

Modèle informatique pour l'optimisation de la conception de composants de turbines à gaz coulés

Actuellement les rendements les plus élevés sont obtenus pour des turbines à gaz avec des aubes à structure monocristalline ou à solidification directionnelle. Il est possible de prédire à l'aide d'un modèle informatique, si et dans quelle mesure, les aubes complexes de turbines peuvent être coulées de manière économique. En collaboration avec l'Institut de technologie d'Aachen, le Centre de recherche d'ABB en Suisse a développé et validé un outil de conception qui permet de modéliser les détails de composants aux formes compliquées dans leur intégralité. Grâce à celui-ci, il est possible de réduire le temps de développement du procédé de fonderie de quelques mois à quelques semaines, d'abaisser les coûts et le temps nécessaire jusqu'à l'introduction sur le marché.

Actuellement, pour avoir du succès sur le marché hautement compétitif des turbines à gaz à génération de puissance, les fournisseurs d'équipements primaires doivent être capables de fournir des turbines à haut rendement, au coût le plus faible possible, ainsi que répondre rapidement et avec efficacité aux changements du marché.

L'aubage est un des composants clé influençant l'efficacité, la fiabilité et les coûts des turbines à gaz. Les aubes de turbine sont fabriquées en superalliage à base de Nickel, à l'aide d'un procédé de moulage à cire perdue, également connu sous le nom de procédé «lost wax».

L'accroissement continu de l'efficacité des turbines qui est apparu au cours des ans, a été accompagné par une augmentation de température significative et par des conceptions d'aubages beaucoup plus complexes. Dans les turbines modernes, les aubes opèrent en contact direct avec les gaz de combustion dont la température est plus élevée que le point de fusion des alliages utilisés. Par conséquent, ces aubes doivent être refroidies. L'air de refroidissement est amené aux canaux de refroidissement situés à l'intérieur

de ces dernières. Au niveau de l'intégrité mécanique de la machine, le contrôle des sections de faible épaisseur du superalliage est devenu un point délicat. De plus, le mode de rupture principal des aubes est passé d'une rupture de fluage à une rupture de fatigue thermo-mécanique suite à l'amélioration de l'efficacité du refroidissement des aubes, ceci grâce à l'utilisation de canaux de refroidissement internes de forme spiraloïdale toujours plus complexes.

Martin Balliel
Dr Peter Holmes
Dr Peter Ernst

ABB Corporate Research Ltd.,
Suisse

Michael Newnham
ABB Production d'énergie SA

Simulation de la coulée: une nécessité?

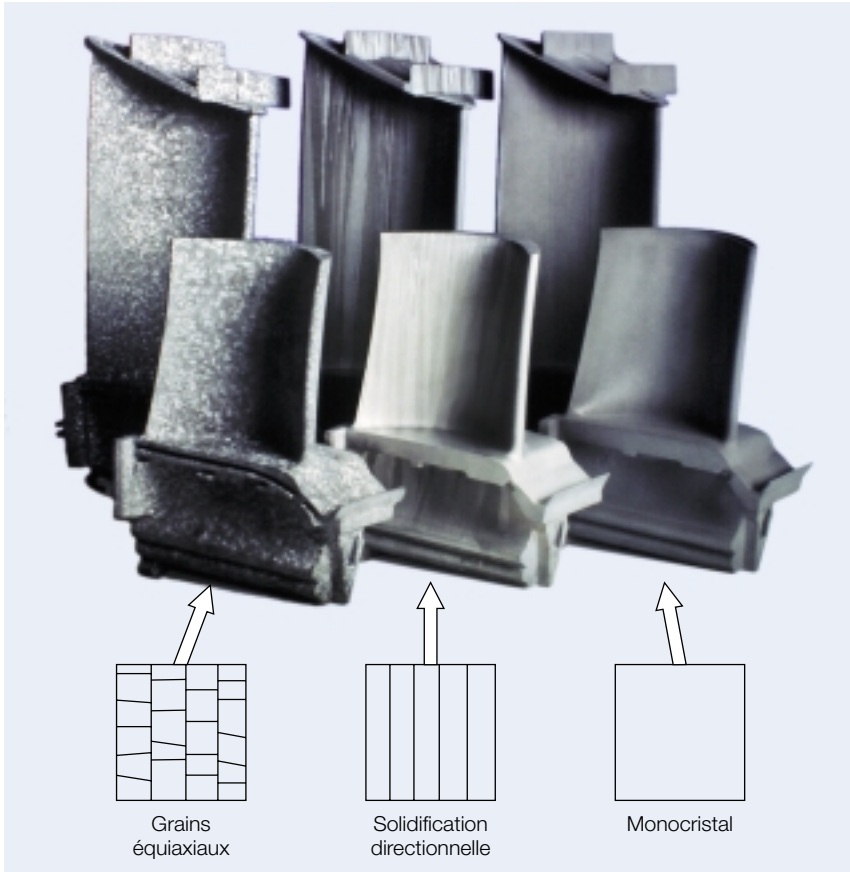
Pour leur dernière génération de turbines à gaz, les constructeurs ont choisi de suivre la voie ouverte par les fabricants de réacteurs et ont remplacé les aubes à structure polycristalline conventionnelles par un aubage à solidification directionnelle ou à structure monocristalline **1**.

