



Applications aéronautiques des alliages de Titane

Journées 2005 de l'Association Titane

J.-M. De Monicault ⁽¹⁾, **B. Day** ⁽²⁾, **G. Khélifati** ⁽³⁾, **J. Panter** ⁽³⁾

(1) SNECMA Moteurs – Forêt de Vernon - BP 802 - 27208 Vernon Cedex – jean-michel.demonicault@sneema.fr

(2) Dassault Aviation – DGT – 78, quai Marcel Dassault - 92552 - Saint-Cloud Cedex – bertrand.day@dassault-aviation.com

(3) EADS CCR – 12, rue Pasteur - BP76 - 92152 - Suresnes Cedex – gael.khelifati@eads.net

Applications aéronautiques des alliages de Titane

1/ Introduction

- rappels sur la métallurgie du Ti et de ses alliages
- les différents types d'alliages
- les alliages de l'aéronautique et du spatial

2/ Alliages de Ti pour moteurs : exemples d'applications chez SNECMA

- les moteurs aéronautiques
- les moteurs spatiaux
- les moteurs hélicoptère

3/ Alliages de Titane pour applications structurales

- caisson central d'empennage Falcon Dassault (fonderie cire perdue)
- Canard du Rafale Dassault (SPF/DB)
- pièces forgées pour BTP Eurocopter
- structure primaire du mât réacteur A380 Airbus

4/ Conclusions

- principaux axes de développement actuels et futurs

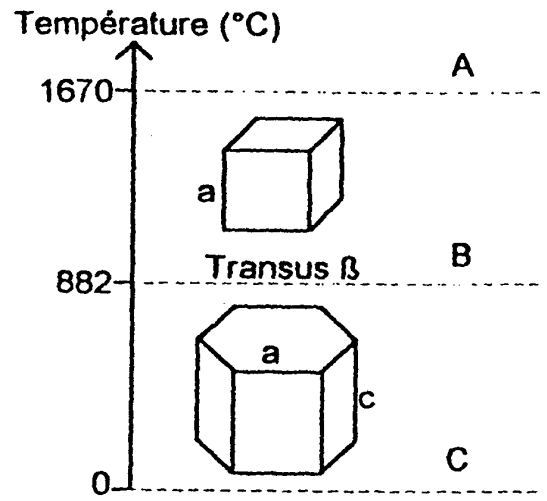
Introduction

- rappels sur la métallurgie des alliages de Titane
- les différents types d'alliages
- les alliages de l'aéronautique et du spatial



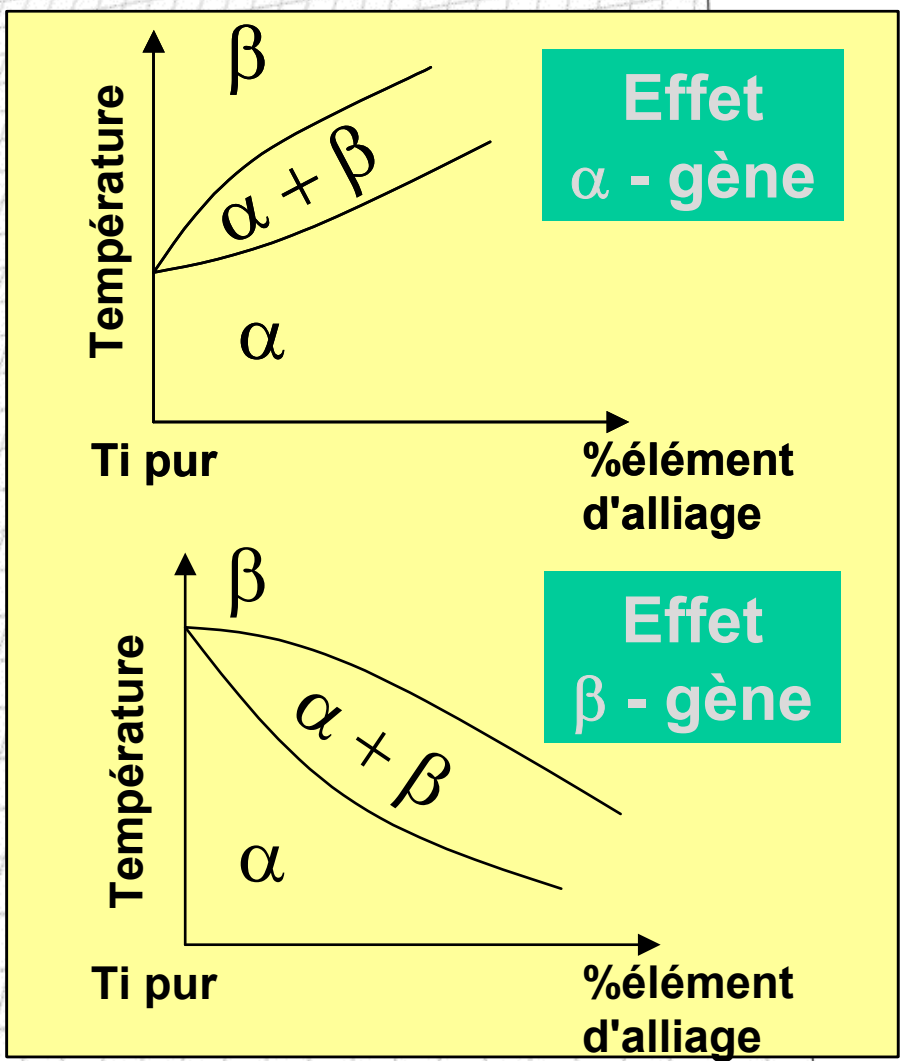
Les alliages de Titane (1)

Le Titane pur



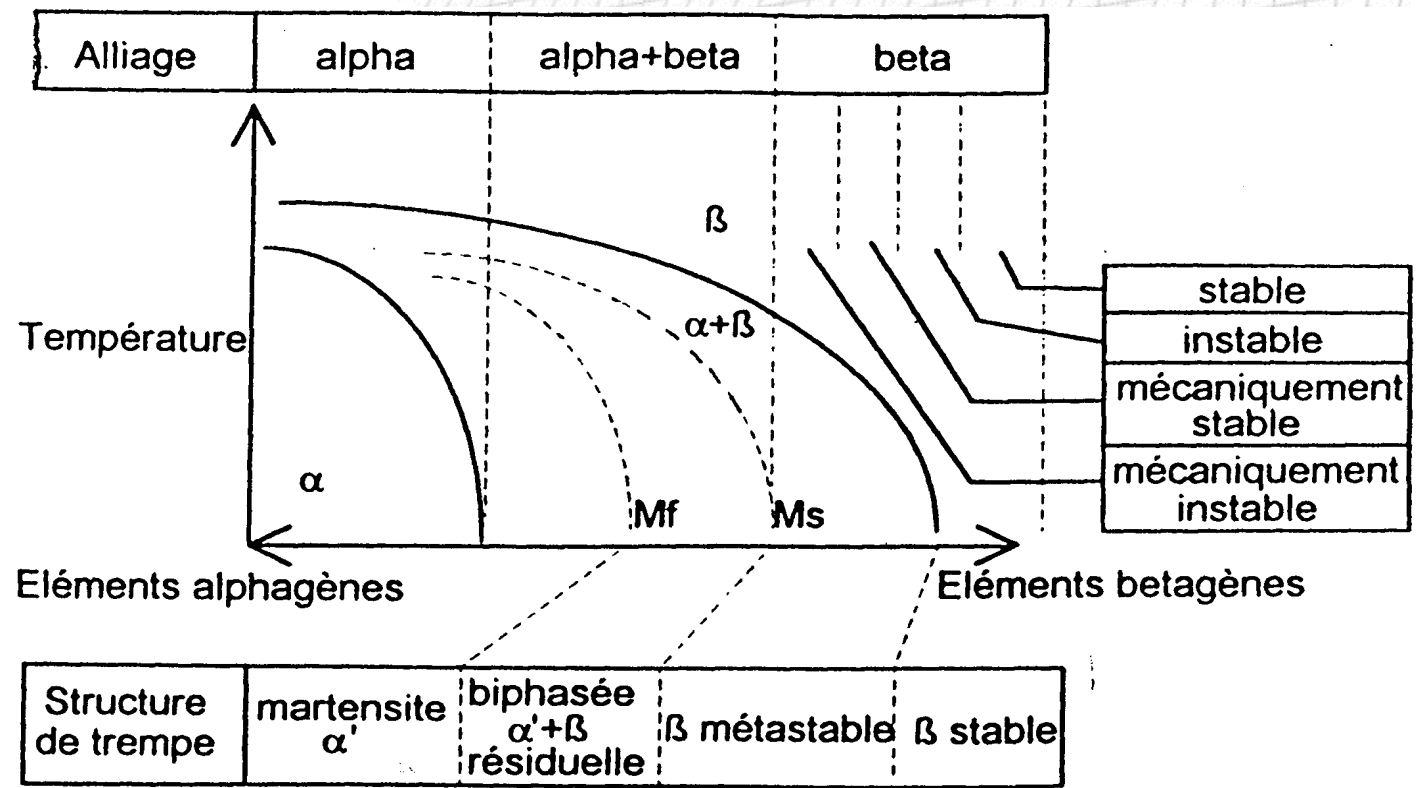
- A état liquide
- B phase β cubique centrée (a=3.32 Å)
- C phase α hexagonale pseudo-compacte (a=2.95 Å, c=4.682 Å, c/a=1.587)

Le Titane allié





Les alliages de Titane (2)



Effet des éléments d'addition sur l'état de l'alliage après trempe

Les différents types d'alliages (1)

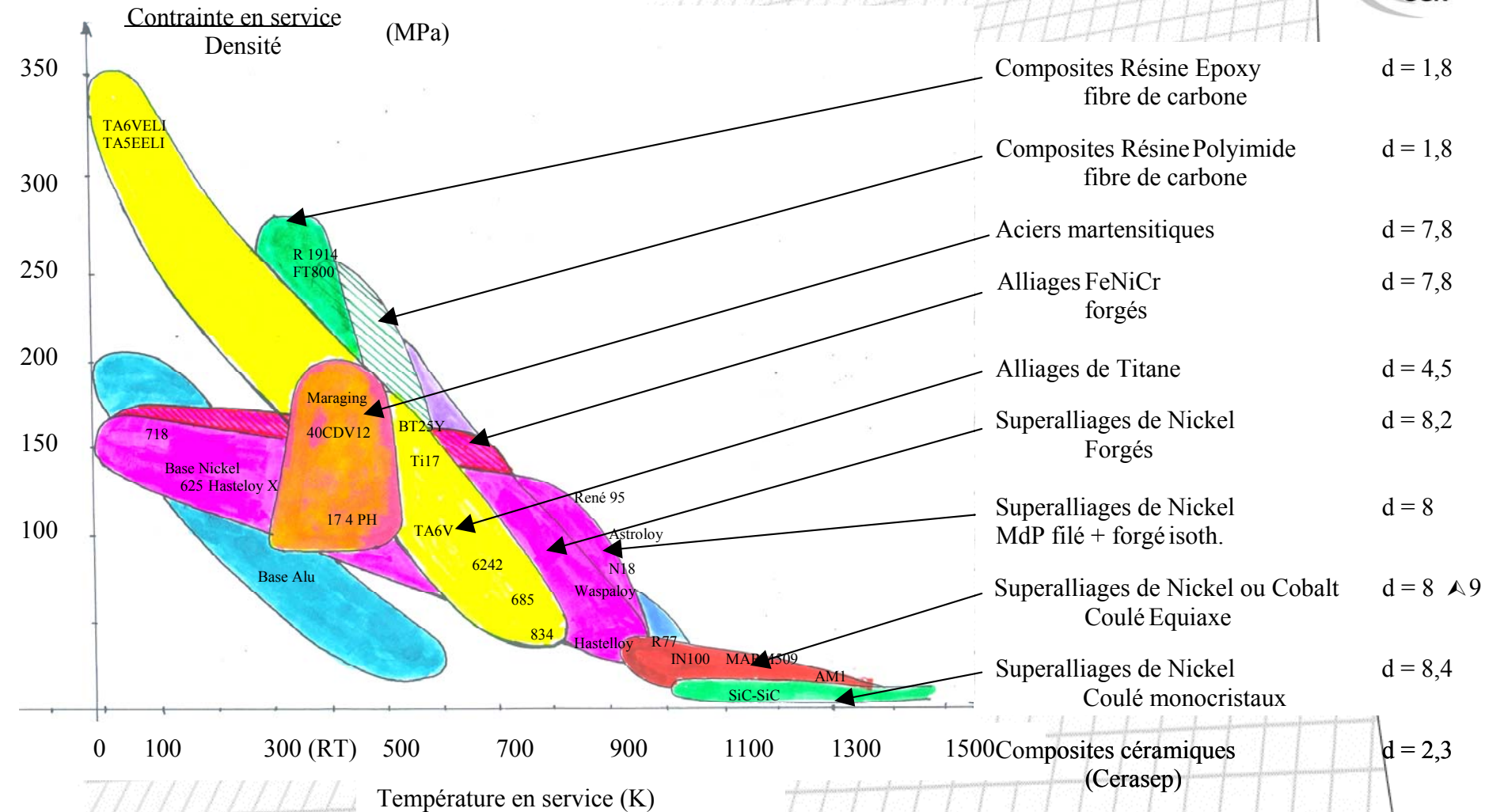
Type d'alliage	Principales propriétés	Alliages usuels
α	Faible ou moyenne résistance en traction Ductile Stabilité thermique Soudabilité	T40 (Ti 0,2 Fe)
Presque α	Bonne résistance en traction Résistance à hautes températures	Ti 6-2-4-2 (6Al 2Sn 4Zn 2Mo) - 450°C maxi IMI 685 (6Al 5Zr 0,5 Mo 0,25 Si) - 500°C maxi
α / β	Répondent aux TT Bonnes caractéristiques en traction Stables jusqu'à 450°C	TA6V (6Al 4V) (350°C maxi) Ti 6-2-4-6 (6Al 2Sn 4Zr 6Mo)

