



AUBERT & DUVAL



Microstructures et propriétés sur pièces matricées en TA6V

Romain Forestier



erameT



AUBERT&DUVAL



Quelques exemple de pièces matricées en TA6V



eramET

STRUCTURES AERONAUTIQUES



Nos principaux clients

- AIRBUS GROUP
- BOEING
- DASSAULT
- EMBRAER
- BOMBARDIER
- SPIRIT
- PREMIUM AEROTECH
- STELIA
- ASCO
- SAFRAN LANDING SYSTEM

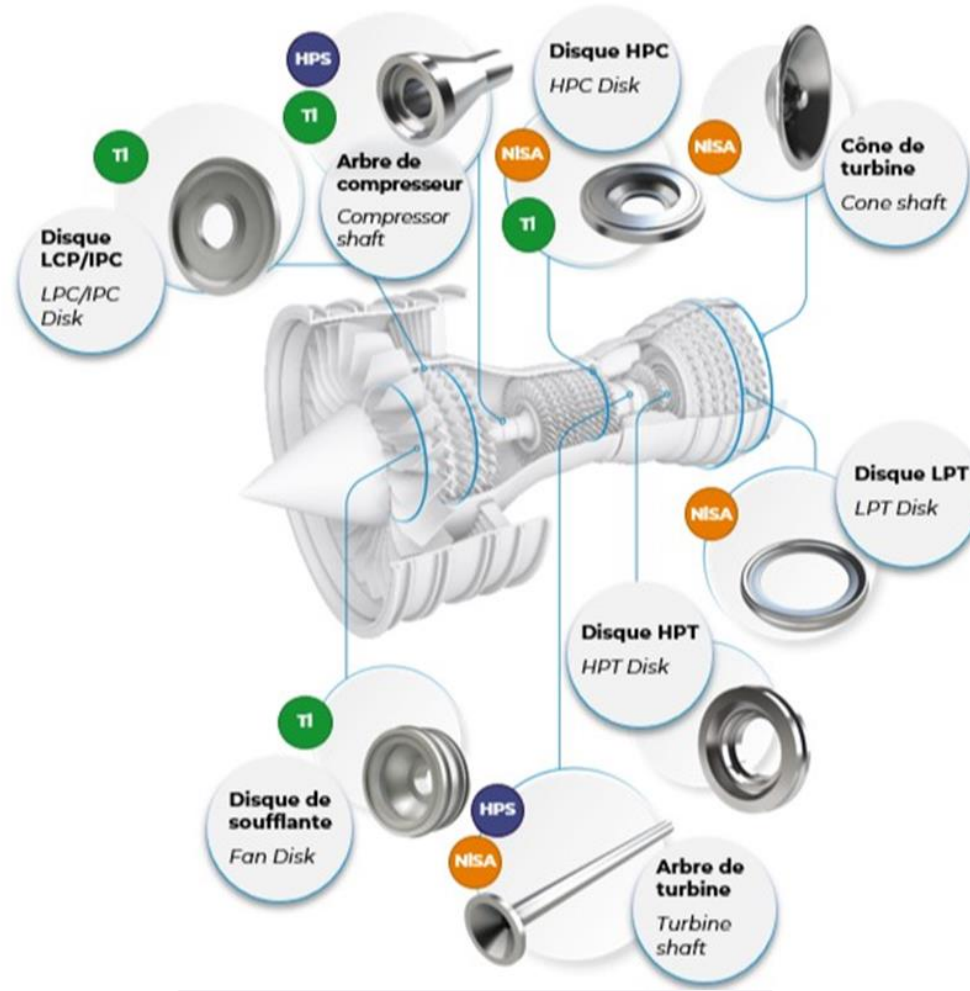
PIÈCES DE STRUCTURES



PIÈCES DE TRAINS D'ATERRISSAGE



TURBINES AERONAUTIQUES

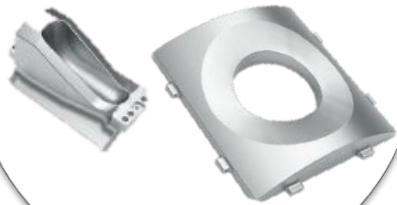


- Titane **TI**
- Superalliage à base de nickel **NISA**
- Acier haute performance **HPS**

Marché spatial



**PIÈCES
DE STRUCTURE**



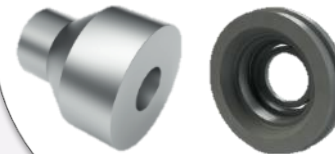
**POUDRES POUR
FABRICATION
ADDITIVE**



**PIÈCES POUR
RÉSÉROIRS**



**PIÈCES DE
MOTEUR**



BARRES





AUBERT&DUVAL



Rappels de quelques grands principes de la métallurgie du TA6V

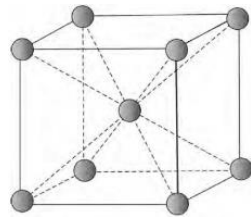
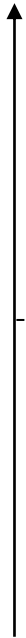


eramET

Les transformations de phase

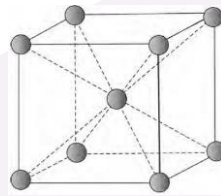
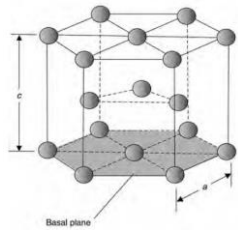
En fonction de la température, le TA6V présente des phases de nature différentes.

Température



Au dessus de la température dite de « transus », seule la phase beta est présente.

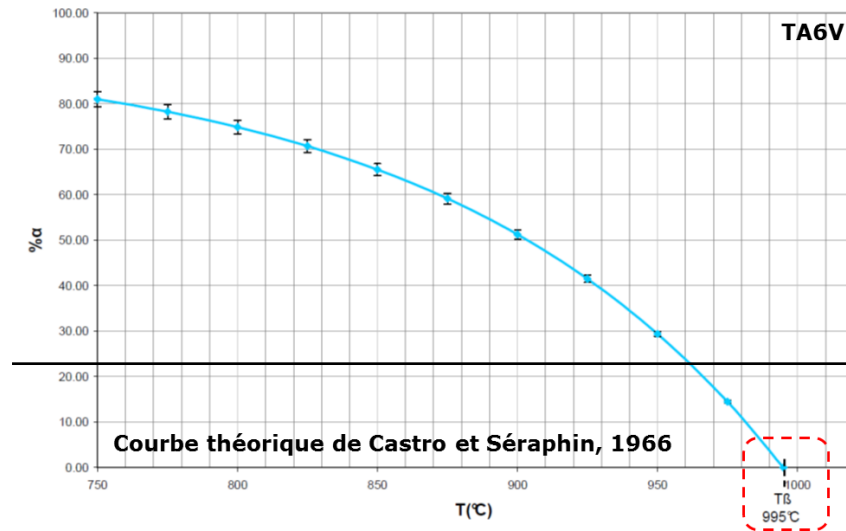
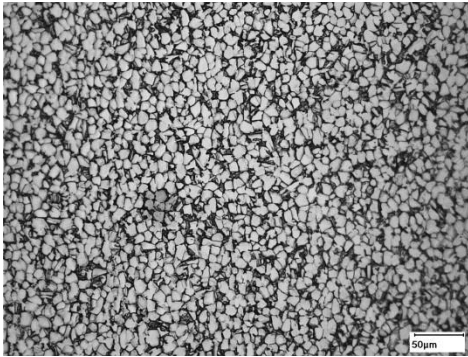
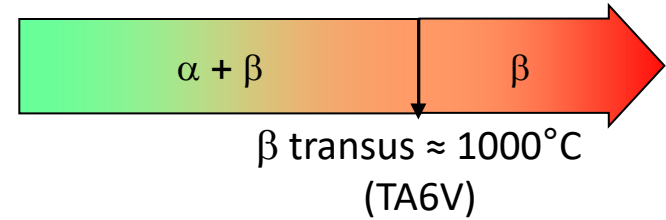
T=Transus (environ 1000°C pour le TA6V)



Au dessous de la température dite de « transus », la phase beta et la phase alpha cohabitent. Plus la température est faible, plus la phase alpha est présente.

