

AIRCRAFT ENGINES

AMBASSADEUR SAFRAN ECL – EPSAC MATERIAUX

—
2019-05-16



This document and the information therein are the property of Safran. They must not be copied or communicated to a third party without the prior written authorization of Safran

OBJECTIF – CONTEXTE

- Un besoin est identifié de supporter l'EPSA dans ses choix matériaux, les caractéristiques utilisées, les évolutions techniques.
- Le retour d'expérience observé en Top Copeau montre un besoin de définition des valeurs admissibles en fonction des cas de charge et type de sollicitations.
- La formation est destinée aux élèves de 1ere année en fin d'année scolaire Mai/Juin en préparation de la phase de conception du 1^{er} trimestre de la 2eme année.

■ Sommaire:

- > Introduction aux matériaux aéronautiques
- > Sollicitations des matériaux
- > Matériau Aluminium
- > Matériau Acier
- > Take Away

INTRODUCTION MATERIAUX AERONAUTIQUES

—
2019-05-16



Matériaux aéronautiques - généralités

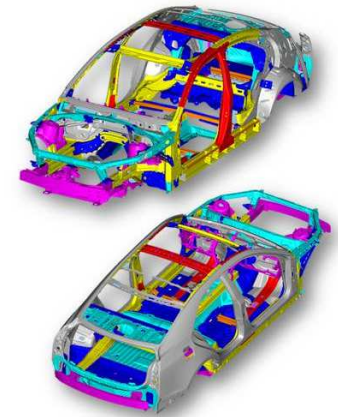
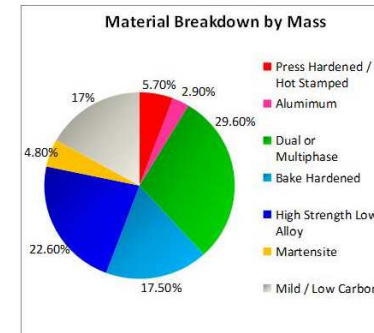
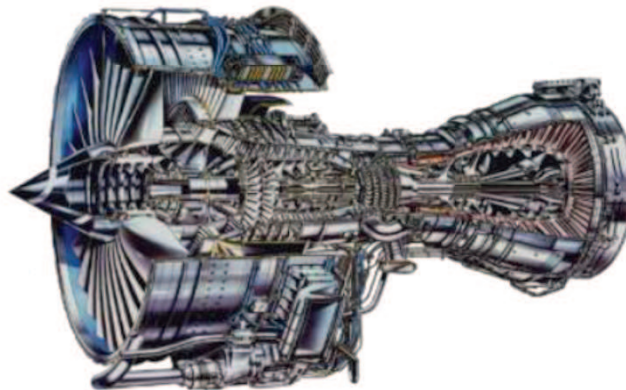


CELLULES

- PIECES EN ALLIAGE D'ALUMINIUM 75 %
- PIECES EN ALLIAGE DE TITANE 10 %
- PIECES EN ACIER ET COMPOSITES 15%

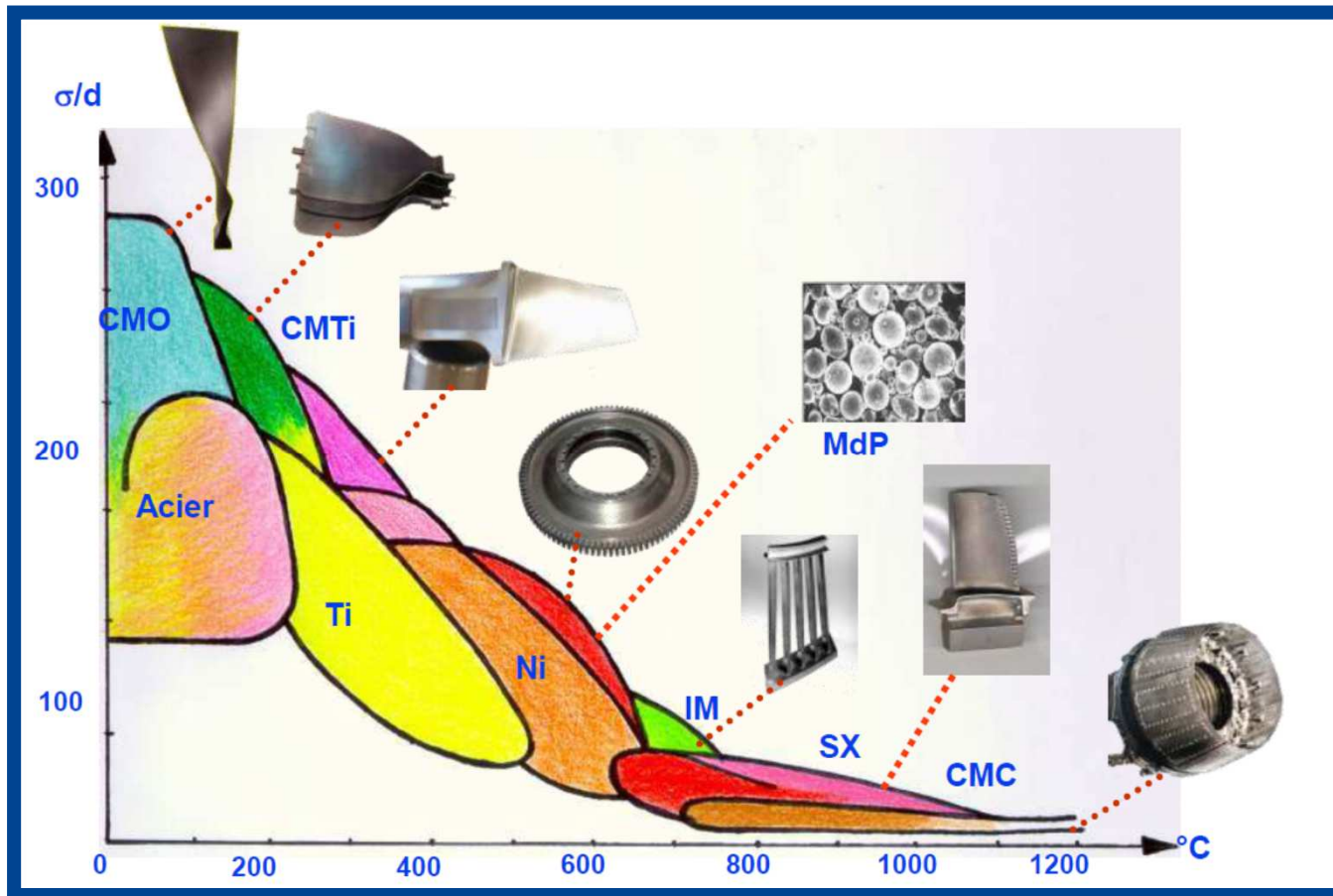
TURBOREACTEUR

- PIECES EN ALLIAGE DE NICKEL 45 %
- PIECES EN ALLIAGE DE TITANE 25 %
- PIECES EN ACIER 15 %
- PIECES EN ALLIAGE DE COBALT 6 %
- PIECES EN ALLIAGE D'ALUMINIUM 4 %
- PIECES COMPOSITES 5 %



