur majeur grâce au développement de ses actions et de ses installations en région. Parmi les dernières nées, la création d'une unité pilote à dispositif partagé (UPDP) sur le site de Cluses en début d'année 2019 dans la vallée de l'Arve. Dans un bassin industriel qui produit des centaines de milliers de pièces avec des équipements de pointes, les entreprises locales sont cependant en recherche de procédés leur permettant de réaliser des courtes séries et de limiter les risques d'investissement. Une demande à laquelle la fabrication additive métallique peut répondre. Le fonctionnement de cette UPDP se fera comme celle installée à St Etienne, sous la forme d'un programme de 18 mois. Les industriels intéressés peuvent être accompagnés pour une sensibilisation à l'utilisation d'équipements de fabrication additive métallique basés sur la technologie du MBJ (Metal binder jetting – projection de liant sur poudre métallique) afin de valider une preuve de concept, monter en compétence ou encore monter un programme de R&D. Cette unité a d'ailleurs pour but de construire un programme collectif de R&D autour de la qualification du **titane** (Ti-6Al-4V) pour démontrer la capacité du procédé de MBJ à produire des pièces qualifiées pour les implants médicaux. Il s'agit là pour le Cetim de la 9e UPDP dédiée à la fabrication additive métallique. Un maillage régional qui vient compléter la mise en place d'une grande plateforme d'envergure internationale, l'Additive Factory Hub, qui s'est installée à Saclay en décembre 2017.

Un pôle d'excellence international

L'[Additive Factory Hub](#) portée par le Cetim et le CEA réunit

autour d'elle une vingtaine de partenaires académiques et industriels. Cette plateforme représente un investissement de 40 millions d'euros sur 5 ans. Elle bénéficie d'une partie des 350 millions d'euros débloqués par la région Ile-de-France pour développer son activité industrielle et d'un apport du Cetim de 2,5 M€. Cette plateforme est dédiée à la R&D pour les différents partenaires du projet tels que Safran, Air Liquide, Poly-Shape, AddUp ou encore le CEA List, l'Onera ou les Arts et Métiers. Elle est aussi à disposition des PME qui ont besoin d'un accompagnement pour se lancer dans des investissements en matière de fabrication additive avec des programmes dédiés sur le modèle du programme national 3D Start PME. Potentiellement, 500 entreprises industrielles pourraient ainsi bénéficier de cette initiative.

Le maillage national s'appuie sur les régions

En parallèle de la mise en place de plateformes, les initiatives pour structurer la recherche et le développement industriel autour de la fabrication additive métallique s'appuient beaucoup sur des constructions régionales – propices à capter des fonds européens. C'est le cas par exemple du projet CLIP FAM (Caractérisation du Lit de Poudre pour la Fabrication Additive Métallique) construit autour d'un consortium normand composé de plusieurs entreprises et centres de recherches : Analyses & Surface, ArianeGroup, CEVAA, CRISMAT, GPM, INSA Rouen Normandie, LMN, NAE et Volum-e. Il bénéficie de fonds régionaux et de fonds européens. Débuté le 1er décembre 2018, ce projet a pour but de développer une méthode de caractérisation de l'étalement des poudres métalliques pour la fabrication additive (banc d'essai) ; renforcer la modélisation de l'étalement afin d'anticiper une production optimale ; évaluer l'impact d'une poudre avec une bonne/mauvaise étalement sur la pièce produite ; appuyer l'émergence d'une norme spécifique sur la poudre (volet étalement).

Ce projet constitue non seulement une initiative fédératrice et structurante pour les acteurs de la fabrication additive en Normandie mais il est aussi essentiel dans le développement futur de la filière de fabrication additive métallique. En effet, certains défauts ou hétérogénéité dans les pièces

fabriquées naissent de la qualité et de la mise en œuvre des poudres métalliques qui empêchent le procédé d'être correctement industrialisé. Aujourd'hui les poudres, selon leur procédé de fabrication, leur fournisseur etc présentent des différences qui nécessitent souvent de réétalonner la fabrication avant de lancer une série. Trouver les techniques pour caractériser et standardiser ces poudres est donc une étape essentielle à l'essor des technologies sur lit de poudre (fusion laser, fusion par faisceau d'électrons, projection de liant etc.).

