



Fonderie de TiAl

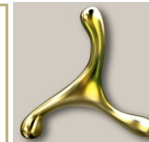
R. Guntlin, U. Hecht, J. Aguilar



access

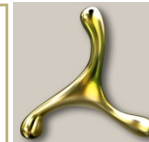
Sommaire

- Access en bref
- Titane-Aluminium – un matériau pour des exigences spécifiques
- Alliage et sa microstructure
- Procédés de mise en œuvre et challenges liés au procédé
- Pièces à géométrie quasi finale réalisée en moulage de précision
- Critères et stratégies pour une introduction sur le marché



ACCESS en bref

- ACCESS est un institut de recherches privé, à but non lucratif, associé à l'université RWTH-Aachen
- Développement de matériaux et de procédés
- 50 employés scientifiques et techniques, environ 25 étudiants en master ou en doctorat
- Chiffre d'affaires annuel: 6 à 7 Millions €
- Financement:
 - 50% des fonds proviennent de projets de recherche
 - 50% de contrats directs avec des entreprises spécialisées en matériaux et en technologies de fonderie
- Principaux clients:
 - Industrie aérospatiale, industrie automobile, ingénierie électrotechnique, fournisseurs de composants
- Certificat d'approbation pour des éprouvettes et des prototypes en TiAl de Rolls-Royce Deutschland



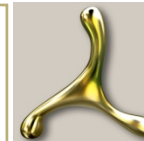
ACCESS en bref

- Access e.V.: Intzestraße 5
- Créée en 1986
- Bureaux
- Laboratoires
- Atelier mécanique
- Analytiques, contrôle de qualité
- Simulation de microstructures et de procédés
- Surface: 1200 m²



ACCESS en bref

- Centre Technologique: Jülicherstraße 322
- Créé en 2000
- Production de prototypes et de petites séries
- Usine pilote pour diverses applications de fonderie
- Ligne de production de carapaces
- Traitement thermique
- Surface: 1200 m²

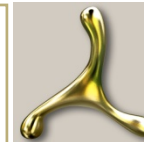


Titane-Aluminium – un matériau pour des exigences spécifiques

Titane-Aluminium sont des alliages légers pour une application de 500°C à 850°C

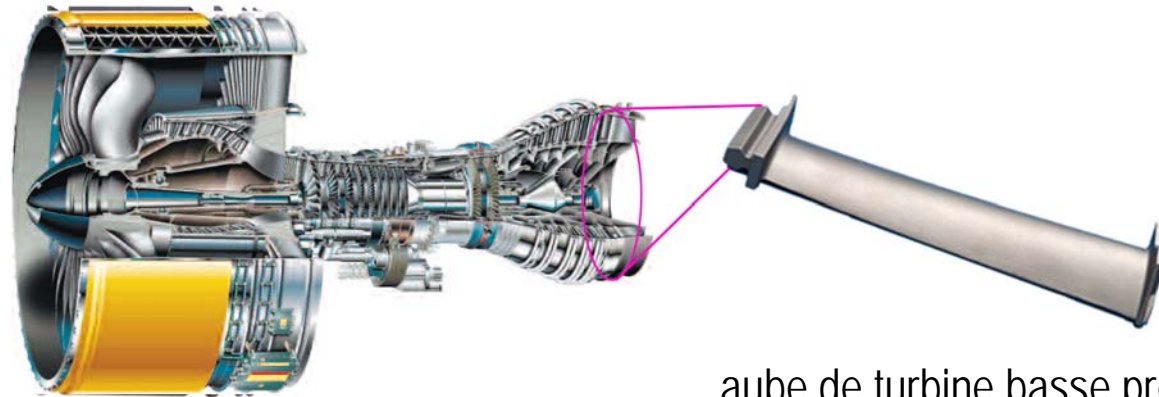
Ensemble unique de propriétés mécaniques et thermo physiques:

- faible densité (3,8 à 4,2 g/cm³), grande raideur
 - bonne résistance intrinsèque à la corrosion pour T < 750°C
 - pour T > 750°C résistance à la corrosion grâce à un traitement de surface adéquat (F-Implantation)
 - grande résistance spécifique, bonne propriété au fluage et à la fatigue
 - faible ductilité et ténacité à température ambiante
- ➔ domaine d'application: composants de réacteurs et de moteurs



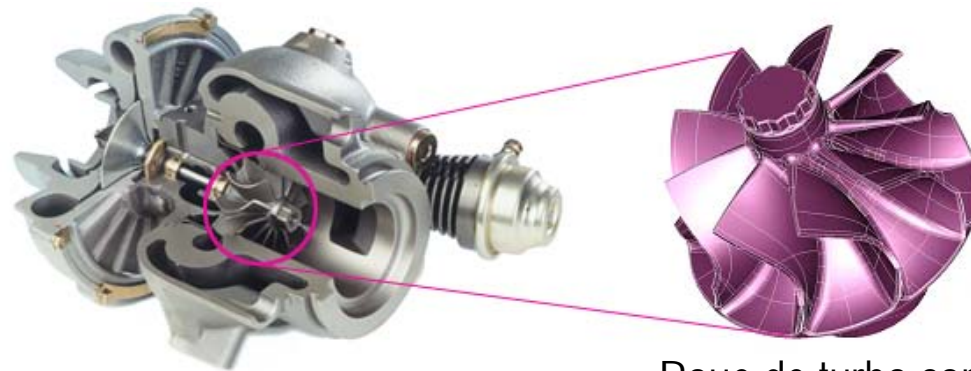
Titane-Aluminium – un matériau pour des exigences spécifiques

Turbine de moteurs
d'avion
Snecma

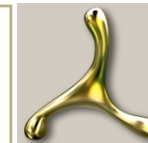


aube de turbine basse pression

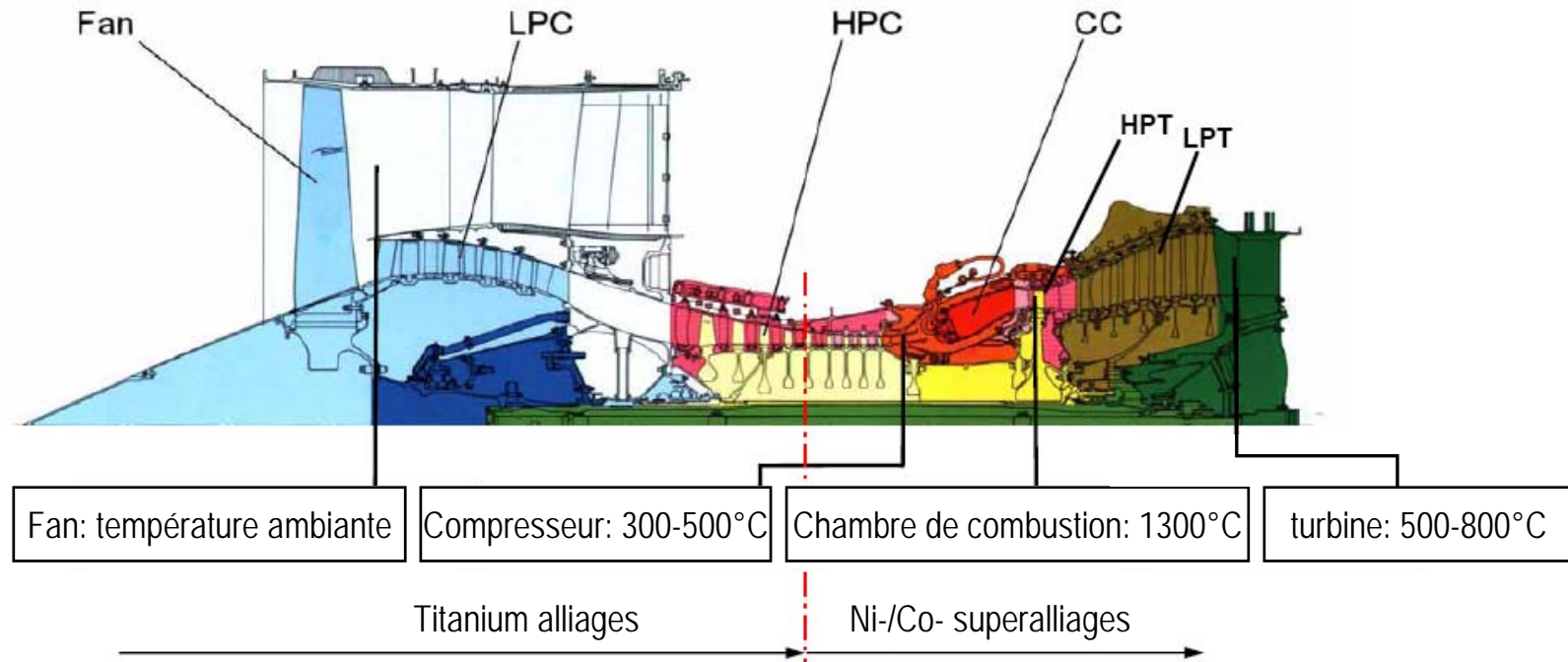
Turbo compresseur
Borg Warner Turbo
Systems



Roue de turbo compresseur
(échappement des gaz)

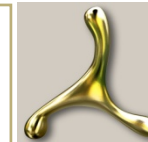


Titane-Aluminium – un matériau pour des exigences spécifiques

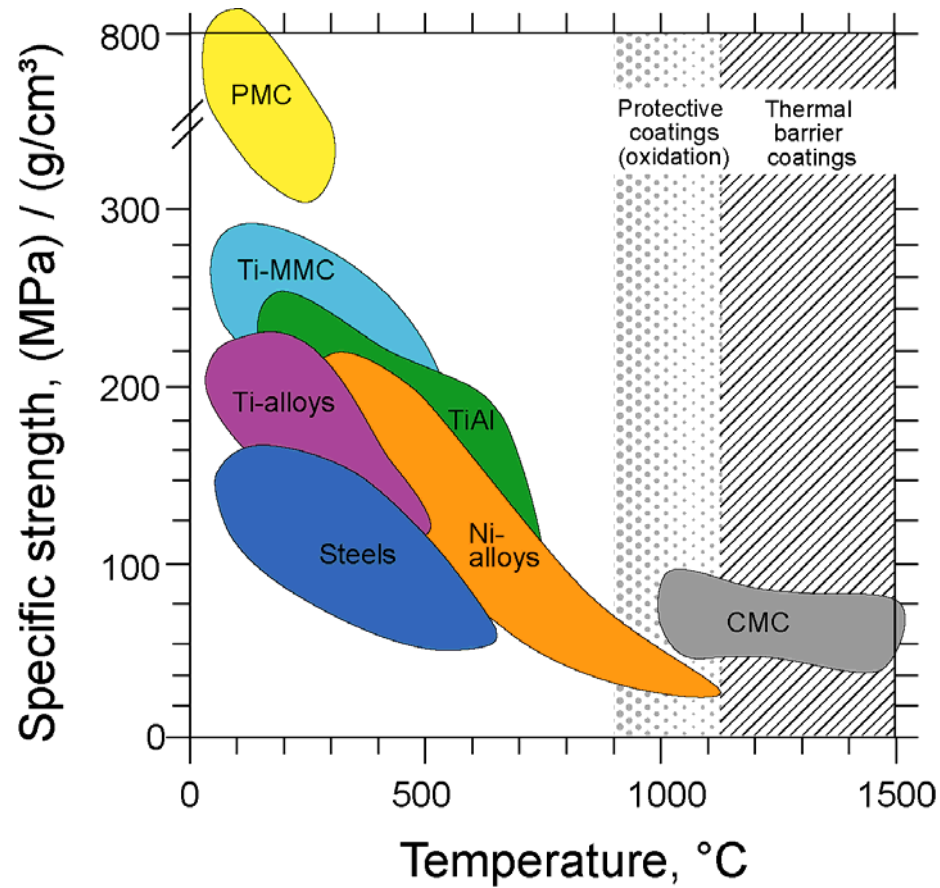


objectif: réduction, de poids, de la consommation de carburant, d'émission NO_x , de bruit et du coût
stratégie: design basé sur de nouveaux matériaux et procédés de mise en œuvre