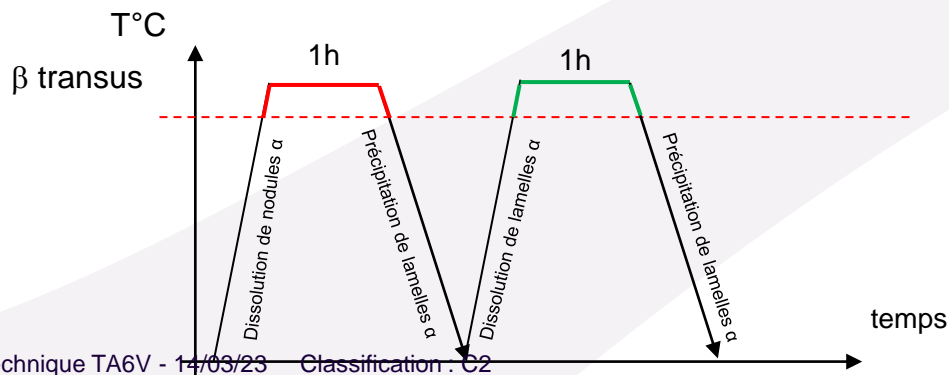
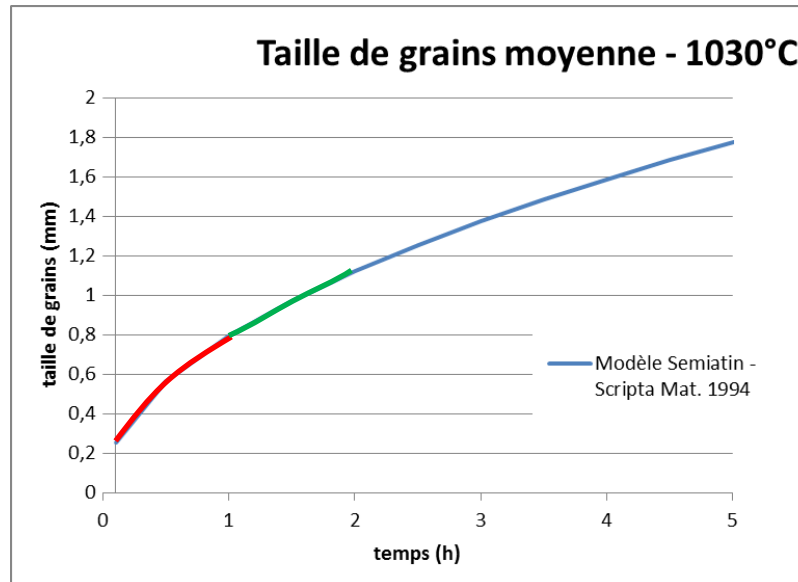
METALLURGIE DU TITANE ET DE SES ALLIAGES

2 phases

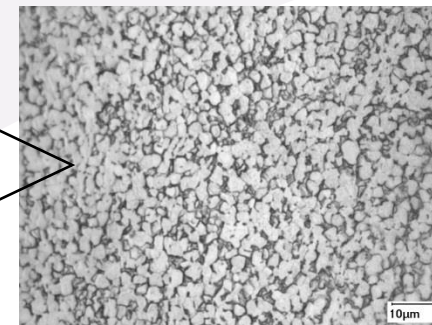
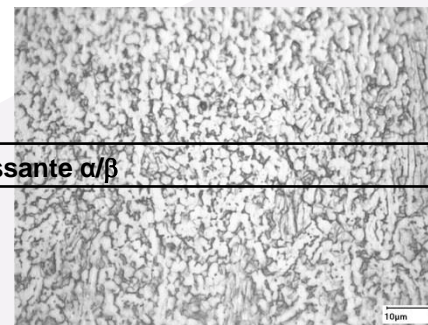
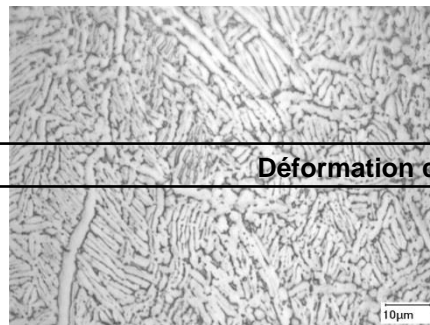
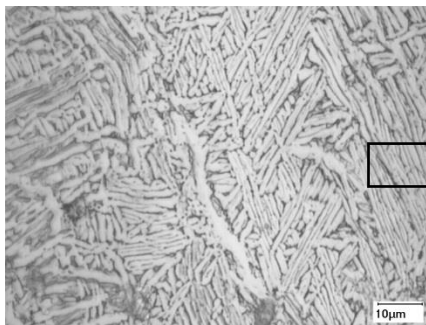
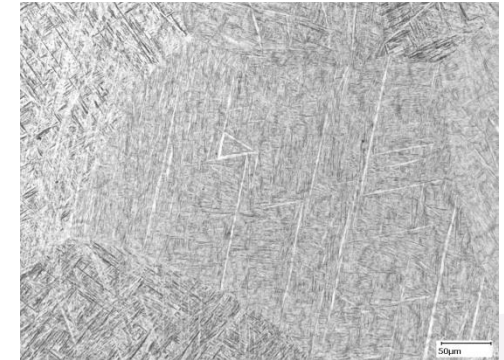
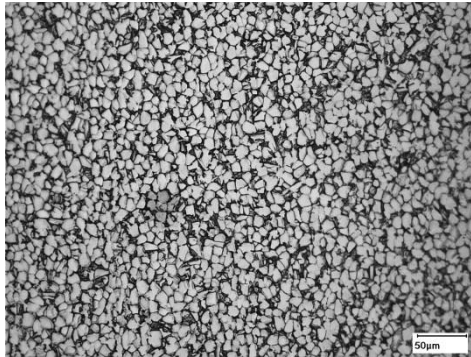
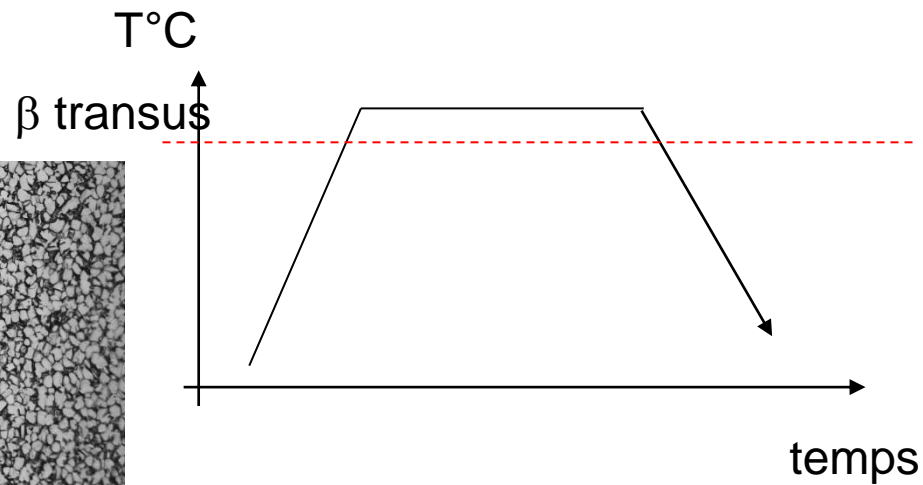