24/10/2019

L'IMPRESSION DE PIÈCES DÉTACHÉES CHERCHE SON MODÈLE

Dans la lutte contre l'obsolescence, la fabrication additive est perçue comme une solution innovante pour la production de pièces détachées et la réparation. Cette démarche se développe timidement, car les contraintes et les interrogations sont nombreuses.

Réputée pour le prototypage et la production de pièces personnalisées ou complexes en petite et moyenne série, la fabrication additive se voit au fil du temps accorder un nouveau mérite : la confection de pièces de rechange, à des fins de remplacement de pièces défectueuses ou usées, empêchant le bon fonctionnement de mécanismes ou d'appareils complets. L'impression 3D deviendrait un facilitateur de la réparation, «*maillon essentiel de l'économie circulaire*» selon le [rapport de l'Ademe](#) publié en juin 2017 sur le thème. Car réparer, c'est allonger la durée d'usage des produits et réduire leurs impacts environnementaux, écrit-on dans ce même rapport.

Les deux initiatives les plus importantes en France sont à mettre au crédit du distributeur Boulanger et de l'industriel Seb, spécialiste de l'électroménager. La plateforme web Happy 3D de Boulanger, née le 1er juin 2016, a pour objectif de centraliser des fichiers 3D de pièces détachées et de les rendre accessible à tous. «*Notre base contient aujourd'hui environ 500 modèles, de marque propre (EssentielB, Listo et Miogo, NDLR) ou internationale, détaille François Longin, chef de projet Happy 3D chez Boulanger. Il s'agit de pièces de type électrodomestique : poignée de réfrigérateur, trappe de télécommande... Elles sont imprimées exclusivement en plastique et peuvent être changées par l'utilisateur lui-même, sans qu'il ait à ouvrir l'appareil, car ce sont uniquement des pièces externes, non prévues pour le contact alimentaire.*»

Puisqu'il est question d'autoréparation, le service après-vente de Boulanger n'est pas impliqué. La fabrication de la pièce est confiée à l'utilisateur lui-même, s'il détient une imprimante 3D, ou à Freelabster, le partenaire de Boulanger. Le distributeur joue l'intermédiaire entre les particuliers et la communauté des «*makers*», qui compte 2000 personnes. Les fichiers sont distribués en open source et Boulanger n'engrange aucune recette, s'engageant même à modéliser gratuitement les pièces de ses propres marques absentes de la base. «*Il n'y avait pas d'enjeu économique*» ajoute François Longin. Ce projet est d'abord l'occasion pour l'entreprise de promouvoir une étiquette éco-responsable auprès de clients actuels ou potentiels.

Remplacer des pièces qui n'existent plus

Un nombre croissant de consommateurs sont en effet sensibilisés à la sauvegarde de la planète. D'autres, plus pragmatiques, sont soucieux avant tout de préserver leur porte-monnaie et de prolonger l'usage de leurs équipements autant que possible. Le contexte législatif est de surcroît propice, en témoigne dernièrement la loi «*Hamon*» de 2014, votée pour favoriser la réparation. Ce sont autant d'opportunités pour le groupe Seb, qui a inauguré le label «*Produit réparable 10 ans*» en septembre 2016. L'impression 3D, déjà employée sur de nombreux sites internationaux pour le prototypage, est mise à contribution au début de l'année 2017 pour la production de pièces de rechange.

«*Nous avons réalisé deux investissements pour le service après-vente sur notre site logistique de **Faucogney-et-la-Mer** (Haute-Saône), précise Nathalie Pécou, chef de projet fabrication additive pour le groupe Seb. Ce site stocke l'ensemble des pièces détachées pour les marques du groupe (Calor, Moulinex, etc. ndlr), soit plus de 30000 références. Avec notre engagement de réparation pendant dix ans, des situations de sous-stock peuvent affecter des produits très*

anciens. Ces deux imprimantes 3D exploitant un procédé polymère assurent l'approvisionnement quand les pièces conventionnelles et leur moule ne sont plus disponibles.»

