

SESSION 2025

**AGRÉGATION
CONCOURS INTERNE
ET CAER**

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

**Option : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR
ET INGÉNIERIE MÉCANIQUE**

**ÉTUDE D'UN SYSTÈME, D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE
ORGANISATION**

Durée : 4 heures

Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier. Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire.

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours interne de l'Agrégation de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAI	1414A	102	7048

► **Concours interne du CAER / Agrégation de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAH	1414A	102	7048

Parties à traiter

Le sujet comporte 3 parties distinctes (*durées conseillées indiquées dans chaque partie*) **qui peuvent être traitées de façon indépendante.** Certaines sous-parties peuvent également être traitées de façon indépendante.

- 1^{ère} partie : Dimensionnement des actionneurs rotatifs et choix technologiques pour garantir la précision et la stabilité du système.
- 2^e partie : Étude du comportement de certains éléments de la structure mécanique du point de vue produit-matériau.
- 3^e partie : Optimisation du processus de réalisation d'éléments de structure dans le cadre d'une industrialisation.

Recommandations

Si le (la) candidat(e) estime avoir détecté une erreur ou un problème dans le sujet, il (elle) l'indique clairement dans sa copie, précise les hypothèses posées (le cas échéant) et poursuit l'épreuve.

- Rédigez vos réponses de manière claire et concise ;
- Détaillez vos calculs, ainsi que les applications numériques et les unités ;
- Justifiez vos choix, vos hypothèses.

Les feuilles de copies remises au (à la) candidat(e) viendront compléter ces documents et permettront au (à la) candidat(e) de répondre au questionnement. Après avoir complété les en-têtes, le (la) candidat(e) remettra en fin d'épreuve ses copies paginées.

DT – Documents techniques

- DT01 : Principes essentiels relatifs aux antennes à réflecteur parabolique
- DT02 : Dépointage de faisceaux
- DT03 : Cahier des charges relatif au mécanisme de pointage d'antenne
- DT04 : Extrait de la norme ECSS-E-ST-33-01C
- DT05 : Fiche produit actionneur rotatif de COMAT Space
- DT06 : Diagrammes de propriétés des matériaux
- DT07 : Brevet – Dépôt européen (extraits)
- DT08 : Détermination des coefficients d'expansion thermique
- DT09 : Fiche matériau fournisseur - TA6V
- DT10 : Caractéristiques SOMAB GENYMAB Bi-broches
- DT11 : Définition End-fitting Type 2 « chape »
- DT12 : Données fraisage dynamique (source Walter Prototyp)

SUJET : MÉCANISME DE POINTAGE D'ANTENNE

(Durée conseillée pour la lecture du sujet : 20 minutes)

Afin de respecter les exigences de confidentialité des industries aérospatiales, les données techniques et les valeurs numériques fournies dans cette étude sont différentes de celles des systèmes réels, tout en étant réalistes.

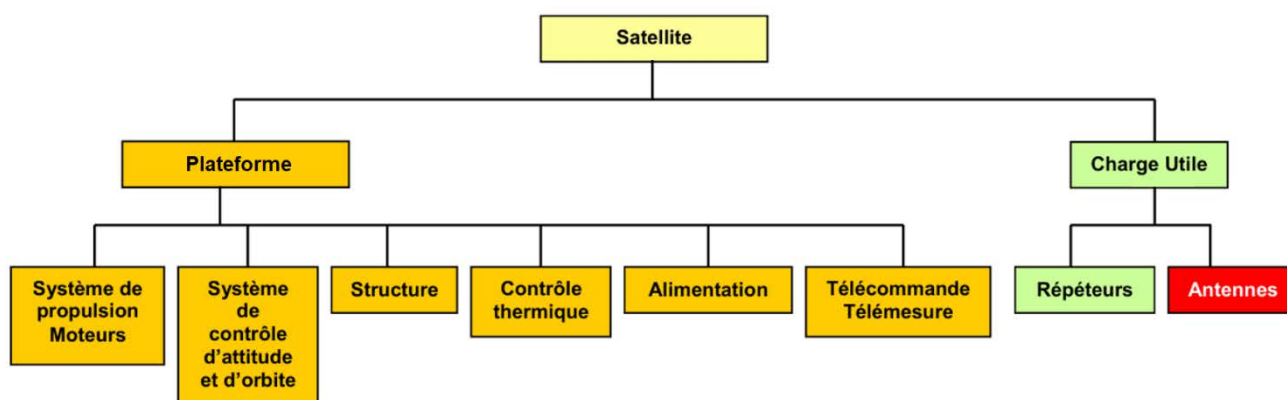
Mise en situation générale

Les satellites de télécommunications

Constituant la 1^{ère} application commerciale de l'ère spatiale, les satellites de télécommunications font l'objet d'une demande croissante à travers le monde, notamment pour communiquer, s'informer et naviguer. Un satellite de télécommunications se décompose en deux parties :

- La charge utile qui sert de relais de communication entre stations terriennes. Elle comprend : les antennes et les répéteurs. Un répéteur est constitué d'équipements de télécommunications situés entre l'antenne d'émission et celle de réception.
- La plateforme qui intègre les moyens logistiques indispensables à la mise en œuvre correcte de la charge utile : sous-systèmes de propulsion, de contrôle d'attitude et d'orbite, d'alimentation électrique, de contrôle thermique, de télécommande et de télémesure.

Figure 1 : Synoptique d'un satellite de télécommunications



Contexte industriel

L'aérospatial est un secteur d'activité devenu générique avec les années d'expérience, mais il n'a de cesse de s'adapter à l'évolution des technologies afin de toujours améliorer le confort des utilisateurs. Être le premier en orbite, avoir la constellation la plus grande en nombre ou une constellation évolutive permettant une éventuelle reconfiguration dans le temps, tels sont les enjeux de la compétition mondiale et les défis que tentent de relever les industries spatiales.

C'est dans ce contexte d'innovation qu'en 2021 l'entreprise Thales Alenia Space® a annoncé¹ le développement pour son client SES d'un satellite ajustable instantanément à la demande en orbite. L'objectif est qu'il soit redéployable vers d'autres missions et positions orbitales pour répondre à l'évolution future des besoins vidéo et data des clients utilisateurs.