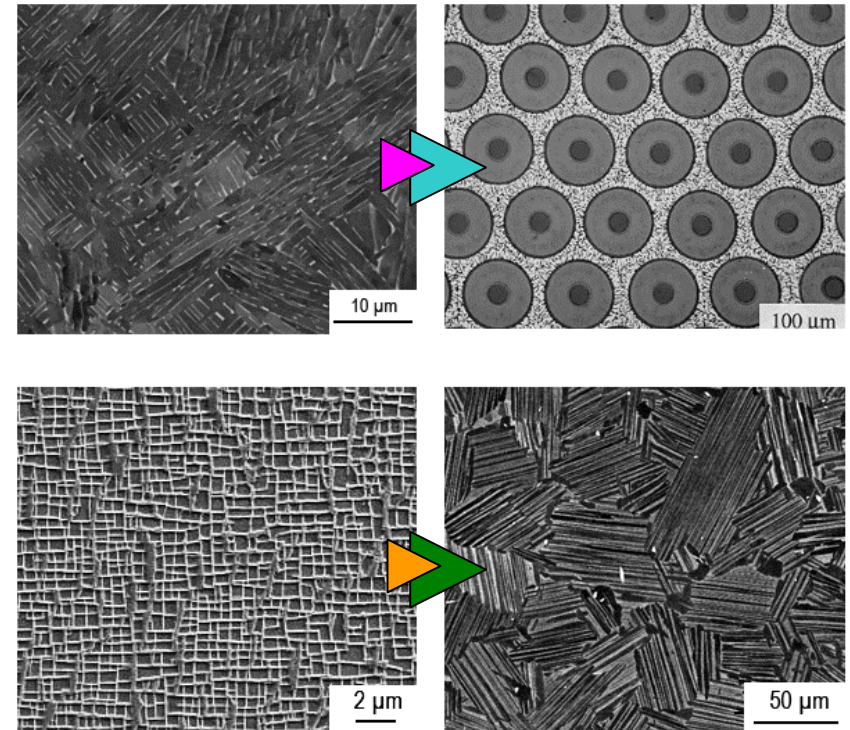
T. Gartner , Lufthansa technique



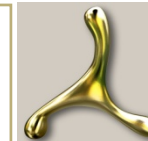
Titane-Aluminium – un matériau pour des exigences spécifiques



W. Smarsly, MTU

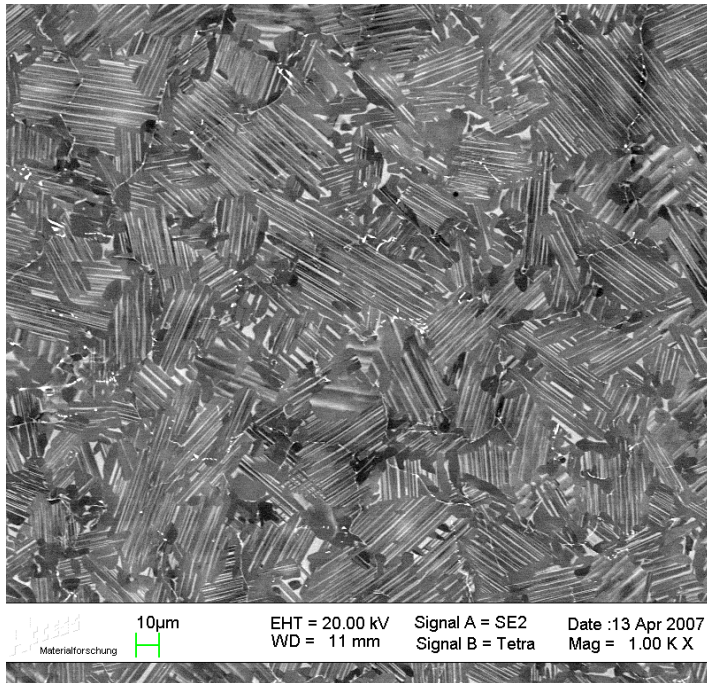


substitution de matériaux:
alliages de Ti → Ti-MMC (Blisk)
superalliages → TiAl

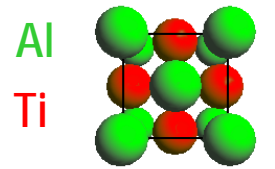


Alliage et sa microstructure

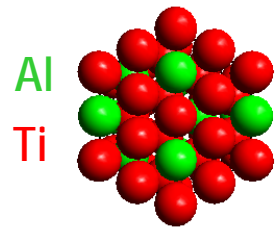
Les alliages TiAl modernes ont une structure lamellaire et sont composés de deux phases intermétalliques



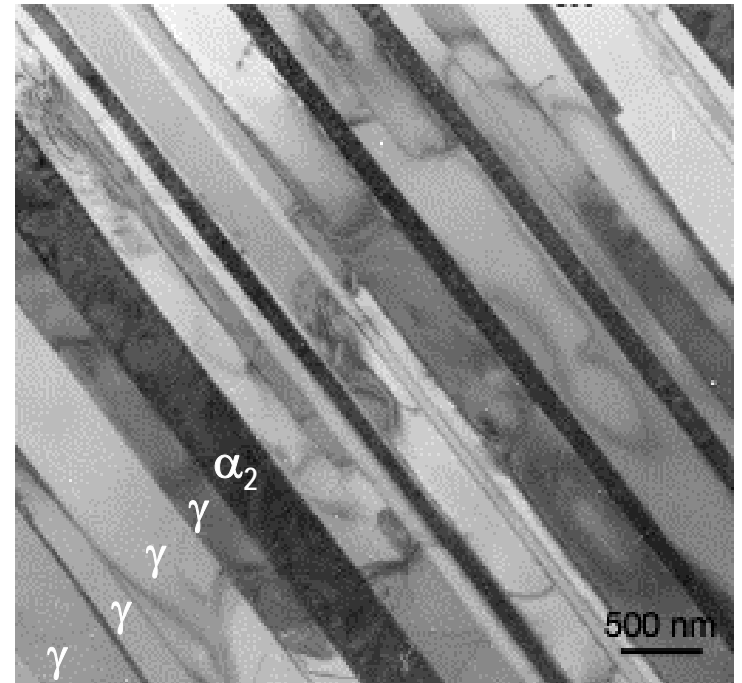
Structure lamellaire de la microstructure
image REM



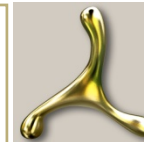
γ -TiAl, L1₀



α_2 -Ti₃Al, D0₁₉



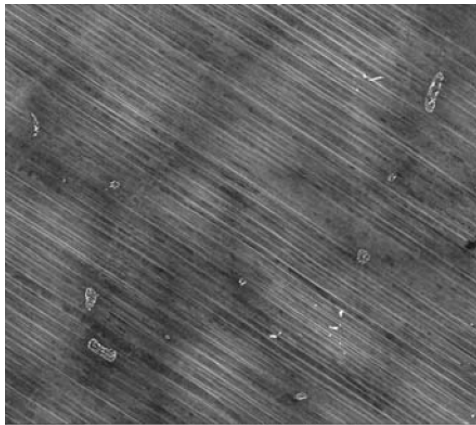
Structure lamellaire de la microstructure
image TEM



Alliage et sa microstructure

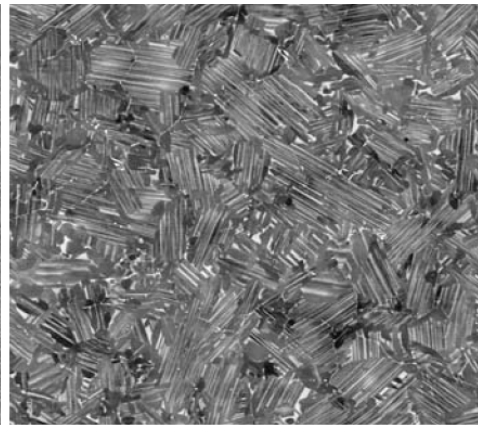
R&D des 30 dernières années a conduit à une multitude d'alliages attractifs, qui possèdent de bonnes propriétés caractéristiques

RNT 650



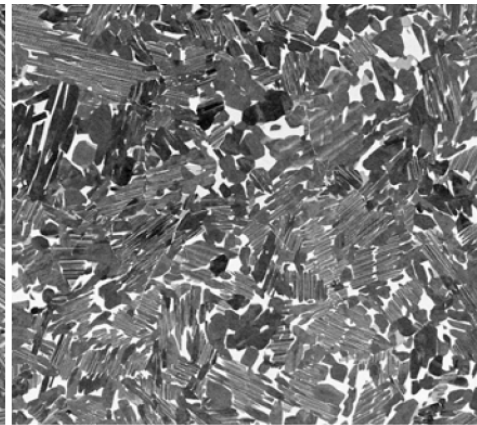
Ti-48Al-2Nb-0.75Cr-0.3Si

TNB-V3



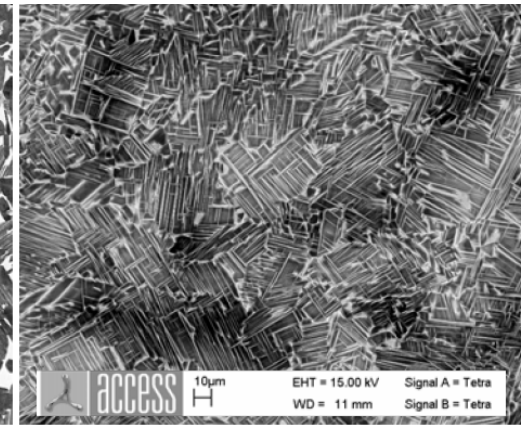
Ti-45Al-8Nb-0.2C-0.2B

TNB-V3B



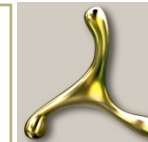
Ti-44Al-6Nb-1Mo-0.2B

Ti46Al8Ta



Ti-46Al-8Ta

Axe de développement des dernières années:
favoriser la solidification Beta et réaliser l'affinement du grain



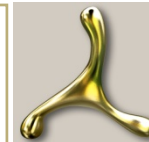
Alliage et sa microstructure

Composition typique des alliages TiAl

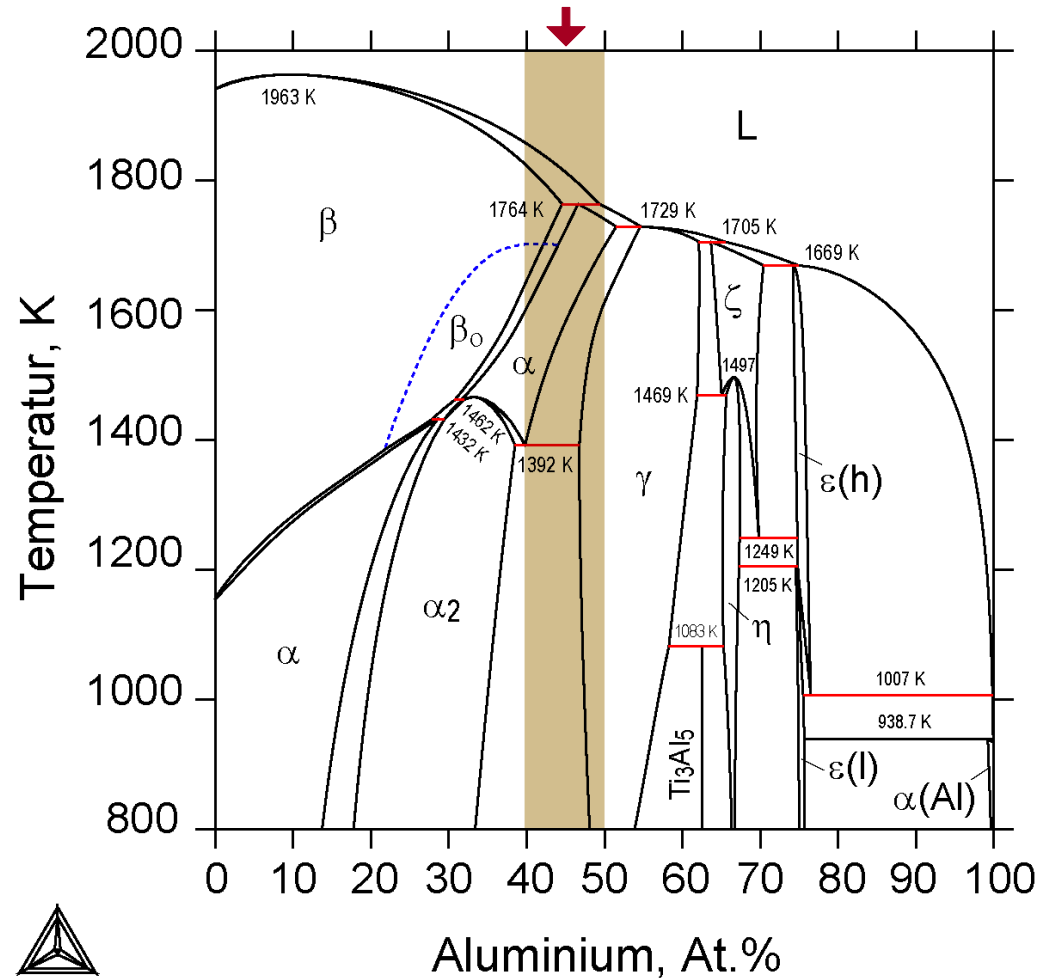
Système binaire:	Al de 44 à 48 At.%
Éléments principaux:	Σ Nb,Mo,Ta,Cr de 5 à 10 At.%
Additifs supplémentaires:	C, Si chaque fois de 0,0 à 0,3 At.%
Affinement du grain (in situ):	B de 0,0 à 0,8 At.%
Impuretés:	O de 300 à 1000 ppm

Les alliages TiAl sont des alliages exigeants, dû à ses propriétés thermodynamiques et à la cinétique des changements de phase

→ paramètres spécifiques des procédés



Procédés de mise en œuvre et challenges liés au procédé



Les challenges liés au procédé concerne le contrôle des caractéristiques suivantes:

Teneur de l'élément (%) selon spécification

Contamination du métal liquide

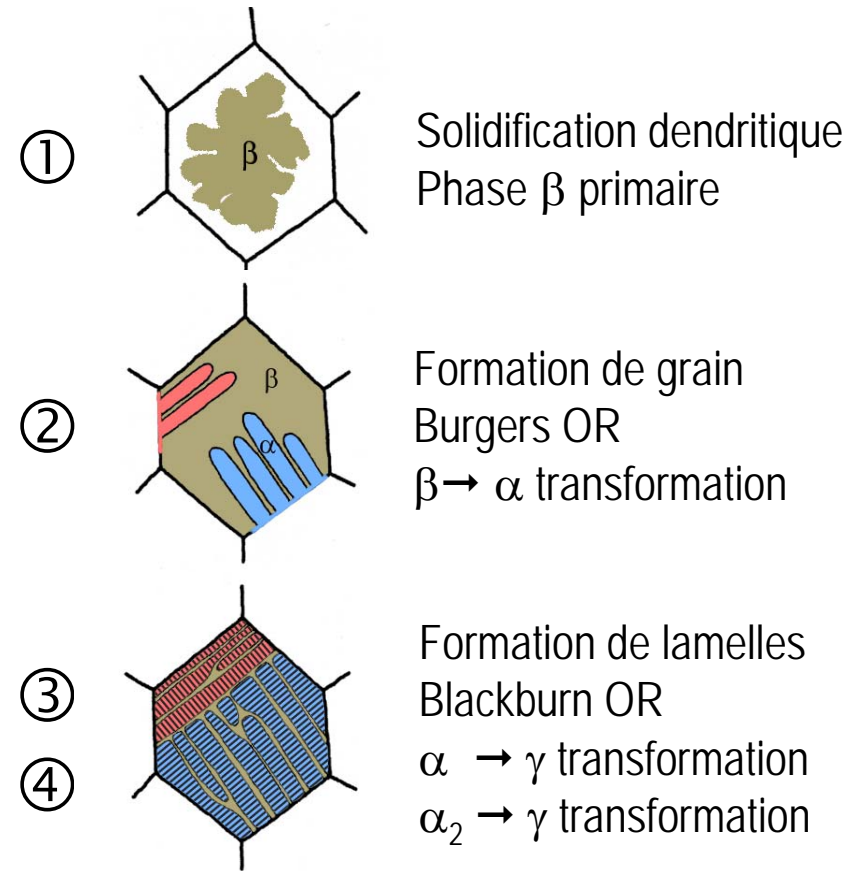
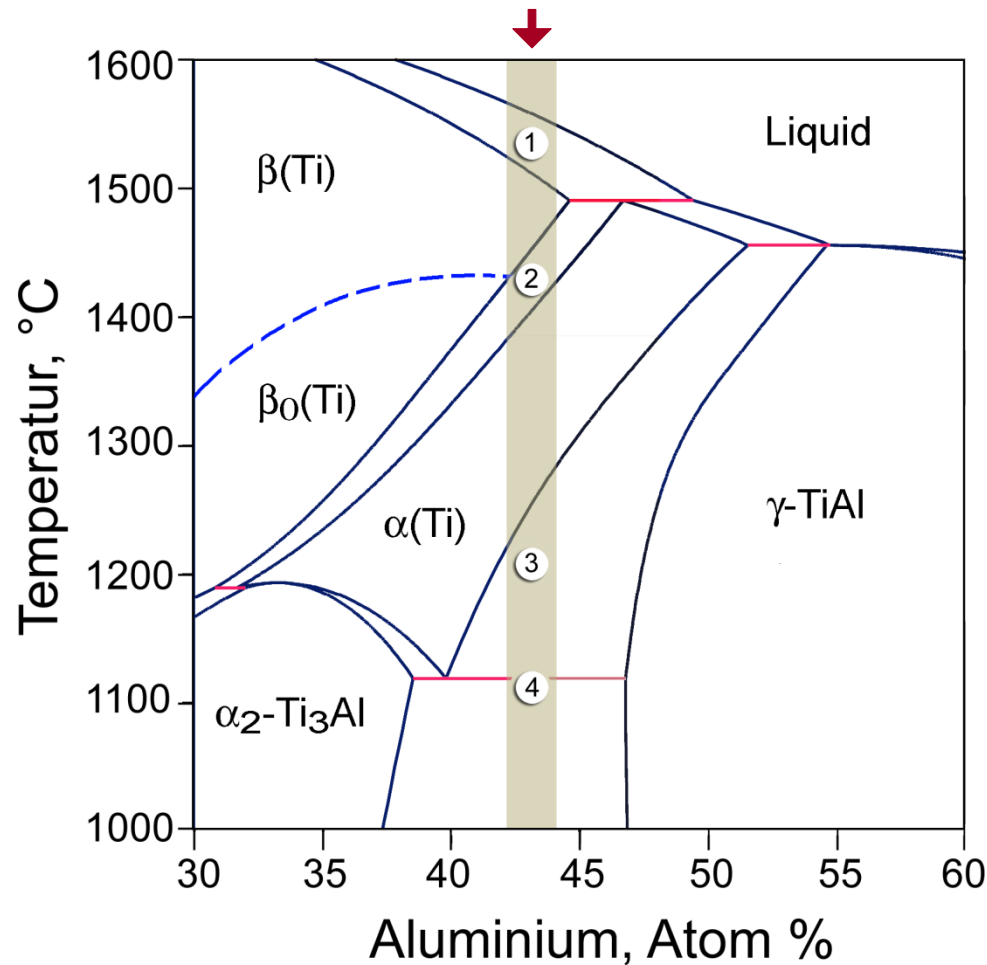
Morphologie de solidification

micro- et macro-ségrégation

Taille des grains et texture



Procédés de mise en œuvre et challenges liés au procédé



OR: relation d'orientation entre les phases

Procédés de mise en œuvre et challenges liés au procédé

Les procédés de mise en œuvre du TiAl sont développés et optimisés d'une manière ciblée
Cependant il n'existe actuellement aucune production en série de pièces à coûts réduits

Métallurgie des lingots (lingot de fusion et brut de forgeage):

VAR électrode réalisée par métallurgie des poudres

Techniques de mise en forme (fonderie et/ou forgeage):

Procédés de fonderie pour une réalisation de pièces respectant la géométrie

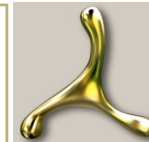
Procédés de forgeage et de métallurgie des poudres

Finition électrochimique et par usinage:

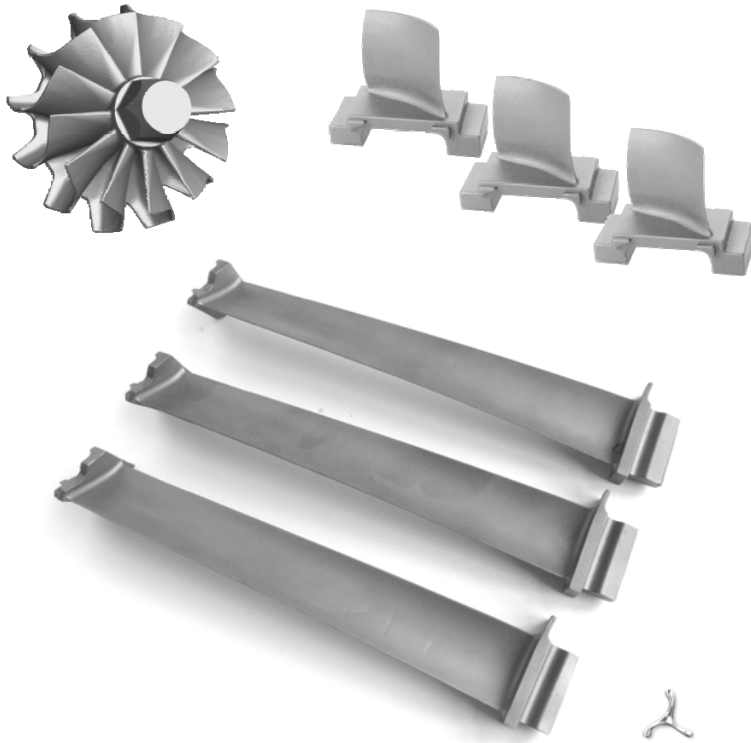
tournage, fraisage, forage, meulage glissant, ECM, etc.

Techniques d'assemblage:

Soudure (par friction, par faisceau d'électrons et au laser) et brasage



Pièces à géométrie quasi finale réalisée en fonderie de précision

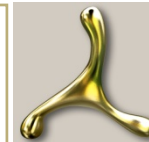


- La fonderie de précision est utilisée pour la réalisation de pièces à géométrie complexe
- Elle a démontré sa faisabilité pour des alliages de titane
- Elle est utilisée au Japon pour la production de roue de turbo compresseurs en TiAl
- Nous travaillons, mondialement afin de réaliser des pièces en TiAl pour l'industrie aéronautique

Exemple

GE – PCC - IHI, réacteur GENx

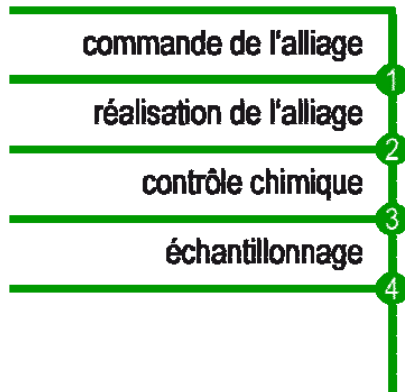
Mars 2006, premier test de réacteur



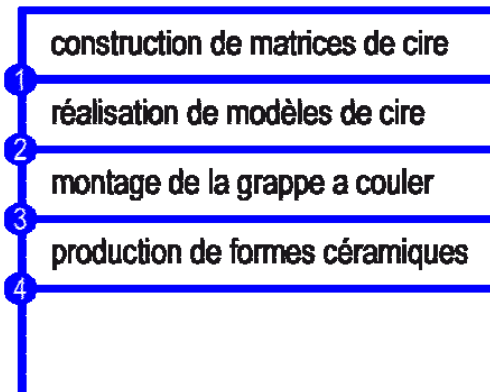
Pièces à géométrie quasi finale réalisée en fonderie de précision

Procédé LINN de fonderie de précision: coulée horizontale sous force centrifuge dans une forme céramique

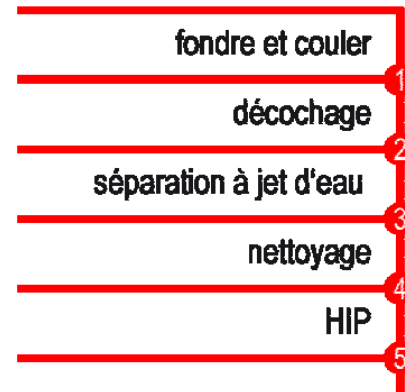
ALLIAGE



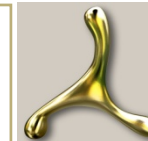
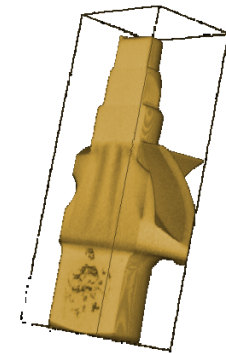
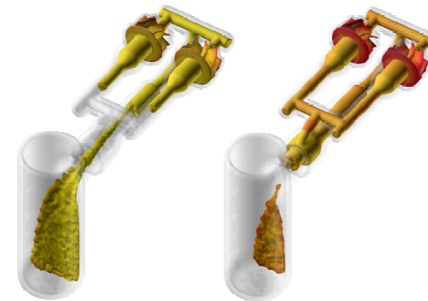
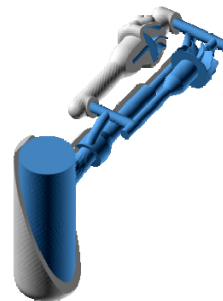
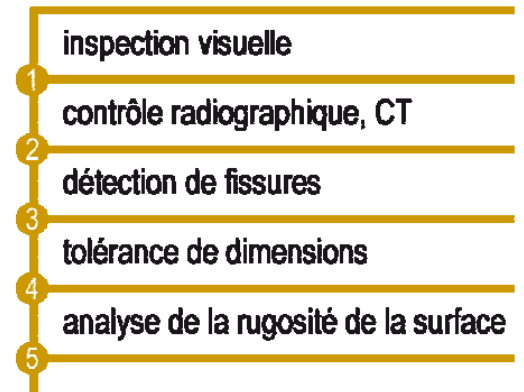
CIRE / CÉRAMIQUE



PROCÉDÉ DU COULAGE



CONTRÔLE de QUALITÉ



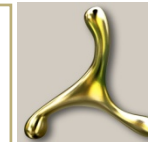
Pièces à géométrie quasi finale réalisée en fonderie de précision

Chaîne de production automatisée avec 2 unités de coulage par centrifugation horizontale pour une utilisation alternée