METALLURGIE DU TITANE ET DE SES ALLIAGES

Cinétique de croissance de grains et hérédité dans le TA6V



METALLURGIE DU TITANE ET DE SES ALLIAGES

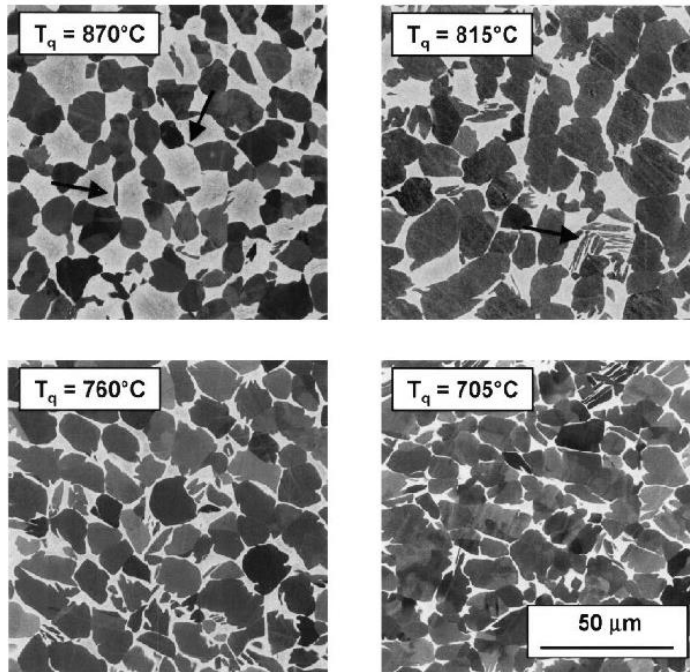


Déformation croissante α/β

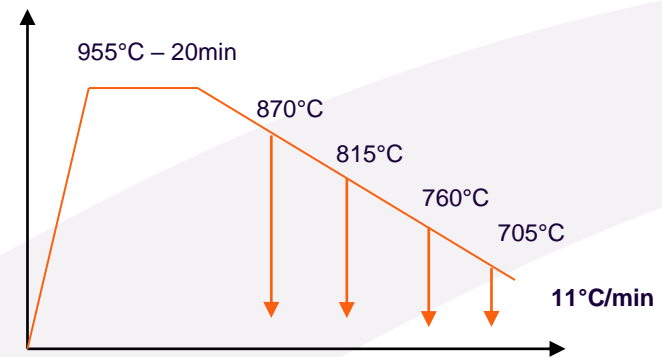
Les évolutions de microstructure lors de traitements thermiques dans le TA6V

Effet d'un **refroidissement lent** après une mise en solution à 955°C (référence : Semiatin et al., Met. And Mat. Trans. A, 34A (2003) 2377 – 2386)

- Epaisseur des nodules α_p au cours du refroidissement.



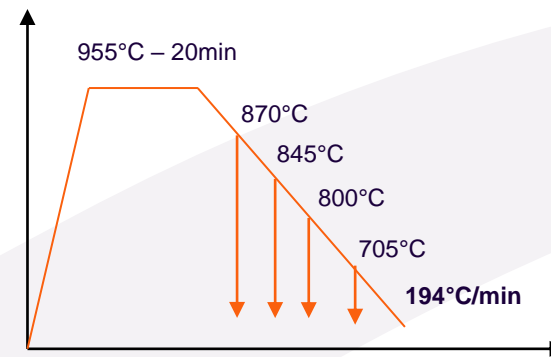
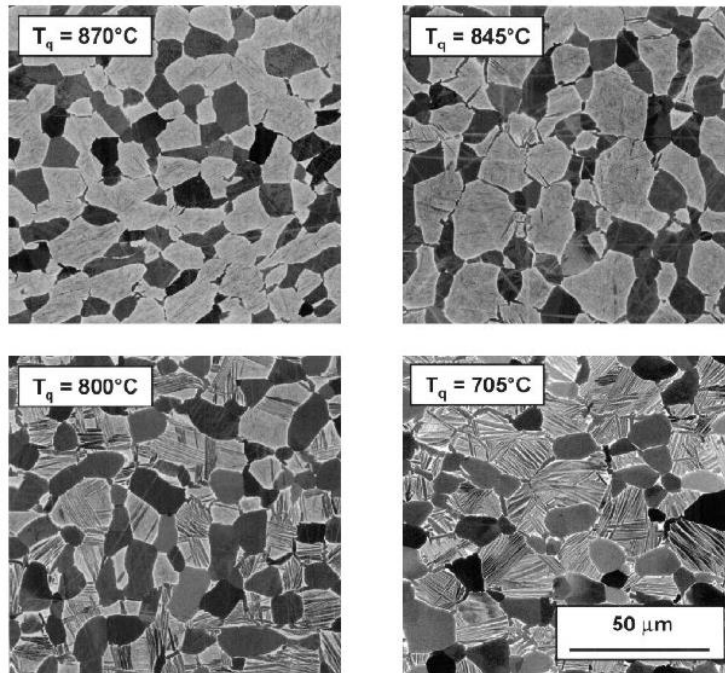
Mise en solution à 955°C - Refroidissement à 11°C/min et trempe à la température indiquée



Les évolutions de microstructure lors de traitements thermiques dans le TA6V

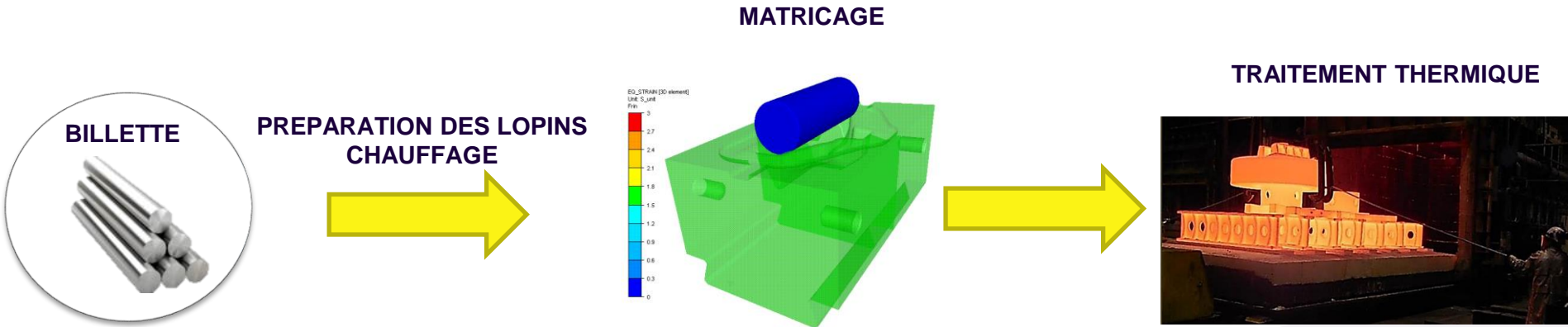
Effet d'un **refroidissement rapide** après une mise en solution à 955°C (référence : Semiatin et al., Met. And Mat. Trans. A, 34A (2003) 2377 – 2386)

Précipitation d'as entre les nodules d'ap.



Mise en solution à 955°C - Refroidissement à $194^{\circ}\text{C}/\text{min}$
et trempe à la température indiquée

Principe du procédé de matriçage



Quelques principes de base :

- La microstructure sur billette est déjà globularisée, et capable des spécifications sur pièces finies : l'étape de matriçage ne vise pas à produire une microstructure très différente de celle de la billette.
- Le traitement thermique final permet de détentionner, voire de conférer les propriétés recherchées sur pièces.