Figure 2 : Vue d'artiste, poster SES-26, © Thales Alenia Space, E_Briot

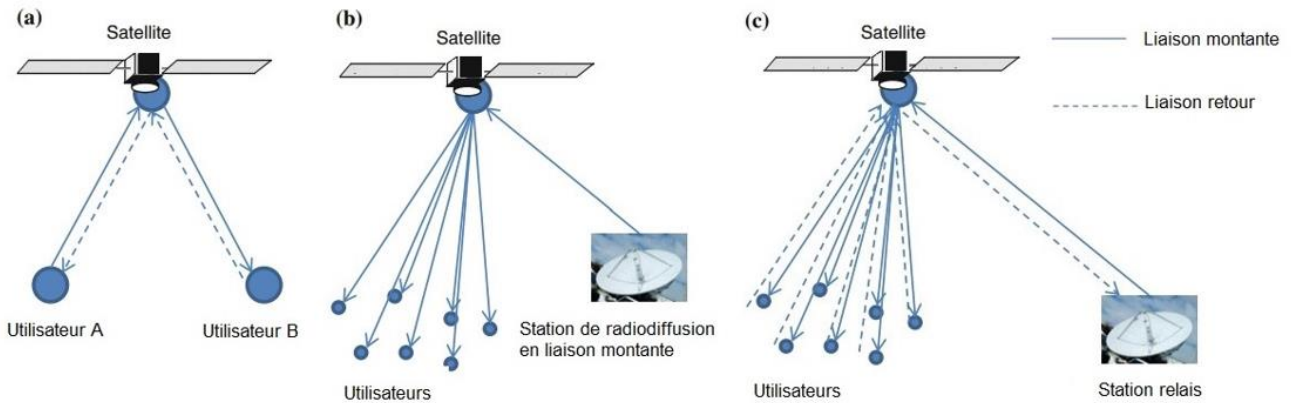


¹ Article de presse Thalesgroup du 18/11/2021 : Thales Alenia Space fabriquera les satellites de nouvelle génération Astra 1P et Astra 1Q pour SES

Principe de fonctionnement

Habituellement en orbite géostationnaire à 36 000 km d'altitude, les satellites de télécommunications se déplacent à la même vitesse que la rotation de la Terre et apparaissent fixes au-dessus d'une zone, appelée la zone de couverture. Depuis leur orbite, ils relaient le signal émis par des stations émettrices vers des stations réceptrices.

Figure 3 : Les 3 architectures les plus courantes de connectivité des satellites de communication



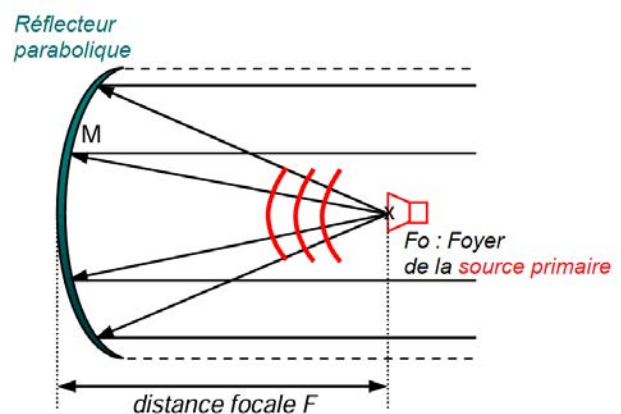
- a) Architecture à deux voies symétriques, bidirectionnelle équilibrée (one to one)
- b) Architecture de diffusion à sens unique (one to many)
- c) Architecture d'accès Internet multimedia bidirectionnelle déséquilibrée (many to one)

Antenne à réflecteur parabolique

L'antenne à réflecteur parabolique est constituée d'une antenne placée au foyer du paraboloïde, nommée source primaire. L'association de cette source primaire et du paraboloïde forme l'antenne à réflecteur.

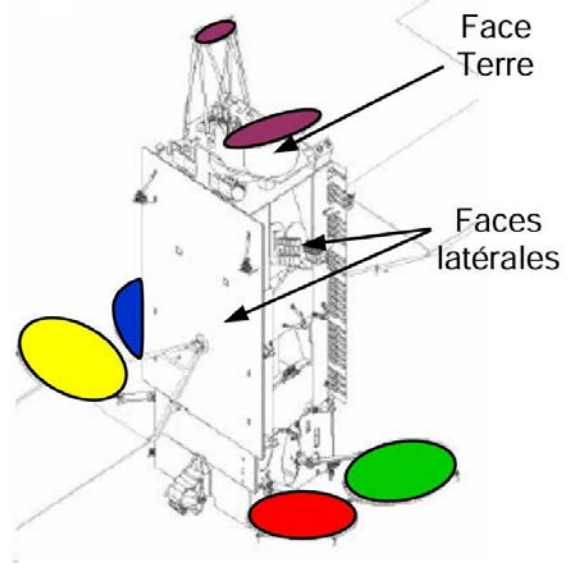
(voir DT01 : Principes essentiels relatifs aux antennes à réflecteur parabolique)

Figure 4 : Schéma de principe d'une antenne à réflecteur



Chaque réflecteur est stocké et immobilisé contre la paroi du satellite pendant la phase de lancement, pour que l'ensemble puisse prendre place à l'intérieur de la coiffe de la fusée. Une fois le satellite mis à poste sur son orbite, les réflecteurs sont déployés et restent dans cette position jusqu'à la fin de la vie du satellite.

Figure 5 : Quelques solutions d'implantation retenues pour les satellites de télécommunications



Le mécanisme de pointage

Dans ce sujet, nous nous intéressons à un mécanisme de pointage de la source qui répond au besoin de repositionnement et d'ajustement des antennes dédiées aux stations relais.

Des antennes correctement orientées améliorent la largeur de bande et permettent une meilleure communication entre les satellites ou entre les stations terrestres et les satellites, d'où l'importance de mécanismes de pointage performants en précision et en stabilité.

La source est montée sur un bras mobile à deux articulations mis en mouvement par des actionneurs électriques rotatifs.

Fonctions principales de l'actionneur rotatif

Les principales fonctions de l'actionneur rotatif de l'antenne mobile sont :

- F1 : Maintenir la source dans une position fixe ;
- F2 : Déplacer la source à une position avec une vitesse ;
- F3 : Fournir une télémétrie à la plate-forme.