Capacité de fusion de 2 x 2 kg TiAl, productivité: 20 grappes / heure

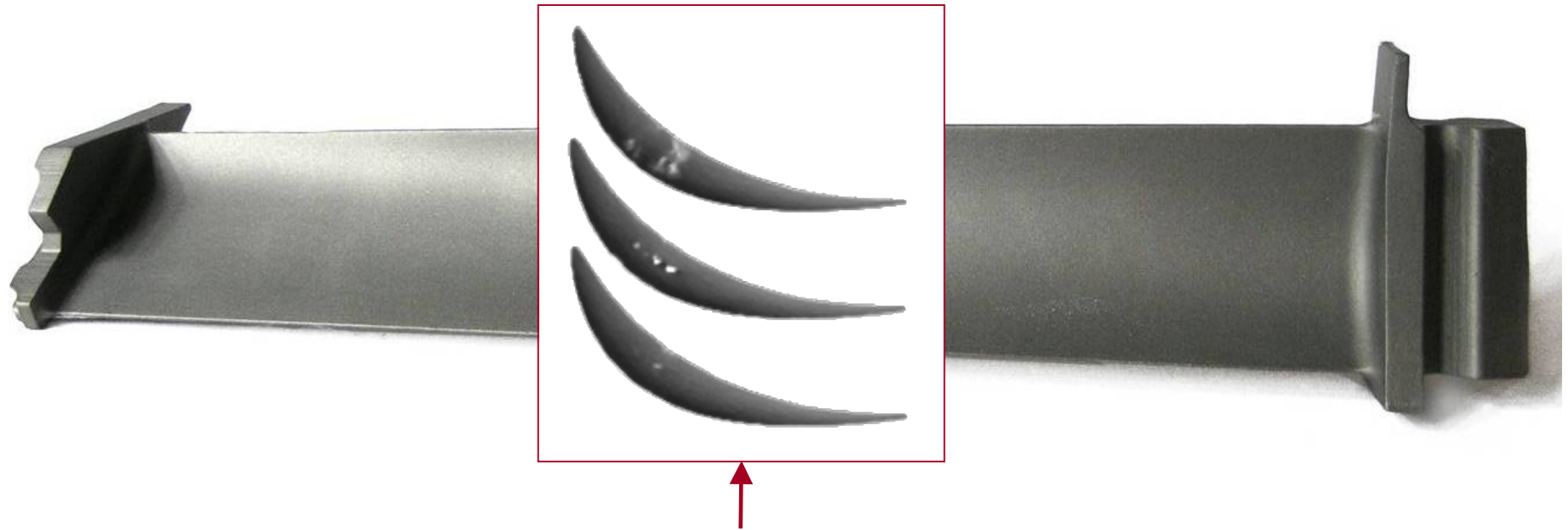


Chaque chambre de fonderie: 514 x 335 x 206 mm³



Pièces à géométrie quasi finale réalisée en fonderie de précision

Développement actuel en coopération avec TITAL GmbH
Optimisation, des conduits de coulée et de la technique de fonderie pour
des aubes de turbine basse pression L=20 à 35 cm

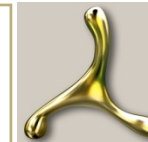
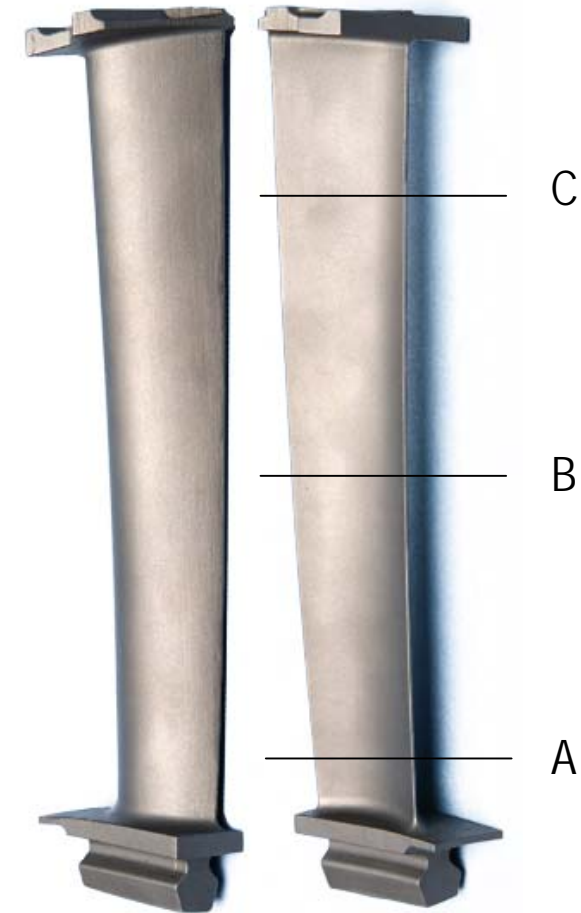
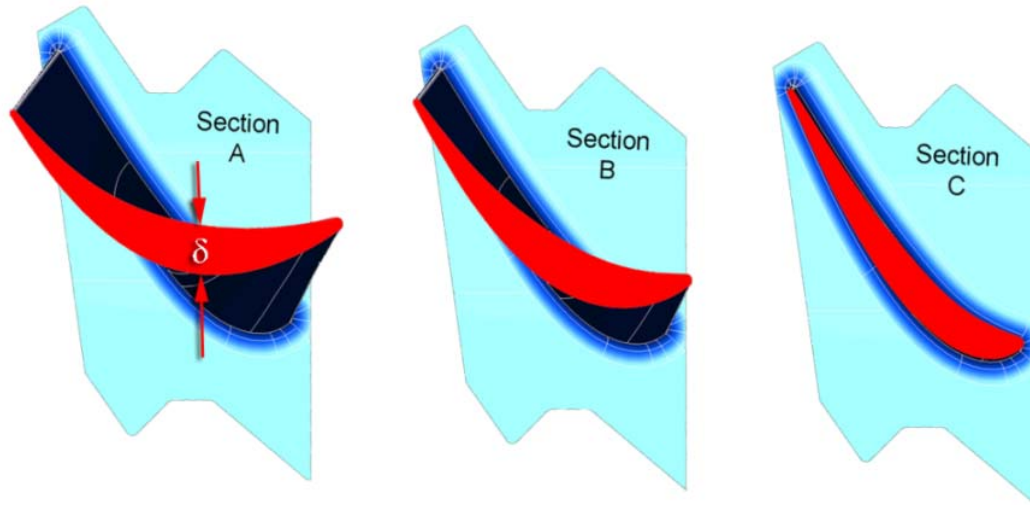


Défauts typiques

Porosité sur la ligne médiane, en contact ponctuels avec la surface extérieure

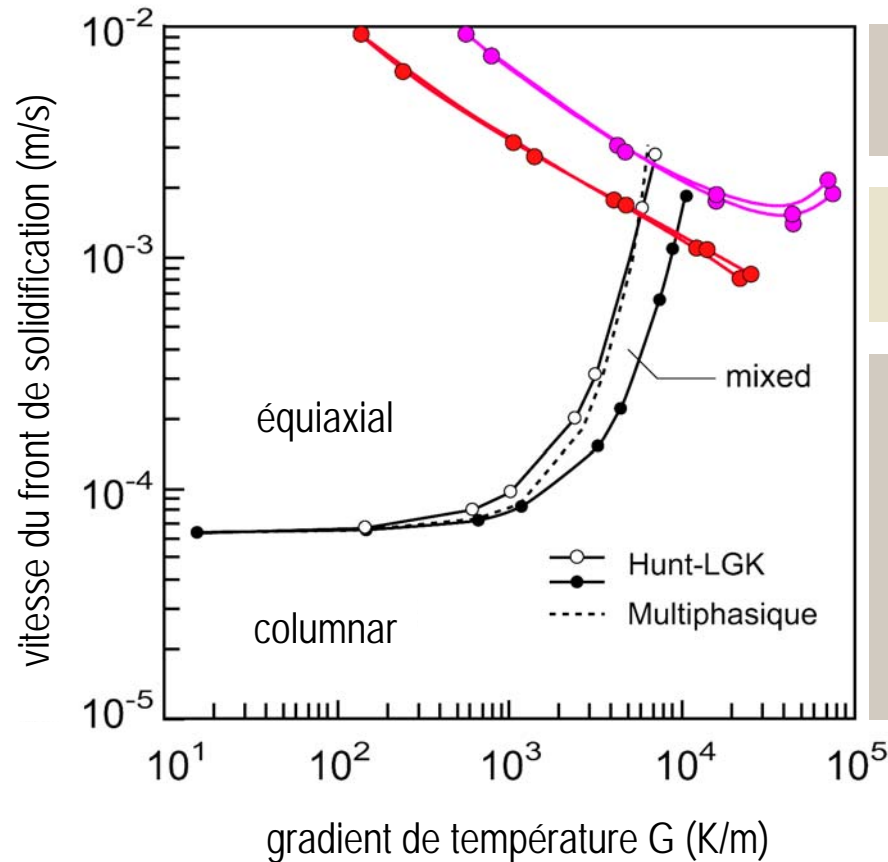
Pièces à géométrie quasi finale réalisée en fonderie de précision

- L'alimentation en métal liquide de la pale de l'aube est extrêmement difficile
- Longueur totale $L_t = 224.4 \text{ mm}$
- Longueur de pale $L = 186.0 \text{ mm}$
- Épaisseur de la pale $\delta = 4.77 \text{ à } 3.60 \text{ mm}$
- Facteur de forme $L/\delta \cong 40$



Pièces à géométrie quasi finale réalisée en fonderie de précision

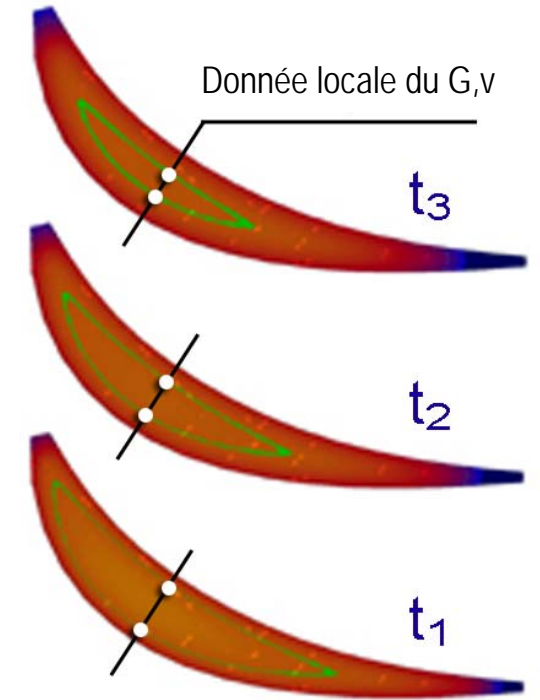
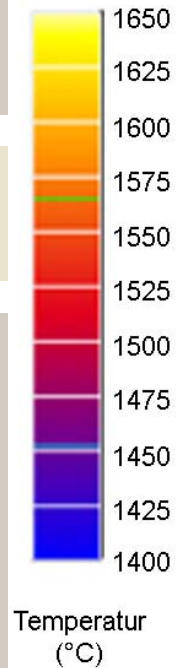
Solutions scientifiques déduites à partir des transitions morphologiques lors de la solidification



moule céramique: 800°C

moule céramique: 900°C

Les modèles CET sont-ils applicables?



Données supplémentaires:
Contraintes de traction, remplissage, forces centrifuges

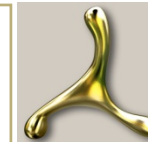
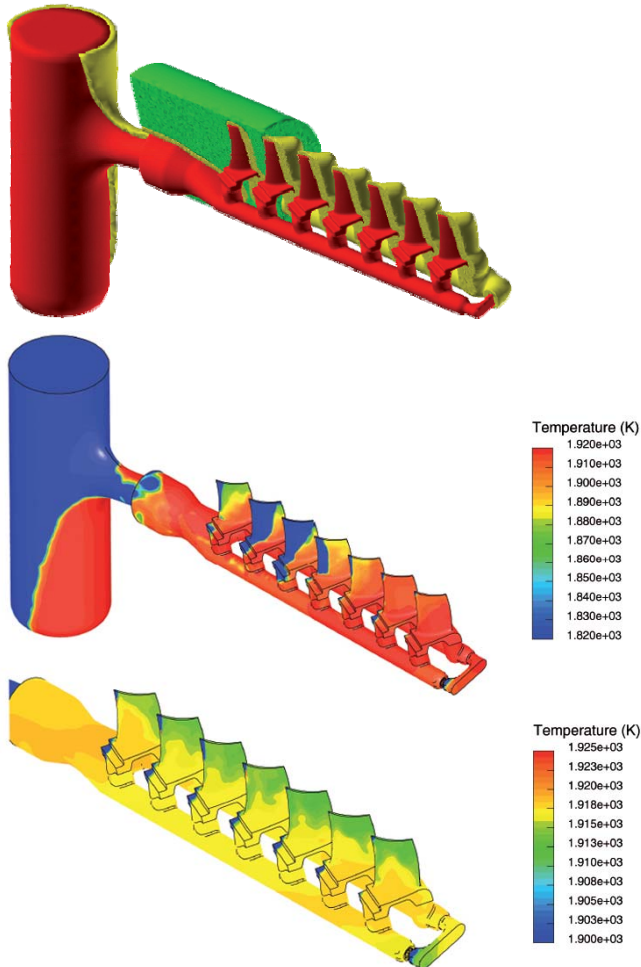
Pièces à géométrie quasi finale réalisée en fonderie de précision