AUBERT&DUVAL



Les gammes thermomécaniques et les caractéristiques sur pièces matricées



eramET

Les définitions des divers traitements thermomécanique

Les conditions de traitement thermomécaniques sont demandées par le end-user.

Des spécifications définissent les traitements sur le TA6V ou même sur d'autres alliages de titane :

- **AMS4928 : Titanium Alloy Bars, Wire, Forgings, and Drawn Shapes 6Al – 4V Annealed**
- **AMS2801 : Heat Treatment of Titanium Alloy Parts**
- **AMSH81200 : Heat Treatment of titanium and Titanium Alloys**
- **+spécifications end-users**

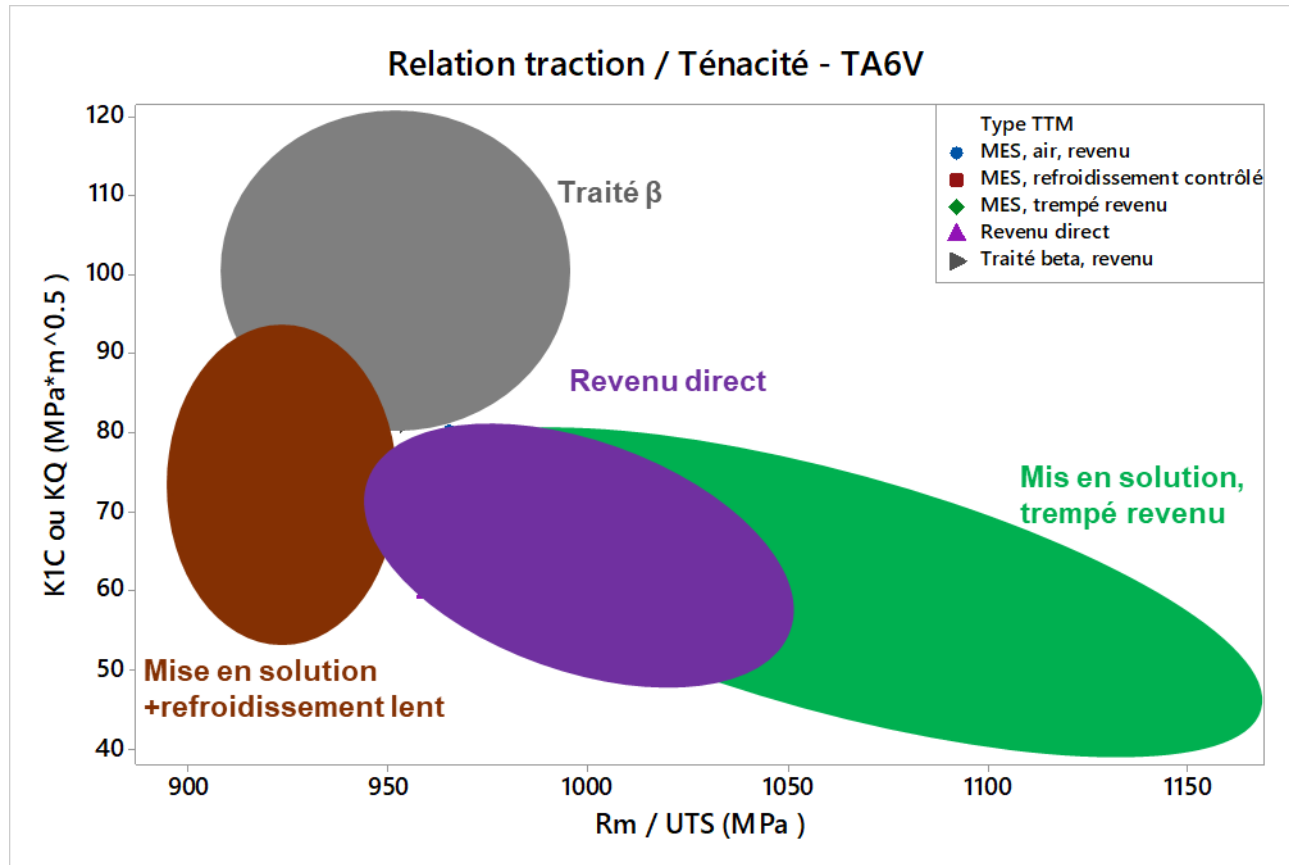
Les définitions des divers traitements thermiques sur TA6V au sens de l'AMSH81200

Traitement	Cycle 1			Cycle 2		
	Température	durée	refroidissement	Température	durée	refroidissement
Solution treatment + Aging	[900°C ; 970°C]	[20min ; 2h]	eau	[480°C ; 690°C]	[2h ; 8h]	air, gas inerte ou four
Stress Relief	[480°C ; 650°C]	[1h ; 4h]	air, gas inerte ou four			
Annealing	[705°C ; 790°C]	[0,5h ; 2h]	air ou plus lent			
Duplex Annealing	[Tbeta-28°C ; Tbeta-42°C]	[1h ; 2h]	air ou plus lent	[705 ; 760]	[1h ; 2h]	air
Recrystallisation annealing	[Tbeta-28°C ; Tbeta-42°C]	[1h ; 4h]	air ou plus lent			
Beta Annealing	Tbeta+28°C	>30min	air ou gas inerte			
Beta Annealing	Tbeta+28°C	>30min	eau	[732°C ; 760°C]	[1h ; 3h]	air ou plus lent

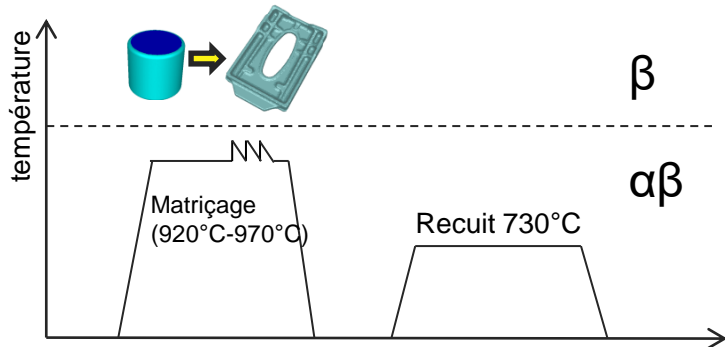
- Ces traitements thermiques sont appliqués sur un état déformé sous transus (au sens de l'AMS4928 par exemple).
- Les spécifications de end-user peuvent différer de ces conditions.
- Chaque traitement thermique est susceptible de donner des caractéristiques métallurgiques et mécaniques différentes.