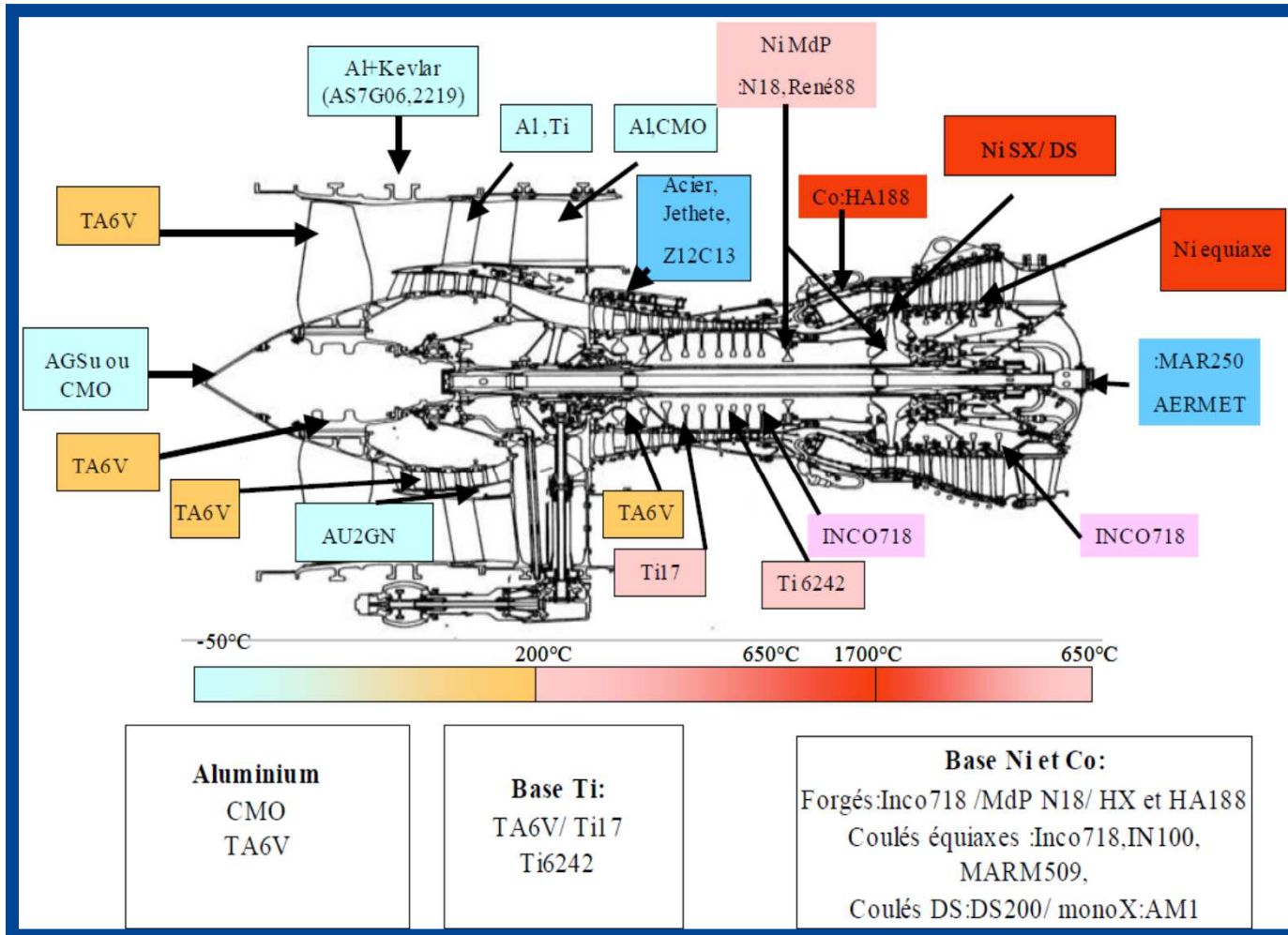
■ Alliages de nickel + titane + aciers = 85% poids du réacteur

Familles de matériaux dans les turboréacteurs



■ Comparaison des propriétés mécaniques spécifiques en fonction de la température.

Matériaux mis en oeuvre aujourd'hui

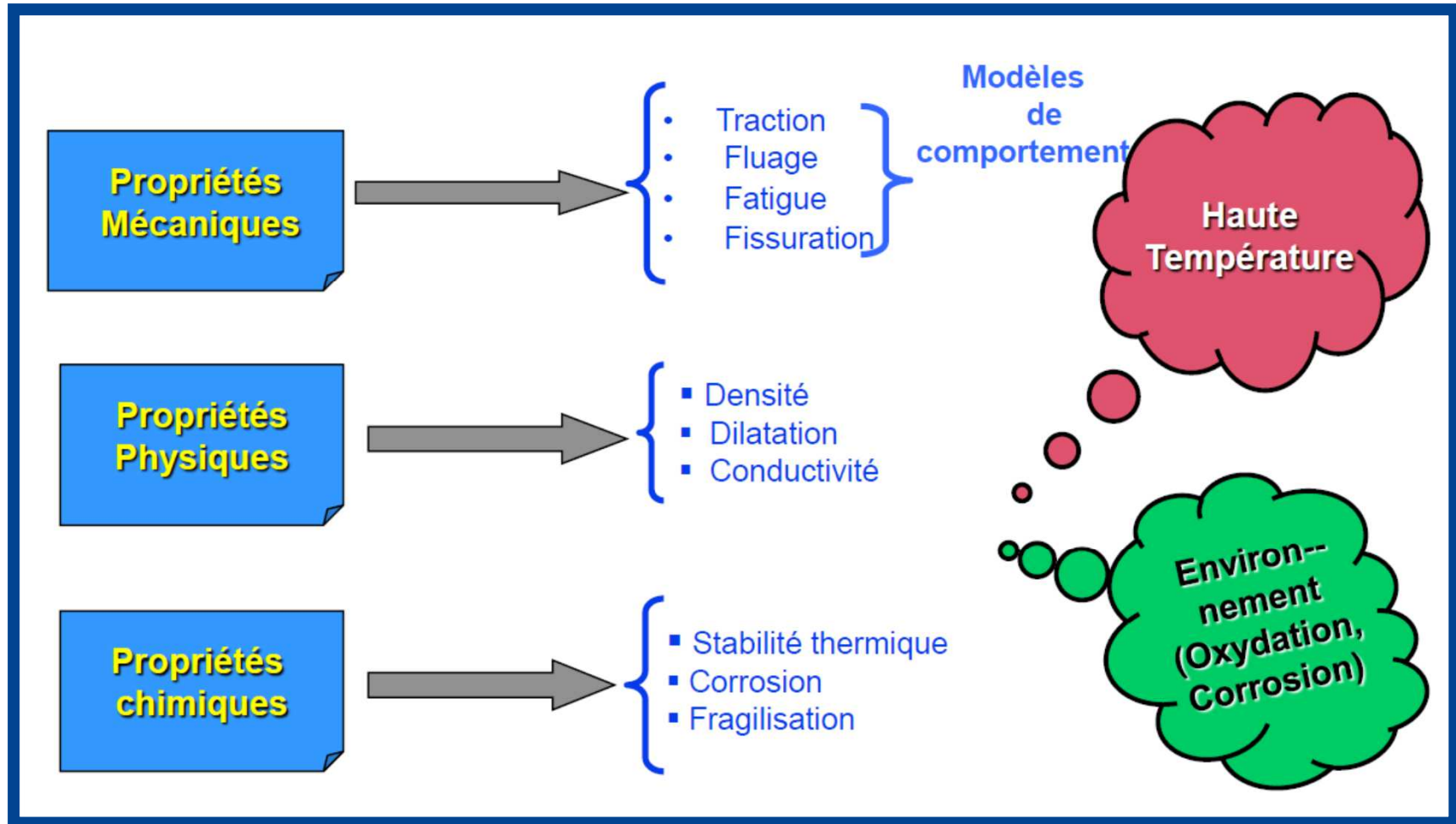


MATERIAUX – SOLLICITATIONS

—
2019-05-16



Exigences en termes de propriétés d'usage



Sollicitations mécaniques

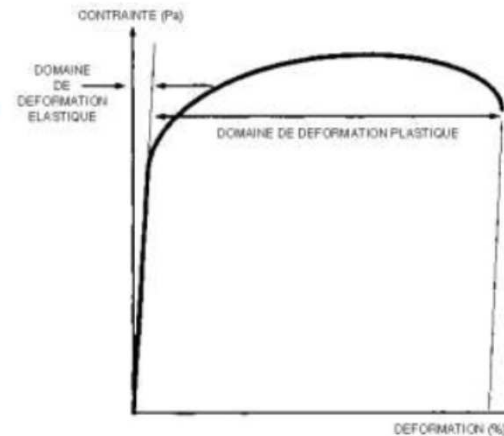
➤ Les sollicitations monotones

✓ FLUAGE

- *Effet du temps de maintien en contraintes et à haute température*
- *=> déformation viscoplastique du matériau (modification des jeux, balourd / frottement, rupture)*