Alors que l'approche empirique conventionnelle est acceptable pour des aubes de réacteur de petite dimension et d'un volume de production relativement grand, elle ne l'est plus pour la production à petite échelle et aux coûts élevés des aubes de turbines industrielles. Du reste, le temps nécessaire pour obtenir une solution empirique (6 à 12 mois) est inacceptable en regard du temps approprié pour le cycle de développement de la turbine, temps dicté par les forces du marché et des considérations de coût de développement du produit.

La nécessité de développer une géométrie optimale pour les composants coulés, avec un risque de défauts de fonderie restreint d'une part et le besoin de réduire le temps nécessaire pour le processus d'apprentissage d'autre part, tout en développant un procédé de fabrication économique, sont pris en compte par l'utilisation des connaissances théoriques du procédé de fonderie conjointement à la simulation assistée sur ordinateur pendant la phase de conception du composant et la phase initiale de validation des essais de fonderie. Avec cette approche, le centre de recherche d'ABB, en collaboration avec ABB Production d'énergie ont démontré que les temps de développement pour la coulée peuvent être réduits de quelques mois à quelques semaines (ce qui correspond à une réduction allant jusqu'à 75%) **2**.

Il existe déjà un certain nombre d'outils de simulation de fonderie sur le marché, mais chacun souffre de lacunes considérables quand ils sont utilisés pour ce type d'optimisation. Le centre de recherche d'ABB en Suisse et ABB Production d'énergie ont constaté, en 1992, que le logiciel développé par ACCESS e.V. à l'institut de technologie d'Aachen en Allemagne, constituait l'outil ayant les meilleures prédispositions pour le développement d'un moyen réaliste d'aide à la conception.

Les avantages techniques spécifiques de ce dernier, appelé CASTS pour 'Computer-Aided Solidification Technologies', sont un modèle d'échange de chaleur par rayonne-



Orientation des joints de grains – les aubes polycristallines conventionnelles (à gauche) ont été remplacées par des aubes à structure solidifiée directionnellement (au centre) ou avec une structure monocristalline (à droite) pour la génération de turbines à gaz la plus récente.

ment basé sur un facteur de vue unique, sa capacité de traiter d'importants modèles d'éléments finis et sa vitesse de calcul. Tous ces facteurs permettent de modéliser de manière complète les composants aux formes complexes et le détail de leur géométrie. Il en résulte une approche plus pointue de la prédiction de la réalité.

La simulation de fonderie permet de prédire le champs de température pendant le procédé. Elle comprend également la physique nécessaire pour prédire l'évolution de la solidification du composant pendant la coulée. L'utilisation de modèles physiques pour le procédé utilisé permet d'estimer le risque de développement de défauts typiques de fonderie comme : porosité, grains irréguliers, «freckles», etc. Une optimisation automatique des paramètres appropriés du procédé peut être utilisée pour minimiser les défauts de solidification de telle sorte que le taux de réussite de la coulée est augmenté de manière significative. De plus, les contraintes et déformations résiduelles inhérentes à ce pro-

cédu peuvent être calculées et la microstructure prédite.

Le modèle a été validé sur la base de comparaisons entre prédictions et résultats d'essais de fonderie au cours de ces dernières années. La confiance dans la simulation de fonderie est maintenant si grande que son emploi a été intégré dans le procédé de développement de nouveaux éléments, y compris pour les composants polycristallins conventionnels, les composants solidifiés directionnellement et les composants monocristallins.

L'outil de simulation de fonderie CASTS

Prédiction du temps et de la température – comment le métal liquide se solidifie

Divers paramètres de départ sont nécessaires pour simuler le procédé de fonderie. Ils s'agit de la géométrie, des propriétés physi-

ques ainsi que de tous les éléments impliqués dans le procédé de solidification (moule en céramique, noyau, intérieur du four, etc.), des températures initiales et des conditions limites. Cela nécessite un maillage par éléments finis (FE) de tous les constituants physiques (composants, moule en céramique, noyau, four, etc.) **3**.