Problématiques

Les satellites en orbite doivent être orientés de manière à pointer leurs antennes, panneaux solaires et instruments avec une extrême précision.

Comme chaque élément embarqué sur un satellite, les bras mobiles d'antenne sont développés pour répondre à de nombreuses contraintes en lien avec leurs performances mais également avec les exigences liées au lancement et à leur déploiement en orbite. On se propose dans ce sujet :

- de dimensionner les actionneurs en termes de motorisation et de réduction afin de valider les solutions technologiques permettant de satisfaire les exigences de performances fixées par le cahier des charges ;
- d'étudier le comportement de certains éléments de la structure mécanique du point de vue produit-matériau ;
- d'optimiser le processus de réalisation d'éléments de structure dans le cadre d'une industrialisation suite à une demande croissante.

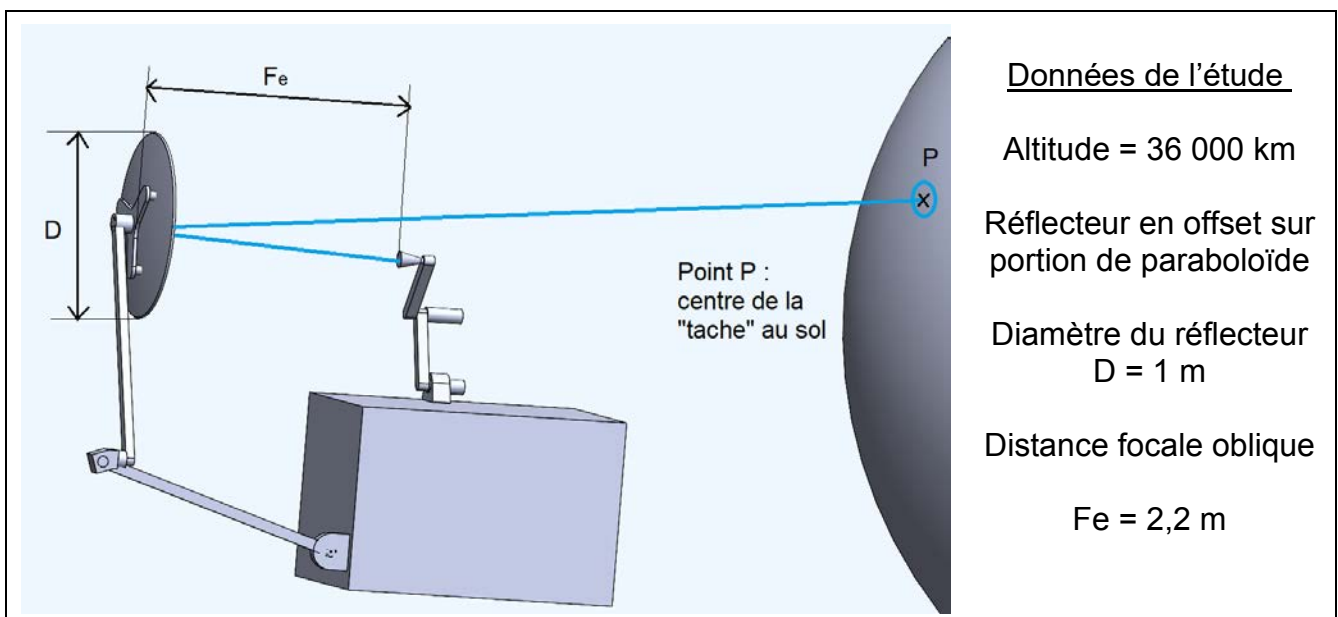
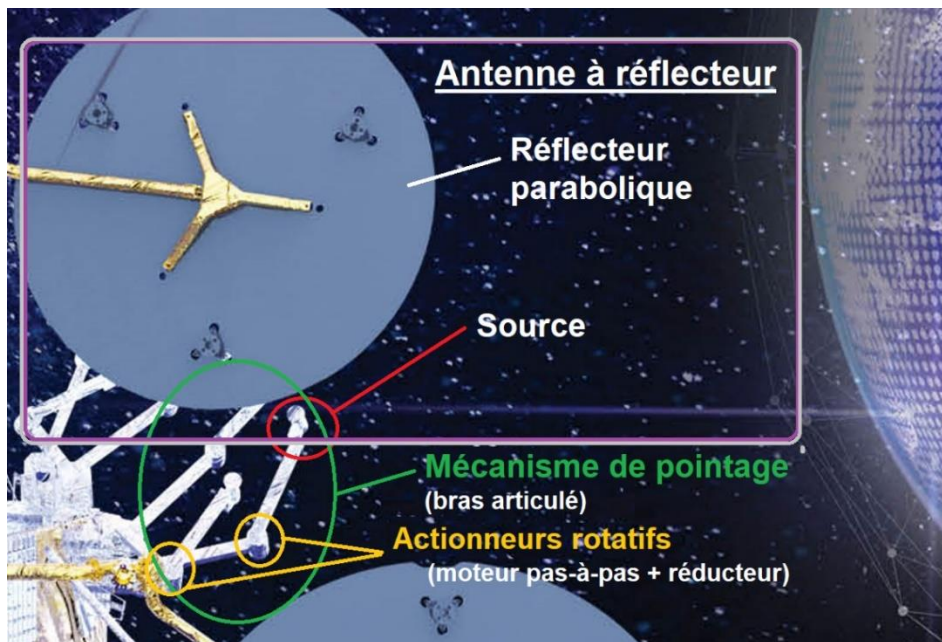
1ERE PARTIE :

ASSURER LA PRECISION DE POINTAGE D'ANTENNE

(Durée conseillée : 1 heure 20 minutes)

Objectif : Appréhender le fonctionnement de l'antenne et caractériser les actionneurs rotatifs qui animent le bras articulé sur lequel est montée la source à positionner.