✓ TRACTION

- *Dimensionnement en cas de « survitesse » accidentelle => plasticité généralisée*



➤ Les sollicitations complexes

✓ LA FATIGUE DE CONTACT (FRETTING)

- *Effet de petits déplacements à forte contraintes sur les 2 surfaces d'appui*

✓ LA FATIGUE - FLUAGE

✓ LA FATIGUE THERMIQUE

- *Endommagement des matériaux pour chambre de combustion*

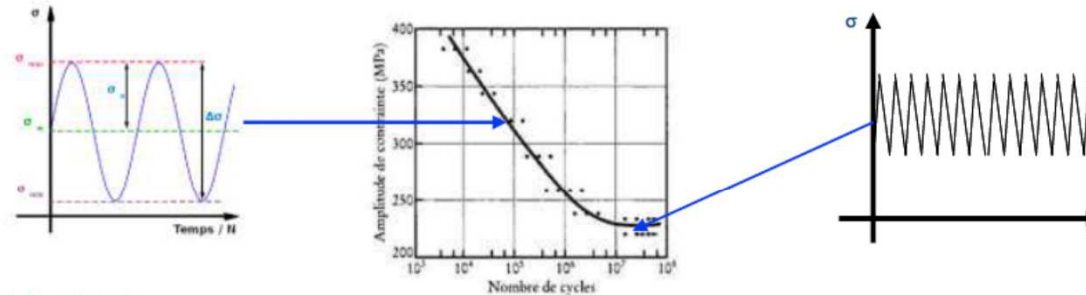
Sollicitations mécaniques : la fatigue

➤ La fatigue oligocyclique (< 30 000 cycles)

- Elle correspond aux cycles de **forte** amplitude dérivés de l'analyse des missions complexes (1 mission = décollage + vol + atterrissage)

➤ La fatigue vibratoire (> 50 000 à 100 000 cycles)

- Elle correspond aux cycles de **faible** amplitude liés aux vibrations de l'ensemble du moteur.



➤ Caractéristiques

- Pour des températures et des sollicitations relativement faibles (bien en dessous de la limite élastique), la rupture en fatigue peut se produire après de nombreux cycles de chargement/ déchargement mécanique.
- La rupture en fatigue se caractérise par la création d'une micro-fissure (**amorçage**) puis par sa **propagation** (par stries contigues) jusqu'à ce que la surface de fissure traverse la pièce.
- Le cheminement de la fissure est étudiée pour avoir une idée de la **durée de vie** de la pièce et définir l'**intervalle inter-inspections**.

Influence des « vieillissements »

➤ OXYDATION

- *Les alliages aéronautiques (base Ti et base Ni) sont peu sensibles à l'oxydation en général. Certaines conditions extrêmes (température élevée / pression élevée d'oxygène) conduisent parfois au périment par oxydation. C'est le cas des chambres et turbines haute pression*



➤ CORROSION

- *Un certain nombre d'agents corrosifs sont à l'origine du périment des pièces. Les sels, sables, huiles ou produits de lavages peuvent être à l'origine de piqures puis de corrosion des pièces. Si les aciers (Maraging) sont les plus sensibles à ce phénomène, les autres alliages ne sont pas épargnés.*

➤ EROSION

- *Effet du sable (granulométrie de l'ordre de 100 microns)
=> rayures, dégradation de la rugosité
=> risque d'accrochage d'agents corrosifs
=> ablation de matière (pb de géométrie et d'état de surface)*

AIRCRAFT ENGINES

MATERIAU ALUMINIUM

—
2019-05-16



This document and the information therein are the property of Safran. They must not be copied or communicated to a third party without the prior written authorization of Safran

2- Généralités Alliages Légers

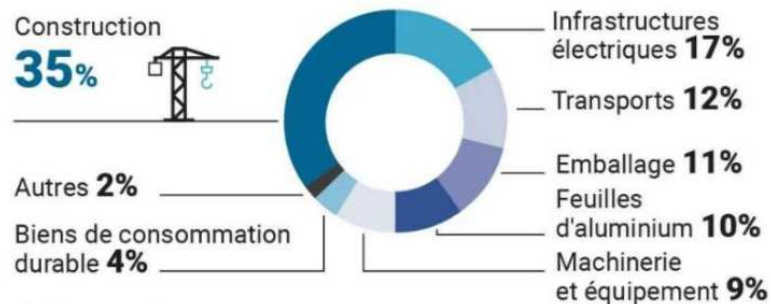
Un peu d'Histoire

- Métaux Al et Mg isolés pour la 1ère fois : 1805-1830
- Minerais parmi les plus répandus sur Terre (Al: 8,2% et Mg : 2,3%)
- Production industrielle dès début XXème siècle : aéronautique : 1930

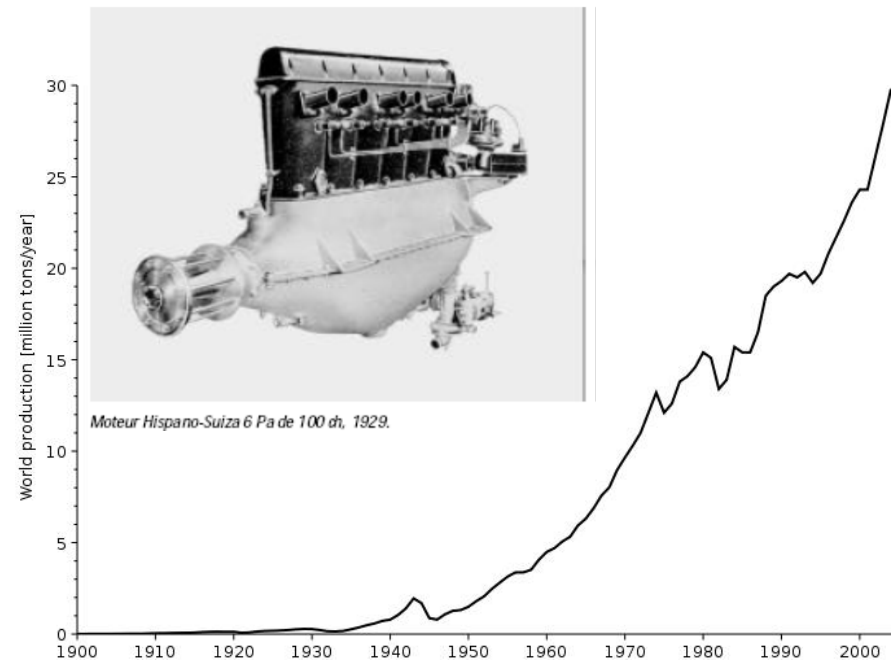
■ Aujourd'hui:

- Production Al : > 40 MT/an
- Production Mg : 0,6 MT/an
- Industries :

Consommation mondiale d'aluminium* par secteur d'utilisation finale en 2015



*Produits corroyés
Sources : Worldsteel, CRU Group (mars 2018)



Production mondiale d'Aluminium



2- Généralités Alliages Légers

Des Atouts...