Comme dans le procédé réel de fonderie, la résolution commence avec le calcul du champs de température du moule vide pendant le préchauffage à 1000–1500 °C. Cette étape est suivie par la simulation de la coulée de l'alliage et de la détermination de la distribution de température transitoire dans le composant, le moule, le noyau et dans tous les autres éléments.

Pour la solidification directionnelle et monocristalline, le moule est retiré de la chambre de chauffage et placé dans une chambre de refroidissement séparée de l'installation de coulée sous vide (procédé Bridgman). La détermination du transfert de chaleur par rayonnement, impliquant un calcul intensif et complexe, est pour cette raison une partie essentielle de la simulation.

La prédiction globale de l'évolution de la température dans le temps représente la base pour toute autre analyse de déformation-contrainte, de la microstructure, ou encore pour l'optimisation du procédé de fonderie.

Prédiction de la microstructure – reconnaissance des défauts de fonderie

En tant qu'alternative, une simulation couplée température-structure des grains a été développée pour un calcul particulièrement précis de cette dernière pour des composant à structure monocristalline ou à solidification directionnelle. En outre, un module de couplage température-déformation/contrainte est en cours de développement et de validation. Ce dernier permettra de prédire les contraintes résiduelles ainsi que les dimensions avec précision. Cependant, ces deux simulations couplées nécessitent sensiblement plus de temps de calcul que la simple résolution d'un champs de température, post-processing inclu.

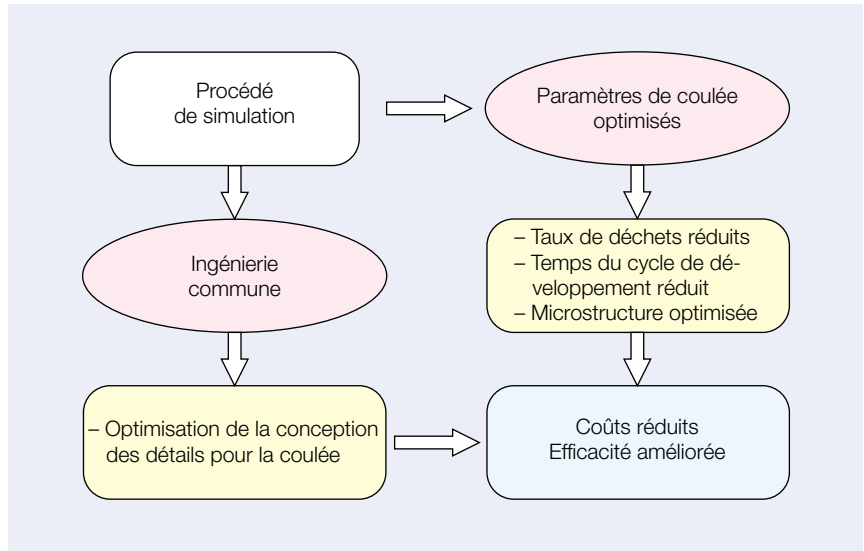
Dans le module le plus rapide de traitement des données, le calcul de la microstructure ainsi que l'évaluation est basée sur la solution de la température, qui dépend à son tour du procédé de solidification sélectionné (monocristal, polycristal directionnel ou conventionnel).

Le résultat de chacune des simulations de structure, couplée ou post processing, est une représentation et une évaluation du volume de sections arbitraires de la pièce coulée en regard des propriétés typiques de sa microstructure, comme la porosité, la qualité et la stabilité des grains solidifiés directionnellement, des «freckles», des grains irréguliers, de certains types de grains dont la direction cristalline est peu inclinée, etc. 4. Ceci contraste avec les résultats des essais de fonderie habituels, où l'image du volume doit être extrapolée à partir de l'évaluation limitée des surfaces métallurgiques, avec les conséquences que cela entraîne au niveau des incertitudes. En fait, la simulation de la coulée vient en aide à l'évaluation métallurgique normale en renforçant son efficacité, grâce à la définition de sections qui contiennent des régions à haut risque de défauts. Le modèle a également montré que tous les composants coulés dans un même moule ne présentent pas les mêmes défauts. Cela signifie, par exemple, qu'une pièce choisie pour être sectionnée pourra être considérée comme métallurgiquement saine, alors qu'une autre pièce coulée dans le même moule pourrait contenir un niveau de porosité que nous qualifierions d'inacceptable.