((((Légende Seb imprimante 3D))))

Le projet n'est pas encore entré dans une phase industrielle. «Pour le moment, **nous testons l'impression 3D** auprès de nos consommateurs, au travers de notre réseau de réparateurs agréés, poursuit Nathalie Pécoul. **Nous limitons cette expérimentation à la France pour le moment, afin d'obtenir un meilleur suivi des consommateurs.** La pièce de rechange n'a pas toujours le même aspect que l'objet original, par exemple. Elle est toutefois systématiquement validée par nos équipes d'ingénieurs.»

Quelques entreprises locales, semblables à des réparateurs de proximité, avaient anticipé la tendance. Micro-entrepreneur dans les Côtes d'Armor et ancien prestataire de service dans le petit bricolage, Sébastien Rannou monte son affaire, Rannou 3D, dès 2015. Equipé aujourd'hui de quatre imprimantes 3D, il modélise et produit des pièces en plastique à destination des particuliers et des professionnels. Il insiste sur l'équation économique : «Je réalise de moins en moins de pièces pour le **petit** électroménager car ce n'est pas assez rentable. Ce sont des petits appareils qui cassent beaucoup et qui n'ont aucune valeur marchande.» Il est vrai que dans les catégories de biens à petit prix, le coût de l'opération et de la pièce n'incite pas à la réparation, mais plutôt au remplacement à neuf.

Beaucoup de freins à lever

Les commandes des professionnels ou sortant de l'ordinaire ont l'avantage d'être plus lucratives. «J'ai par exemple imprimé un petit engrenage que j'ai facturé une centaine d'euros. **Cette pièce de rechange a évité le remplacement complet d'un système valant de 3000 à 4000 euros,** poursuit-il. Pour le particulier, les pièces de piscine sont également intéressantes car très chères.» Il se refuse cependant à imprimer tout et n'importe quoi. «Une pièce imprimée en 3D est 25% moins résistante qu'une pièce

moulée par injection, estime-t-il. Je ne travaille pas pour l'aéronautique ou l'automobile, à moins que ce ne soit un simple support de gaine. Grâce à mon passé dans l'automatisme industriel, j'ai acquis de bonnes connaissances mécaniques pour évaluer la **faisabilité** une pièce.»

Redoute-il des poursuites pour contrefaçon ? «Le client a le droit de réaliser la copie d'une pièce au titre de la réparation» rappelle Sébastien Rannou. C'est l'une des craintes exprimées par le secteur de la réparation et rapportée par l'Ademe. L'agence indique cependant que, pour la plupart, «les pièces détachées ne sont ni protégées ni protégeables par les droits de propriété intellectuelle» entre autres arguments en faveur de la réparation. D'autres freins plus significatifs sont relevés, dont le manque de compétitivité (prix de la matière, temps de fabrication...) et l'inadaptation de la technologie (propriétés mécaniques ou thermiques inférieures, etc). De gros progrès techniques sont à attendre avant que l'impression 3D ne devienne un outil de réparation omnipotent et omniprésent.

Frédéric Monflier

Réparation à haute précision pour moteur d'avion

Dans les filières industrielles à haute valeur ajoutée, les réparations, souvent critiques et onéreuses, n'en restent pas moins profitables car l'appareil ou l'équipement coûte lui aussi très cher. L'industrie aéronautique est un bon exemple : le spécialiste de la réparation de moteur, Chromalloy, se sert de la fabrication additive pour réparer des pièces de turbine Pratt&Whitney. Mieux encore, au bout de quatre cycles de réparation, la durée de vie des pièces (des joints) passe de 10000 à 50000 heures. La technique mise en œuvre fait appel à la déposition de métal par laser, inventée par l'entreprise française Beam.

28/03/2018

LES SECRETS STRUCTURELS SOUS LA LOUPE DU NUMÉRIQUE

La modélisation 3D numérique est un outil permettant l'étude fine du comportement de l'assemblage jusqu'à la ruine. Il est alors possible d'évaluer l'évolution d'un grand nombre de variables d'état, difficilement accessibles par l'expérimentation seule, et de dériver des modèles de comportement et des critères de rupture à l'échelle de la structure.