■ Propriétés physiques:

- > Faible densité : Alliages Al : **2,65 – 2,9** / Alliages Mg : 1,75 – 1,95
- > Al : Conductivité thermique (60% Cu) et électrique (2/3 Cu)
- > Al : Tenue à la corrosion
- > Al, Mg : Recyclage (Al : 25-30% de la production)

■ Al : Diversités des alliages

- > Nuance adaptée à l'application (~200 nuances normalisées)

■ Diversité des modes de transformation et demi-produits

- > Produits laminés, filés, forgés, matricés, emboutis, usinés ...
- > Fonderie (sable, cire-perdue, coquille, injection, ...)
- > Assemblage : soudage, brasage, ...

■ Alliages d'Aluminium:

- > Résistances mécaniques : **50 à 580 MPa**
- > Température d'emploi : **< 200°C**
- > Sensibilité à certaines formes de corrosion (galvanique, intergranulaire, CSC, ...) => Besoin d'une protection

...et des limitations

■ Alliages de Magnésium:

- > Résistances mécaniques : 150 à 350 Mpa
- > Température d'emploi : < 250°C
- > Sensibilité extrême à la corrosion galvanique
- > Peu de nuances aptes à la mise en forme par déformation (laminage, ...)

3- Fondamentaux techniques – Alliages Légers

Classes d'alliages Aluminium - désignation

■ Base Aluminium + 5 éléments majeurs : Cu, Mg, Si, Mn, Zn,

> + éléments d'additions : Cr, Ni, Ti, Zr, Li, ...

éléments	↗	↘
Cu	Caract. méca, tenue à chaud fluage, usinabilité	Tenue corrosion, soudabilité, conductivité électrique
Mn	Aptitude déformation, tenue corrosion, aptitude brasage	
Si	Coulabilité	Usinabilité, CTE
Mg	Caract. méca, tenue corrosion, soudabilité	Déformabilité à chaud
Zn (+Mg)	Caract. méca, usinabilité	Tenue corrosion, soudabilité

■ Familles de nuances définies selon les éléments d'alliage principaux

■ Système de désignation international à 4 chiffres : 1er chiffre = famille d'alliage

- > Série 1000 : Al commercialement pur
- > Série 3000 : Mn (0,5-1,5%) + Mg, Cu
- > Série 5000 : Mg (0,5-5%) + Mn, Cr
- > Série 2000 : Cu (2- 6%) + Si, Mg
- > Série 6000 : Mg, Si (0,5-1,5%) + Cu, Cr
- > Série 7000 : Zn (5-7%), Mg (1-2%) + Cu
- > Série 4000 : Si (0,8-1,7%)
- > Alliages de fonderie : Al-Si ; Al-Si-Mg; Al-Cu-Mg

This document and the information therein are the property of Safran. They must not be copied or communicated to a third party without the prior written authorization of Safran

3- Fondamentaux techniques – Alliages Légers

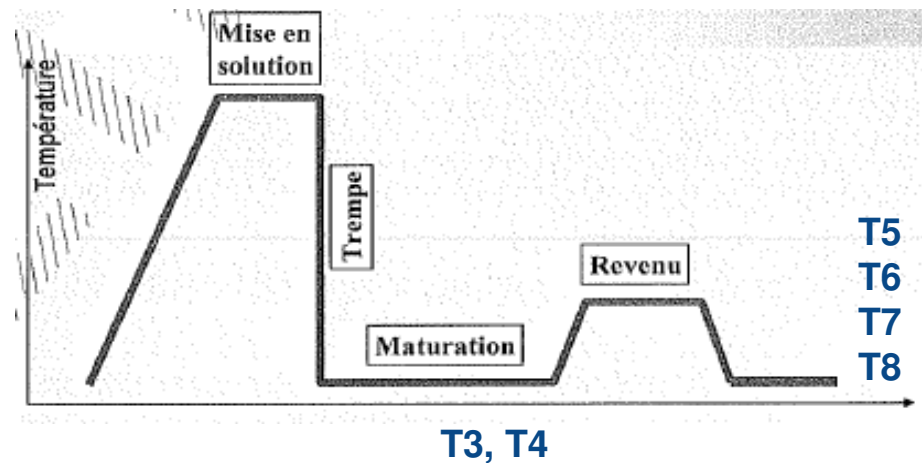
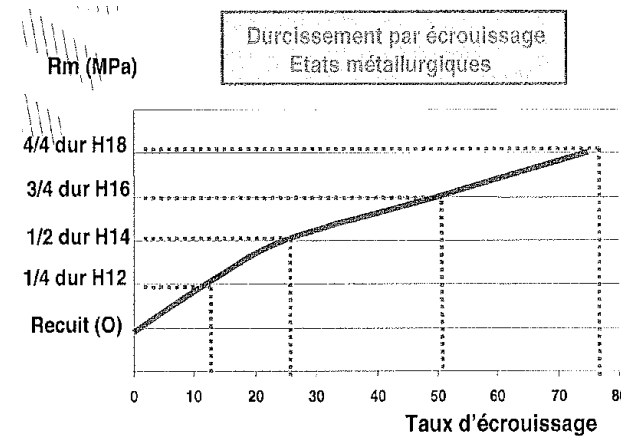
Alliages d'Aluminium – états métallurgiques

■ Alliages à durcissement par écrouissage:

- Séries 1000, 3000, 5000
- États O, H1x, H2x, H3x
- Adoucissement par recuit

■ Alliages à durcissement structural

- Séries 2000, 6000, 7000
- États T3, T4, T5, T6, T7, T8
- Détensionnement
 - ◆ par traction : Tx51
 - ◆ par compression : Tx52