Les différents types d'alliages (2)

Type d'alliage	Principales propriétés	Alliages usuels
Quasi β	Résistant à l'ambiante Aptitude aux TT Mise en forme Résistance à chaud	Ti17 (Ti 5Al 2Sn 2Zr 4Mo 4 Cr) β-CEZ (Ti 5Al 2Sn 4Zr 4Mo 2Cr 1Fe)
β Meta stable	Médiocres à haute température et en fluage, bonnes propriétés de résistance à l'ambiante	LCB TIMET (Ti 6.8Mo 4.5Fe 1.5Al) β-21S (Ti 0.2Al 15Mo 2.8Nb) 10.2.3 (Ti 3Al 10V 2Fe) Ti 15.3.3 (Ti 15V 3Cr 3Al 3Sn)
	Nota : exception faite du β 21S, utilisable jusqu'à 500°C (allié Si)	



Les alliages de l'aéronautique et du spatial

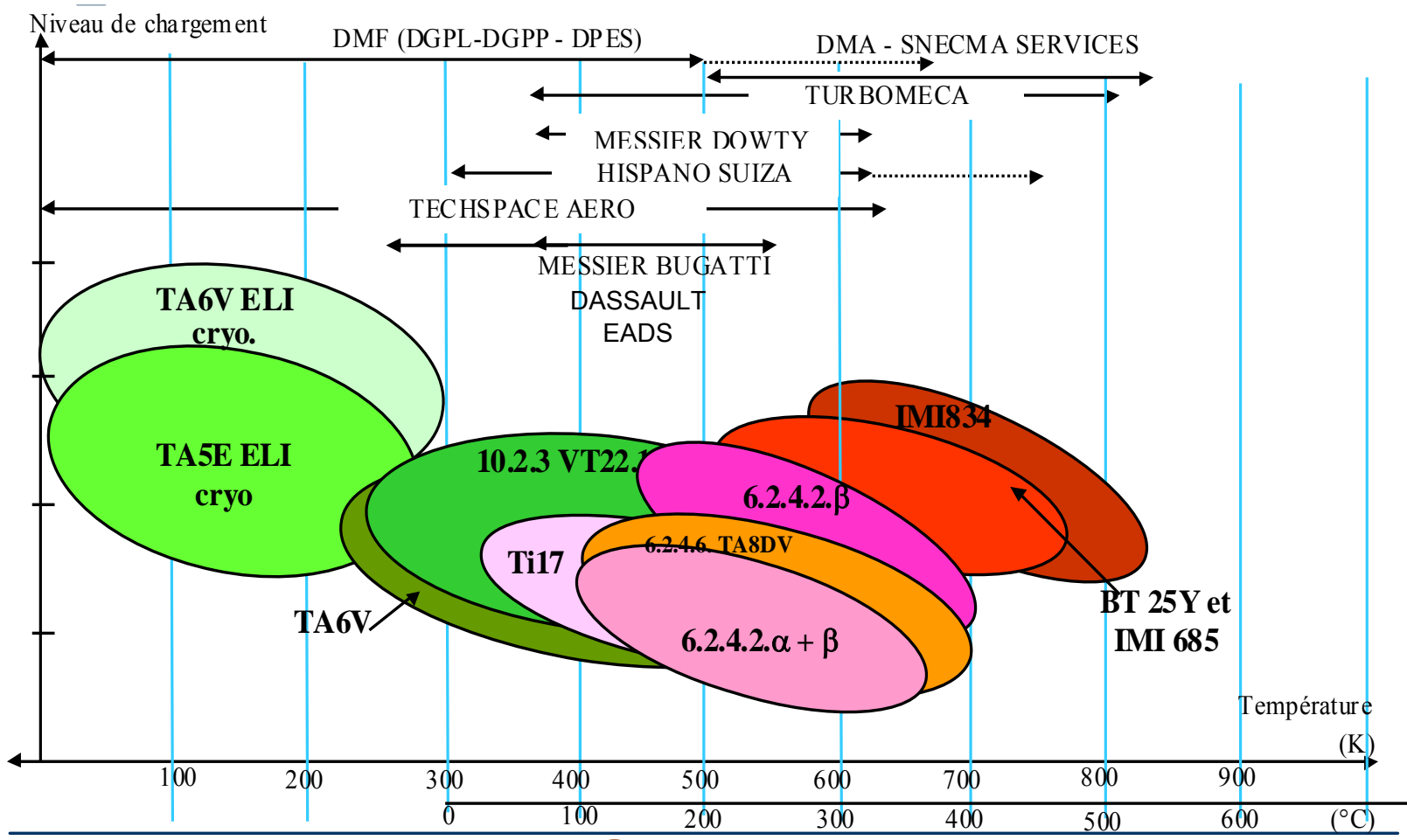


+ Compatibilité avec composites Carbone Epoxy + Soudabilité (réparabilité)





Comparaison des différents alliages de Titane

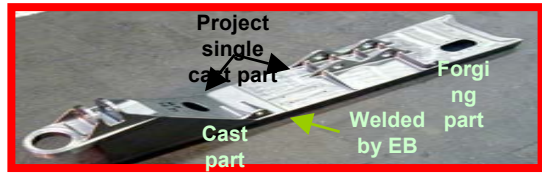


Référence 19/03/2001 5

Exemples d'applications des alliages de Titane



Matricé



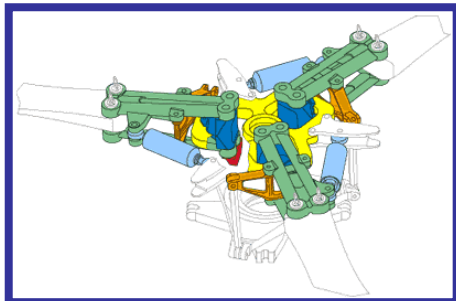
Project single cast part
Cast part
Welded by EB
Forging part

Attache et Ferrure de voileure Rafale TA6V



Exhaust moteur

Ti Bêta 21 S



MOYEU ROTOR PRINCIPAL NH90 Ti10.2.3

ALLOY	Al equiv.						Mo equiv.						T _B °F	T _B °C
	10	5	0	5	10	15	20	25	10	15	20	25		
Ti 834	5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.3Si-0.06C												1913	1045
Ti 1100	6Al-2.75Sn-4Zr-0.4Mo-0.45Si												1859	1015
Ti 829	5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.25Mo-0.3Si												1859	1015
Ti 685	6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si												1877	1025
6-2-4-2	6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si												1823	995
8-1-1	8Al-1Mo-1V												1922	1050
Ti 679	2.25Al-11Sn-4Zr-1Mo-0.25Si												1742	950
5-1-1-1	5Al-1Sn-1Zr-1V-0.8Mo												1795	979
Ti 6-4	6Al-4V												1832	1000
6-6-2	6Al-6V-2Sn												1751	955
Ti 9	4.5 Al-1.6V-2Mo-0.5Fe-0.3Si-0.03C												1770	965
Ti 550	4Al-2Sn-4Mo-0.5Si												1780	975
62S	6Al-2Fe-0.1Si												1850	1010
6-2-2-2-2	6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si												1805	985
6-2-4-6	6Al-2Sn-4Zr-6Mo												1724	940
SP 700	4.5Al-3V-2Mo-2Fe												1670	910
β CEZ	5Al-2Sn-4Zr-Mo-2Cr-1Fe												1652	900
Ti-17	5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr												1634	890
β III	11.5Mo-6Zr-4.5Sn												1418	770
10-2-3	10V-2Fe-3Al												1472	800
555	5Al-5.5Mo-3Cr-0.5Fe												1580	860
β21 S	15Mo-2.7Nb- Al-0.2Si												1544	800
15-3-3-3	15V-3Cr-3Al- Sn												1400	760
LCB	6.8Mo-4.5Fe-1.5Al												1463	795
βC	3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr												1247	675

Al equivalent (w/%) = Al + Sn/3 + Zr/6 + 10 (O₂ + N₂)
 Mo equivalent (w/%) = Mo + 2V/3 + Nb/3 + 3 (Fe + Cr)