Un extrait de « [Comportement et modélisation des assemblages ponctuels](#) », par Bertrand LANGRAND

L'étude du comportement des assemblages fait appel aux domaines de l'expérimentation et de la [modélisation numérique](#). Le degré de complexité de ces expériences ou des modèles (3D ou simplifiés) illustre la sophistication des mécanismes mis en jeu. Le nombre important des paramètres liés au dimensionnement des assemblages limite inexorablement la prospection expérimentale. L'alternative numérique est fondée sur le rendu 3D et sur la caractérisation de modèles de comportement élastoplastique (éventuellement visqueux), d'endommagement et de rupture des matériaux constituant l'assemblage. Une fois cette étape franchie et validée, l'outil de simulation numérique peut être utilisé comme une méthode de [prototypage virtuel](#) pour étudier l'influence de divers paramètres (ou choix technologiques). La diversité des matériaux dans les structures modernes (métalliques, composites, polymères, etc.), donc notamment au niveau des assemblages, pose le problème de la modélisation du comportement et des multiples modes de ruine de ces matériaux, en particulier composites.

Les modèles de liaison et leurs limites

Les « liaisons rivets » de type contraintes cinématiques rassemblent les liens rigides, les « rivets/spotwelds », les corps rigides et les interfaces liantes. L'intérêt de ce type de représentations est qu'il n'y a pas de condition de stabilité imposée (pas de temps), car pas de rigidité associée. De

plus, elles sont relativement simples à mettre en œuvre, même dans le cas d'ensembles complexes. Cependant, elles ne permettent pas de modéliser les comportements fins de la liaison, et la rupture est modélisée par un critère macroscopique couplant les efforts de traction et de cisaillement. Les modèles de liaison fondés sur l'utilisation d'éléments 1D, eux, regroupent essentiellement les éléments finis de poutre, de ressort, et la combinaison des deux. L'ensemble de ces éléments est associé à un pas de temps élémentaire afin d'assurer la stabilité des simulations. Étant dans la majorité des cas associés aux dimensions des éléments 1D, leur pas de temps peut être préjudiciable pour un [calcul de structure](#).

Les expérimentations dédiées à l'analyse du comportement des assemblages sont entreprises sur des échantillons unitaires (un rivet, une perforation, un point soudé). Le cas d'ensembles assemblés doit être abordé afin d'étudier la robustesse des modèles et des critères dans des cas plus complexes mais complètement maîtrisés d'un point de vue des conditions aux limites. L'étude de la robustesse des outils, des méthodes et des modèles (d'un point de vue général) vis-à-vis de faibles variations des conditions aux limites est une problématique de recherche à part entière.

Exclusif ! L'article complet dans les ressources documentaires en accès libre jusqu'au 12 mai 2022 !

[Comportement et modélisation des assemblages ponctuels](#), par Bertrand LANGRAND

28/04/2022

LES THÈSES DU MOIS : MODÉLISATION DES MICROSTRUCTURES ET STRUCTURES DES MATÉRIAUX

Pour vous accompagner et vous fournir une information toujours plus riche, Techniques de l'Ingénieur s'associe au Réseau National des Ecoles Doctorales - Sciences Pour l'Ingénieur (REDOC SPI). Chaque mois, notre partenaire sélectionne des thèses en lien avec notre dossier mensuel afin de vous permettre de creuser plus loin les thématiques développées dans le dossier.

Pour notre dossier d'avril, "Modélisation des microstructures et structures des matériaux", voici les thèses sélectionnées par le REDOC SPI. Retrouvez le résumé de ces thèses ainsi que les thèses des mois précédents sur [le site de notre partenaire](#).

Génération 3D aléatoire de microstructures de combustibles nucléaires MOX et homogénéisation mécanique Akram El Abdi Doctorat en Sciences pour l'ingénieur. Mécanique des solides, soutenu le 22-01-2021 *Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (Aix-Marseille)*

Synthèse de microstructures par optimisation topologique, et optimisation de forme d'un problème d'interaction fluide-structure Valentin Calisti Doctorat en Mathématiques, soutenu le 20-12-2021 *Institut Elie Cartan de Lorraine*

Développement d'alliages métalliques à gradient de composition pour l'exploration combinatoire des

microstructures Imed-Eddine Benrabah Doctorat en Matériaux, Mécanique, Génie civil, Electrochimie, soutenu le 08-01-2021 *Laboratoire : Science et ingénierie des matériaux et procédés (Grenoble)*

Imaging and diagnostic of sub-wavelength micro-structures, from closed-form algorithms to deep learning- Peipei Ran Doctorat en Traitement du signal et des images, soutenu le 15-12-2020 *Laboratoire Génie électrique et électronique de Paris*