3- Fondamentaux techniques – Alliages Légers

Alliages Aluminium - Propriétés

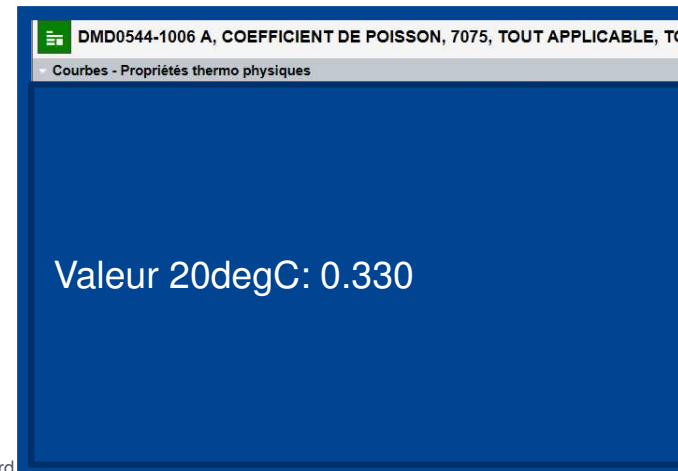
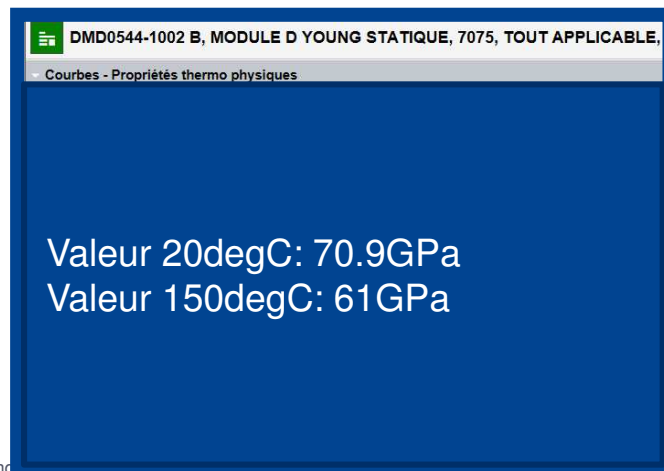
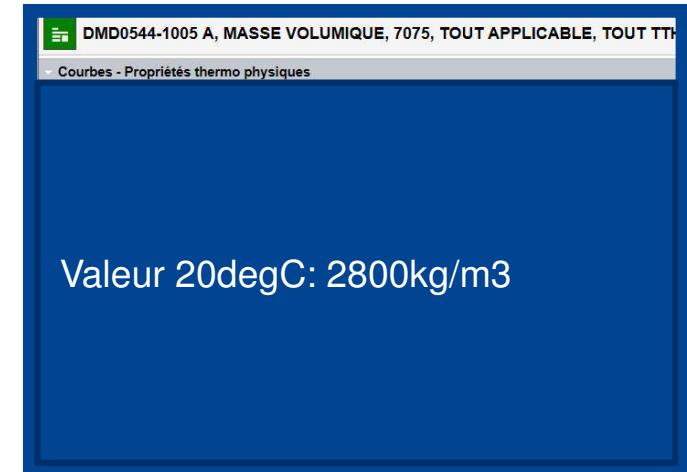
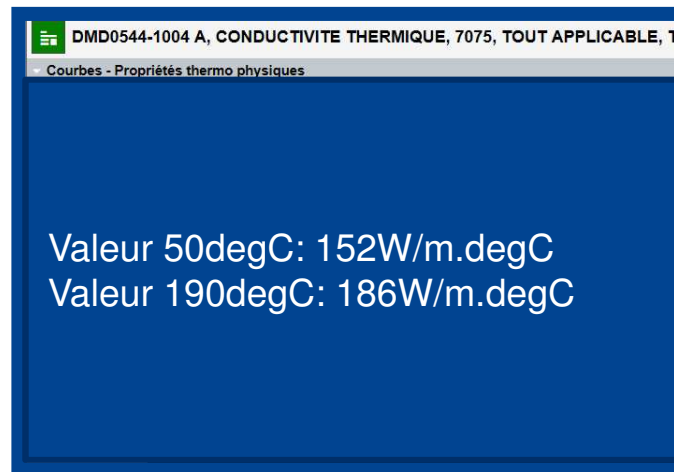
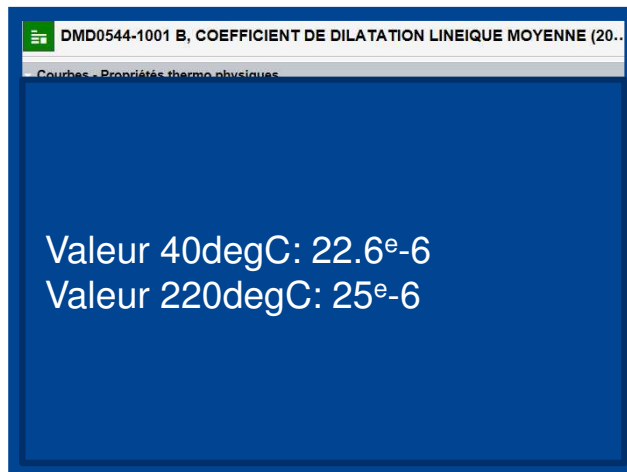
■ Les propriétés pilotent les domaines d'applications

Série	Nuances principales	E (Gpa)	Rm (Mpa)	λ (W/mK)	Soudage	Mise en forme	Tenue corrosion	Utilisations principales
1000	1050A, 1200	69	50-150	220-240	Ok	+	+	Chaudronnerie, tôlerie, bâtiment, décoration, échangeur thermique, conducteurs électriques, emballage
2000	2024, 2618A, 2219, 2014	74	300-450	120-150	Ko (Ok:2219)	-	-	Mécanique, aéronautique & défense
3000	3003, 3004	69	100-260	160-190	Ok	+	+	Bâtiment, mobilier urbain, échangeur thermique, emballage
5000	5083, 5086, 5754	70	100-340	120-140	Ok	++	++	Chaudronnerie, tôlerie, plasturgie, automobile, construction navale, bâtiment, décoration, mobilier urbain, emballage
6000	6060, 6061, 6063, 6082	69,5	150-310	170-220	Ok	++	++	Chaudronnerie, tôlerie, plasturgie, automobile, construction navale, bâtiment, mobilier urbain, échangeur thermique
7000	7010, 7020, 7050, 7x75	72	320-600	130-180	Ko (Ok:7020)	-	-	Mécanique, aéronautique & défense

3- Fondamentaux techniques – Alliages Légers

Alliages Aluminium - Propriétés
Exemple Aluminium 7075 T73

■ Caractéristiques thermophysiques moyennes



3- Fondamentaux techniques – Alliages Légers

■ Caractéristiques statiques minimales

Alliages Aluminium - Propriétés Exemple Aluminium 7075 T73

DMD0544-2002 A, LIMITE ELASTIQUE A 0.2% (CONVENTIONNELLE), 7075, P

Courbes - Caractéristiques mécaniques

Valeur 20degC: 365MPa
Valeur 100degC: 323MPa

DMD0544-2006 B, LIMITE ELASTIQUE A 0.2% (CONVENTIONNELLE), 7075,...

Courbes - Caractéristiques mécaniques

Valeur 20degC: 374MPa
Valeur 100degC: 278MPa

DMD0544-2002 A, LIMITE ELASTIQUE A 0.2% (CONVENTIONNELLE), 7075,...

Informations sur la donnée matériau

Nom de la série	2 - STATIQUE
Désignation de la caractéristique	LIMITE ELASTIQUE A 0.2% (CONVENTI
Type de sollicitation	AXIALE
Classe d'applicable	PIECES FORGEES
Applicable	PIECES FORGEES SENS LONG
Traitement Thermique	T73
Catégorie SAFRAN AE	IV
Prélèvement de la matière	TOLE 32MM T7351

DMD0544-2001 A, RESISTANCE A RUPTURE, 7075, PIECES FORGEES, T73, I

Courbes - Caractéristiques mécaniques

Valeur 20degC: 429MPa
Valeur 100degC: 339MPa

DMD0544-2006 B, LIMITE ELASTIQUE A 0.2% (CONVENTIONNELLE), 7075,...

Informations sur la donnée matériau

Nom de la série	2 - STATIQUE
Désignation de la caractéristique	LIMITE ELASTIQUE A 0.2% (CONVENTI
Type de sollicitation	AXIALE
Classe d'applicable	PIECES FORGEES
Applicable	PIECES FORGEES EPAISSEUR INFERIEUR 20 MM
Traitement Thermique	T73
Catégorie SAFRAN AE	III
Prélèvement de la matière	PLATEFORME AUBE FAN, AUBE REDRESS FAN CFM56-7

3- Fondamentaux techniques – Alliages Légers

Alliages Aluminium - Propriétés
Exemple Aluminium 7075 T73

■ Caractéristiques statiques – comparaison Re mini et moyenne

Graphique de comparaison

Re moyenne:

Valeur 20degC: 440MPa

Valeur 100degC: 402MPa

Re minimale:

Valeur 20degC: 365MPa

Valeur 100degC: 323MPa

3- Fondamentaux techniques – Alliages Légers

Alliages Aluminium - Propriétés
Exemple Aluminium 7075 T73

■ Caractéristiques fatigue minimales

DMD0544-4001 A, FATIGUE OLIGOCYCLIQUE A DEFORMATION IMPOSEE,...