Corrélation ténacité traction

Le compromis ténacité/traction est fortement dépendant du traitement thermique

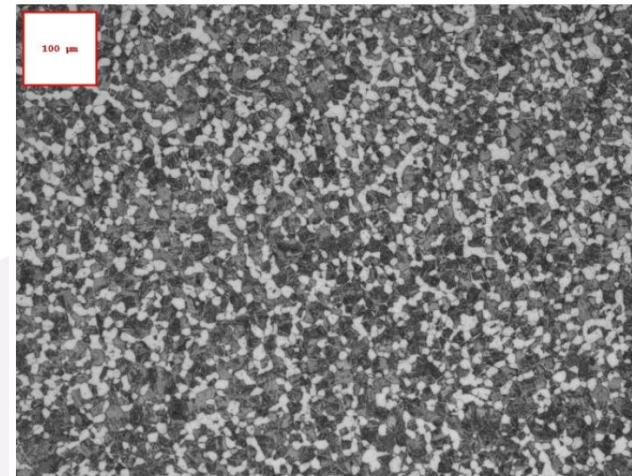
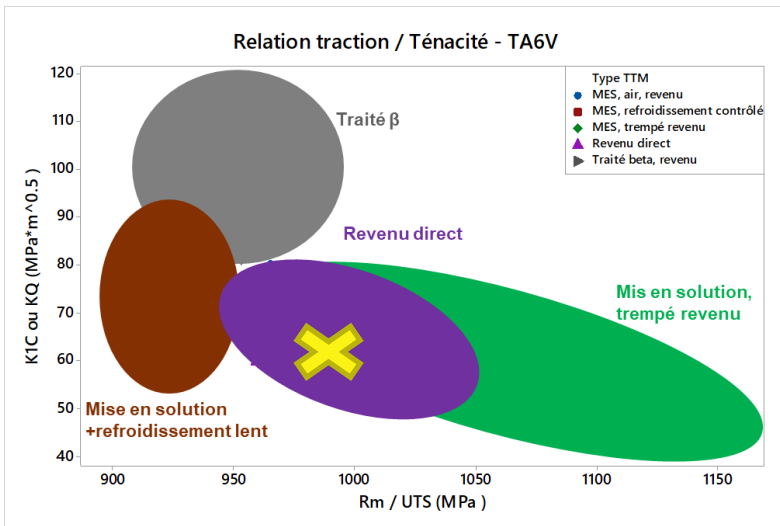


Matriçage du TA6V



Forgeage α/β suivi d'un revenu de détentionnement.

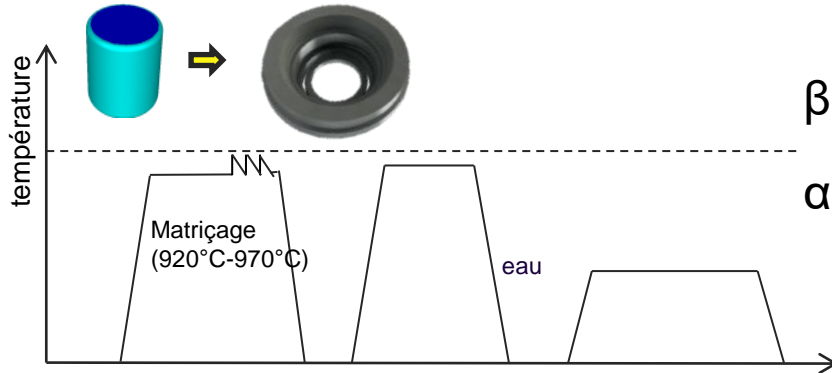
Ex: TA6V STD, pièces structures
 $R_m = 990\text{MPa}$ / $RP_{0.2} = 940\text{MPa}$ / $A\% = 15$ / $Z\% = 50$
 / $K_{1C} = 60\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$



TA6V forgé α/β
 50% environ d' α primaire

x100

Matriçage du TA6V

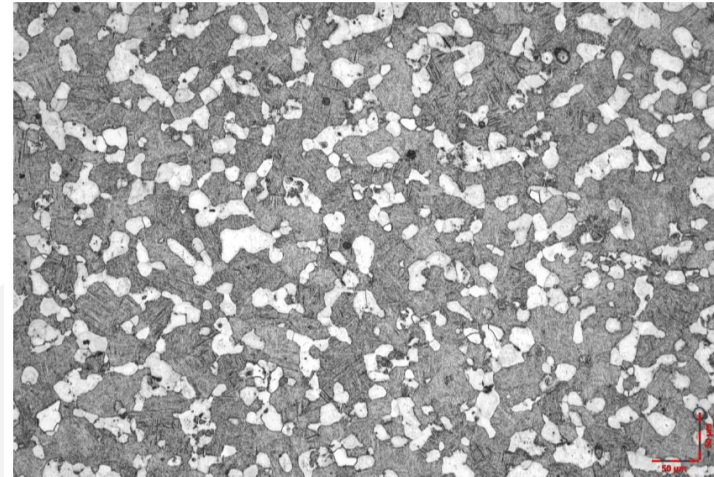


Mise en solution trempé, revenu

Le traitement de mise en solution + trempé permet de fixer le pourcentage de phase α primaire (10 à 40%). Le revenu détensionne.

Ex: TA6V PQ, pièces moteur

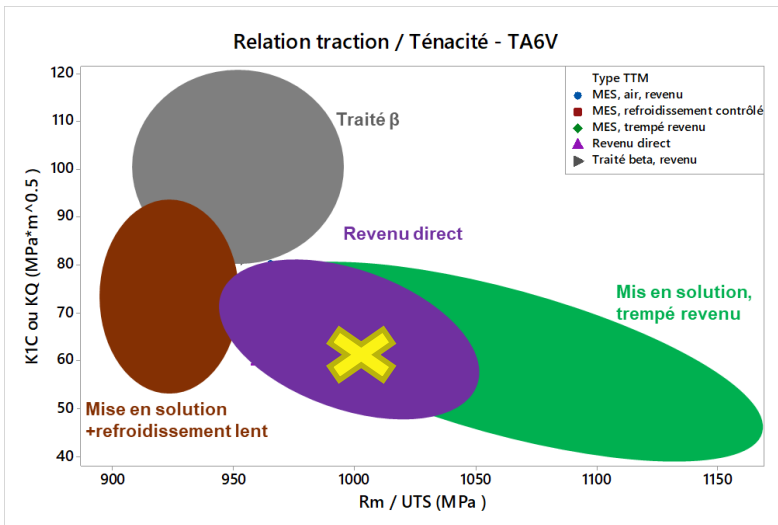
Rm= 1035MPa / RP0.2= 960MPa / A%= 15 / Z%= 46 / K1C=60MPa.m^{1/2}



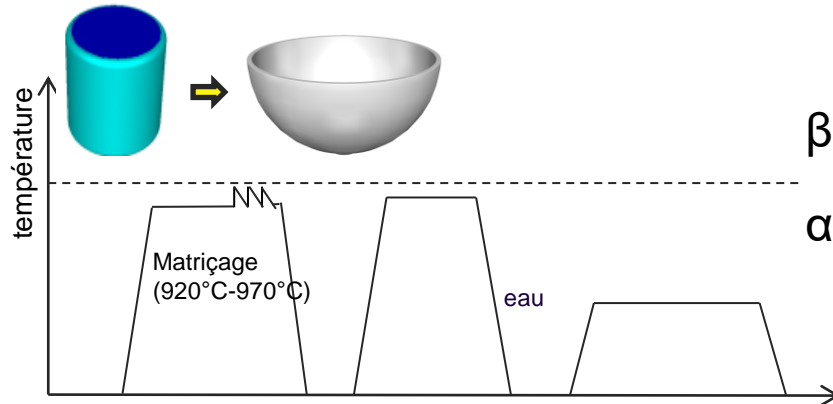
TA6V forgé α/β

Mise en solution Transus -30°C

20 à 30% d' α primaire



Matriçage du TA6V

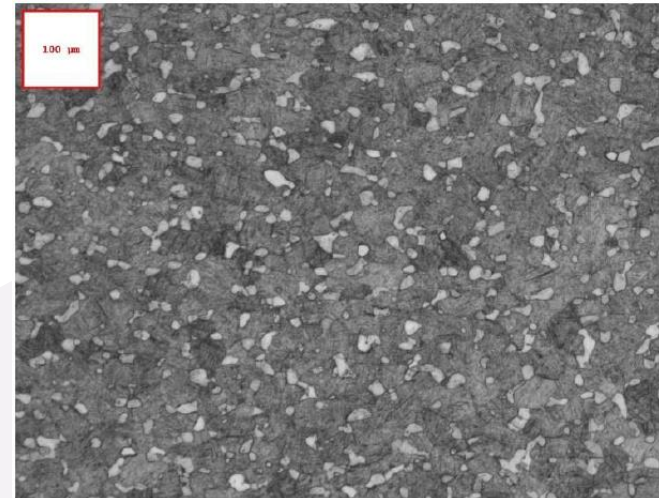


Mise en solution trempé, revenu

Le traitement de mise en solution + trempé permet de fixer le pourcentage de phase α primaire (10 à 40%). Le revenu détensionne.