2006-2008: aubes de compresseur en TiAl

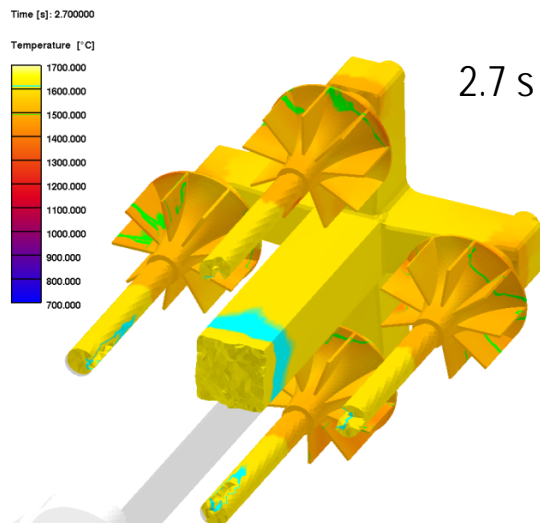
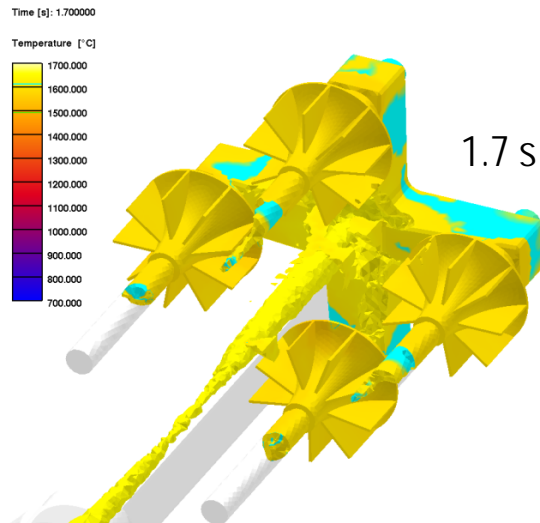


Optimisation des "système de fonderie" (attaque de coulée, masselotte)
à l'aide de la simulation numérique du remplissage et de la solidification
(logiciel STAR-Cast)

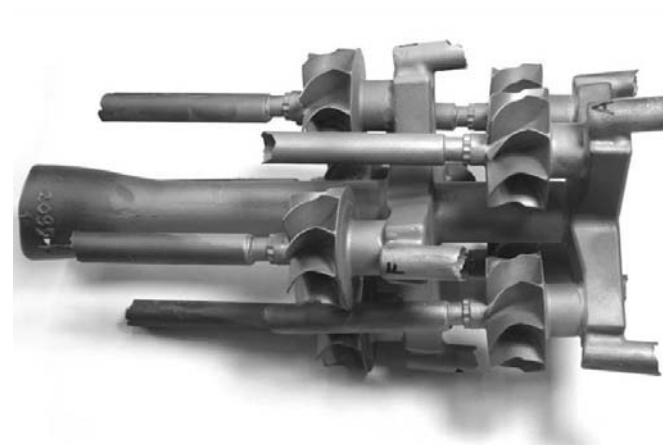
Réalisation avec succès et livraison de 2600 aubes en alliage
TNB-V3, TNB-V3B
(aubes variables, aube unique, segments)



Pièces à géométrie quasi finale réalisée en fonderie de précision

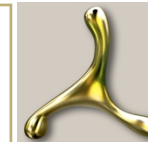


2007-2009: roues de turbo compresseur

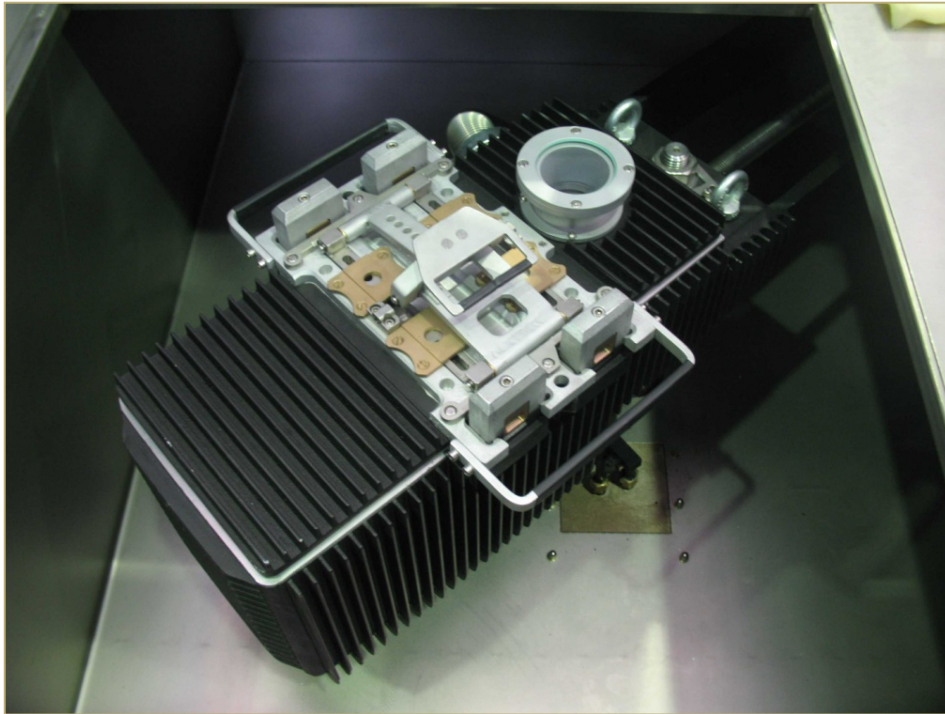


Optimisation des "système de fonderie" (attaque de coulée, masselotte)
à l'aide de la simulation numérique du remplissage et de la solidification
(logiciel STAR-Cast)

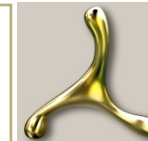
Réalisation avec succès et livraison:
février 2010



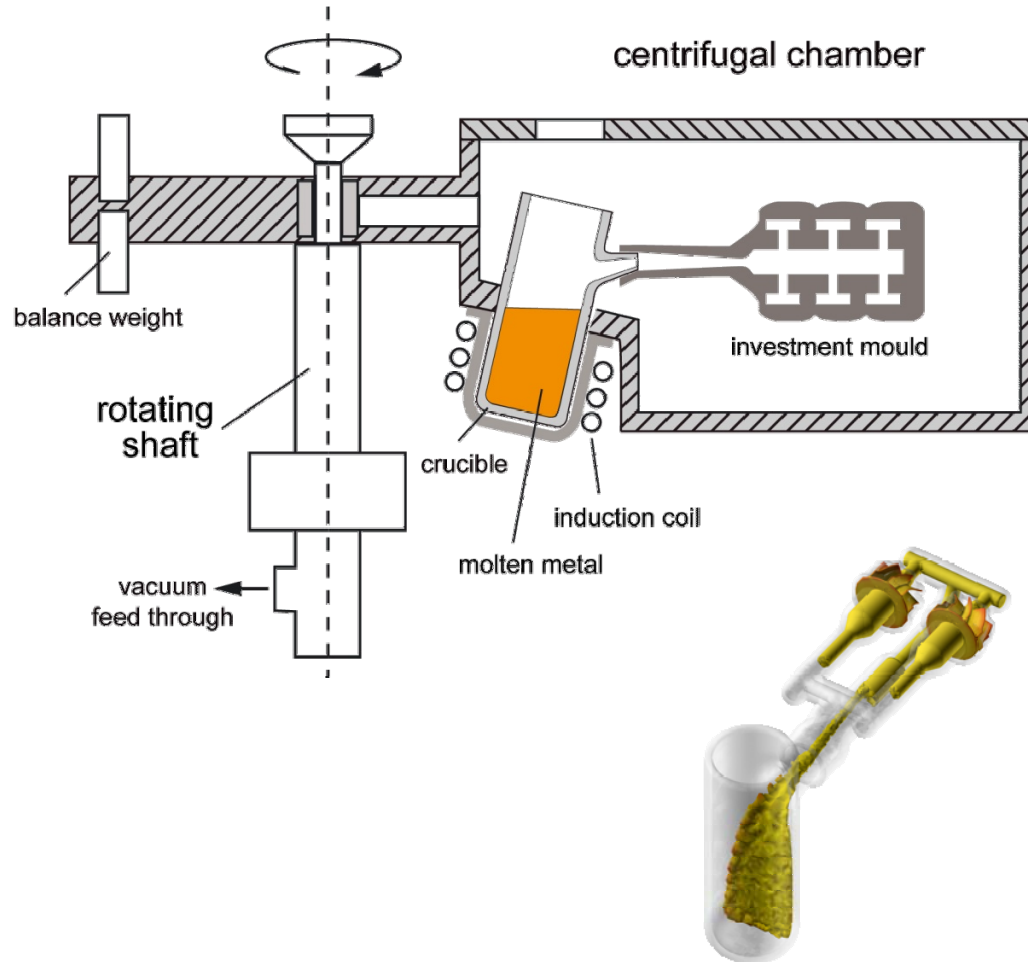
Simulation numérique du procédé de fonderie de précision



Coulée centrifuge horizontale
de roues de turbo compresseur



Simulation numérique du procédé de fonderie de précision



Coulée centrifuge horizontale

Capacité de fusion: 1.0 kg

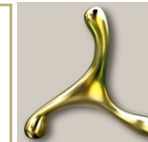
Surchauffe $\Delta T \approx 20$ à 100 K