Optimisation automatique

ABB a développé une routine d'optimisation automatique pour laquelle un programme d'analyse établit la qualité de la microstructure sur la base des indications de l'utilisateur. La routine d'optimisation génère et améliore successivement les paramètres de fonderie évalués par le programme d'analyse, jusqu'à ce que le maximum ou la qualité définie soit atteint. Pendant que l'optimisation est en cours, le procédé de mesure de la qualité peut être contrôlé interactivement, permettant ainsi d'opérer immédiatement d'éventuelles corrections des fonctions définies par l'utilisateur.

L'optimisation peut comprendre de 20 à 200 pas d'itération en fonction du nombre de paramètres et de l'algorithme d'optimisation considéré. Chaque calcul d'aube de turbine à gaz de grande dimension, de structure monocristalline ou à solidification directionnelle, nécessitant un refroidissement complexe prend approximativement 5 heures (processeur R10000 à 195 MHz). Pour cette raison, le temps total d'optimisation se situe entre 4 et 40 jours. En disposant de plusieurs processeurs, il est possible d'effectuer plusieurs calculs en parallèle. De la sorte, avec 4 pro-



Deux voies pour la simulation du procédé de fonderie:

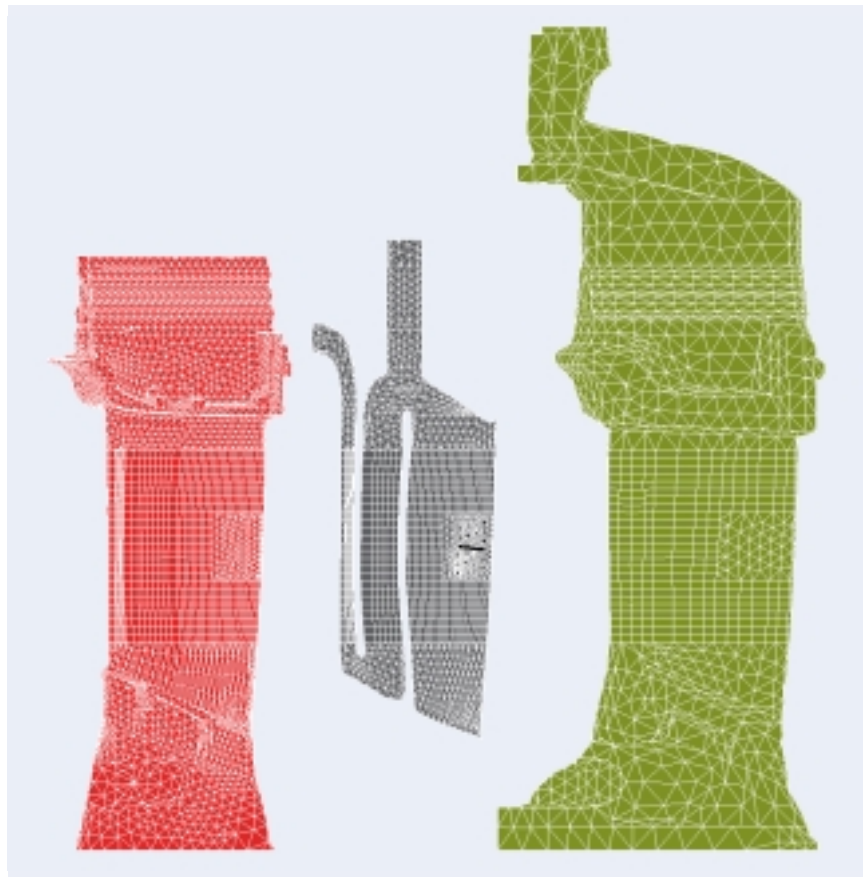
2

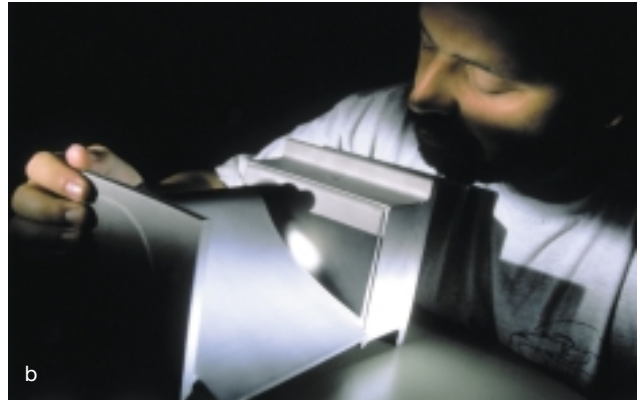
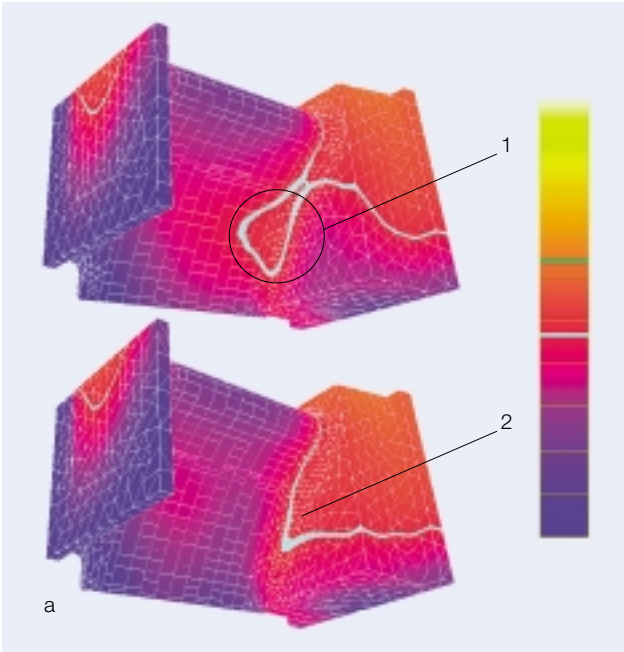
- Conception commune de nouveaux composants
- Optimisation de la production de composants existants

Maillage par éléments finis (FE) pour la modélisation de fonderie d'une aube de structure à solidification directionnelle

3

Rouge Superaliage Bleu Noyau Beige Moule





4 *Microporosité minimisée pour une aube coulée conventionnellement. L'introduction d'une modification du procédé de fonderie a permis d'éliminer le problème de la microporosité.*

- a *Représentation du modèle informatique montrant une microporosité inacceptable (1) et un résultat admissible du procédé de fonderie développé par ordinateur (2).*
- b *Constructeur indiquant les régions sensibles d'un composant de fonderie.*

cesseurs, le temps de calcul total est réduit à une période allant de 1 à 10 jours.

La routine d'optimisation peut être utilisée pour minimiser la probabilité des défauts sur la base de la spécification du composant. Elle peut également être utilisée pour améliorer le procédé de fonderie dans l'optique d'une production économique et efficace en intégrant davantage de critères de qualité comme le temps de production nécessaire dans le haut fourneau, la consommation d'aliage ou le nombre de pas du procédé.