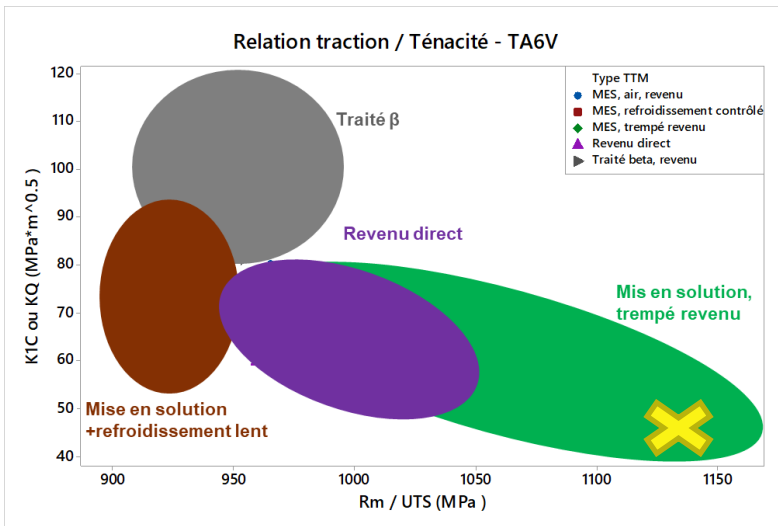
Ex: TA6V STD, hémisphère

$R_m = 1140\text{MPa}$ / $RP0.2 = 1060\text{MPa}$ / $A\% = 14$ / $Z\% = 37$
 / $K1C = 44\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

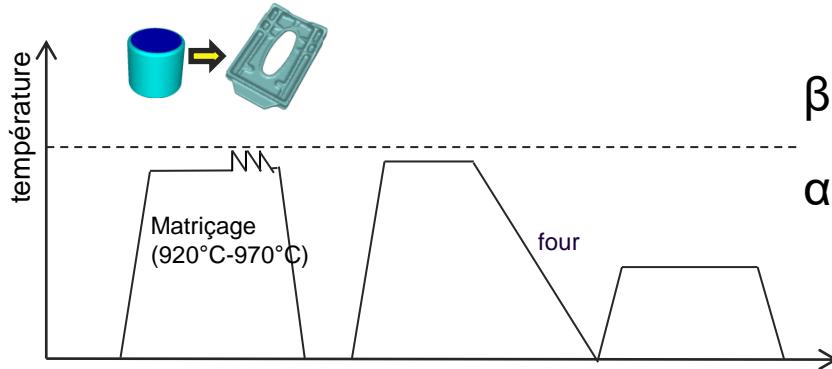


TA6V forgé α/β

Mise en solution Transus -30°C



Matriçage du TA6V



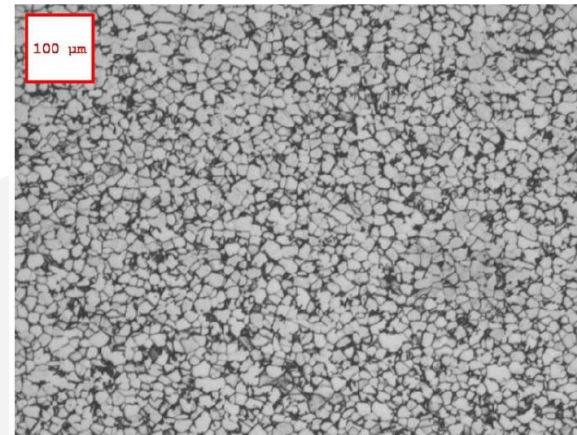
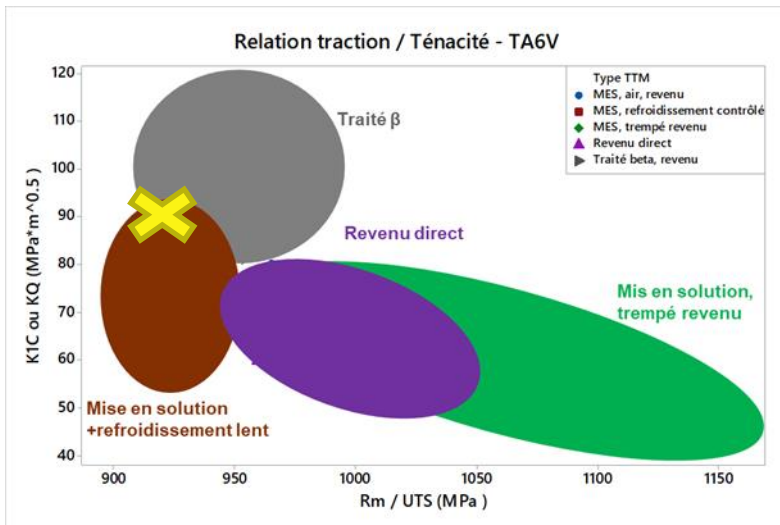
Le recuit de recristallisation :

Refroidissement lent depuis le haut du domaine $\alpha+\beta$. Permet de faire croître les nodules d'alpha primaire.

Basse résistance, bonne ductilité et haute ténacité

Ex: TA6V, recuit à $T_{\beta}-30^{\circ}\text{C}$, refroidissement contrôlé puis revenu à 730°C .

$R_m = 925\text{MPa}$ / $R_{P0.2} = 890\text{MPa}$ / $A\% = 18$ / $Z\% = 41$ / $K_{1C} = 90\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

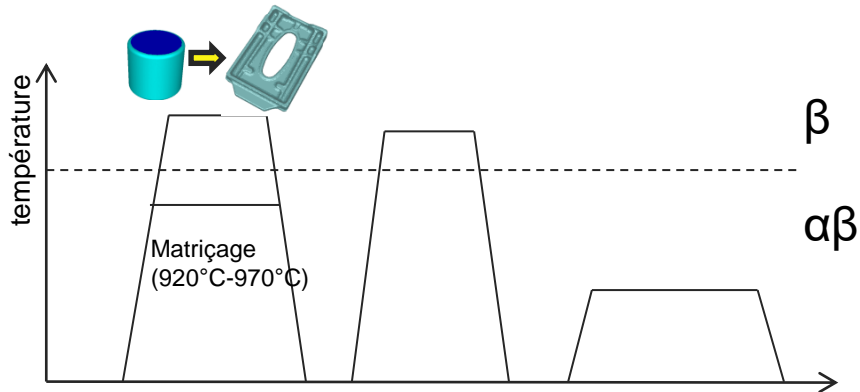


x100

TA6V forgé α/β

Recuit de recristallisation

Matriçage du TA6V

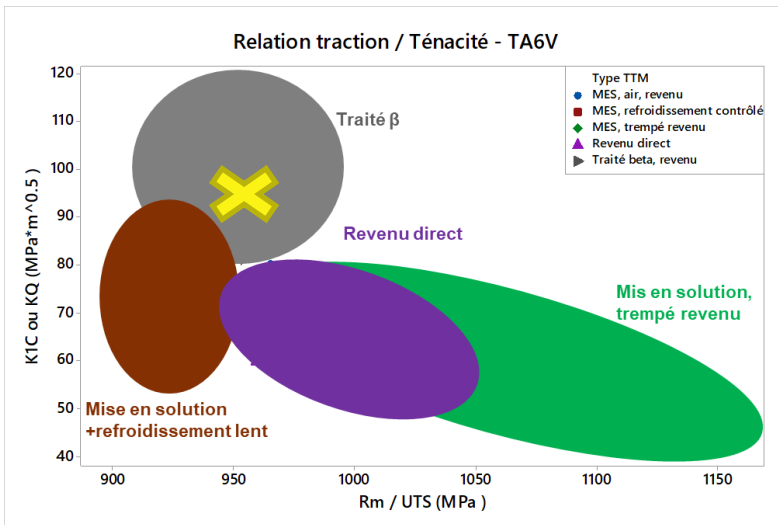


Mise en solution bêta.