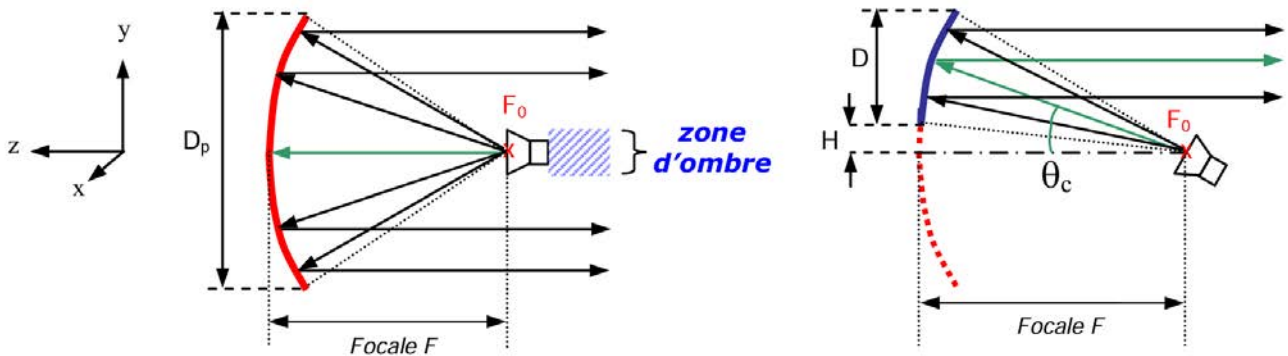
Figure 6 : Illustrations du contexte



Analyse de la trajectoire du faisceau émis par la source

Considérant une antenne à un seul réflecteur, deux types de configurations sont possibles. Soit la source primaire illumine le centre du réflecteur de diamètre D_p , auquel cas le réflecteur sera dit centré ; soit elle éclaire le centre de la portion de paraboloïde de diamètre D , identifié par l'angle de pointage θ_c de la source focale, le réflecteur sera alors dit en offset.

Figure 7 : Configurations possibles de réflecteur parabolique centré (à gauche) et en offset (à droite)

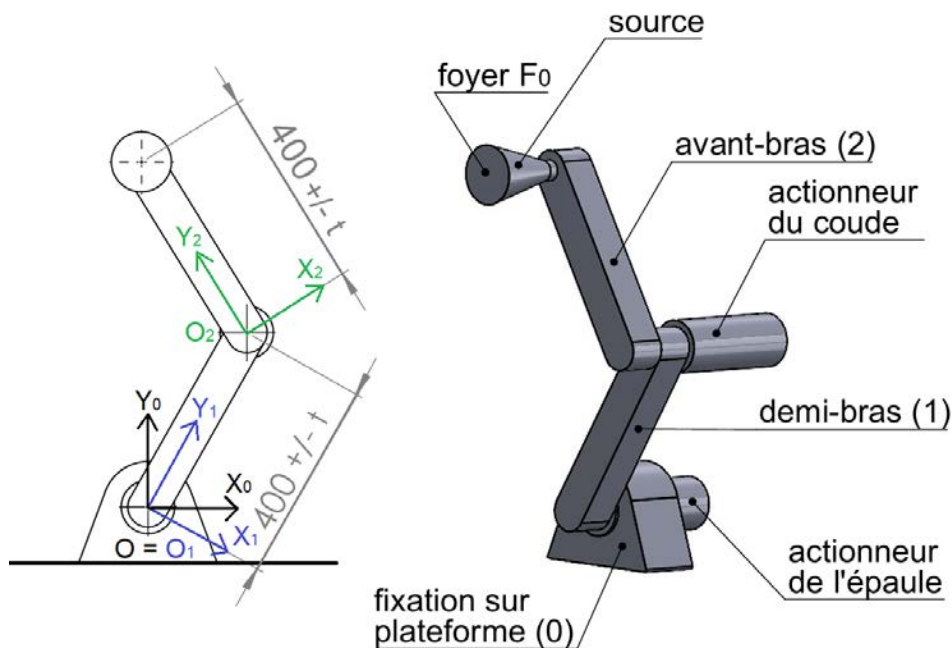


- QUESTION 1.1 | **Donner** la raison principale qui justifie que la configuration de réflecteur parabolique en offset est actuellement la géométrie la plus utilisée sur les systèmes embarqués sur satellite.
Feuille de copie DT01
- QUESTION 1.2 | En tenant compte de l'ensemble des données fournies dans la documentation technique (voir DT02 : *Dépointage de faisceaux*), **préciser** les approximations et hypothèses à énoncer pour simplifier l'expression du dépointage θ_s par l'équation 3 : $\theta_s = \arctan(\delta / F_e)$.
Feuille de copie DT02
Exprimer ensuite θ_d en fonction de θ_s .
- QUESTION 1.3 | Pour garantir une résolution de pointage au sol se traduisant par une variation linéaire du faisceau égale à 10 km, **calculer** le déplacement minimal δ dans le plan focal de la source d'une antenne embarquée sur un satellite géostationnaire en orbite à 36 000 km d'altitude.
Feuille de copie DT03 1/2 et DT03 2/2

Dimensionnement du moteur de l'actionneur rotatif

Pour répondre à la problématique de dimensionnement des actionneurs rotatifs présents dans le mécanisme de pointage étudié, nous commençons dans un premier temps par définir les caractéristiques du moteur qui permettent de satisfaire les exigences de performances fixées par le cahier des charges dont un extrait est fourni en documentation technique *DT03*.

Figure 8 : Paramétrage du bras articulé du mécanisme de pointage (vue non contractuelle)



On note :

- θ_1 l'angle de changement de repère entre la plateforme (0) et le demi-bras (1) ;
- θ_2 l'angle de changement de repère entre le demi-bras (1) et l'avant-bras (2) ;
- les origines respectives O_1 et O_2 sont prises dans le plan tangent des demi-bras ;
- les valeurs dimensionnelles sont données en millimètres ;
- les actionneurs sont représentés par des blocs cylindriques non dimensionnés.

QUESTION 1.4
Feuille de copie

Dans la position singulière où le demi-bras et l'avant-bras de l'antenne mobile seraient alignés ($\vec{Y}_1 = \vec{Y}_2$), **déterminer** la variation de position $\Delta\theta_1$ de l'actionneur de l'épaule induite par la valeur de δ déterminée à la question 1.3.

Exprimer la valeur numérique en degré d'angle.

Face aux exigences de très grande précision dans la gestion des positions et des vitesses relativement élevées, le choix de l'alimentation électrique du mécanisme se porte sur un moteur pas-à-pas de 24 pas par tour garantissant une stabilité magnétique des incréments.