**Analyse de sensibilité –
identification des paramètres critiques**

Un autre avantage de la simulation, en comparaison avec les essais conventionnels de fonderie, est la capacité d'effectuer des analyses de sensibilité très enrichissantes. Si la physique et les paramètres sont utilisés correctement alors la simulation écarte les perturbations expérimentales non reproductibles et permet ainsi d'examiner la variation de paramètres de manière isolée. Ceci permet également de définir les variables expérimentales critiques qui nécessitent un réglage précis.

ABB a mené à bien des études paramétriques du procédé de coulée dans le but de déterminer comment des changements mineurs de différents paramètres de réglages, comme la température du métal ou du moule, affectent la qualité des pièces coulées. Il est donc possible d'observer dans quelle me-

sure un procédé est stable. Ces évaluations seraient trop onéreuses dans le cadre de l'approche expérimentale traditionnelle.

Applications

Production bon marché

La simulation de fonderie est actuellement utilisée pour les composants les plus chers, ayant des temps de livraison élevés, pour lesquels un risque significatif de dépassement des délais et du cadre financier existe. Un rapide retour sur investissement est ainsi assuré.

Dans la course à la «lean production», la capacité de stockage est réduite à un niveau aussi faible que possible. Si des problèmes de production apparaissent et que les composants impliqués se trouvent sur ce que l'on désigne par «le chemin critique» alors c'est la livraison de l'unité complète qui prend du retard. La conséquence peut être une dégradation de l'image de marque, des coûts plus élevés et une diminution du cash-flow en raison des retards dans les paiements ou des pénalités contractuelles.

L'aubage est continuellement en développement en raison du rôle clé qu'il joue dans l'augmentation de puissance et de rendement des turbines à gaz. Le temps de développement pour une nouvelle construction, ou un nouveau procédé de fabrication, détermine souvent le temps nécessaire jusqu'à l'introduction sur le marché d'une nouvelle turbine à gaz ou d'un «upgrade».