Nombre de tours ω : 160 à 200 rpm

Durée du procédé: 6 - 8 min

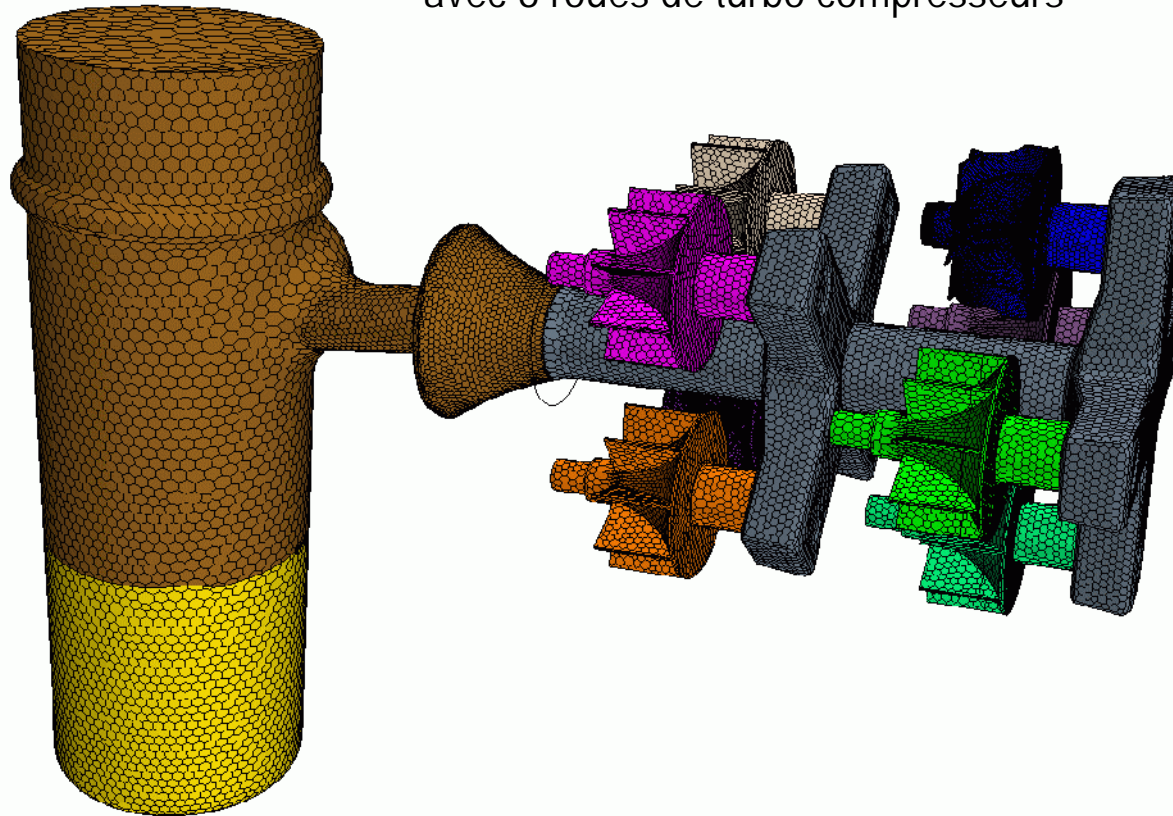
Taux d'oxygène: 800 -1000 Gew.-ppm

paramètres: ΔT , ω , design du système de fonderie



Simulation numérique du procédé de fonderie de précision

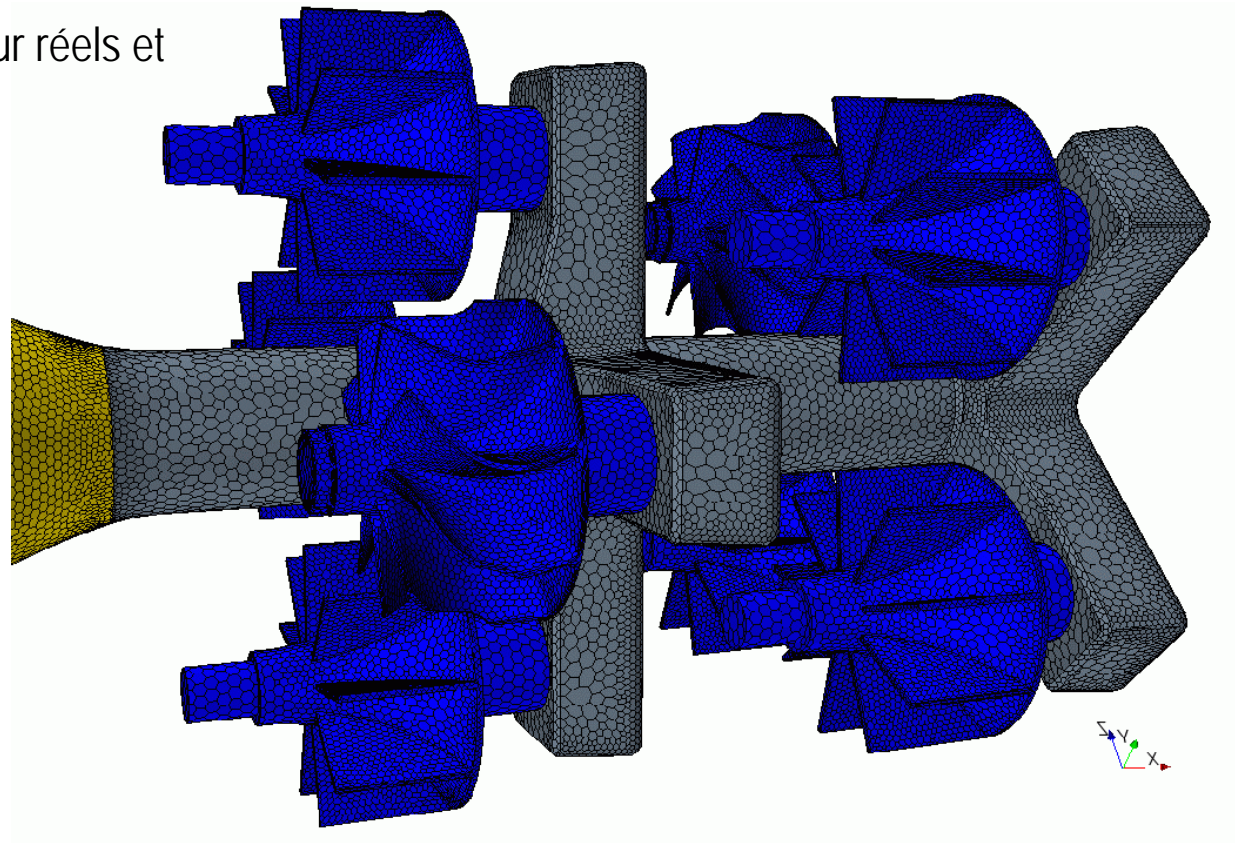
Maillage EF (éléments finis) pour un montage avec 8 roues de turbo compresseurs



Simulation numérique du procédé de fonderie de précision

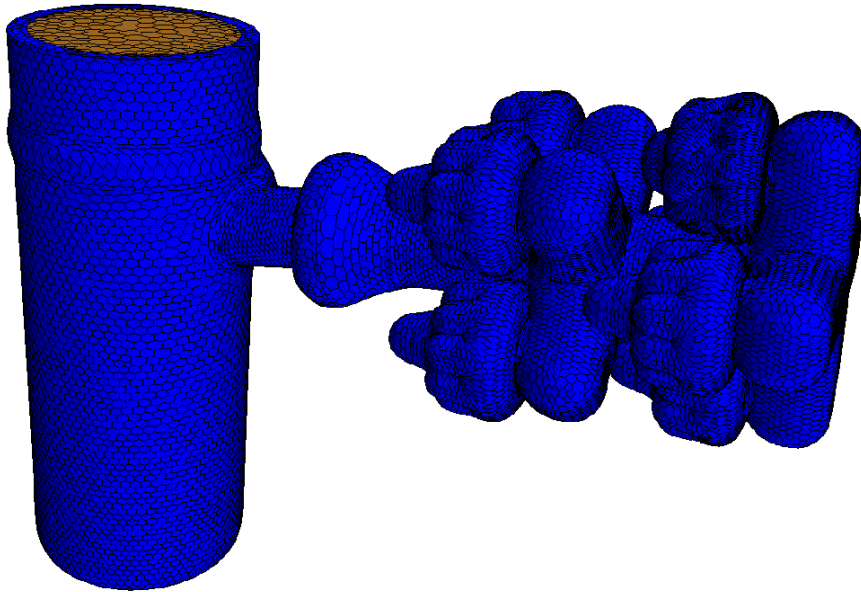
Maillage EF

2 roues de turbo compresseur réels et
6 roues "Dummy"
(rédaction du maillage EF)

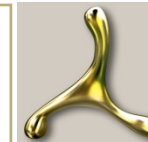
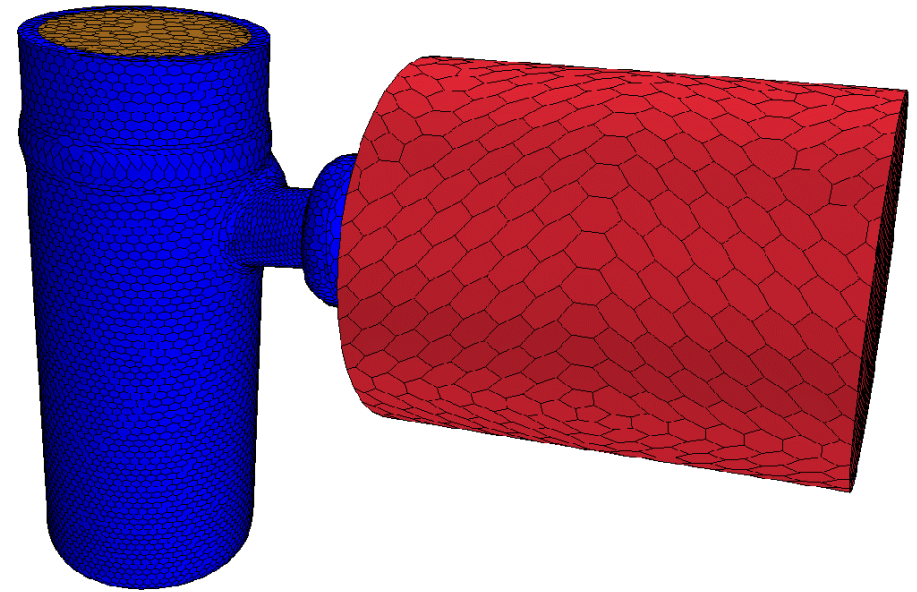


Simulation numérique du procédé de fonderie de précision

Génération automatique du moule céramique STAR-Cast

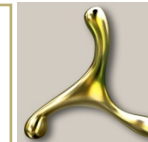
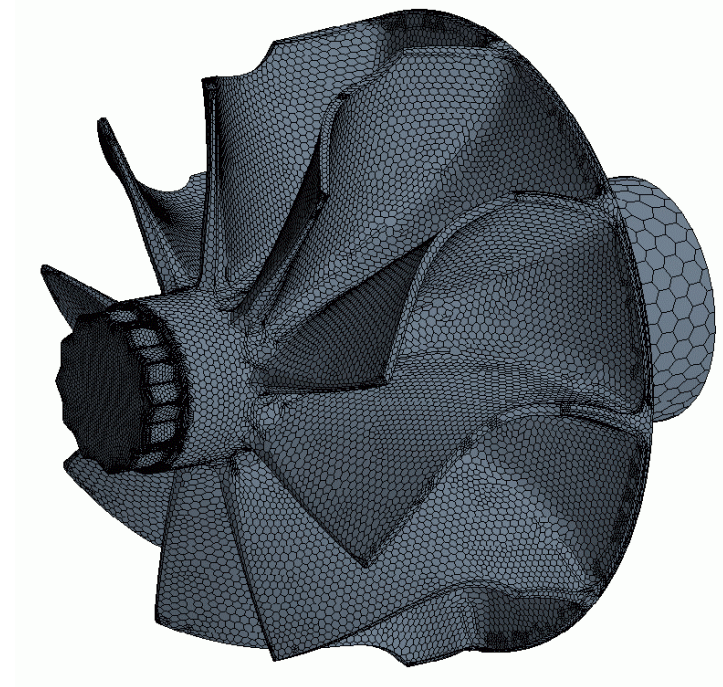
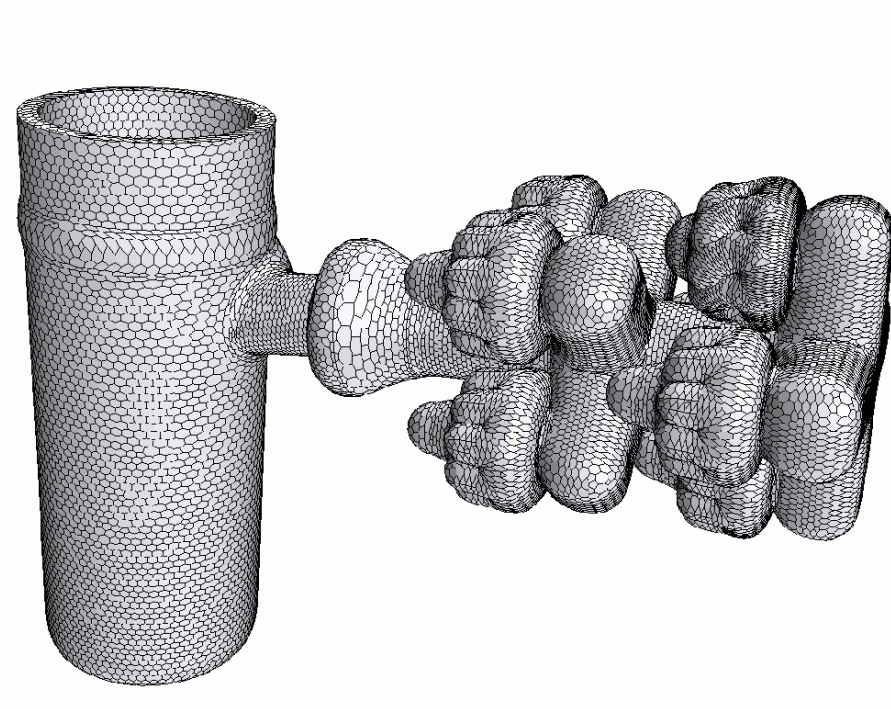


Isolation céramique du moule



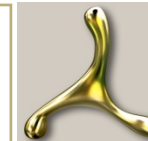
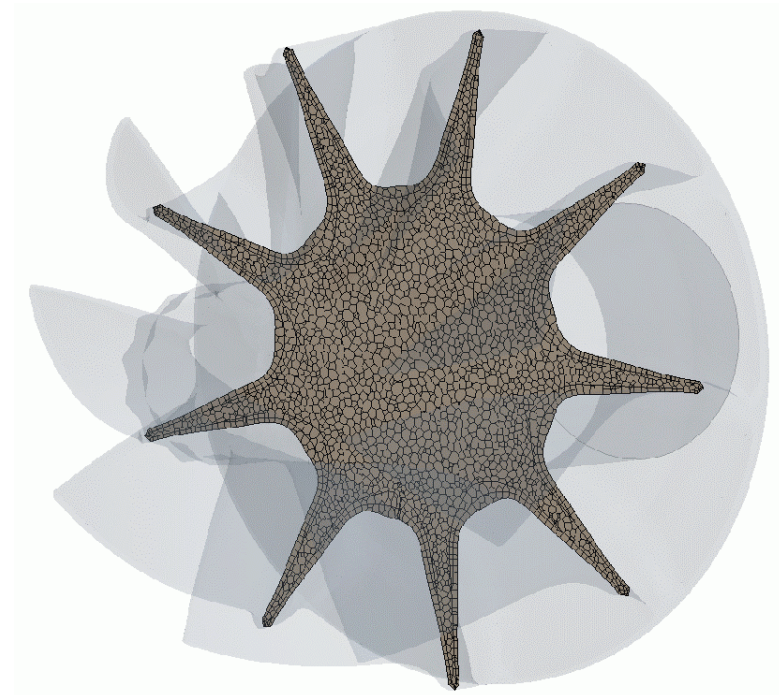
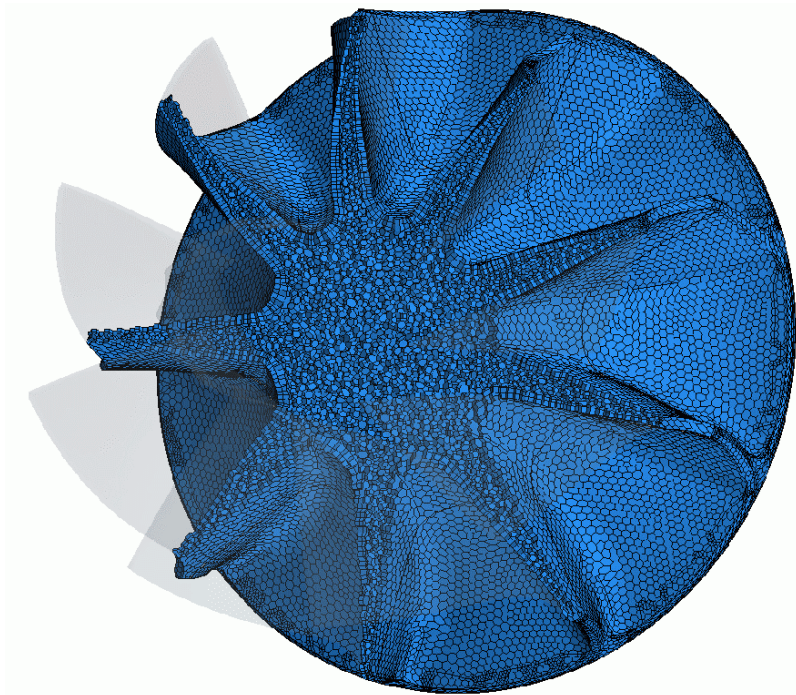
Simulation numérique du procédé de fonderie de précision