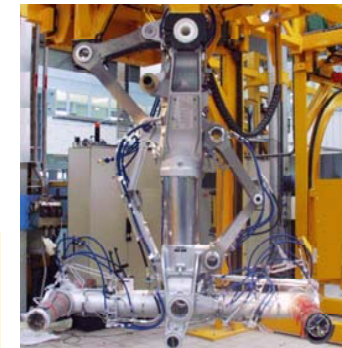
ROUET MOTEUR VULCAIN TA6V ELI PQ



ROUET MOTEUR TURBOMECA TAD6Zr4E PQ



COMPRESSEUR BASSE PRESSION CFM56 TA6V PQ et Ti17



TRAIN D'ATERRISSAGE MESSIER DOWTY Ti 10.2.3



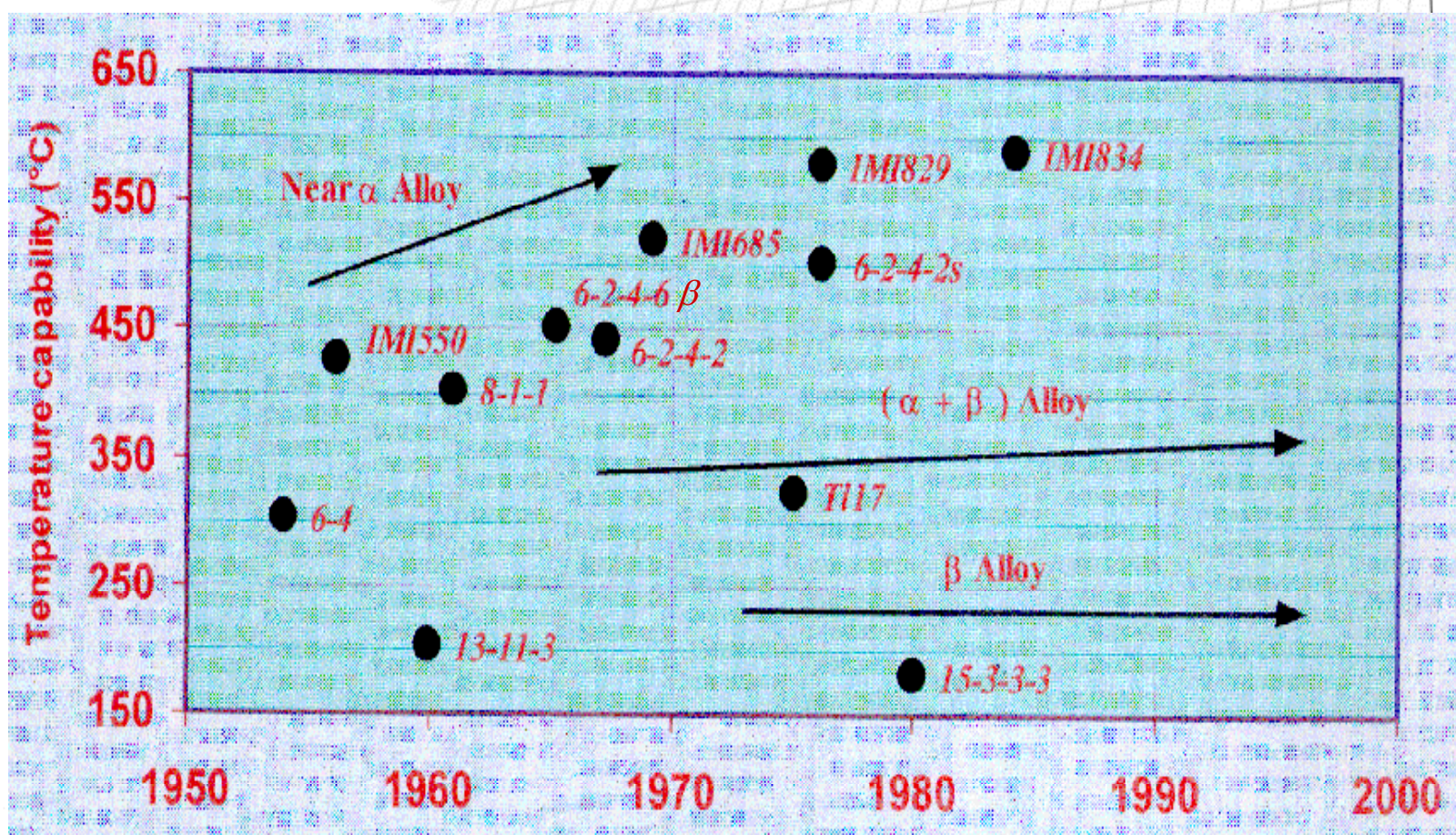
Alliages de Ti pour moteurs : exemples d'applications chez SNECMA

Les moteurs aéronautiques



L'évolution des Alliages de Titane dans l'aéronautique

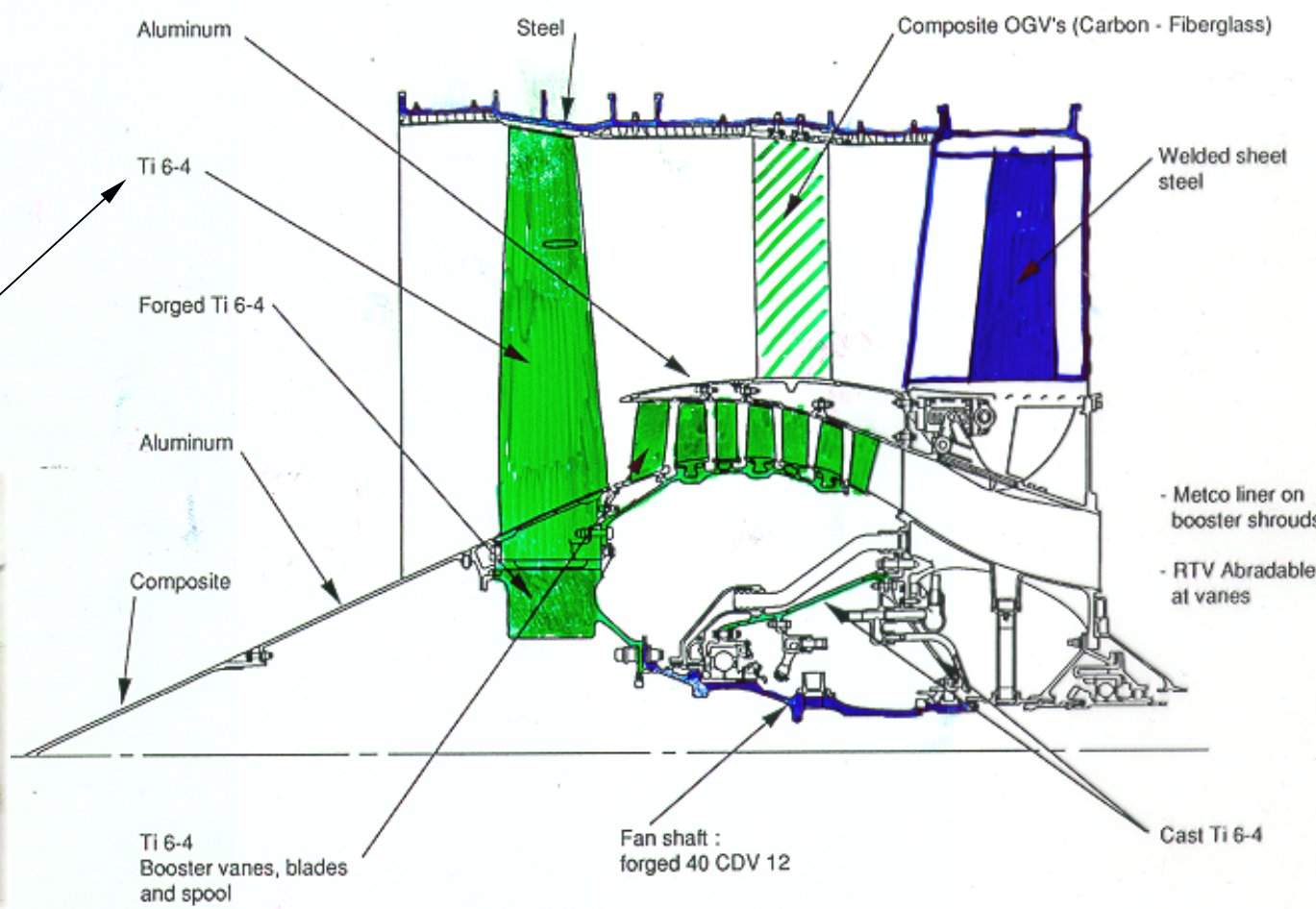
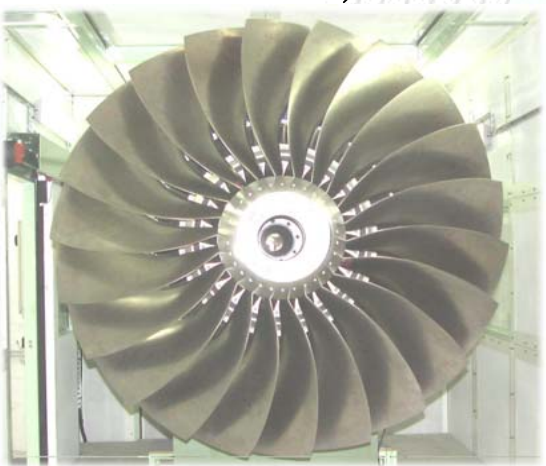
Développement des nuances depuis 50 ans





Un exemple : le CFM 56-5A Fan et Booster

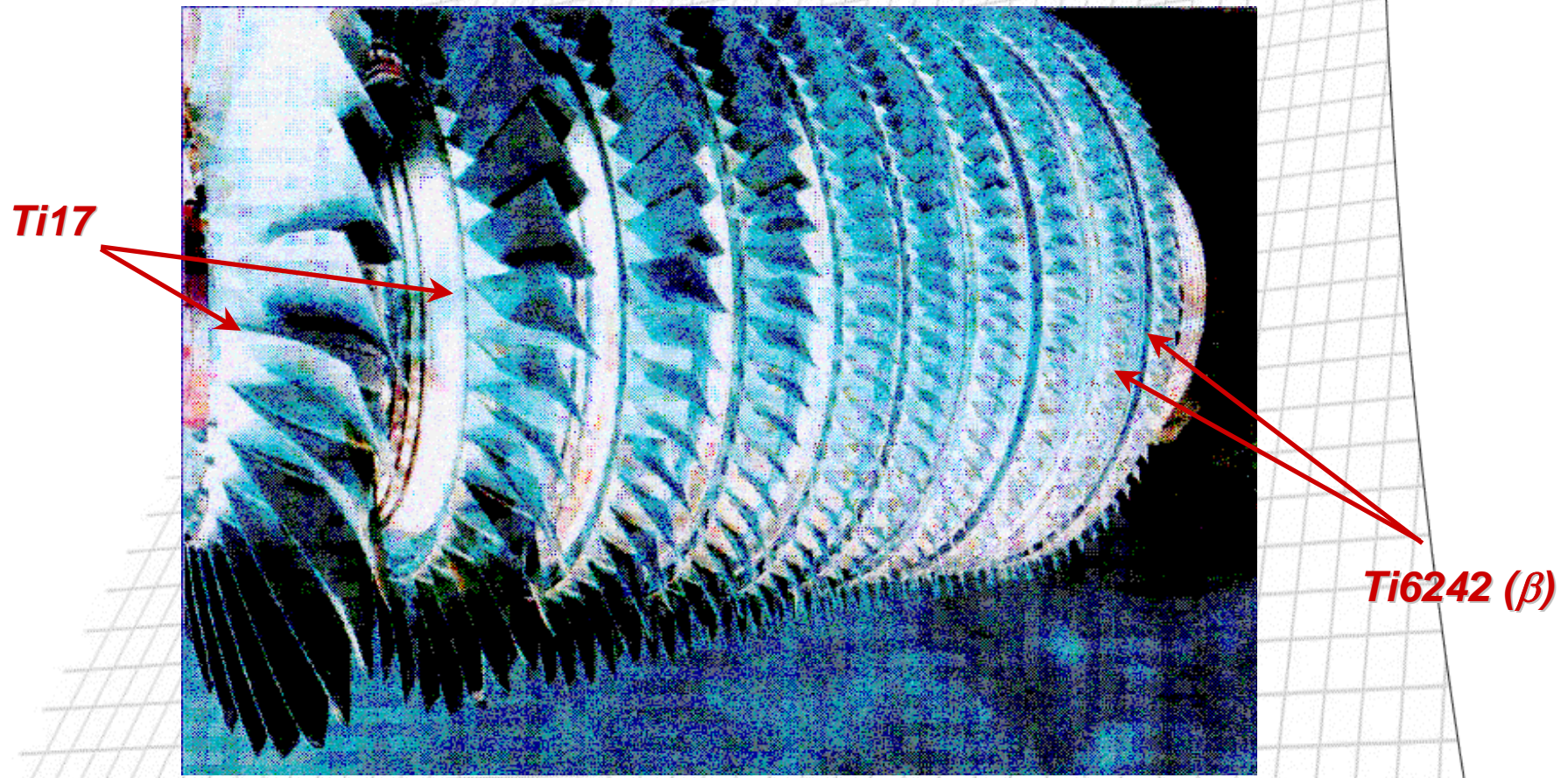
-  Titane
-  CMO
-  Acier





Alliages de Titane dans les turbomachines :

Rotor COMPRESSEUR HP GE90 (étages 1 à 6 en Titane)





Alliages de Ti pour moteurs : exemples d'applications chez SNECMA

Les moteurs spatiaux

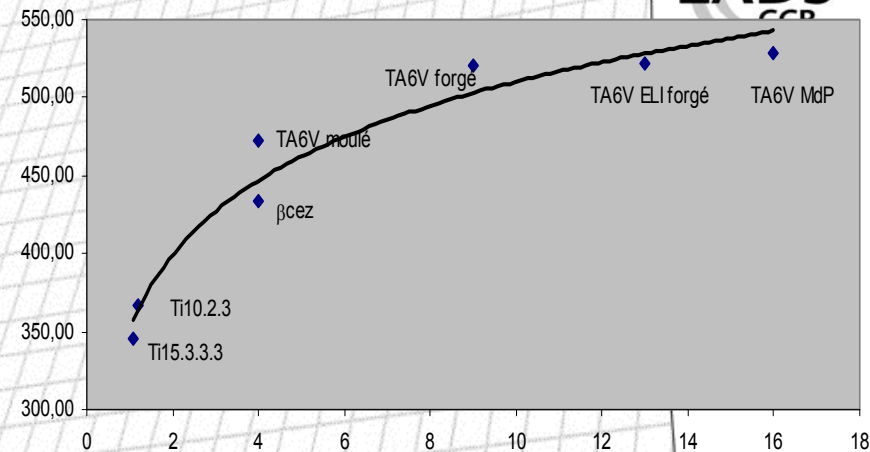
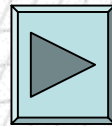