5 illustre l'avantage considérable de la modélisation sur l'approche expérimentale conventionnelle au niveau de temps d'exécution ou de réaction face à une modification de conception. Pour cette raison, ABB utilise la simulation de fonderie pour tous les nouveaux aubages de turbines à gaz. Alors qu'à l'heure actuelle, le succès technique et financier de la simulation de fonderie est entrain d'être validée pour les aubes, la modélisation d'éléments complexes supplémentaires, comme les brûleurs et les bâtis, est en phase d'introduction.

Développement du procédé de fonderie

Un autre domaine d'application de la simulation est le développement du procédé de fonderie. Ceci inclus l'évaluation d'autres techniques de coulée qui élargissent le spectre de procédés utilisables permettant la fabrication économique de composants complexes importants. La modélisation d'une aube de grande dimension de structure à solidification directionnelle au moyen de refroidissement à métal liquide (LMC, Liquid Metal Cooling) peut être citée à titre d'exemple. L'évaluation des différents procédés est relativement facile à réaliser à l'aide de l'ordinateur en comparaison des importants efforts nécessaires pour construire les installations expérimentales, sans parler des coûts engendrés par les tests et l'analyse des produits. Cependant, il est possible qu'une validation quantitative soit nécessaire pour de nouveaux concepts

situés en dehors du domaine de connaissance actuel.

Capacité de coulée en tant que critère de développement

Phase de conception

Lors du développement d'un nouveau composant, les coûts dus aux changements de conception sont d'autant plus élevés que les modifications apparaissent tardivement dans le processus de développement. Il est particulièrement important d'arrêter les choix corrects pendant la phase de conception si l'on veut éviter des problèmes qui par la suite causeront des retards et une augmentation des coûts significatifs. L'outil de simulation de coulée a donc un impact maximal lorsqu'il est utilisé lors de la phase de conception **6**. Des exemples de composants pour lesquels la simulation de coulée a été utilisée pendant cette phase sont illustrés dans **7** et **8**.

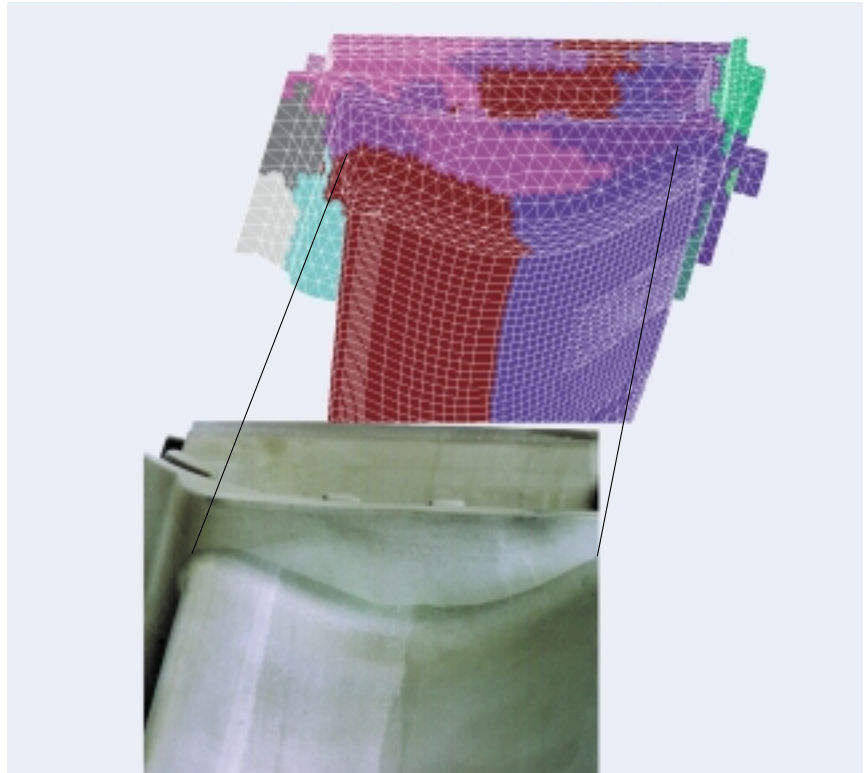
Un changement de la conception après que la production ait commencé, nécessite une modification ou la fabrication de nouveaux outils d'injection pour la cire et les noyaux. Cela peut entraîner un retard de 2 à 6 mois suivant l'étendue des modifications. A côté des pertes dues à un temps d'intégration sur le marché plus long et une perte de clients potentiels, cela provoque également une augmentation significative des coûts directs entraînés par les changements de conception et d'outils, la révision du procédé de développement et la validation des composants. En résumé, il est beaucoup plus facile d'intégrer une correction durant la phase de conception plutôt que d'opérer des modifications pendant le développement de la fabrication chez le fondeur.