QUESTION 1.5 | En supposant que la résolution requise de l'actionneur soit inférieure
Feuille de copie à $0,044^\circ$, **calculer** le rapport de réduction minimum nécessaire.
Exprimer la valeur numérique sous forme d'un nombre entier.

Ce moteur est piloté à une fréquence de 20Hz. On considère que tous les jeux sont compensés par ailleurs et que les mouvements entre deux états stables sont uniformément variés.

QUESTION 1.6 | Sur un pas, en supposant que la vitesse initiale et la vitesse finale sont
Feuille de copie nulles, **dessiner** les profils de vitesse angulaire et d'accélération
DT03 1/2 et DT03 2/2 angulaire du moteur pas-à-pas en fonction du temps.
Exprimer les valeurs numériques correspondantes.

QUESTION 1.7 | **En déduire** les valeurs numériques de la vitesse et de l'accélération
Feuille de copie angulaires en sortie du réducteur.
DT03 1/2 et DT03 2/2

QUESTION 1.8 | **Énoncer** le théorème à appliquer et **déterminer** le couple nécessaire
Feuille de copie au déploiement du mécanisme de pointage.

La valeur déterminée à la question précédente n'est valable qu'au démarrage du moteur pour le premier pas. Dans une approche dynamique plus complexe, nous admettons que par la suite, il peut se produire des phénomènes de couplages avec la fréquence d'excitation qui peuvent amplifier cette valeur du couple. Par empirisme, il est recommandé d'appliquer un facteur 3 pour tenir compte du pire des cas.

QUESTION 1.9 | Dans le cadre de référence à la norme ECSS² relative aux
Feuille de copie mécanismes spatiaux, ce couple nécessaire est désigné sous le
terme de T_D .
Préciser la valeur numérique de T_D à prendre en compte par la suite.

² ECSS : European Cooperation for Space Standardization

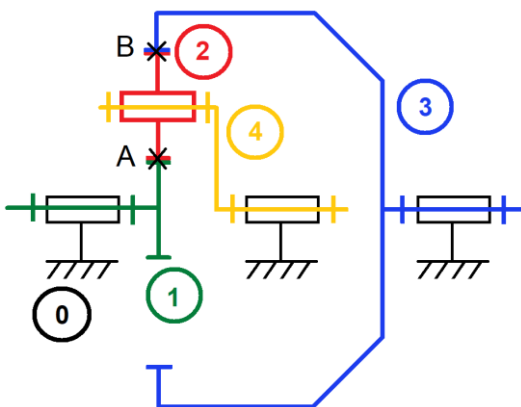
QUESTION 1.10
 Feuille de copie
 DT03 1/2 et DT03 2/2
 DT04

Selon la loi ECSS (voir DT04 : *Extrait de la norme ECSS-E-ST-33-01C*) et les données relatives au mécanisme étudié (voir DT03), **calculer** le terme T_{min} caractérisant le couple minimal utile en sortie de l'actionneur rotatif. **Préciser** la valeur T_{mot} (en N.m et arrondie à 2 décimales) du couple permettant de valider le choix d'un moteur sur catalogue.

Étude du réducteur de l'actionneur rotatif

Les performances en lien avec le dimensionnement du moteur étant vérifiées, il s'agit désormais de déterminer les caractéristiques mécaniques du réducteur associé. Afin de respecter au mieux les exigences du cahier des charges, le bureau d'études oriente son choix vers un train épicycloïdal de type 1 dont la structure est précisée ci-après.

Figure 9 : Configuration de type 1 des trains épicycloïdaux plans



Type 1 : Un planétaire intérieur (P_{int}) ici repéré (1), des satellites (S) repérés (2) simple denture, un planétaire extérieur (P_{ext}) repéré (3), un porte-satellite (PS) ici (4).

Pour les trains épicycloïdaux plans, les planétaires ou le porte-satellite peuvent être l'arbre d'entrée ou de sortie mais généralement pour la majorité des cas, un des deux planétaires est l'entrée alors que l'autre est fixe et le porte-satellite est la sortie.

QUESTION 1.11
 Feuille de copie

Dans le contexte de l'étude, **préciser** les principaux avantages de la solution train épicycloïdal par rapport à un train d'engrenages simples.

Le paramètre λ est appelé raison de base du train épicycloïdal, il s'agit du rapport des vitesses des deux planétaires par rapport au porte-satellite. Dans notre étude, nous choisissons de lier le planétaire extérieur au bâti.

$$\frac{\omega_{P_{ext}/bâti} - \omega_{PS/bâti}}{\omega_{P_{int}/bâti} - \omega_{PS/bâti}} = \lambda$$

QUESTION 1.12
 Feuille de copie

Proposer la démarche pour retrouver la formule dite de Willis et **exprimer** la raison de base λ en fonction des rayons primitifs des engrenages R_i (avec i variant de 1 à 4) du train présenté en figure 9.

QUESTION 1.13 | Un train épicycloïdal de type 1 permet communément d'avoir une
Feuille de copie réduction comprise entre 5 et 10. En admettant que le rapport de réduction nécessaire pour notre actionneur rotatif soit de 343, **proposer** une architecture de réducteur permettant d'utiliser plusieurs trains de type 1. **Justifier** votre choix.

Préciser les valeurs numériques des rapports de réduction et les raisons de base λ des trains utilisés.

QUESTION 1.14 | **Dessiner** et **paramétrer** le schéma cinématique minimal en 2D
Feuille de copie permettant de modéliser l'actionneur (moto-réducteur) ainsi proposé.

Afin de répondre aux critères d'encombrement minimal, le module normalisé des engrenages est fixé à 1 mm et pour minimiser le glissement, source de perte mécanique, le plus petit pignon ne doit pas avoir un nombre de dents inférieur à 12.

QUESTION 1.15 | **Déterminer** les diamètres primitifs des différentes roues du
Feuille de copie réducteur. **Conclure** sur le respect du cahier des charges en terme
DT03 1/2 et DT03 2/2 d'encombrement.

Dans le cadre d'un partenariat avec le CNES³, l'entreprise COMAT Space® a récemment développé et qualifié un actionneur rotatif. La fiche produit caractérisant le moteur et le réducteur associé est disponible dans la documentation *DT05 : Fiche produit actionneur rotatif COMAT Space®*.