Choix de la nuance

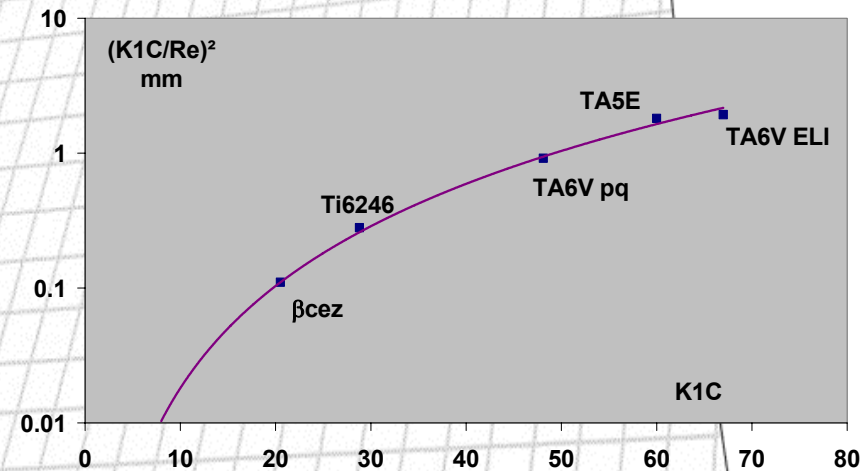
- Température cryogénique
- Besoin : **marge % vitesse d'éclatement**
- Pièce complexe \Rightarrow **plastification localisée**
 \Rightarrow **marge = plastification max. possible**

Besoin en propriétés à 20K:

- Re/ ρ - A%
- K1C
- Fatigue HCF



Comparaison des vitesses périphériques



Comparaison des tailles de défaut

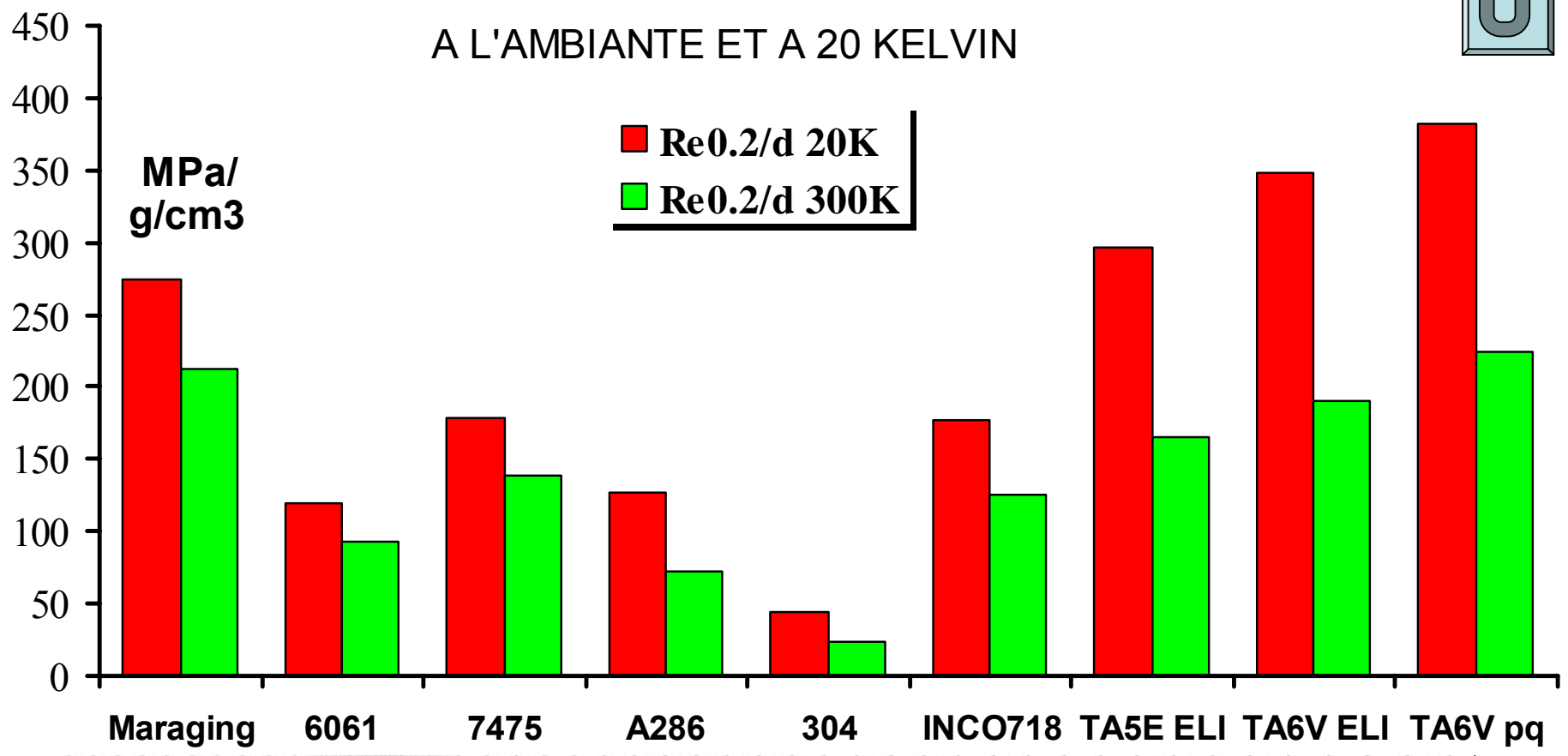
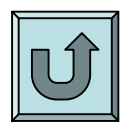
Conclusions

- Applications cryotechniques - pièces tournantes :
 - Compromis résistance / ductilité / ténacité
 - **Une seule réponse : alliage de titane (TA6V - TA5E) nuance ELI : Extra Low Interstitial**



Choix des alliages des Titane

COMPARAISON DES LIMITES ELASTIQUES SPECIFIQUES
A L'AMBIANTE ET A 20 KELVIN



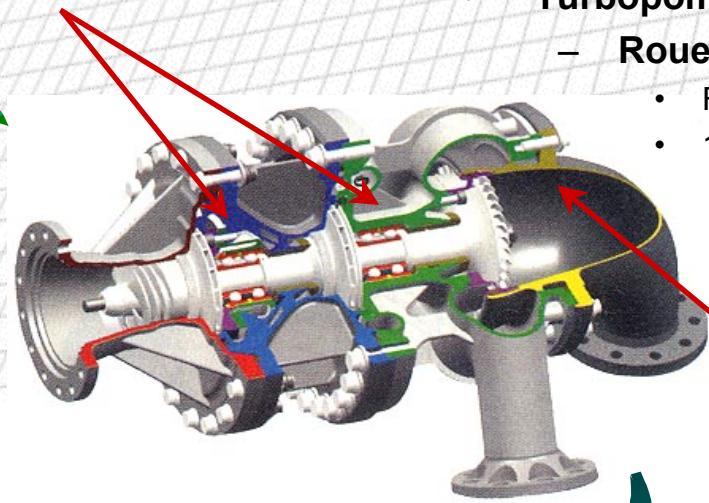


Moteur TPH Vinci 180

- 3^{ème} étage Ariane 5
- H₂ et O₂ liquides
- 10 tonnes de charge utile
- Turbopompe:
 - Rouet de la turbopompe
 - Fiabilité
 - 100 000 tr/min et jusqu'à 130000 tr/min

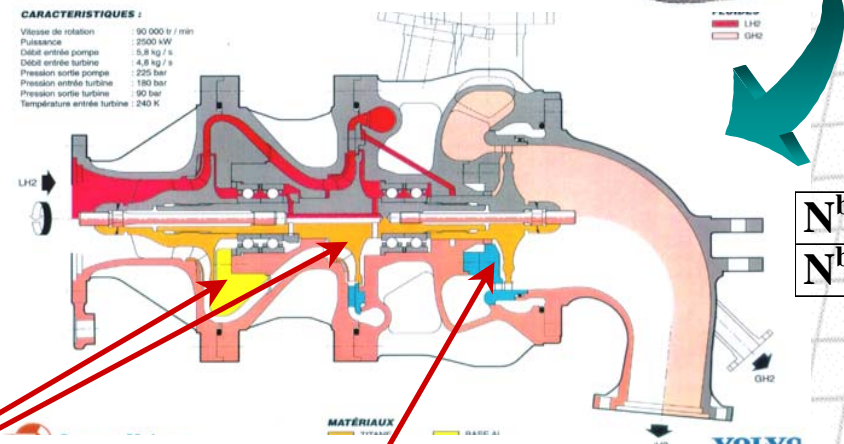


Rouets



Turbine

CARACTERISTIQUES :
 Vitesse de rotation : 90 000 tr / min
 Puissance : 2500 kW
 Débit entrée pompe : 6,8 kg / s
 Débit entrée turbine : 4,8 kg / s
 Pression sortie pompe : 225 bar
 Pression entrée turbine : 180 bar
 Pression sortie turbine : 90 bar
 Température entrée turbine : 240 K

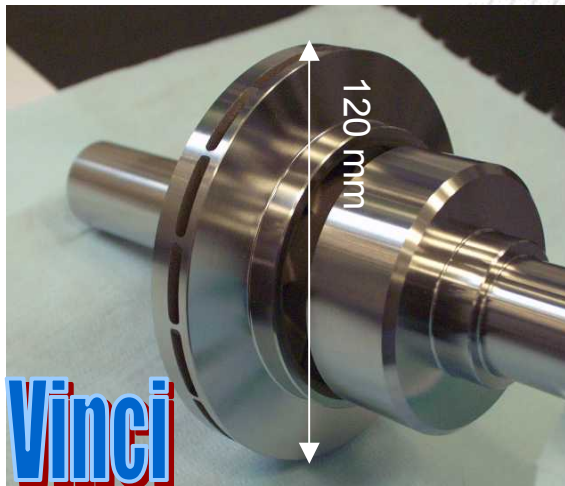


	TPH Vulcain	TPH Vinci
N ^{bre} d'él ^t stator	13	5
N ^{bre} d'él ^t rotor	10	4

**Réduction de coût de 50%
(référence P2 Vulcain)**

Rotors cryo 20K en TA6V ELI, Rotors turbine TA6V PQ

Métallurgie des Poudres



- Des rouets très près des cotes
- +
• Des propriétés mécaniques hors pair (137.000 rpm à 30 k sur Moteur VINCI)