Permet d'obtenir une structure aciculaire, qui possède une bonne ténacité en conservant des bonnes résistances. Cette mise en solution est suivie du recuit à 730°C.

$R_m = 960 \text{ MPa} / R_{P0.2} = 900 \text{ MPa}, A\% = 10 / Z\% = 17$

$K_{1C} = 92 \text{ MPa.m}^{1/2}$



TA6V STD traité β



AUBERT&DUVAL



Quelques exemples d'aléas sur les microstructures de pièces matricées



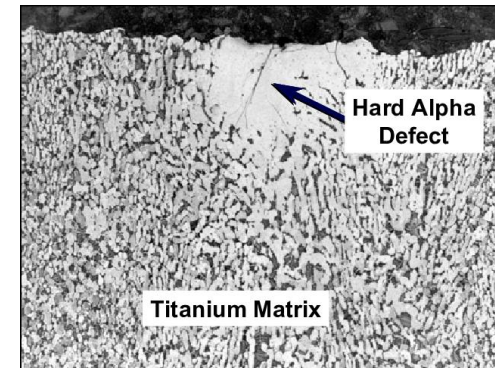
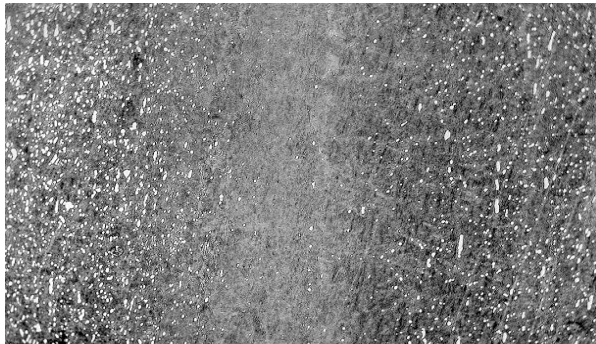
eramET

La filière de production : les défauts d'élaboration

L'élaboration : du minerai au lingot...

Ce procédé si il est mal contrôlé peut conduire à des défauts d'élaborations

- Ségrégations α (riches en alphagènes)
- β flecks (riches en bétagènes)



D'autre part, l'utilisation de tournures mal triées, peut apporter des morceaux d'outils carbures dans le métal qui sont très nocifs:

- Défauts haute densité

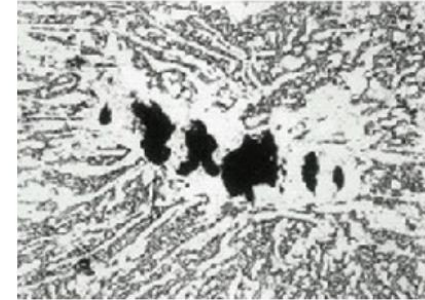


Inclusion exogène (WC)

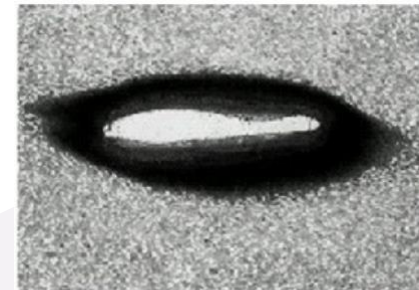
La filière de production : les défauts d'élaboration

Classification des défauts d'élaboration

Defect Type	Possible Causes
Type I ("Hard Alpha"), also called High Interstitial Defect (HID)	Sponge production <ul style="list-style-type: none"> - Fires during handling or shearing First melt electrode production <ul style="list-style-type: none"> - Fires during compaction - Improperly conditioned scrap - Contaminated master alloy - Contamination during welding Melting and remelting <ul style="list-style-type: none"> - Small water leak - Air leak - Aggressive grinding during ingot conditioning
High Density Inclusions (HDIs)	Scrap additions <ul style="list-style-type: none"> - Tungsten welding electrodes - Tool bits mixed into turnings
Beta Flecks	Melting segregation Conversion too close to transus (including adiabatic heating effects)
Type II (Alpha Stabilized)	Improper final melt phase (excessive pipe formation) Improper ingot top removal Al-rich "drop-ins" during EBM
Voids	Incorporation of shrinkage pipe during conversion Improper conversion practice



Hard-Alpha



High-Density Inclusion



Type II

La filière de production : les défauts d'élaboration

En 1989, le vol United Airlines 182 s'est crashé à Sioux City.

➤ De nombreux passagers sont décédés (112) ou ont été blessés.

Les faits :

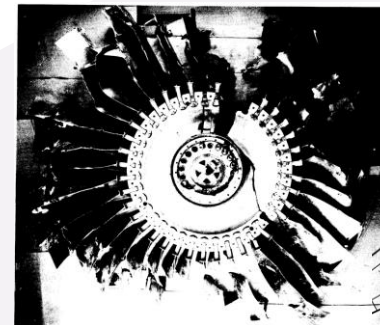
- Rupture d'un fan disk TA6V (étage 1) du moteur CF6.
- Explosion non contenue avec rupture du circuit hydraulique
- Crash de l'avion.

Explication matériau

➤ Rupture prématurée sur un hard alpha non détecté.

Conséquences

- Passage d'un process 2VAR à un process 3VAR
- Renforcement des conditions de CND.



United Airlines Flight 232
Injury Map
McDonnell Douglas DC-10-10
N1819U
July 19th, 1989