QUESTION 1.16 | Dans l'optique de s'affranchir d'une fabrication sur-mesure et d'utiliser
Feuille de copie un actionneur pré-existant, **analyser** les caractéristiques mécaniques
DT05 annoncées par COMAT Space® par rapport aux besoins de notre mécanisme. **Conclure** sur la possibilité d'utiliser ou non ce produit en l'état dans la situation étudiée.

Préciser les modifications à apporter le cas échéant.

La démarche suivie a permis de caractériser dans les règles de l'art les éléments relatifs à la motorisation et sa transmission de puissance. Afin de poursuivre la caractérisation du mécanisme de pointage de l'antenne à réflecteur, il convient de vérifier les performances des éléments de structure notamment lors des phases critiques du lancement et du déploiement en orbite. Ces problématiques font l'objet des parties suivantes de ce sujet.

³ CNES : Centre national d'Études Spatiales

2^E PARTIE :

ÉTUDE DES RELATIONS PRODUIT-MATERIAU D'ÉLÉMENTS DE STRUCTURE.

(Durée conseillée : 1 heure)

Objectif : Identifier les caractéristiques pertinentes permettant d'identifier les matériaux adaptés aux composants de structure des satellites.

Un satellite est soumis à plusieurs types de sollicitations importantes, principalement durant la phase de lancement, puis lors de son utilisation en orbite.

Lors de la phase de lancement, il subit des accélérations élevées (jusqu'à 10g), des vibrations importantes couvrant une large gamme de fréquences, des chocs pyrotechniques en fonction du type de lanceur, une pression acoustique importante ainsi que de fortes variations thermiques. La durée de cette phase de fortes sollicitations est d'environ 10 minutes. Après cela, les sollicitations liées aux ajustements d'orbite et autres manœuvres deviennent moins sévères.

En orbite, les satellites subissent principalement des variations thermiques importantes (de -170°C à +180°C) en fonction de leur exposition. En microgravité, les sollicitations mécaniques de fonctionnement sont faibles par rapport à l'étape de lancement mais peuvent perturber l'orientation du satellite, tout comme les micro météorites et débris, ou les perturbations orbitales.

QUESTION 2.1
Feuille de copie

Les éléments de structure des satellites sont usuellement dimensionnés en raideur plutôt qu'en fatigue par les bureaux d'études. **Expliquer et détailler** ces deux démarches et **justifier** ce choix.

Indépendamment des éléments de structure de la plateforme (châssis), dont le développement reste souvent spécifique, un nombre croissant d'éléments « standardisés » est utilisé dans la conception des bras mobiles d'orientation d'antennes ou autres jambes de force (les « struts ») permettant le déploiement, le positionnement et le maintien d'accessoires.

La suite de l'étude propose de s'intéresser aux choix de conception et d'industrialisation de ces éléments constitués de tubes et d'éléments de liaison aux extrémités (les « end-fittings »).

Figure 10 : Illustration de bras mobiles d'orientation⁴

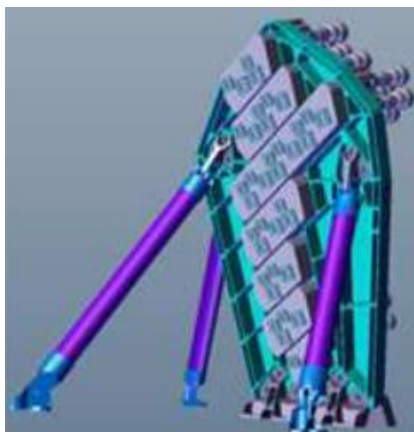


Figure 11 :

<https://spacestructures.com>



Figure 12 :

<https://www.mecano-id.com>



Les matériaux utilisables nécessitant une qualification spatiale (normes ECSS), seuls quelques matériaux précis (et non les familles) disposant de ces qualifications seront étudiés par la suite.

Choix de matériau pour les end-fittings, proposés en alliage d'aluminium 7075-T7351 ou en alliage de titane TA6V (ou Ti-6Al-4V)

QUESTION 2.2

Feuille de copie
DT06 1/2 et 2/2

Calculer l'allongement maximal en traction avant déformation permanente pour chacun des deux matériaux, ainsi que l'allongement pour une contrainte de 235 MPa. **Conclure** sur le comportement en traction de ces 2 matériaux.

Le second graphique représente le module d'Young en fonction de la densité. **Expliquer** quel serait l'intérêt de tracer les droites d'iso-performance du type $(E/\rho)^n$.

QUESTION 2.3

Feuille de copie
DT06 1/2 et 2/2

Lister le (ou les) critère(s) qui justifie(nt) le choix du TA6V par rapport à l'alliage d'aluminium 7075-T7351 en ce qui concerne les end-fittings.

⁴ Source : « Eucap 2016 : Exemple of MFPB Tx/Rx MBA »

Choix de matériau pour le tube :

QUESTION 2.4
Feuille de copie
DT06 1/2 et 2/2,
DT07 et DT08

Le matériau retenu pour le tube du strut est un composite fibre de carbone et matrice époxy, obtenu par enroulement filamentaire. **Préciser** la particularité principale du comportement mécanique de ce matériau par rapport à un alliage d'aluminium, proposé également au catalogue des fournisseurs de struts.

Une des solutions possibles d'assemblage entre le tube et les end-fittings est le contact direct des surfaces lors de l'étape d'enroulement filamentaire, conformément aux indications fournies par le brevet du déposant (voir *DT07 : Brevet – Dépot européen (extraits)*).

Le type d'enroulement dans les zones de liaisons des extrémités est défini, et les caractéristiques des matériaux sont connues et données sur *DT08 : Détermination des coefficients d'expansion thermique*.

QUESTION 2.5
Feuille de copie
DT06 1/2 et 2/2,
DT08

À partir des données précédentes, **déterminer** les coefficients d'expansion thermique axial α_L et transversal α_T du composite à l'échelle des plis et **conclure** sur la qualification finale de l'assemblage TA6V-composite dans le contexte d'un bras de positionnement d'accessoire sur un satellite.