La qualité du maillage est essentielle pour la simulation couplée,
du remplissage et de la solidification ➔ STAR-CCM+



Simulation numérique du procédé de fonderie de précision

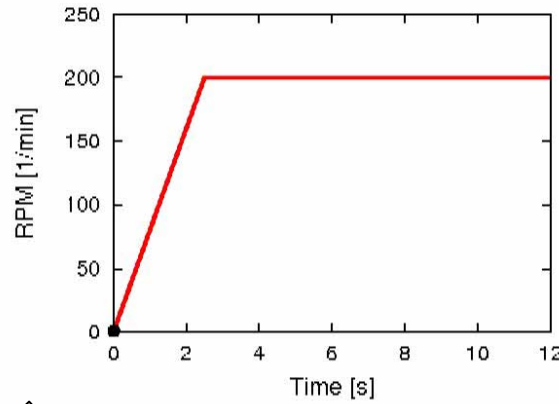
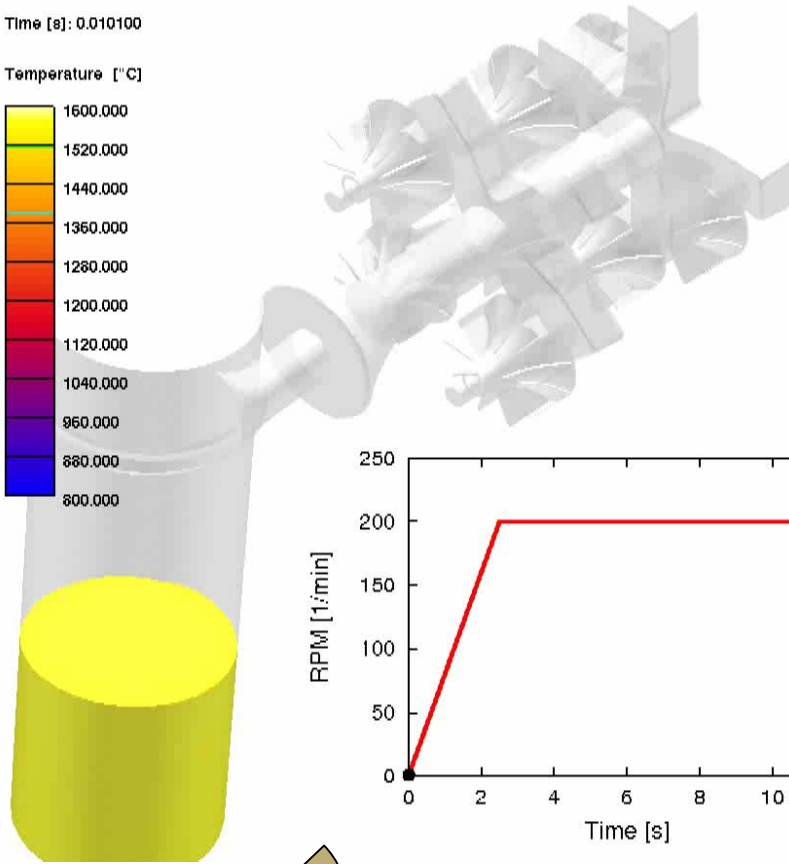
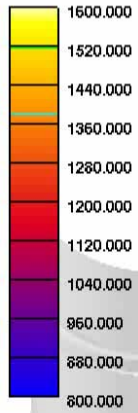
La qualité du maillage est essentielle pour la simulation couplée,
du remplissage et de la solidification ➔ STAR-CCM+



Simulation numérique du procédé de fonderie de précision

Time [s]: 0.010100

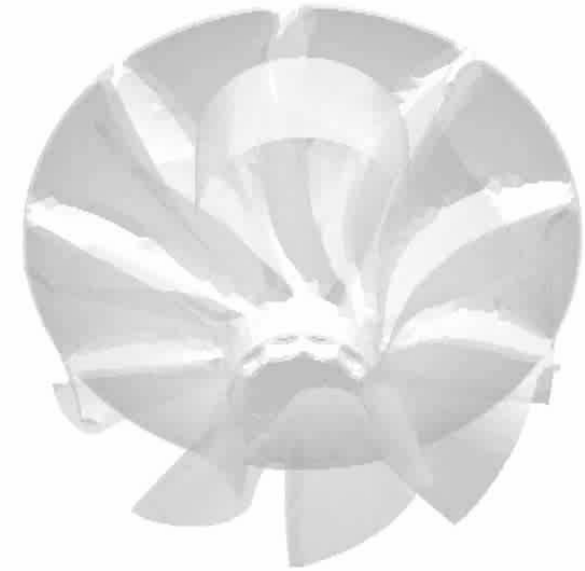
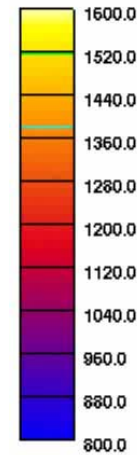
Temperature [°C]



sens de rotation

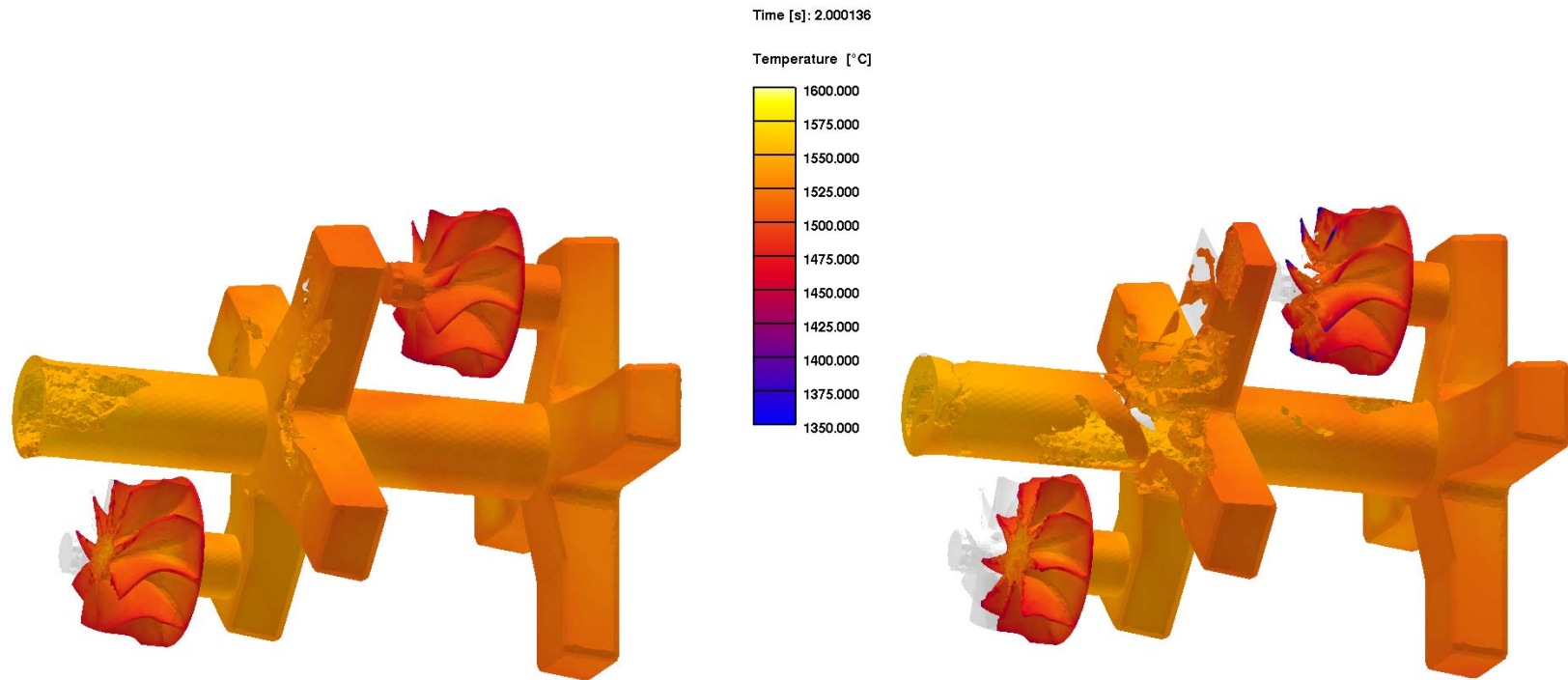
Time [s]: 1.510100

Temperature



Simulation numérique du procédé de fonderie de précision

La porosité du moule céramique pour l'évacuation de l'air ambiant, en présence d'une faible pression de l'argon, influence le remplissage de celui-ci

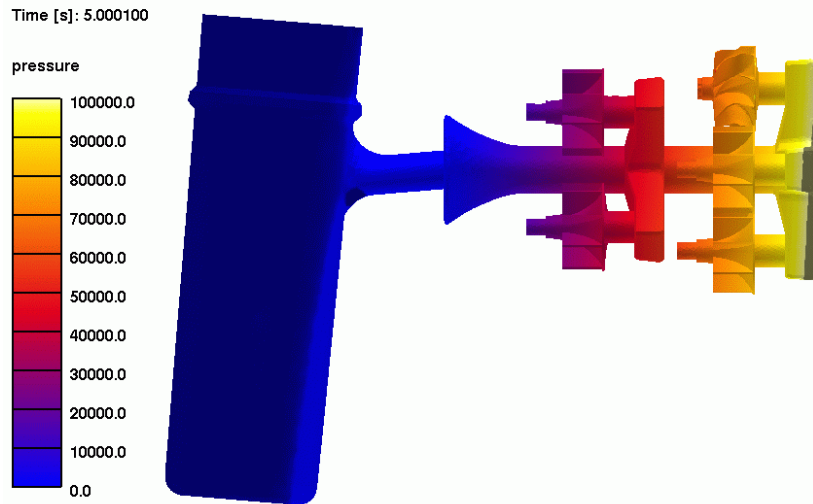


Porosité calibrée du moule céramique

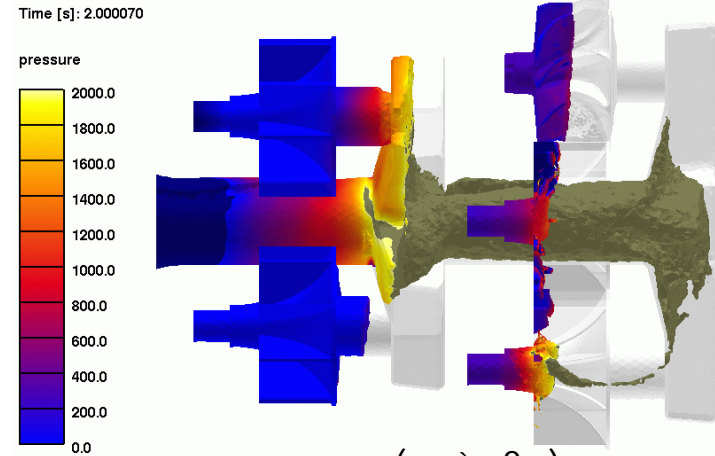
Porosité du moule réduite d'un facteur 10