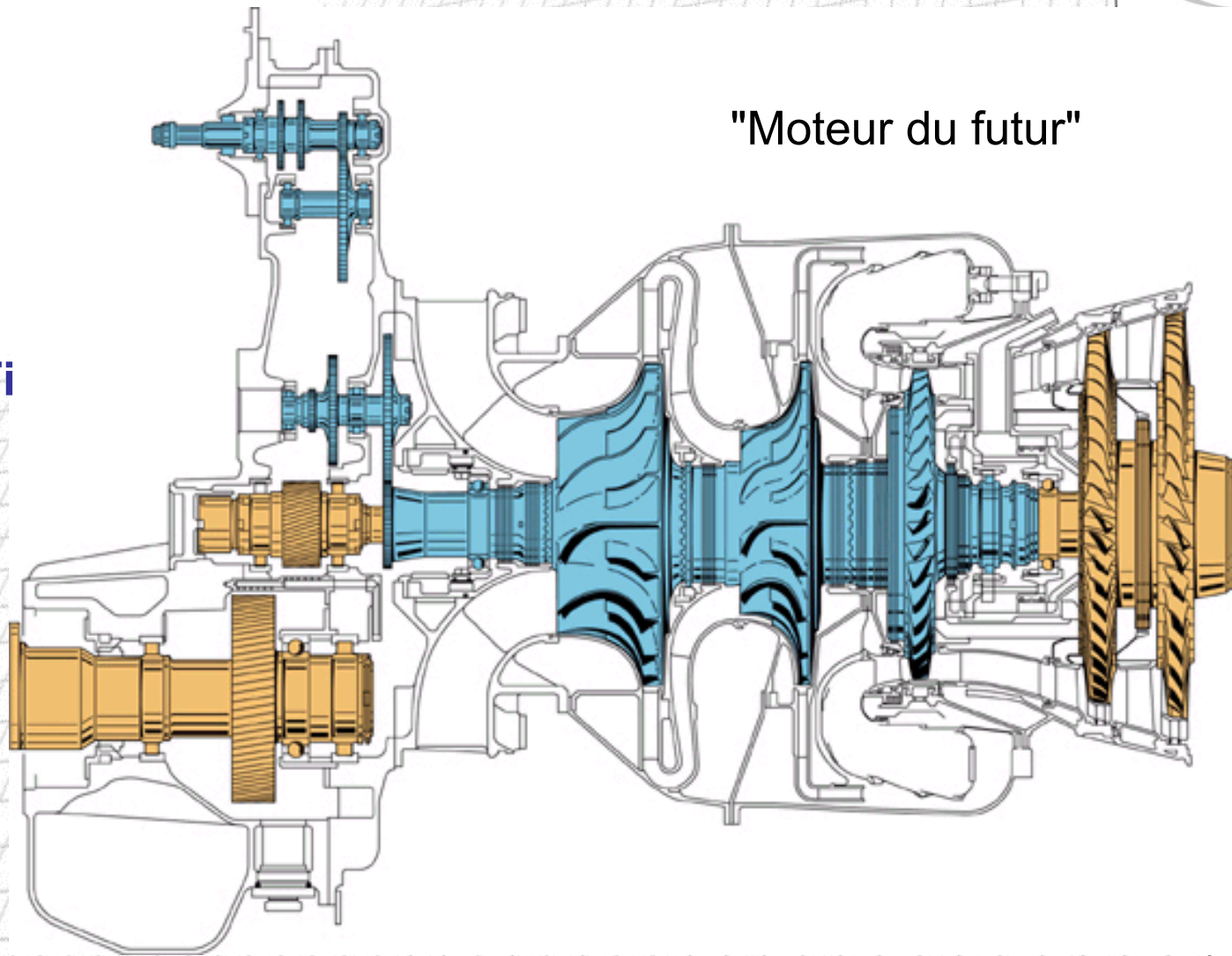


Alliages de Ti pour moteurs :
exemples d'applications chez SNECMA
Les moteurs hélicoptères - TURBOMECA

Turbomachine Hélicoptère Turboméca

"Moteur du futur"

En bleu :
Alliage de Ti





Alliages de Ti pour applications structurales

Caisson central d'empennage

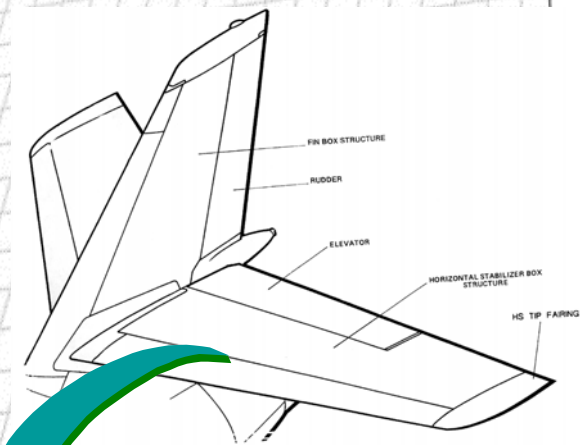
Falcon Dassault (fonderie cire perdue)



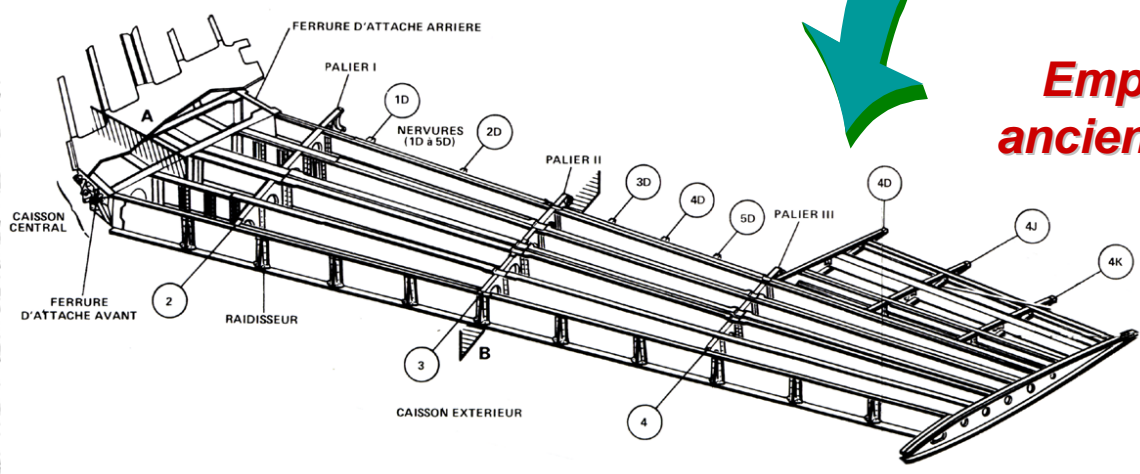
Caisson d'empennage horizontal Falcon



La famille FALCON



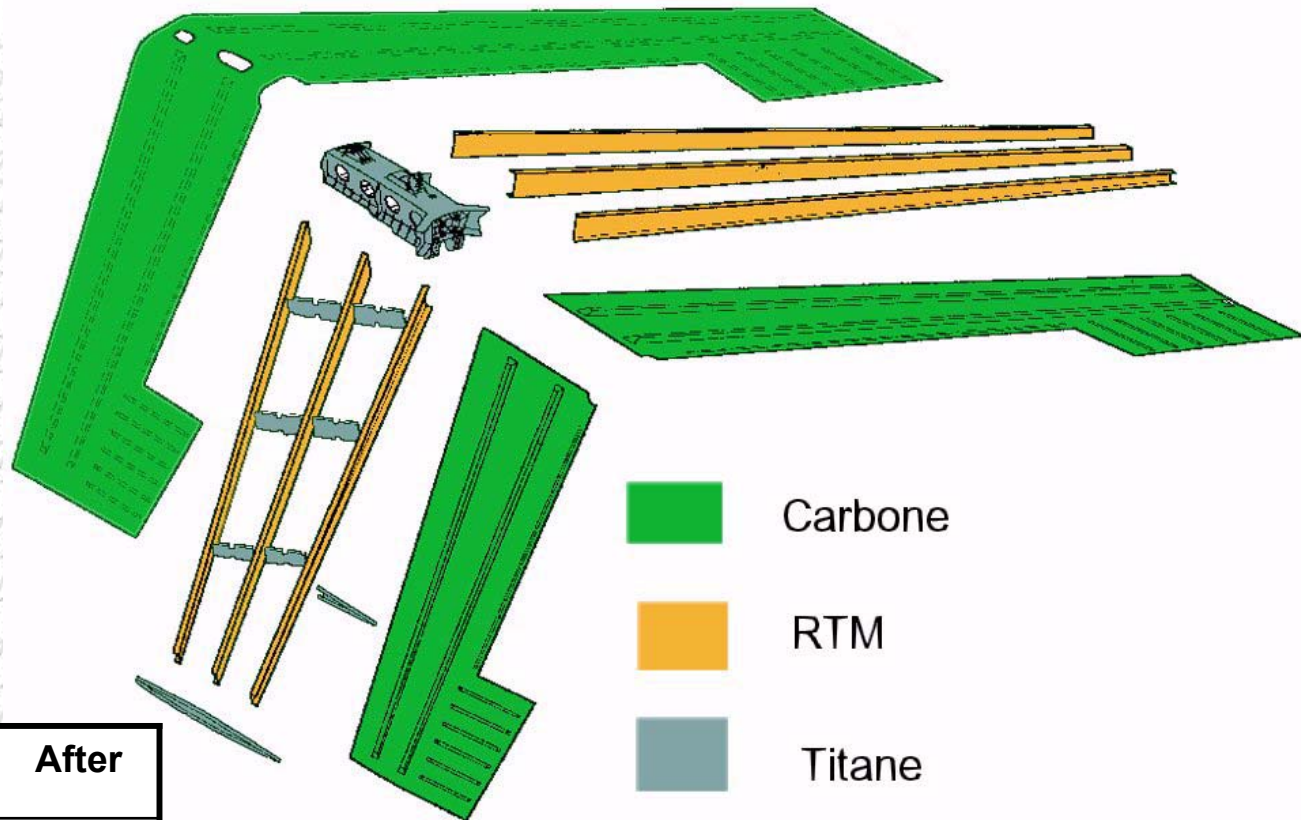
Empennage horizontal ancien design (métallique)



Caisson d'empennage horizontal Falcon

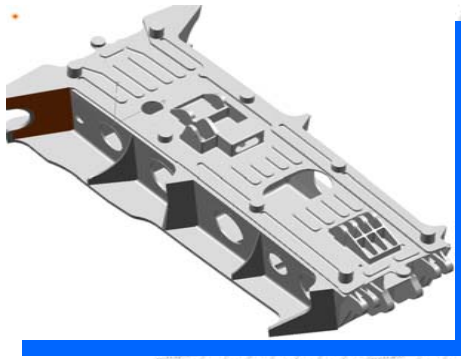
**Horizontal
Empennage**

**Nouveau design:
composite +
caisson titane**



	Before	After
Number of parts	240	36
Fixations	12000	3500

Caisson d'empennage horizontal Falcon



Modèle Catia

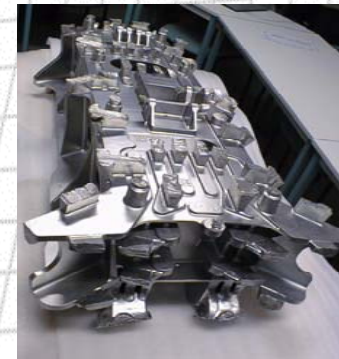
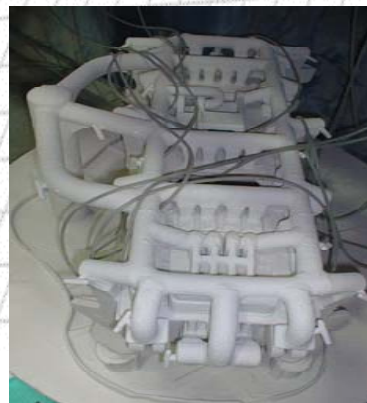


Usinage

Stéréolithographie



Moule



Ebauche de fonderie

Caisson d'empennage horizontal Falcon

Fonderie CIRE PERDUE

Sous vide

T-A6V

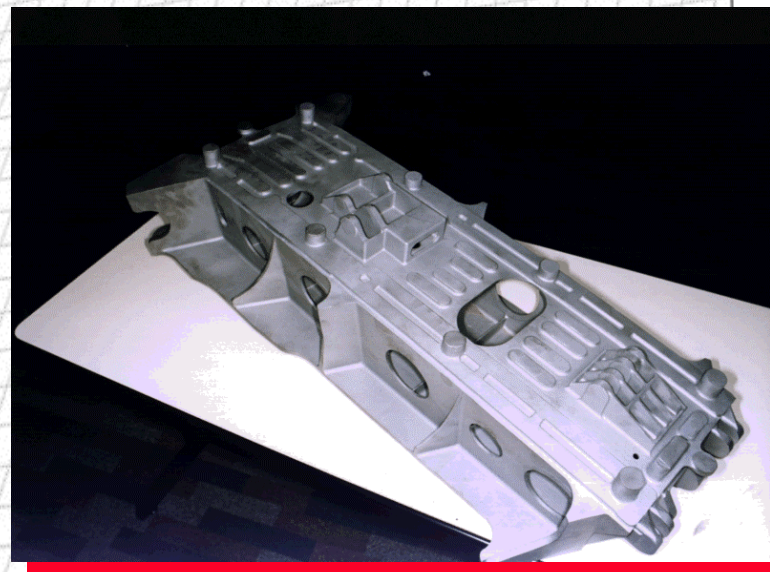
Longueur: **990 mm**

Largeur: **522 mm**

Epaisseur: **326 mm**

Epaisseur: **2,4 mm**

Masse de l'ébauche: **39 kg**



Comparaison des ensembles terminés assemblés et coulés:

Nombre de composants

Nombre de fixations



(-24)

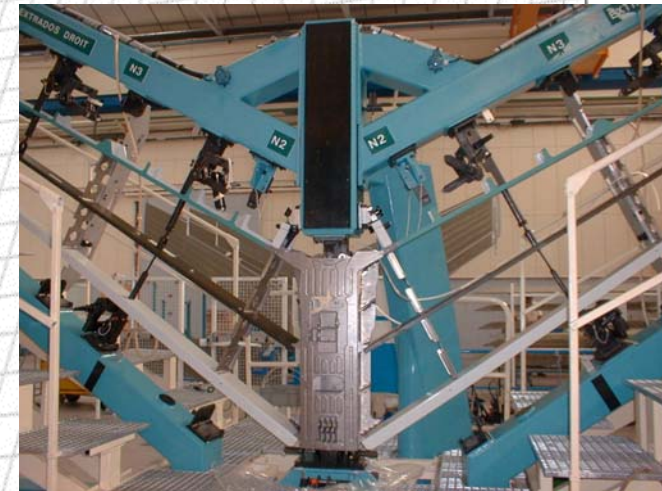
(-200)

Caisson d'empennage horizontal Falcon

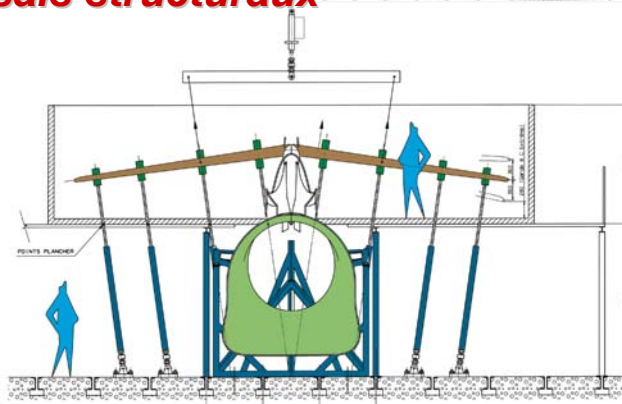
Drapage



Chaine d'assemblage final



Essais structuraux





Alliages de Ti pour applications structurales

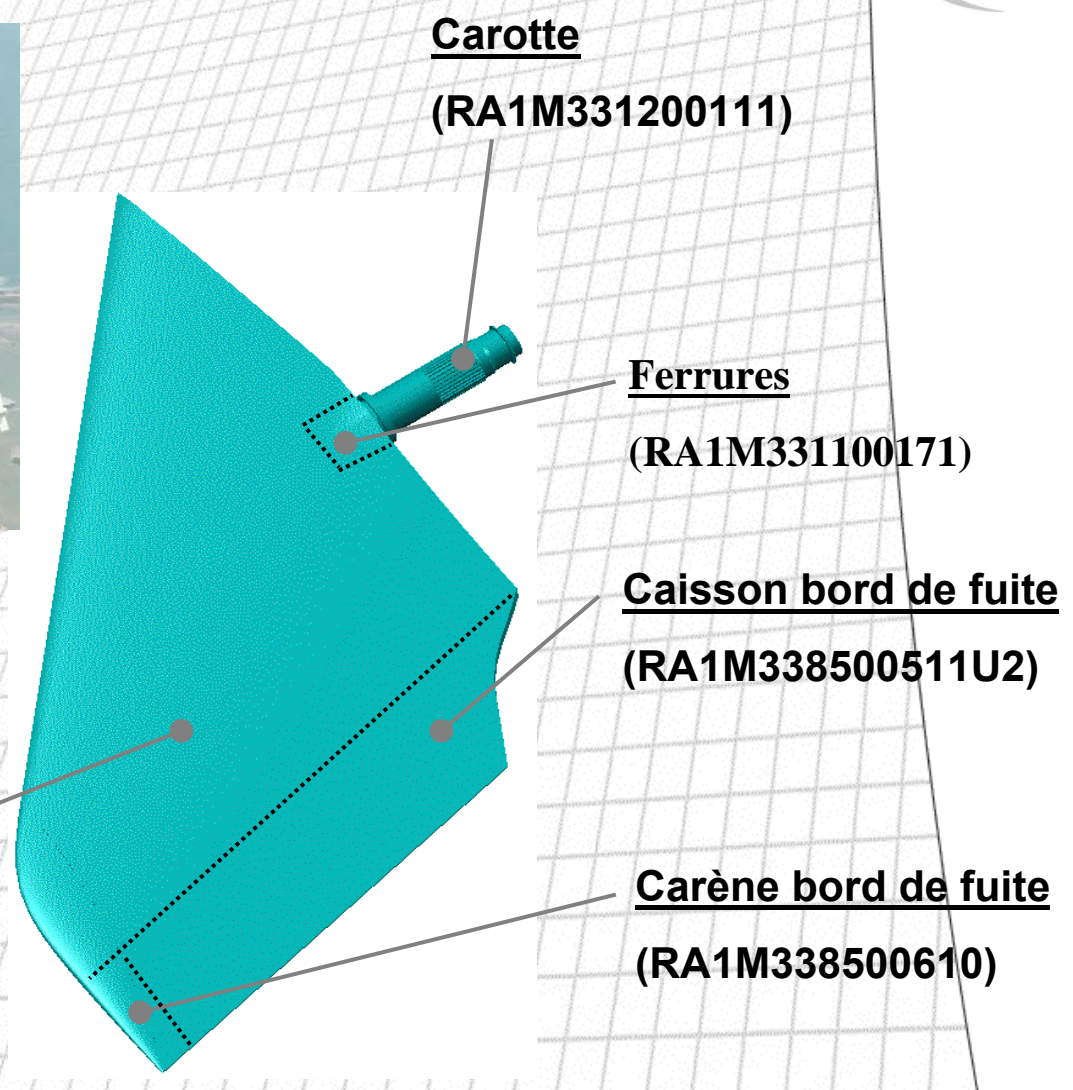
Canard du Rafale Dassault (SPF/DB)



La canard du Rafale



CANARD RA1M 330

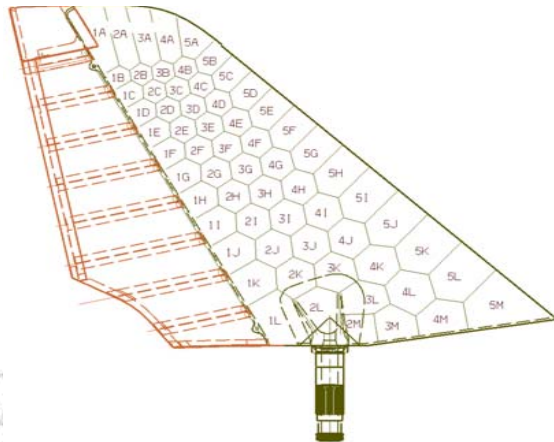
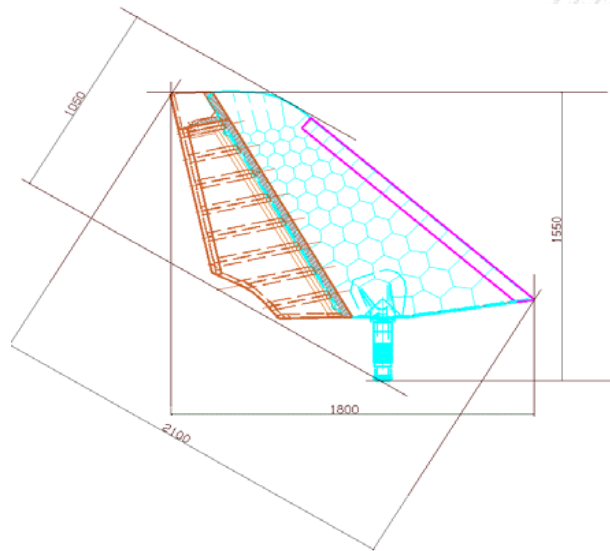


Caisson (RA1M331U1)

Intégralement réalisé en TA6V
Pièce et procédé présentés plus
avant ce jour à 16h10

La canard du Rafale

Caisson Canard





Alliages de Ti pour applications structurales

Pièces forgées pour BTP Eurocopter



Pièces forgées pour BTP Hélicoptères

Au cours des années 90,
pour répondre à d'importants besoins de gain
de masse pour de nouveaux programmes
(EC120 et NH90),

EUROCOPTER a étudié la possibilité
d'introduire de nouveaux alliages de Titane
aux caractéristiques mécaniques supérieures
à l'alliages de référence Ti6-4, en
remplacement d'aciers hautes résistances



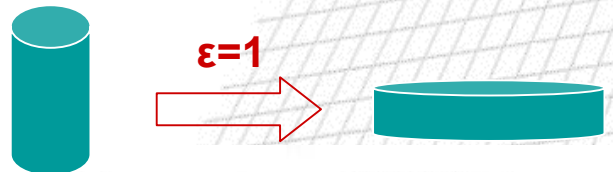
EADS Corporate
Research Centre

Aujourd'hui, le Ti10.2.3 vole
sur EC120 et NH90

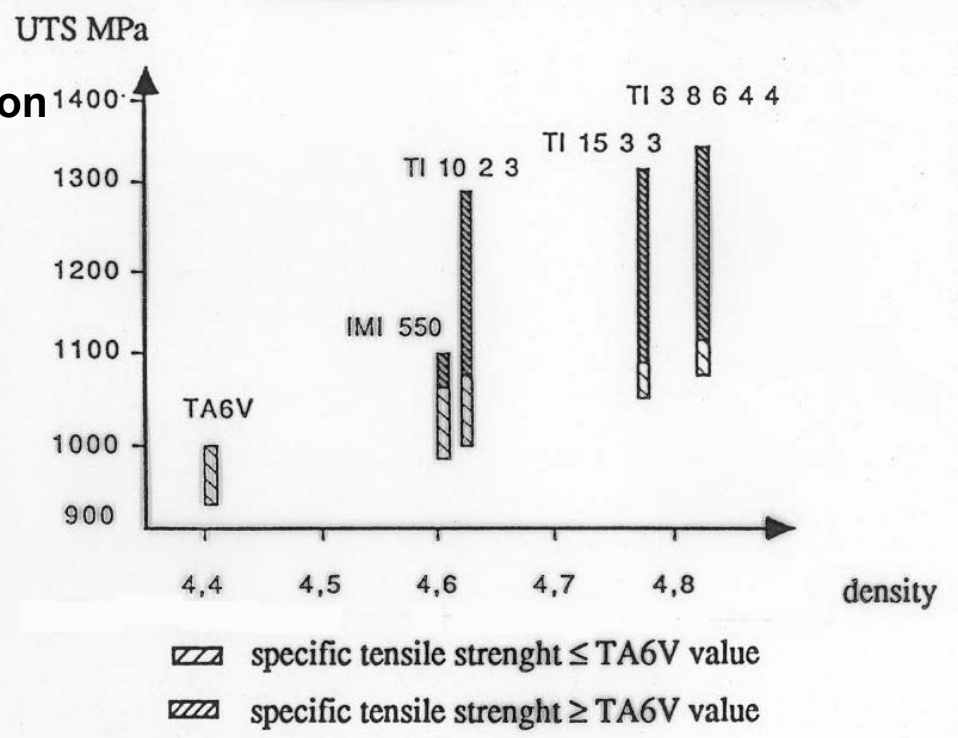
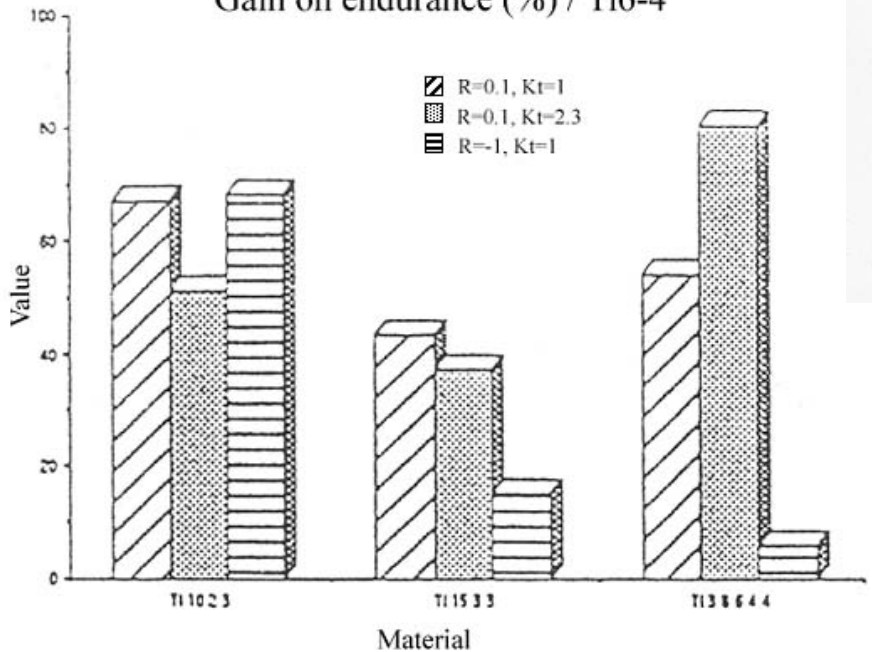