Notes

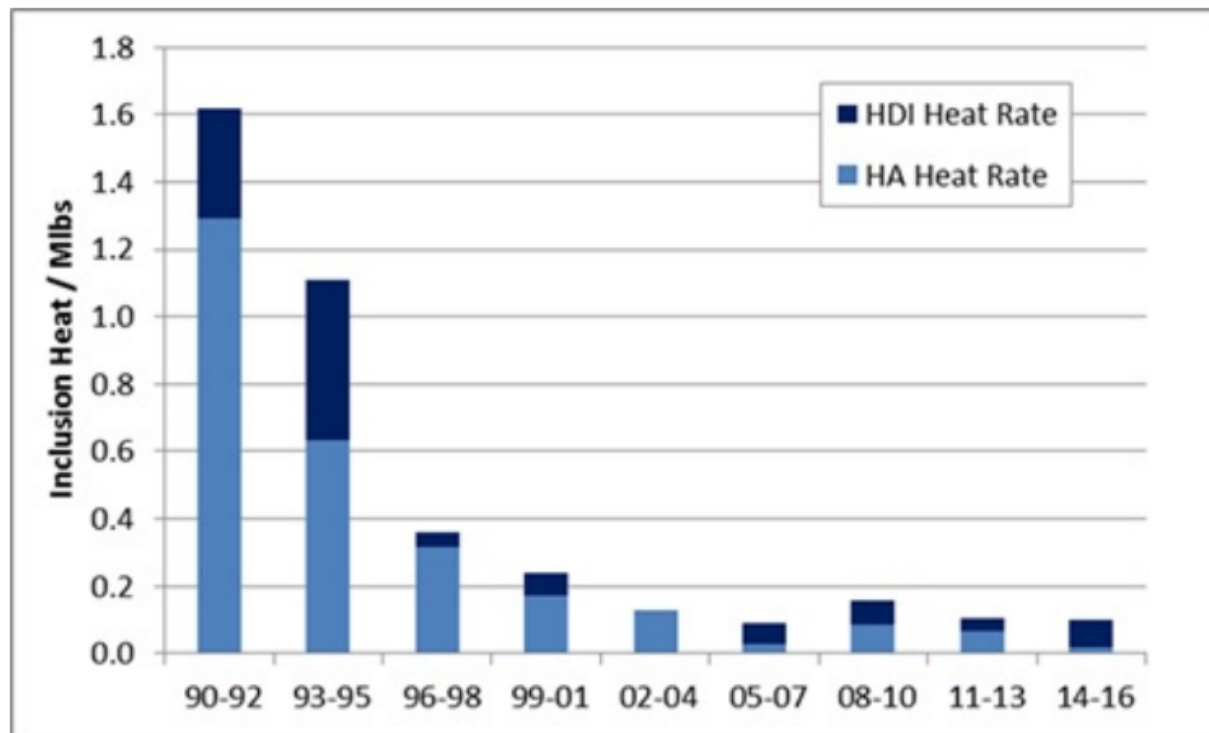
- Passenger in seat 20H moved to an unknown seat and died.
- 1 passenger died from his injuries 31 days after the accident. In accordance with established guidelines he/she is classified as a survivor with serious injuries in orange.



La filière de production : les défauts d'élaboration

Les progrès en matière de propreté des alliages de titane aéronautiques

- Les producteurs de billettes de titane PQ et les primes sont réunis au sein du JETQC (Jet Engine Titanium Quality Committee) : ATI, Arconic, PCC-Timet et VSMPO + GEAE, Honeywell, MTU, Pratt Whitney, Rolls Royce, Safran, Williams International + la FAA.

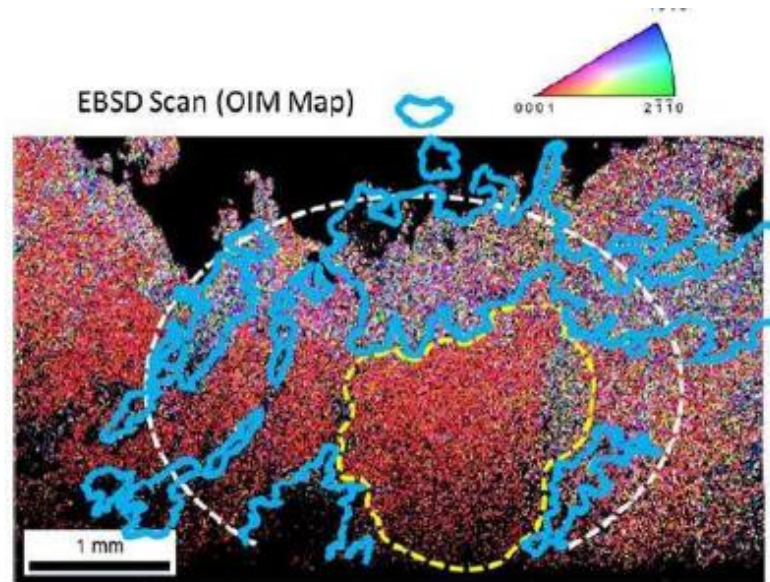


TA6V – fatigue dwell et macrozones

Accident vol AF066 sur A380 (Moteur GP7000 – PW)



- ❑ Perte de la soufflante au-dessus du Groenland
- ❑ Rupture au niveau du moyeu
- ❑ Amorçage (fatigue-dwell) sur macrozone très étendue
- ❑ Durcissement probable des exigences des clients liées aux texture



Rapport BEA2017-0568, septembre 2020

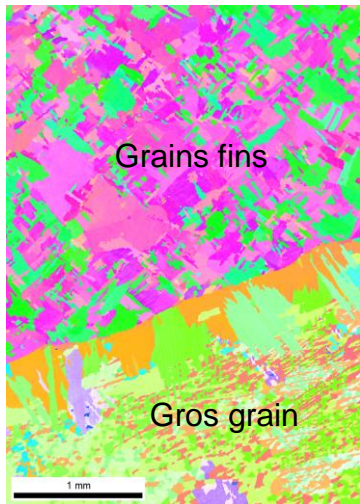
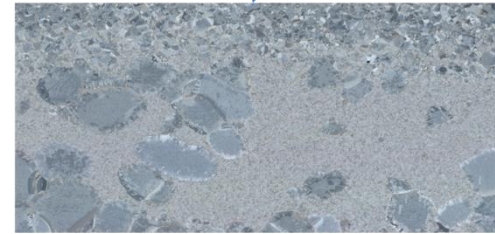
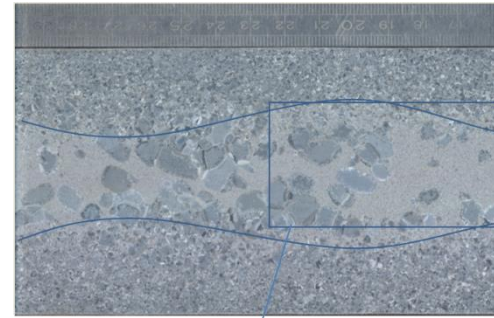
Croissance anormale de grains

Gammes traitées β impactées

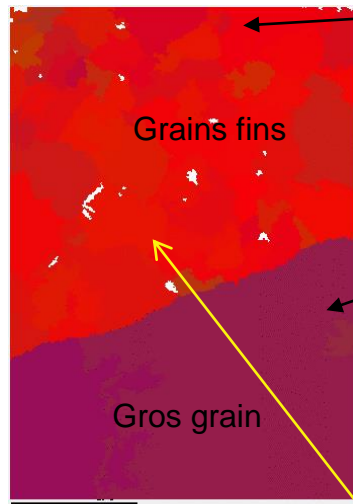
Origine :

- ▶ Lors de phases de forgeage ébauche ou de matriçage, le chemin de déformation peut induire une texture de type cube tournée dans la phase β .

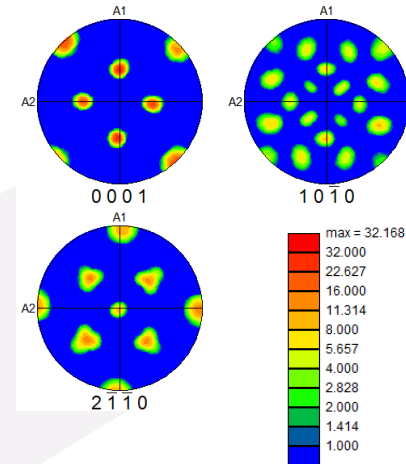
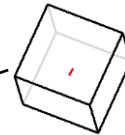
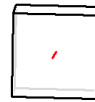
Impact sur les caractéristiques mécaniques : principalement allongements en traction.



Cartographie EBSD – phase α



1000 μm IPF-Z
Cartographie EBSD (phase β)



Texture dans la zone à grains fins
Texture « cube »

Zone à grains fins
Désorientation : $3^\circ < \theta < 15^\circ$

Reconstruction de la phase β

Echauffement adiabatique

Les défauts liés à la mise en forme

Réchauffement adiabatique (interne)

Réchauffement se produisant à **cœur** de pièce sous l'effet d'une forte déformation

Exemple d'une pièce TA6V ELI matricée trop vite.

Structure aciculaire en
zone échauffée



Structure équiaxe
hors zone échauffée