Simulation numérique du procédé de fonderie de précision

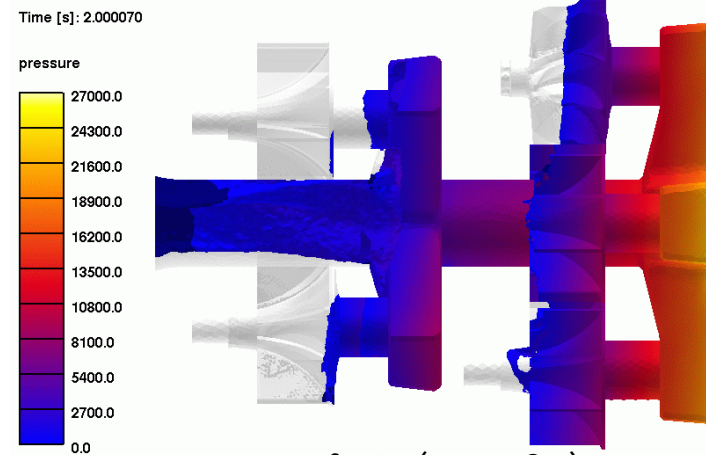
Distribution de pression



Système global (après 5 s)



gaz (après 2 s)



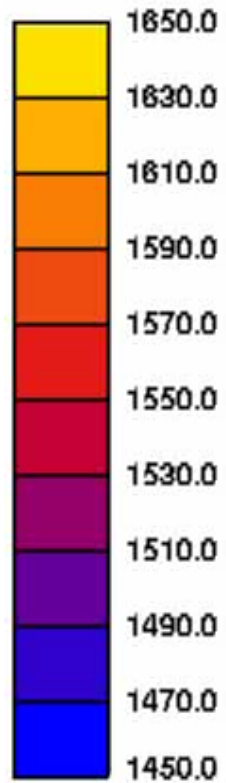
fonte (après 2 s)



Simulation numérique du procédé de fonderie de précision

Time [s]: 1.480379

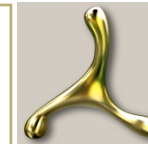
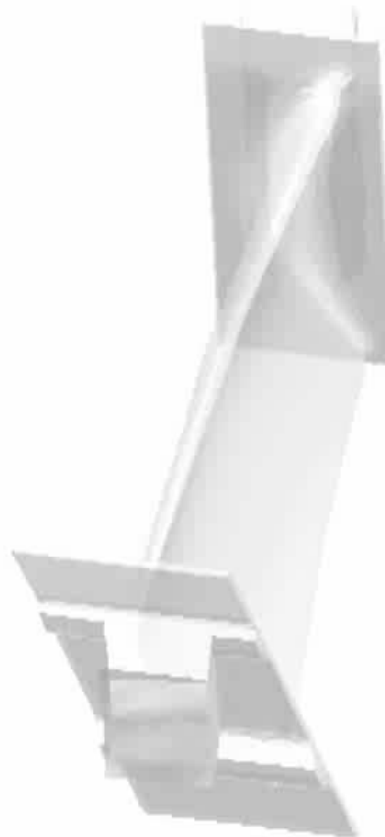
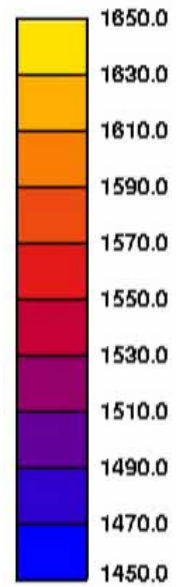
Temperature



Simulation numérique du procédé de fonderie de précision

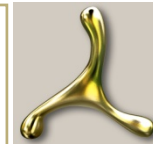
Time [s]: 1.410379

Temperature



Critères et stratégies pour une introduction sur le marché

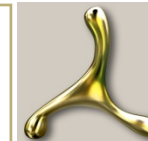
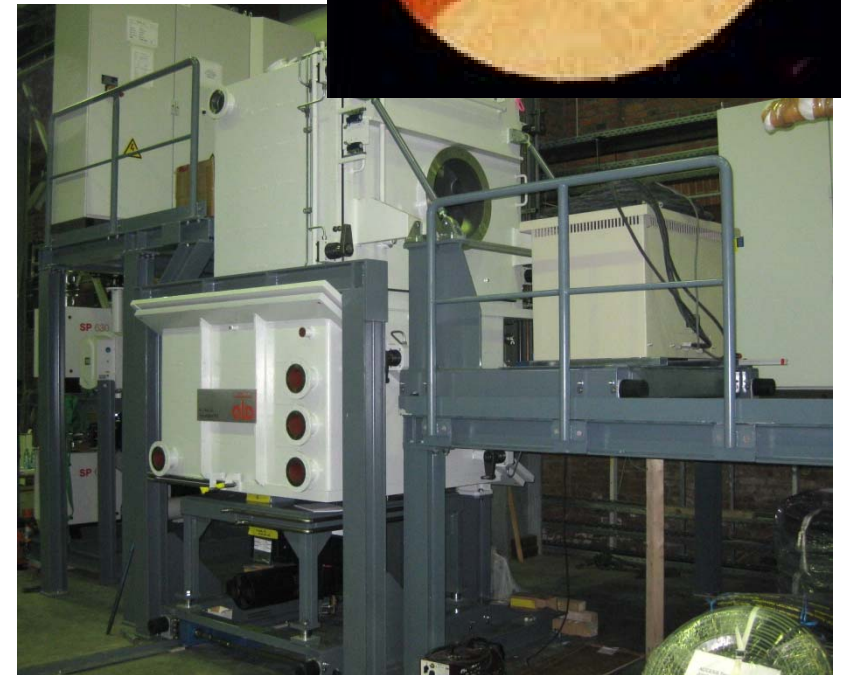
- Actuellement, aucun procédé de mise en œuvre d'aubes de turbine ou de roues de turbo compresseur en TiAl, n'est efficace d'un point de vue coût, et à la fois pour la production grandes séries
- Les fonderies de précision attendent des commandes fermes de la part des l'utilisateurs finals
- Les utilisateurs finals attendent des procédés, qui garantissent un coût compétitif et une réalisation en grandes séries
- Seulement une production à géométrie quasi exacte donne l'opportunité de produire des pièces avec un coût compétitif
- Toute la chaine de production devra être nouvellement orientée et développée pour le matériau TiAl
- Plusieurs sites essaient de montrer en 2010 leur capacité de production en grande série d'aubes de turbine
- En Allemagne une chaine de production de roues de turbo compresseur est en cours de montage



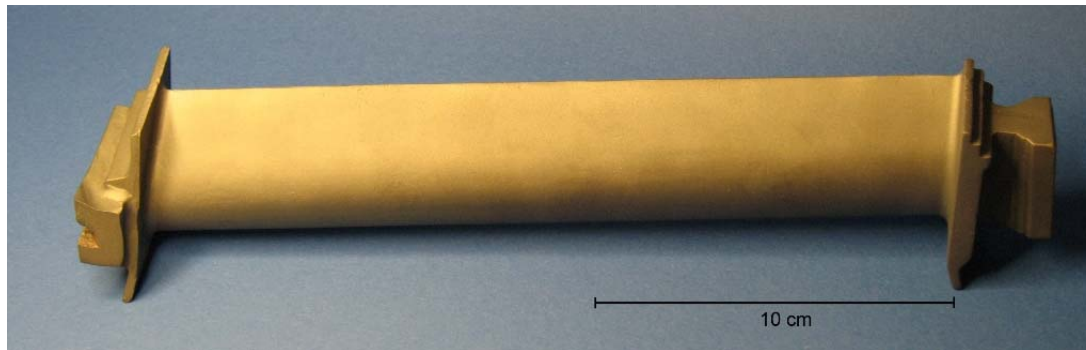
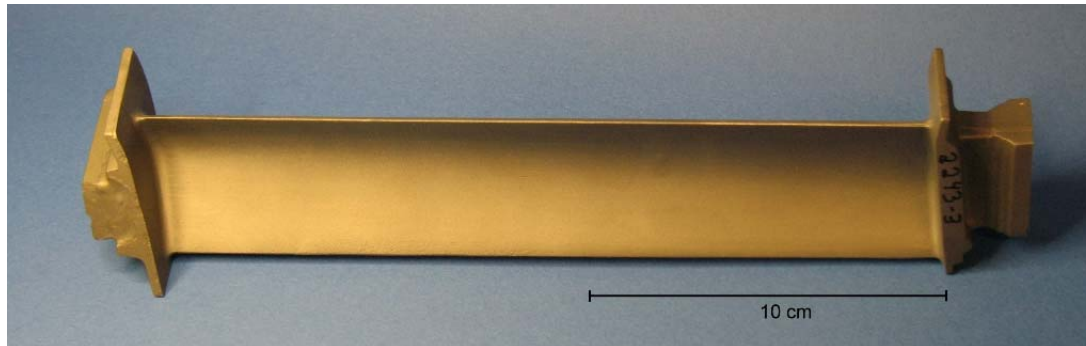
Fonderie de précision: Coulée centrifuge horizontale (ALD-Leicomelt)

Caractéristique du procédé (mise en service en mai 2010)

- Fusion avec creuset froid à induction
- Système à 2 chambres (séparation entre chambre de fusion et de coulée)
- Capacité de fusion: max 8,0 kg (bientôt jusqu'à 20 kg)
- Coulée centrifuge horizontale ou par gravité
- Applicable pour une production industrielle
- Méthode de fusion agréée par l'industrie aéronautique



État d'avancement: Qualité de surface



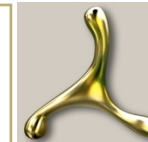
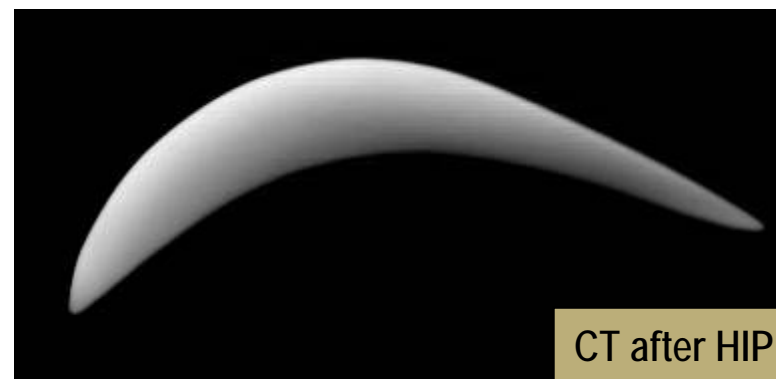
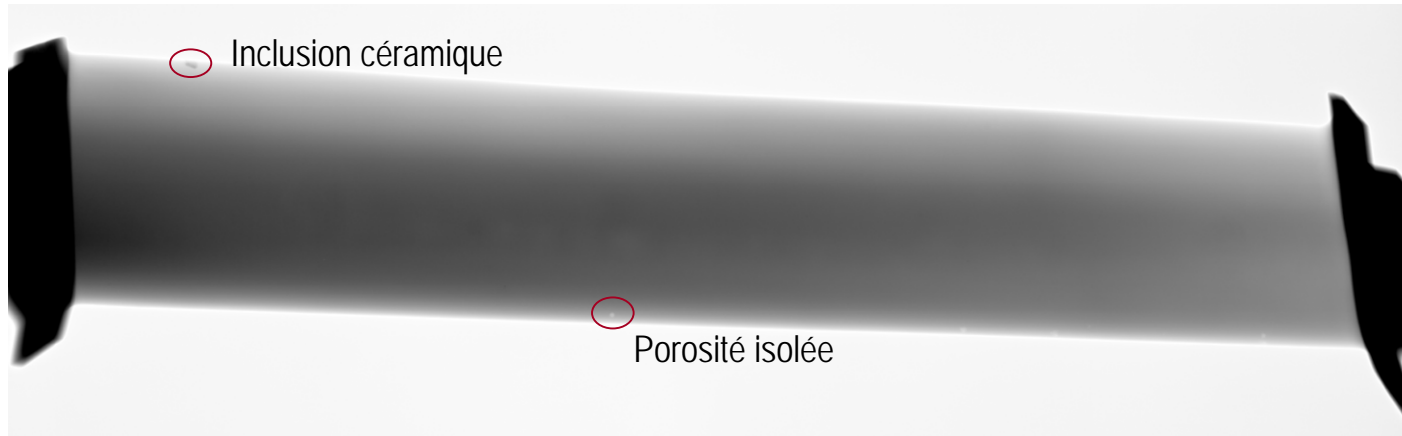
État d'avancement

- Bonne qualité de surface
- Porosités de surface isolées (< 0,3mm)
- Inclusions céramique isolées
- Pas de fissure
- Pas de défauts de remplissage
- Pas d'écaillage
- Pas de porosité dans l'axe central après pressage isostatique à chaud



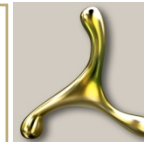
État d'avancement: Analyse des défauts internes (après compression isostatique à chaud)

X-ray and CT-analysis for process optimization



Conclusion et perspectives

- Transfert de connaissance, des expériences précédentes avec la technologie du creuset céramique à celle du creuset froid à induction
- Amélioration de la reproductibilité pour une production de "présérie" (prévue 2010/2011)
- Garantir la qualité suivant les spécifications exigées par les fabricants de moteurs aéronautiques
- Amélioration de la précision dimensionnelle
- Différents concepts en vue d'une production en série de pièces TiAl
- Certaines fonderies européennes sont prêts des aujourd'hui d'établir une production en série



- FIN -

MERCI POUR VOTRE ECOUTE