Courbes - Caractéristiques mécaniques

Valeur 2000 cycles: 200MPa
Valeur 2.1×10^6 cycles: 104MPa

DMD0544-4003 A, FATIGUE VIBRATOIRE (DELTA SIGMA/2), 7075, PIECES FO

Courbes - Caractéristiques mécaniques

Valeur 2000 cycles: 93MPa
Valeur 2.1×10^6 cycles: 86MPa

DMD0544-4005 B, DIAGRAMME DE GOODMAN (FATIGUE VIBRATOIRE), 707

Courbes - Caractéristiques mécaniques

Valeur 0 MPa statique: 120MPa alterné
Valeur 438 MPa statique: 0MPa alterné

Remarque:
 $R_e(20\text{degC})=366\text{MPa}$
Contraint alternée admissible (20degC)=120MPa
pour contrainte statique nulle

Hypothèse raisonnable: $\sigma_{\text{alt_max}}=1/3 \cdot R_e$

SAFRAN

AIRCRAFT ENGINES

FAMILLE ACIER

—
2019-05-16



This document and the information therein are the property of Safran. They must not be copied or communicated to a third party without the prior written authorization of Safran

2- Généralités Acier

Un peu d'Histoire

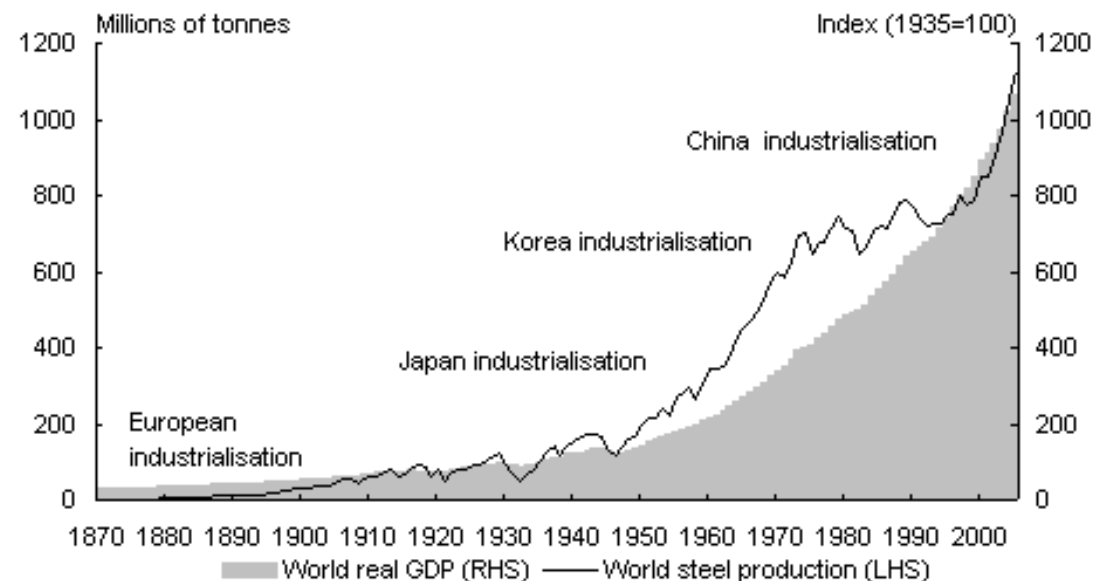
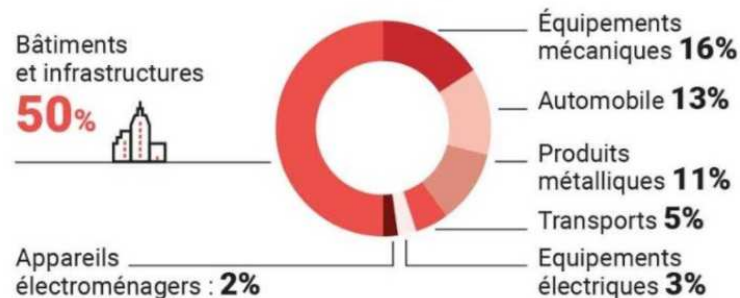
- Les premières coulées de fonte ont été réalisées par les Chinois durant la période des Royaumes combattants (entre -453 et -221)
- 1786 → métallurgie scientifique : 3 savants français de l'école de Lavoisier, Berthollet, Monge et Vandermonde¹¹ présentent devant l'Académie royale des sciences un Mémoire sur le fer introduisant 3 produits ferreux : le fer, la fonte et l'acier
- Production industrielle dès début XIXème siècle.

■ Aujourd'hui:

- Production Acier : > 1200 MT/an
- Utilisation acier:

Utilisation de l'acier dans le monde

par type d'industrie, en % de l'acier produit en 2016



Production mondiale Acier



2- Généralités Alliages Légers

■ Propriétés physiques:

- > Densité moyenne : acier **7.8**
- > Acier: fort module Young **~210GPa**.
- > Acier: dilatation thermique « moyenne » **~12^e-6 degC-1**
- > Acier: recyclage de près de 80-90% production.

■ Acier: Diversités des alliages

- > Aciers non-alliés d'usage général (construction) ;
- > Aciers non-alliés spéciaux, pour traitement thermique, malléables, soudables, forgeables, etc. ;
- > Aciers faiblement alliés, pour trempe et revenu (éléments d'alliage favorisent trempabilité → structures martensitiques ou bainitiques → haute dureté, haute limite élastique → pour les outils, les ressorts, les roulements, etc. ;
- > Aciers fortement alliés :
 - ◆ Aciers inoxydables,
 - ◆ Aciers rapides, pour les outils à forte vitesse de coupe comme les forets.

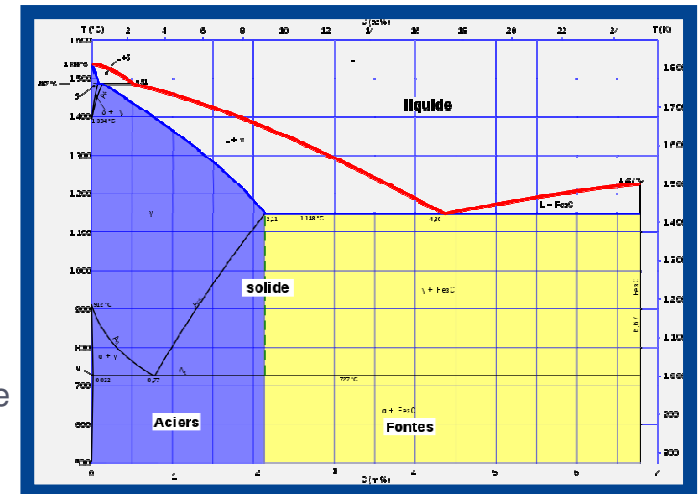
■ Diversité des modes de transformation et demi-produits

- > Estampage, pliage (grande déformation).
- > Produits laminés, filés, forgés, matricés, emboutis, usinés ...
- > Fonderie (sable, cire-perdue, coquille, injection, ...)
- > Assemblage : soudage, brasage, ...

■ Acier:

- > Résistances mécaniques : **200 à 1800 Mpa**
- > Masse volumique élevée **7800kg/m³**
- > Sensibilité à la corrosion → Besoin d'une protection

Des Atouts...