Photo traçage massivement parallèle, multi résolution et multi profondeur de microstructures et nanostructures diffractantes pour les applications antifraude- Yoran-Eli Pigeon Doctorat en Photonique, soutenu le 04-10-2019 *École nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique Bretagne Pays de la Loire*

Automatisation de la modélisation numérique des microstructures de matériaux hétérogènes basée sur une intégration CAO-calcul Adrien Couture Doctorat en Génie mécanique, soutenu le 08-11-2019 *Institut de Recherche Dupuy de Lôme*

Fabrication additive par Arc-Fil et Laser-Fil de l'alliage Ti-6AL-4V : relations procédés - microstructures – propriétés Achraf Ayed Doctorat en Science et Génie des

Matériaux, soutenu le 31-05-2021 *Laboratoire Génie de Production (Tarbes)*

Étude d'un alliage de titane "transformable par déformation" : lien entre propriétés mécaniques, microstructures de déformation et mécanismes de rupture *Chloé Varenne* Doctorat en Sciences et génie des matériaux, soutenu le 13-11-2020 *Centre des matériaux (Evry)*

Fabrication additive arc-fil en alliage d'aluminium a durcissement structural AA6061 : relations procédé, microstructures et propriétés mécaniques *Gautier Doumenc* Doctorat en Génie des matériaux, soutenu le 19-02-2021 *Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (Nantes)*

Alliages nano composites Ti6Al4V et Ti6Al4V-nYSZ produits par fabrication additive via le procédé SLM (selective laser melting) : traitement des poudres, optimisation des microstructures et propriétés mécaniques *Mohamed Amine Hatta* Doctorat en Sciences des matériaux, soutenu le 26-03-2021 *Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux (Villetaneuse)*

28/04/2022

Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS




MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- > + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- > + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- > Des Quiz interactifs pour valider la compréhension 

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

Les offres Techniques de l'Ingénieur

INNOVATION

- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente

MATÉRIAUX

- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillessement
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites

MÉCANIQUE

- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D

ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement

ÉNERGIES

- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications

GÉNIE INDUSTRIEL

- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception

ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique

TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information

AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique

INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime

MESURES – ANALYSES

- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif

PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire

SCIENCES FONDAMENTALES

- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière

BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques

CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillessement, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques

OFFRE



Innovations technologiques

La veille technologique comme moteur d'innovation pour anticiper les prochaines évolutions de marché;
Ref : TIP958WEB

PRÉSENTATION

Un outil de veille technologique pour identifier les enjeux industriels de demain:

les dernières avancées scientifiques et techniques: description **des grands projets de R&D et des innovations en cours** dans le secteur de la recherche privée et publique,
les grandes tendances technologiques: panoramas de **réalisations au stade industriel ou pré-industriel, des études sectorielles et des analyses prospectives** pour anticiper les prochaines évolutions de marché,
l'ensemble **des outils et des méthodes** pour maîtriser les grandes étapes du **processus de l'innovation**: de l'analyse des besoins au management de projet innovant, jusqu'au financement et à la protection de l'innovation,
l'ensemble **des pratiques d'éco-conception** à disposition des professionnels, sans oublier les aspects marketing et de financement, ainsi que de nombreuses études de cas.

VOTRE COMMANDE :

Référence	Titre de l'ouvrage	Prix unitaire H.T	Qté	Prix total H.T
TIP958WEB	Innovations technologiques	1 355 €	1	1 355 €
Total H.T en €				1 355 €
T.V.A : 5,5%				74,53 €
Total TTC en €				1 429,53 €

VOS COORDONNÉES :

Civilité M. Mme

Prénom _____

Nom _____

Fonction _____

E-mail _____

Raison sociale _____

Adresse _____

Code postal _____

Ville _____

Pays _____

Date :

Signature et cachet obligatoire

CONDITIONS GÉNÉRALES DE VENTE

Conditions générales de vente détaillées sur simple demande ou sur www.technique-ingenieur.fr

Si vous n'êtes pas totalement satisfait, vous disposeriez d'un délai de 15 jours à compter de la réception de l'ouvrage pour le retourner à vos frais par voie postale. Livraison sous 30 jours maximum.