Liberté de conception

Un autre aspect important est le gain potentiel ainsi obtenu dans la liberté de conception des composants. La sécurité des composants est ainsi améliorée par la fiabilité de la prédiction de sa microstructure et de ses propriétés mécaniques. En outre, la connaissance des répartitions locales des propriétés de la microstructure, en relation avec la distribution des sollicitations de l'élément de construction, permettent au constructeur d'exploiter tous les domaines et caractéristiques de manière optimale.

Implémentation de l'outil

Des cours de formation sur l'utilisation de CASTS ont été organisés pour les construc-



Prédictions (en couleur) et microstructure effective (hachuré gris) d'une aube monocristalline

5

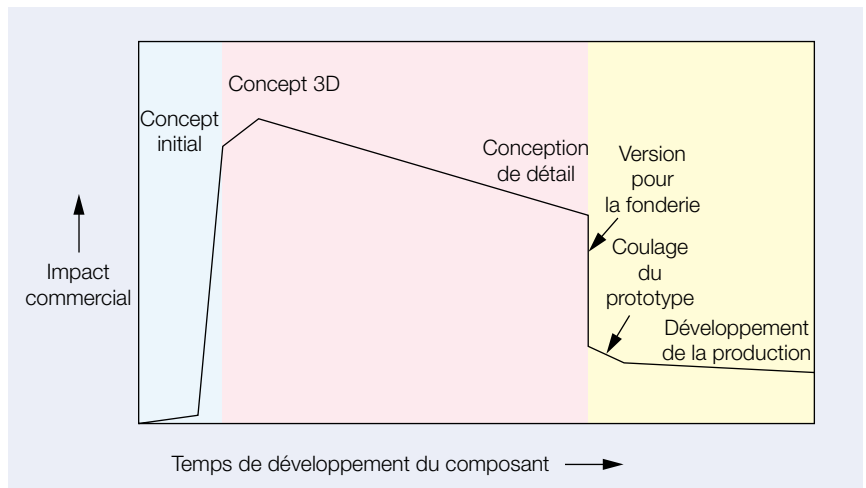
Gain de temps pour une modification de conception de l'aube de turbine monocristalline annoncée le plus tôt possible: procédé expérimental conventionnel (I) en comparaison de la simulation de fonderie (II)

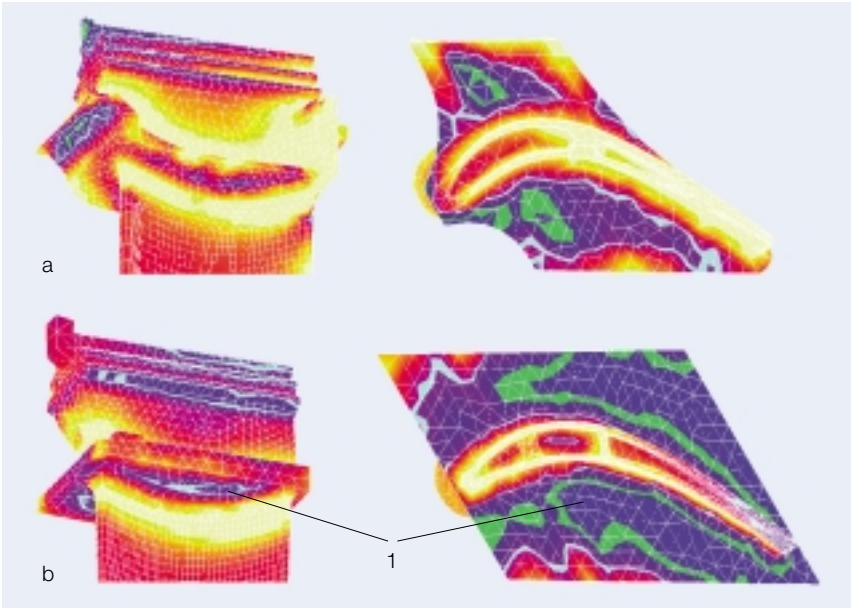
<p>I. Première annonce pour un changement de conception + Fabrication de l'outillage + Fabrication du moule & noyau</p> <hr/> <p>= 26 semaines</p>	<p>II. Première annonce pour un changement de conception + Maillage de l'aube, noyau & moule + Simulation</p> <hr/> <p>= 3-4 semaines</p>
--	---

Impact économique de la modélisation lors de la conception.

6

L'effet le plus important de la modélisation de fonderie est obtenu dès que le modèle tridimensionnel est disponible. Des modifications dans la conception sont faciles à implémenter à ce stade; des changements plus tardifs requièrent des investissements supplémentaires en temps et en argent.