Pièces forgées pour BTP Hélicoptères

A cette date (1993), choix des alliages Ti38644, Ti15.3.3 et Ti10.2.3 pour évaluation de leurs propriétés sur des lopins forgés (épaisseur après forge ~25mm)



Gain on endurance (%) / Ti6-4

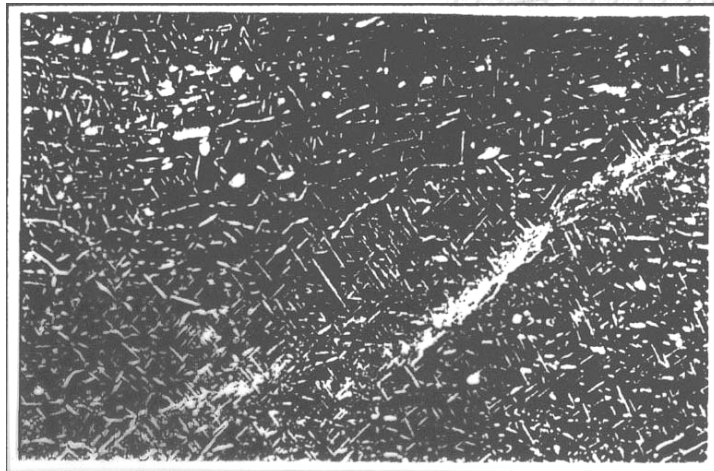


Les pancakes en Ti10.2.3 présentent de meilleures caractéristiques en traction et fatigue et une microstructure plus homogène.

Pièces forgées pour BTP Hélicoptères

Essais de faisabilité sur des ébauches en Ti10.2.3 (section maximale ~120mm) :

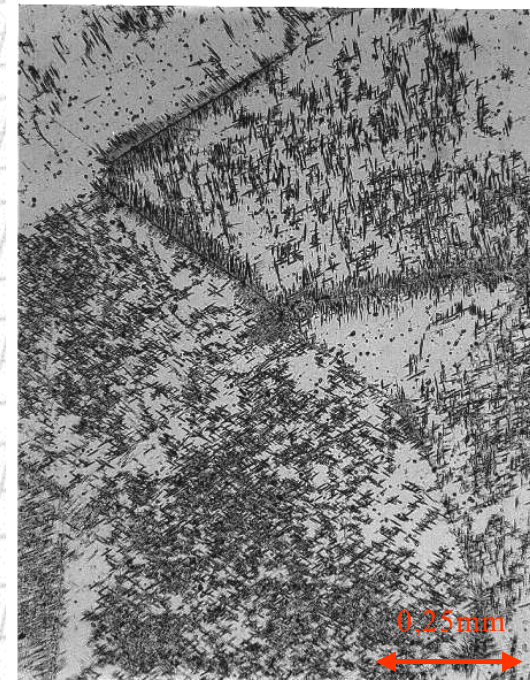
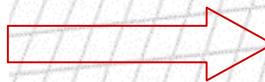
- Conditions de forge β similaires aux pancakes (AC)
- Même mise en solution α/β (WQ)
- Vieillessement pour atteindre UTS~1150 MPa



pancakes x 500

Pancake

El% ↘ à 2%



Ebauche

Décoration des joints de grains β par une précipitation α_{GB} (rubans)

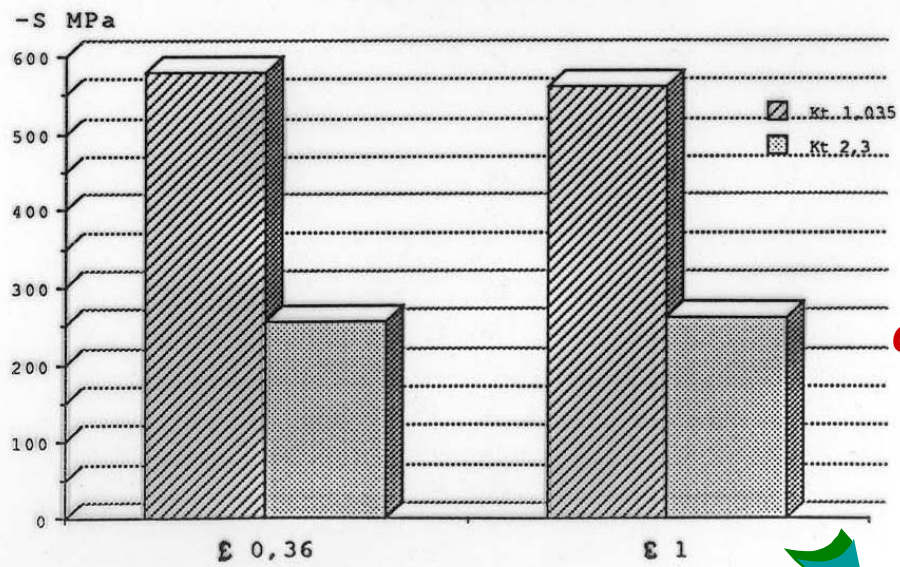


Pièces forgées pour BTP Hélicoptères

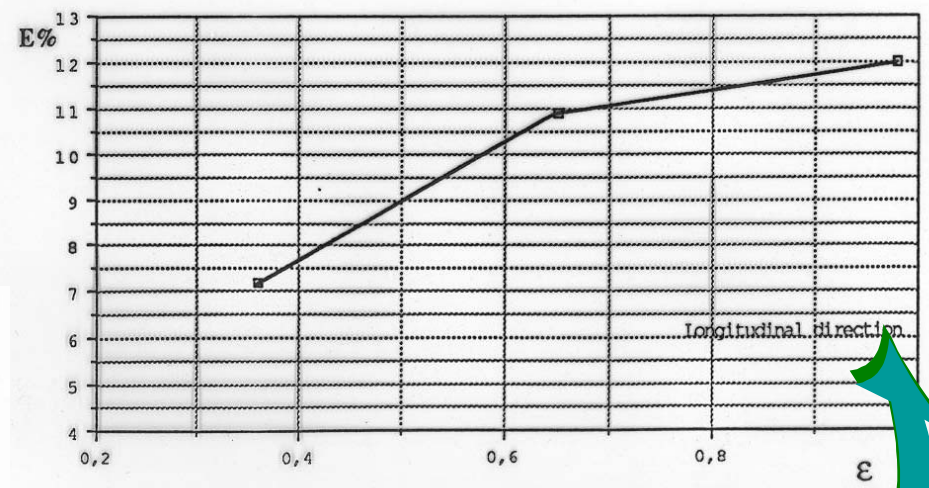
Optimisation du cycle de forge:

- forge dans le domaine β (WQ)
- **addition d'une étape de forge dans le domaine α/β**
- même traitement de mise en solution α/β
- vieillissement pour atteindre UTS~1150MPa

FATIGUE BEHAVIOUR



ELONGATION



Forte influence du taux de déformation dans le domaine α/β sur l'allongement E_l

Pas d'influence sur la résistance à la fatigue



Pièces forgées pour BTP Hélicoptères

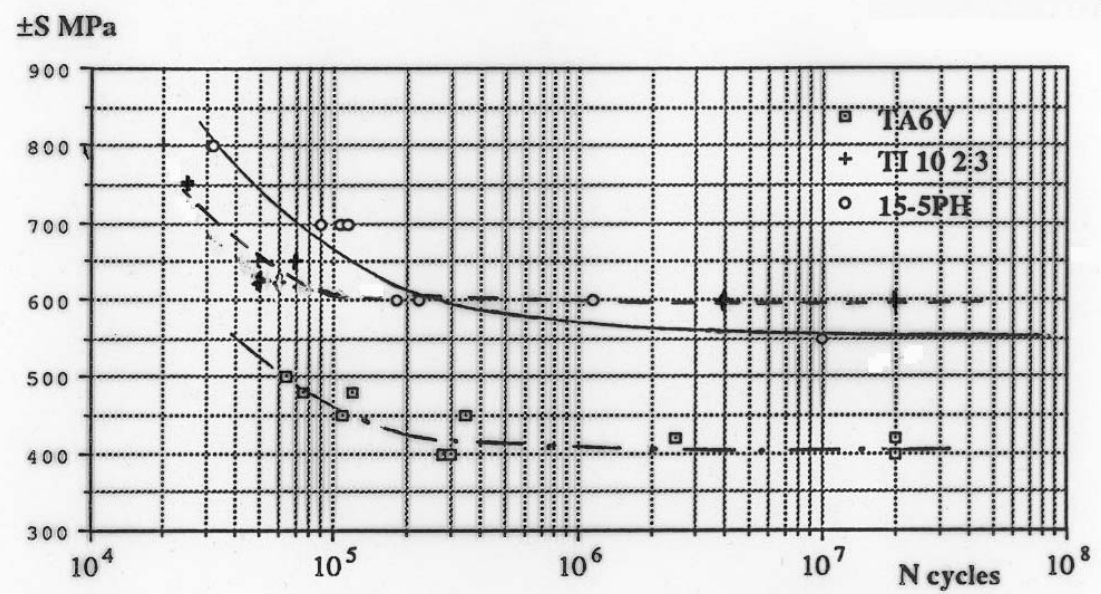
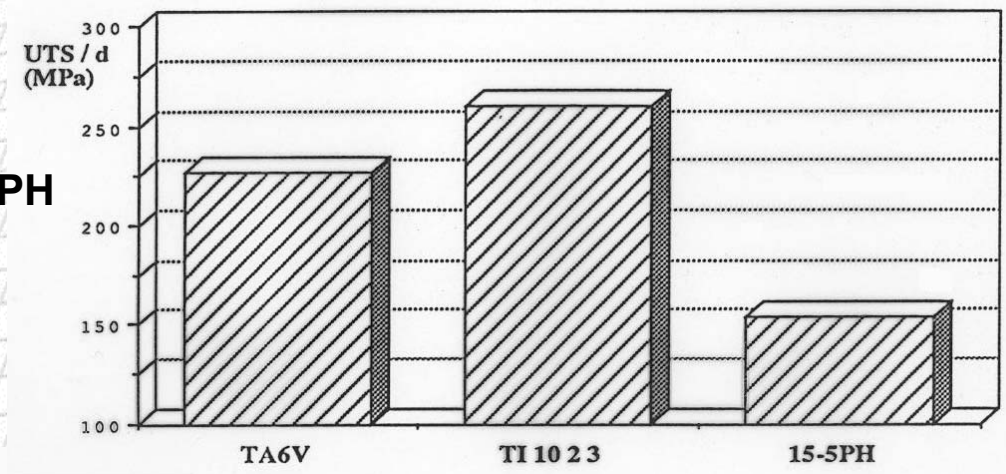
Propriétés spécifiques en traction
supérieures à celles du 15-5PH