...et des limitations

3- Fondamentaux techniques – Aciers

Aciers – états métallurgiques

■ Alliages à durcissement par écrouissage:

- > Sé
- > Éta
- > Add

■ Alliag

- > Sé
- > Éta
- > Dét
- ◆ p
- ◆ p

PAS ENCORE DISPONIBLE

3- Fondamentaux techniques – Alliages Légers

Aciers - Propriétés

- Les propriétés pilotent les domaines d'applications

PAS ENCORE DISPONIBLE

3- Fondamentaux techniques – Aciers

Aciers- Propriétés
Exemple Acier 40CDV12

■ Caractéristiques thermophysiques moyennes

DMD0113-1001 B, MODULE D YOUNG STATIQUE, TOUT APPLICABLE, T1R1,
Courbes - Propriétés thermo physiques

Valeur 15degC: 213GPa
Valeur 250degC: 198GPa

DMD0113-1005 A, MASSE VOLUMIQUE, TOUT APPLICABLE, T1R1, Moyen (l
Courbes - Propriétés thermo physiques

Valeur 20degC: 7855kg/m3

DMD0113-1004 A, CONDUCTIVITE THERMIQUE, TOUT APPLICABLE, T1R1,
Courbes - Propriétés thermo physiques

Valeur 100degC: 35.7 W/m.degC
Valeur 660degC: 26.6 W/m.degC

DMD0113-1002 A, COEFFICIENT DE DILATATION LINEIQUE MOYENNE (20 C
Courbes - Propriétés thermo physiques

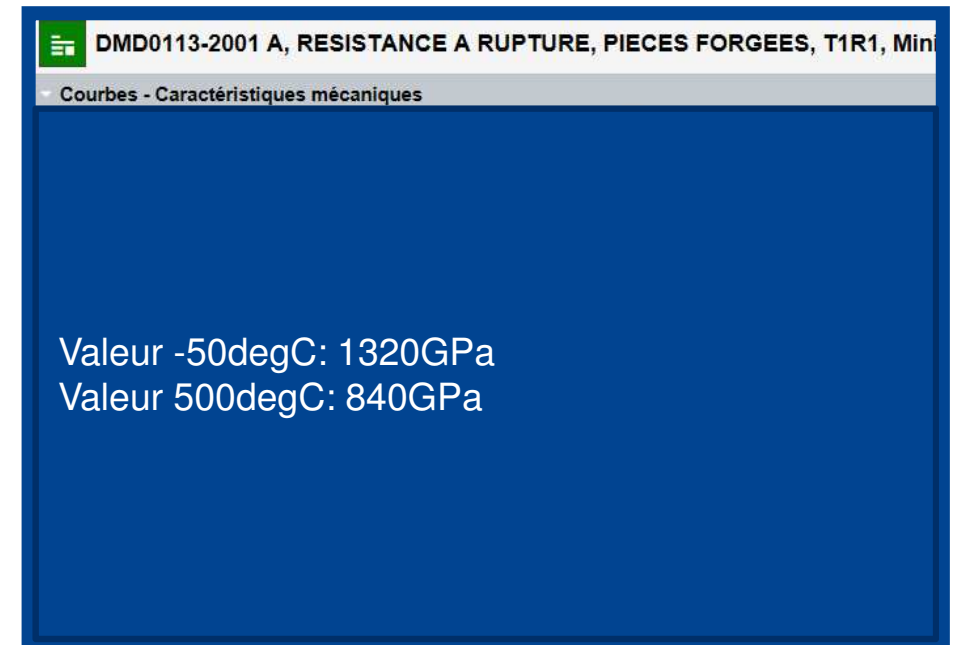
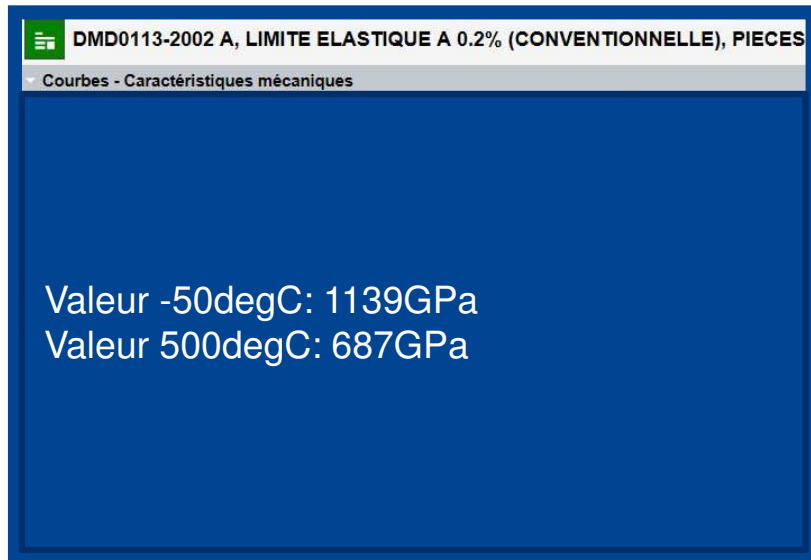
Valeur 100degC: $10.9 \cdot 10^{-6} \text{ deg}^{-1}$
Valeur 660degC: $14 \cdot 10^{-6} \text{ deg}^{-1}$

DYL01130006 D, COEFFICIENT DE POISSON, TOUT APPLICABLE, T1R1, Mo
Courbes - Propriétés thermo physiques

Valeur 22degC: 0.23
Valeur 249degC: 0.23

3- Fondamentaux techniques – Alliages Légers

■ Caractéristiques statiques minimales



3- Fondamentaux techniques – Alliages Légers

Aciers - Propriétés
Exemple Aluminium 7075 T73

■ Caractéristiques fatigue minimales

DMD0113-4001 A, FATIGUE OLIGOCYCLIQUE A CONTRAINTE IMPOSEE, PIE
Courbes - Caractéristiques mécaniques

Valeur 10 000 cycles: 557GPa
Valeur 60 000 cycles: 483GPa

DMD0113-4015 A, FATIGUE A CONTRAINTE IMPOSEE, PIECES FORGEE.
Courbes - Caractéristiques mécaniques

Valeur 10 000 cycles: 883GPa
Valeur 2.9^e6 cycles: 621GPa

DMD0113-4027 B, DIAGRAMME DE GOODMAN (FATIGUE VIBRATOIRE), PIE
Courbes - Caractéristiques mécaniques

Valeur 0 MPa statique: 622MPa alterné
Valeur 1200 MPa statique: 0MPa alterné

Remarque:
Re(20degC)=366MPa
Contraint alternée admissible (20degC)=120MPa
pour contrainte statique nulle

Hypothèse conservative: $\sigma_{alt_max}=1/3*Re$

SAFRAN

CONCLUSIONS

—
2019-05-16



Proposition de règles de dimensionnement

■ Admissibles cas normaux

- > Contrainte Von Mises : $\text{Min}(\text{Re} \cdot 0,75 ; \text{Rm} \cdot 0,5)$.
- > Cisaillement : $0,5 \cdot \text{Re}$.
- > Matage : $0,5 \cdot \text{Ps}$.
- > Contrainte alternée moyenne : contrainte de Wohler pour une durée de vie de 10 000 cycles.

■ Admissibles cas limites

- > Contrainte Von Mises : $\text{Min}(\text{Re} \cdot 0,75 ; \text{Rm} \cdot 0,5)$.
- > Cisaillement : $0,5 \cdot \text{Re}$.
- > Matage : $0,5 \cdot \text{Ps}$.
- > Contrainte alternée moyenne : contrainte de Wohler pour une durée de vie de 100 cycles.

■ Admissibles cas ultimes

- > Contrainte Von Mises : $0,9 \cdot \text{Rm}$.
- > Cisaillement : $0,9 \cdot \text{Re}$.
- > Matage : $0,9 \cdot \text{Ps}$.
- > Contrainte alternée moyenne : contrainte de Wohler pour une durée de vie de 10 cycles.