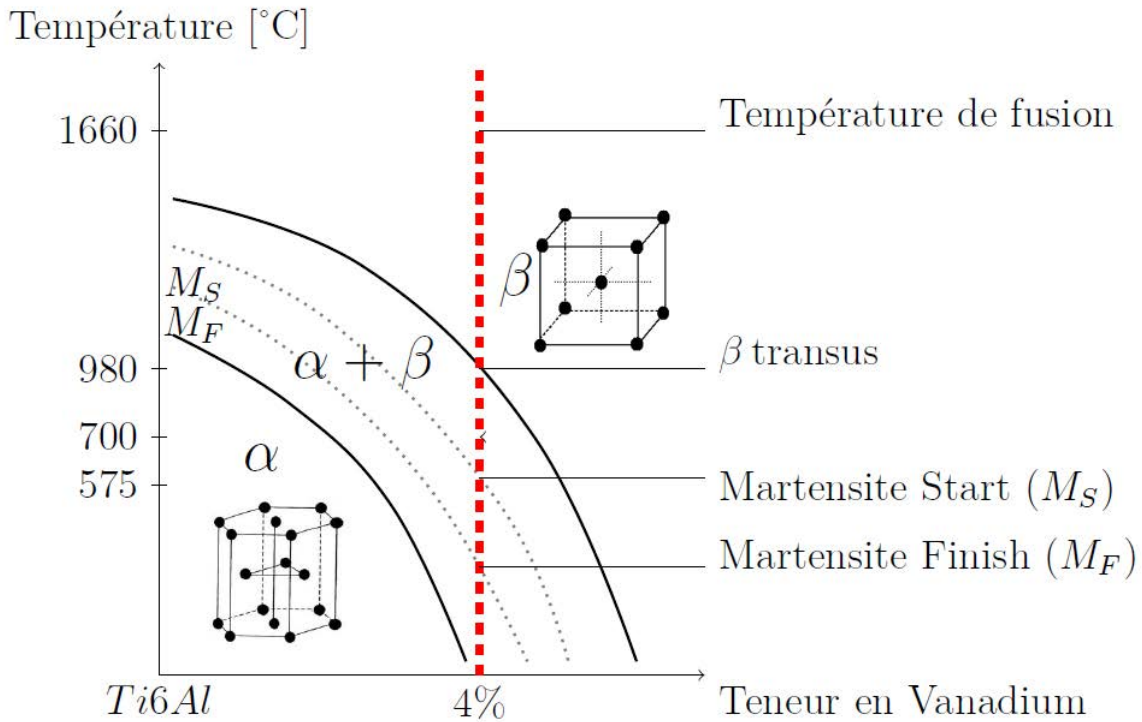
Étude des microstructures du TA6V : s'assurer de la qualité métallurgique des produits.

Deux traitements différents en fonction du diamètre de barres sont proposés par un fournisseur (voir *DT09 : Caractéristiques du TA6V*). Afin de maîtriser le comportement mécanique des pièces, il est nécessaire de connaître l'état métallurgique attendu.

On distingue 3 familles d'alliages de titane :

- les alliages de type α , dont la phase est hexagonale compacte, difficiles à déformer à froid et de résistance à la traction modeste ;
- les alliages de type $\alpha+\beta$, qui présentent la résistance mécanique la plus élevée et dont les caractéristiques dépendent fortement des traitements thermiques en partie en raison de la formation d'une phase de martensite lors du refroidissement ;
- les alliages de type β , dont la microstructure est cubique centrée et présentent une bonne déformabilité à froid.

Figure 13 : Diagramme de phase pseudo-binaire de l'alliage Ti-6Al-4V⁵



QUESTION 2.6
Feuille de copie
DT09

À partir du diagramme de phase ci-dessus, **préciser** à quelle famille d'alliage appartient le TA6V. **Justifier** le caractère « bêtagène » du Vanadium.

QUESTION 2.7
Feuille de copie

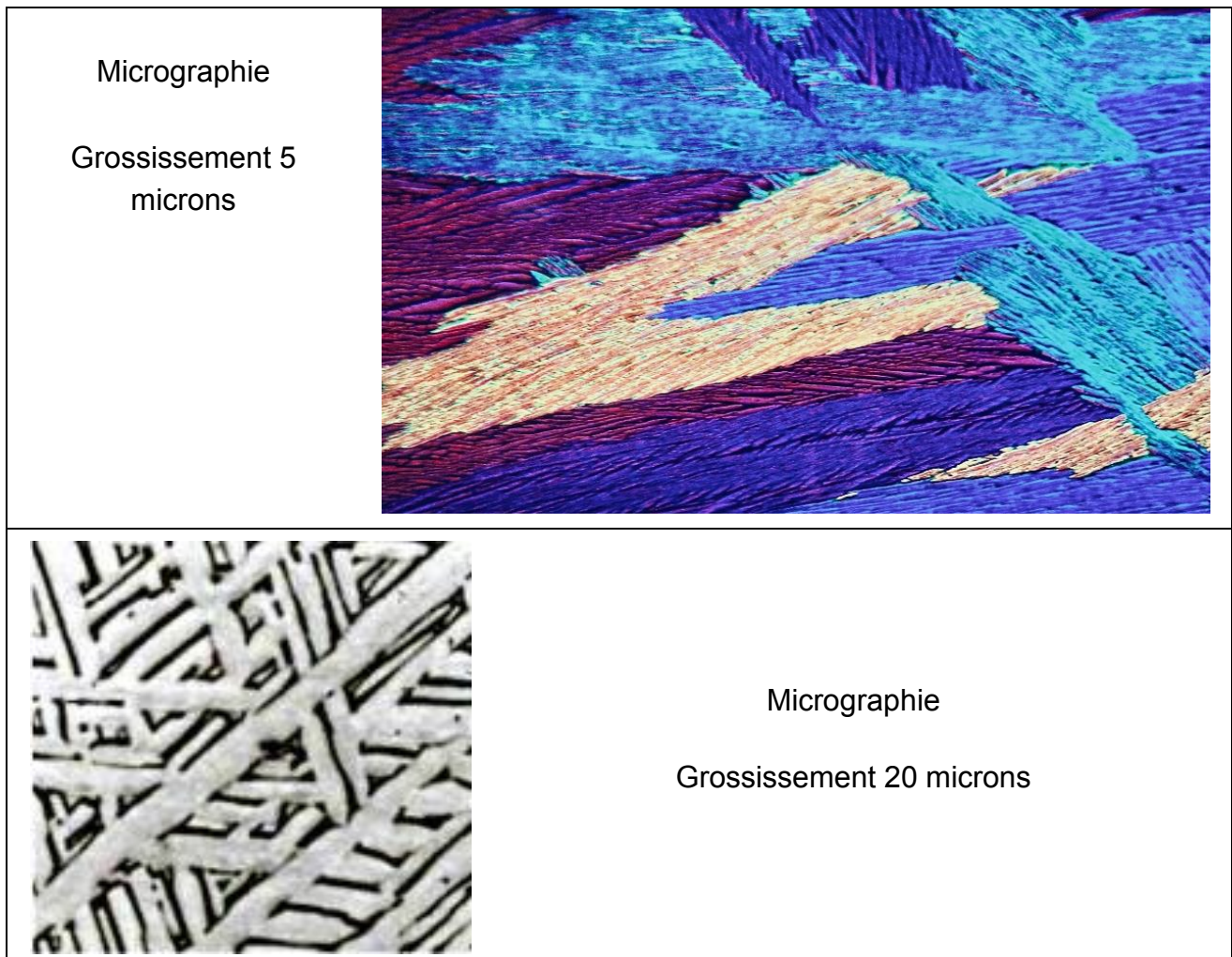
Déterminer approximativement la proportion attendue des phases α et β dans les pièces réalisées après usinage.