Optimisation de la conception, en regard de la facilité de coulée, des plates-formes intérieure et extérieure d'une aube de structure solidifiée directionnellement 7

a Conception améliorée: coulée fondamentalement meilleure Vert Risque moyen
 b Conception initiale: coulée peu satisfaisante Bleu clair Léger risque

1 Risque de rupture de la structure des grains dans la plate-forme et la plaque de recouvrement

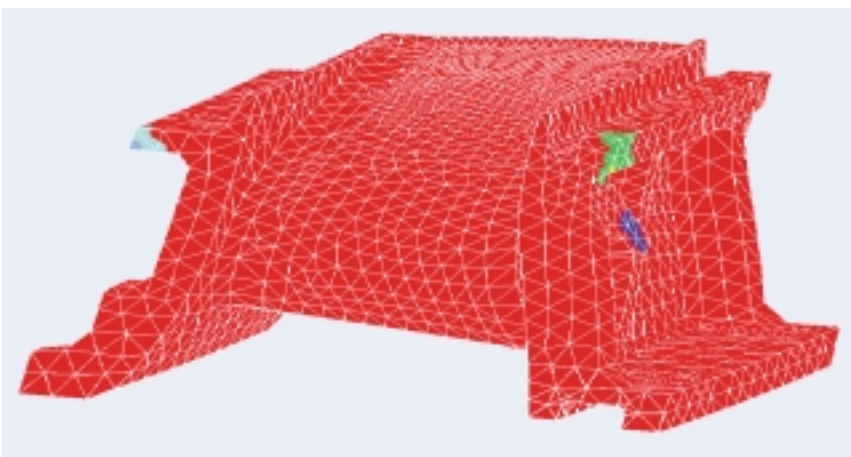
teurs de turbines à gaz. Une introduction aux principes de base du procédé de coulée leur ont été donné dans ces cours, dans l'optique d'obtenir des pièces de fonderie conçues de manière optimale à l'avenir. Le programme CAST montre, de manière facilement compréhensible, comment le procédé de fonderie se déroule et quelles sont les influences des différents critères de conception.

Effets de synergie

Le maillage FE est une partie essentielle de la simulation d'un composant complexe refroidi. Les ingénieurs mécaniciens responsables de l'intégrité mécanique de la machine utilisent des maillages similaires pour l'estimation de la durée de vie des composants. Il est possible de préparer un modèle commun, bien que les paramètres de maillage requis pour la simulation de fonderie et l'estimation

Stade de conception intermédiaire d'une aube monocristalline. La prédiction des irrégularités a conduit à une conception plus facile à couler. 8

Rouge Monocristal Autres couleurs Grains irréguliers



de durée de vie différent passablement. Ce modèle, désigné sous le nom de «modèle solide», représente la géométrie tridimensionnelle du composant en tant que volume. Cette préparation commune permet d'économiser environ 35% des coûts générés par un maillage séparé.

Développement et recherche continue

L'outil de simulation de fonderie a été développé par le centre de recherche d'ABB en Suisse, en une collaboration de plusieurs années avec ACCESS e.V. et l'institut de fonderie de l'Université d'Aachen (RWTH) en Allemagne. D'autres coopérations ont été établies avec l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) en Suisse et l'Université de Colombie Britannique de Vancouver au Canada.

Perspectives

Après plusieurs années de développement du logiciel CASTS en collaboration avec un certain nombre de partenaires stratégiques, ce logiciel a été adopté par les constructeurs de turbines à gaz ABB et reconnu comme étant un outil fort utile pour réduire les coûts et le temps nécessaire pour mettre la turbine sur le marché. ABB dispose ainsi d'un avantage compétitif dans le marché des turbines industrielles. Cependant, cet outil reste encore une application isolée. Son intégration définitive dans une méthode de conception globale de composants de fonderie nécessitera encore un effort supplémentaire important. Un tel outil de conception intégré – une vision des chercheurs et des constructeurs d'ABB – incorporera tous les aspects de la conception, de l'aérodynamique, de l'intégrité mécanique, des coûts et de la coulée. Ce dernier aspect ne représentant qu'un seul des nombreux modules d'un système complexe.

Adresses des auteurs

Martin Balliel
 Dr Peter Holmes
 Dr Peter Ernst
 ABB Corporate Research Ltd
 CH-5405 Baden-Dättwil/Suisse
 Téléfax: +41 (0) 56 493 36 62
 E-mail: martin.balliel@chrcr.abb.ch

Michael Newnham
 ABB Production d'énergie SA
 CH-5401 Baden/Suisse