■ Hypothèses raisonnables:

- > Caractéristiques statiques:
 $\sigma_{\text{mini}} = 0,8 \cdot \sigma_{\text{moy}}$
- > Diagramme de Goodman:
 $\sigma_{\text{alt_max}} = 1/3 \cdot \text{Re}$

Quelques propriétés matériaux – exemples

Ancienne désignation	Désignation normalisée	Norme de la dernière désignation normalisée	Re (MPa)		Rr (MPa)		E (MPa) à 20°C	Masse volumique (kg/dm3)	Prix/kg (2005)	Utilisation classique	Autre caractéristique
			Min	Max	Min	Max					
Acier											
XC18	C22E	NF EN 10083-1 08/96	250		410			7,8	0,77	Structure, axe et arbre	Acier de cémentation
XC38	C35	NF EN 10083-2 08/96	330		550	780		7,8	0,83	Structure, axe et arbre	
XC48	C45	EN 10027	370		630	850		7,8		Pièces d'accouplement	
25CD4	25CrMo4	EN 10027	400		650	1000		7,8		Axe, boulon	Trempabilité assez élevée, tenacité
(SCV) 15CDV6			860		1050	1150		7,8			
35NCD16	36NiCrMo16	NF EN 10083-1 08/96	800	1275?	1000	1710		7,8	3,2	dards et pièces de structure maquette	
Acier Inox											
304 L Z3 CN 18-10	X2CrNi19-11	DIN EN 10263-5 02/02	175		460	680		7,8		Construction	Acier austénitique au molybdène
316 L Z3 CND 17 11 02	1.4404 X2 Cr Ni Mo 17 12 2	NF	185		460		200000 à 20°C	7,8		Inox haute température	
APX4 (Z6CND16.05.01)			750	950	1000	1200		7,8		arbre, tirants, boulonnerie	
Alu											
AU4G AlCu4MgSi	2017 A		280		420		74000	2,79	7,3	Mécanique générale	
AU2GN	2618A		390		440		74000	2,76			
AG5	5083		160		305		71000	2,66			
Fortal	7xxx		370	460	460	535		2,81			

Conclusion

■ Choix matériau guidé par les fonctions et besoins:

- > Environnement thermique
- > Agressions : corrosion, fretting, UV etc
- > Cas de charge: statique, fatigue, vibration, etc
- > Liens utiles: <http://www.matbase.com>

■ Approvisionnement et mise en œuvre:

- > Accessibilité et cout matière
Attention aux mises en forme, état et normes.
- > Choix de mise en œuvre: usinage, pliage, soudage, etc
- > Contrôle:
 - ◆ Métaux : contrôle dimensionnel souvent suffisant – attention aux qualités matière des soudures !
 - ◆ Composite: le matériau est créé avec la pièce – attention aux porosités, délaminage etc

■ Matériaux innovants:

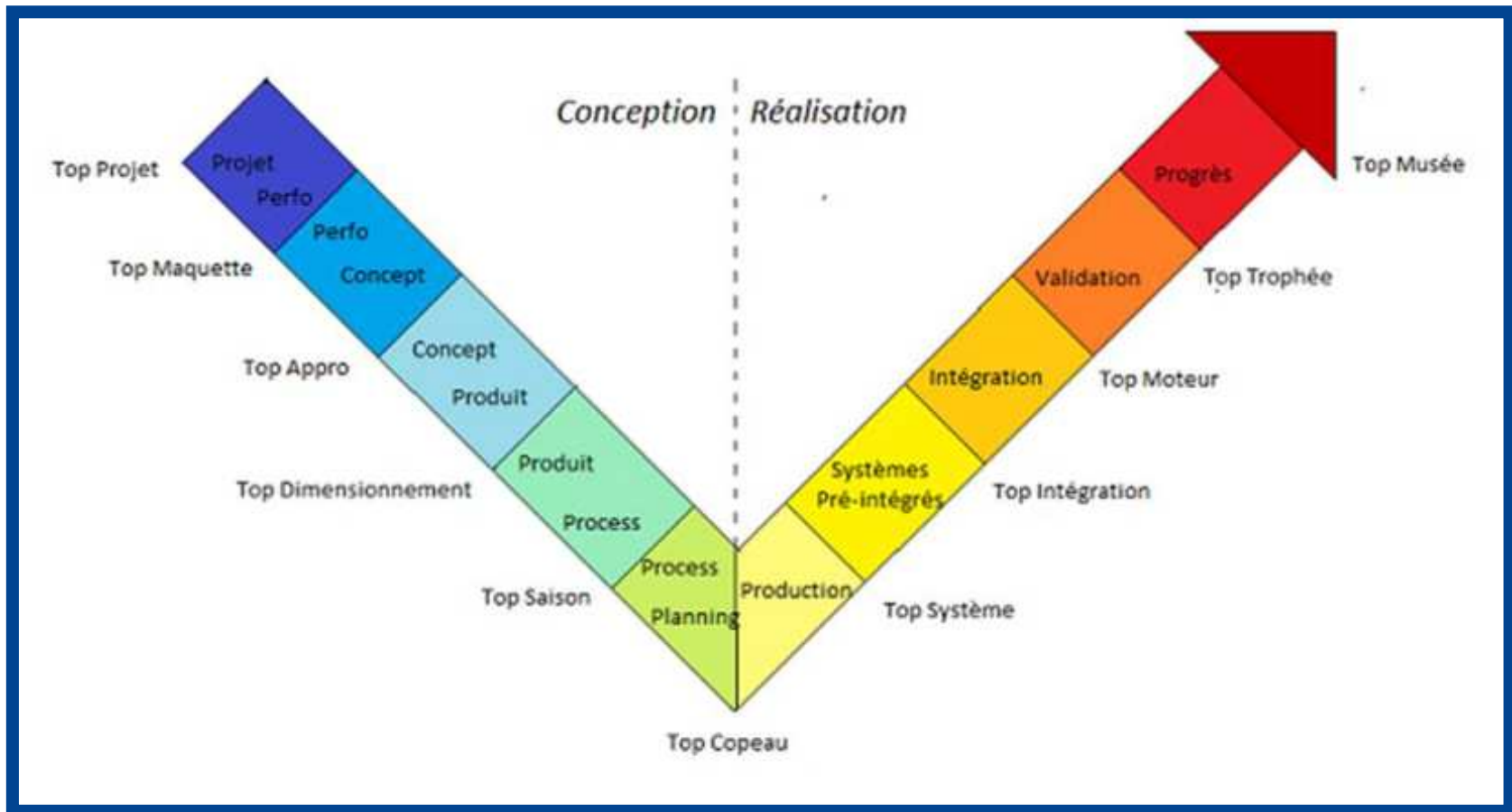
- > Besoin d'identifier très en amont les matériaux innovants.
- > Besoin de disposer des bonnes valeurs caractéristiques et admissibles en amont de la phase de conception.
- > **Recommandation: provisionner des marges évolutives:**
 - ◆ Avant Top Appro: 200%
 - ◆ Avant Top Dim: 150%
 - ◆ Avant Top Copeau: 120%
- > Besoin de vérifier les matériaux innovants :
 - ◆ Sur éprouvette avant la conception système
 - ◆ Sur pièce finale après production unitaire
 - ◆ Sur système assemble après assemblage
Validation comportement interfaces (corrosion galvanique par exemple).

ANNEXE

—
2019-05-16



CYCLE EN V EPSA



FATIGUE

bm4540_Les hélices_TI