+

Endurance en fatigue équivalente au 15-5PH



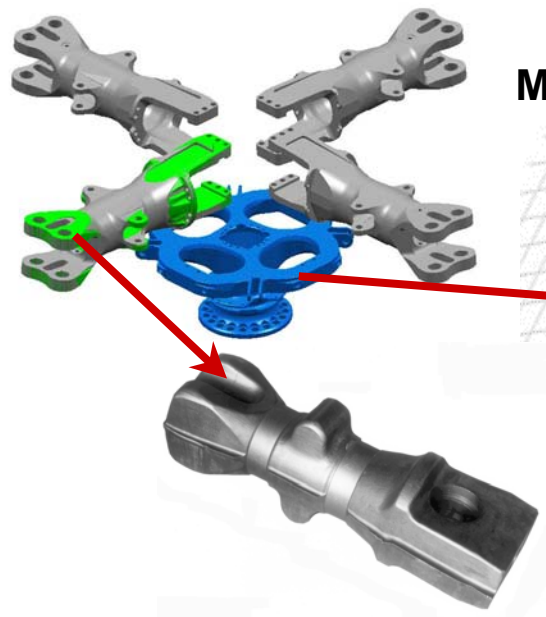
IMPORTANT GAIN DE MASSE



A partir d'une étude microstructurale et mécanique, un cycle de forge efficient a été défini pour des pièces forgées de forte section

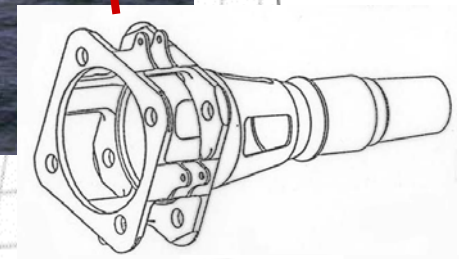


Pièces forgées pour BTP Hélicoptères



Moyeu de rotor principal

NH90 (Première livraison 2005)



Manchons du rotor principal :

Taille : $L_{max} \sim 950mm$, $H_{max} \sim 300mm$

Masse : $\sim 185\text{ kg}$

Fatigue sur ép. prélevées sur pièce : $\pm S_{\infty} = 592\text{ MPa}$

Arbre de rotor arrière

Size : $\varnothing_{max} \sim 400mm$, $L_{max} \sim 800mm$

Weight : $\sim 250\text{ kg}$

Fatigue sur ép. prélevées sur pièce : $\pm S_{\infty} = 615\text{ MPa}$





Alliages de Ti pour applications structurales

TA6V4 sur mât réacteur Airbus A380



Alliages de Titane sur A380



Contraintes matériaux sur structure primaire de mât

Propriétés mécaniques

- Résistance à la traction
- Compression / flambement
- Fatigue
- **Tolérance aux dommages**

Conditions / environnement

- Résistance à la corrosion
- Attaques / fluides
- Stabilité thermique
- Résistance au feu

Manufacturing/Purchasing

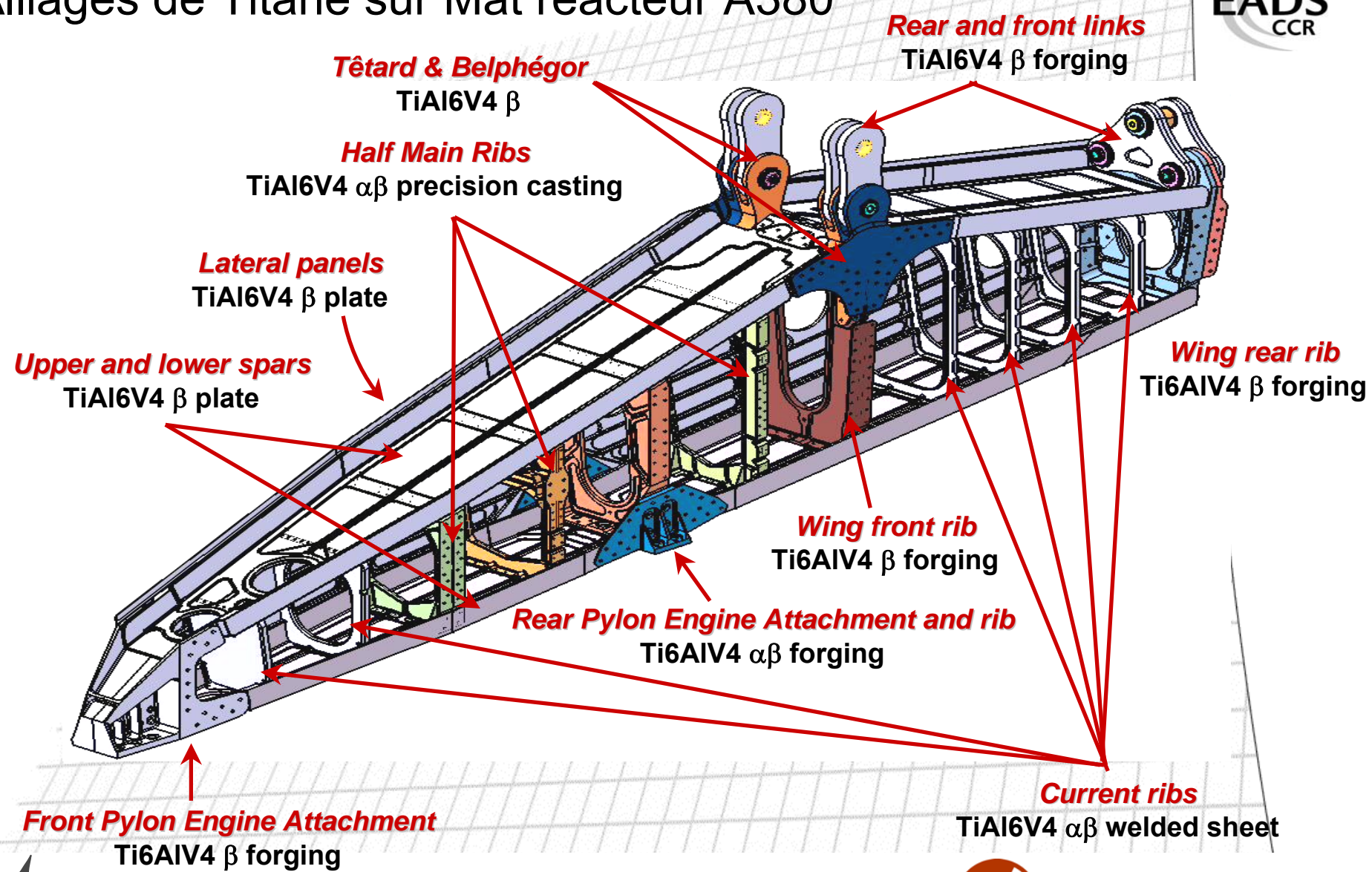
- Coût de la matière brute
- Usinage
- Mise en forme
- ...



En raison de ces contraintes, le choix
matériaux s'est porté uniquement sur les
Métaux durs



Alliages de Titane sur Mât réacteur A380



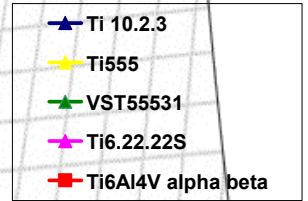
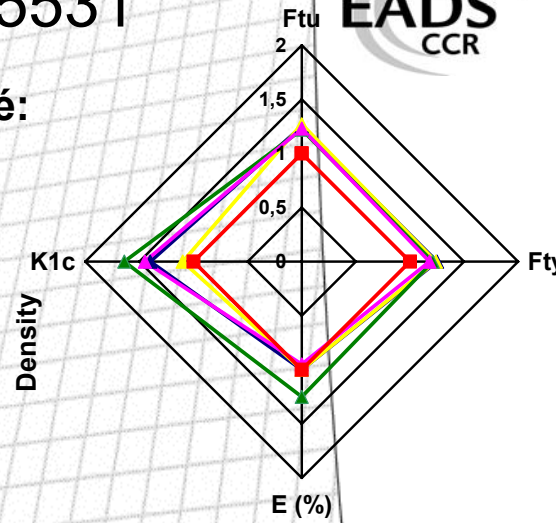
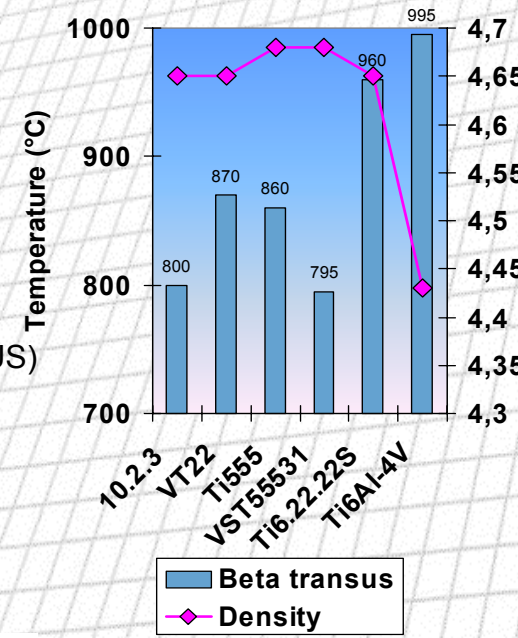
Introduction de l'alliage haute résistance VST55531

• **Impératifs A380 : haute résistance en traction et bonne ténacité:**

- $F_{tu} \geq 1100$ MPa
- $F_{ty} \geq 1000$ MPa
- $K_{1c} \geq 70$ MPa \sqrt{m}

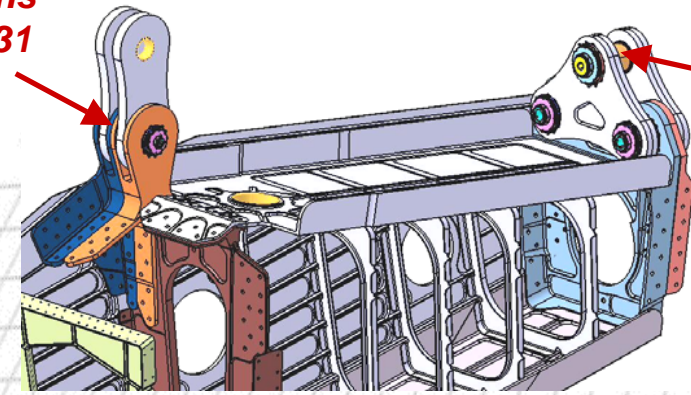
• **Propositions des fournisseurs:**

- VST55531 (VSMPO)
(développé à travers une collaboration avec AIRBUS)
- Ti555 (TIMET)
- Ti10.2.3 (TIMET & VSMPO)
- Ti6.22.22S (RMI & ALLVAC)...



Front Pins VST55531

Rear Pins VST55531



Première application Ti haute résistance: pions entre voile et mât qui permettent un gain de masse de 15kg



Conclusions

**Alliages de Ti pour applications moteurs
et structures aéronautiques:
grands axes de développement actuels et
futurs**



Conclusions

Les activités sur les alliages de Titane dans le domaine aéronautique regroupent trois axes forts :

- o Recherche des corrélations lien mésostructures - propriétés mécaniques
- o Travaux de consolidations technologiques des procédés de mises en œuvre
- o Travaux de développement amont : élaboration et transformation (nouveaux alliages et nouveaux procédés)

A ces activités, se rajoutent celles qui se rattachent à la problématique de l'utilisation des alliages de Ti : Tribologie, Oxydation / Corrosion / Traitements de surface, CND / END, Bases de données, Modélisation.



Grands axes de développement actuels

- o Alliages α pour applications chaudes moteurs, tels que Ti6242 et IMI834
- o Alliages $\alpha+\beta$ pour applications structurales et moteurs dans des zones mi-chaudes et ambiante, tels que TA6V, Ti17, Ti6246, TA3V2.5
- o Alliages β pour applications structurales et moteurs, à hautes caractéristiques mécaniques et de résistance à la corrosion, tels que TA6V β , Ti10.2.3, Ti5553, VST55531, β 21S, Ti15.3.3.3

Mais

- o Chaque alliage a un caractère différent qui nécessite des connaissances importantes et une approche mécanique / métallurgique / environnement obligatoire pour la conception des pièces de motorisation et de structure

o Contexte politico-économique d'approvisionnement difficile (cf. présentation P.-F. Louvigné à 14h00) : le Titane paye la rançon de ses atouts et de son succès !



Grands axes de développement futurs

- o Applications plus chaudes
- o Assemblage des alliages Ti avec matériaux composites (résistance à la corrosion)
- o Soudage / brasage des alliages de Ti (alliages β)
- o Développement des composites à Matrice Métallique Ti: rigidité spécifique très élevée (Ti/SiC à fibres longues)