QUESTION 2.8
Feuille de copie
DT09

Les traitements thermiques ayant un impact important sur la ténacité, il est souhaitable de réaliser une mise en solution β avant recuit. **Déterminer** la température de mise en solution β .

⁵ Source : Mathieu Suard – 2015

Figure 14 : Illustrations d'une trempe lente à partir du domaine β^6



QUESTION 2.9
Feuille de copie

La micrographie ci-dessus présente une des microstructures lamellaires recherchée du TA6V. **Donner** la raison pour laquelle cette microstructure constituée de lamelles croisées permet d'accroître la ténacité du matériau.

⁶ Source : Y. Robert – 2017

Détermination de la taille critique des défauts matière :

La norme ECSS impose le calcul des seuils de contrôle non destructif concernant les pièces par la détermination des facteurs d'intensité de contrainte appliqué au cas de chargement.

Critical crack-size calculation

ECSS-E-ST-32-01_0810102

- a. The critical crack-size (a_c) shall be calculated by means of LEFM:

$$a_c = \frac{(K_c)^2}{\pi \sum (F_i S_i)^2}$$

where S_i are the maximum specified stresses and F_i are the stress intensity magnification factors for the different load cases (which depend on the crack size a) and K_c is the critical stress intensity factor.

NOTE The maximum specified load is in many cases the limit load, but sometimes higher than the limit load (e.g. for detected defects, composites and glass items).

Afin de minimiser le risque d'une propagation de fissure dans l'alliage TA6V durant la phase de fortes sollicitations de la mise en orbite du satellite, la limite maximale du facteur d'intensité de contrainte K_c est fixée à $K_{1c}/3$ sous une contrainte ne dépassant pas la limite élastique du matériau. K_{1c} correspond à la valeur de ténacité fournie sur le *DT06 : Diagrammes de propriétés des matériaux*.

QUESTION 2.10
Feuille de copie
DT06 1/2 et 2/2
DT09

En se plaçant dans l'hypothèse d'une fissure circulaire de rayon « a » dans une pièce de volume infini et dans un cas de traction, pour lequel le facteur de forme $F_i = 2 / \pi$, **calculer** le rayon critique a_c au-delà duquel une fissure pourra se propager dans le matériau et conduire à la rupture.

Proposer une méthode de contrôle non-destructif adaptée au contexte étudié.

3^E PARTIE : ÉTUDE D'INDUSTRIALISATION D'ÉLÉMENTS DE STRUCTURE DANS UN CONTEXTE D'AUGMENTATION DE LA DEMANDE.

(Durée conseillée : 1 heure 20 min)

Objectif : L'augmentation du nombre de produits à réaliser, en lien direct avec les projets de constellations de satellites, justifie de remettre en cause les processus de réalisation établis jusqu'alors pour des petites séries voire des commandes unitaires de pièces.

Les end-fittings sont actuellement réalisés par enlèvement de matière, à partir de barres cylindriques en TA6V. Si les géométries d'assemblage avec le corps des struts peuvent être standardisées (directement intégrées dans le composite lors de l'enroulement ou vissées dans des écrous noyés dans le corps), les géométries de liaison aux autres éléments de structure des satellites varient de façon importante (chapes, rotules, pivots, platines...etc.).

Figure 15 : End-fitting chape

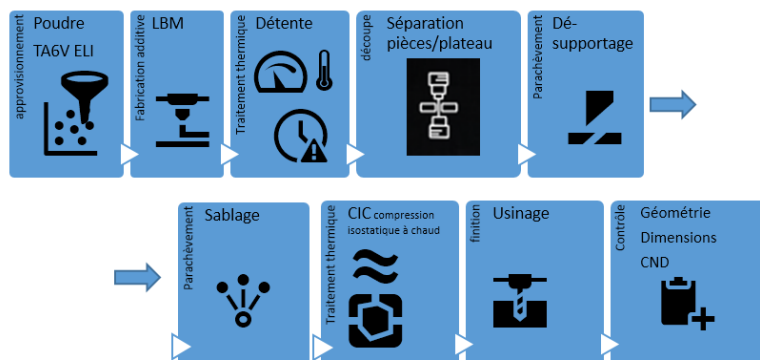


Une nouvelle gamme de fabrication des pièces est envisagée, intégrant la fabrication additive par fusion laser de lit de poudre (procédé LBM).

QUESTION 3.1
Feuille de copie
DT07 et DT11

Préciser la nature de la protection apportée par le brevet en ce qui concerne les end-fittings et **justifier** la pertinence d'intégrer la fabrication additive dans le cadre d'une montée en cadence de cette production.

Le nouveau processus de fabrication intégrant le procédé LBM est proposé ci-dessous :



QUESTION 3.2
Feuille de copie
DT11

Décrire et justifier la présence et la position de la phase de compression isostatique à chaud intégrée au processus de fabrication.

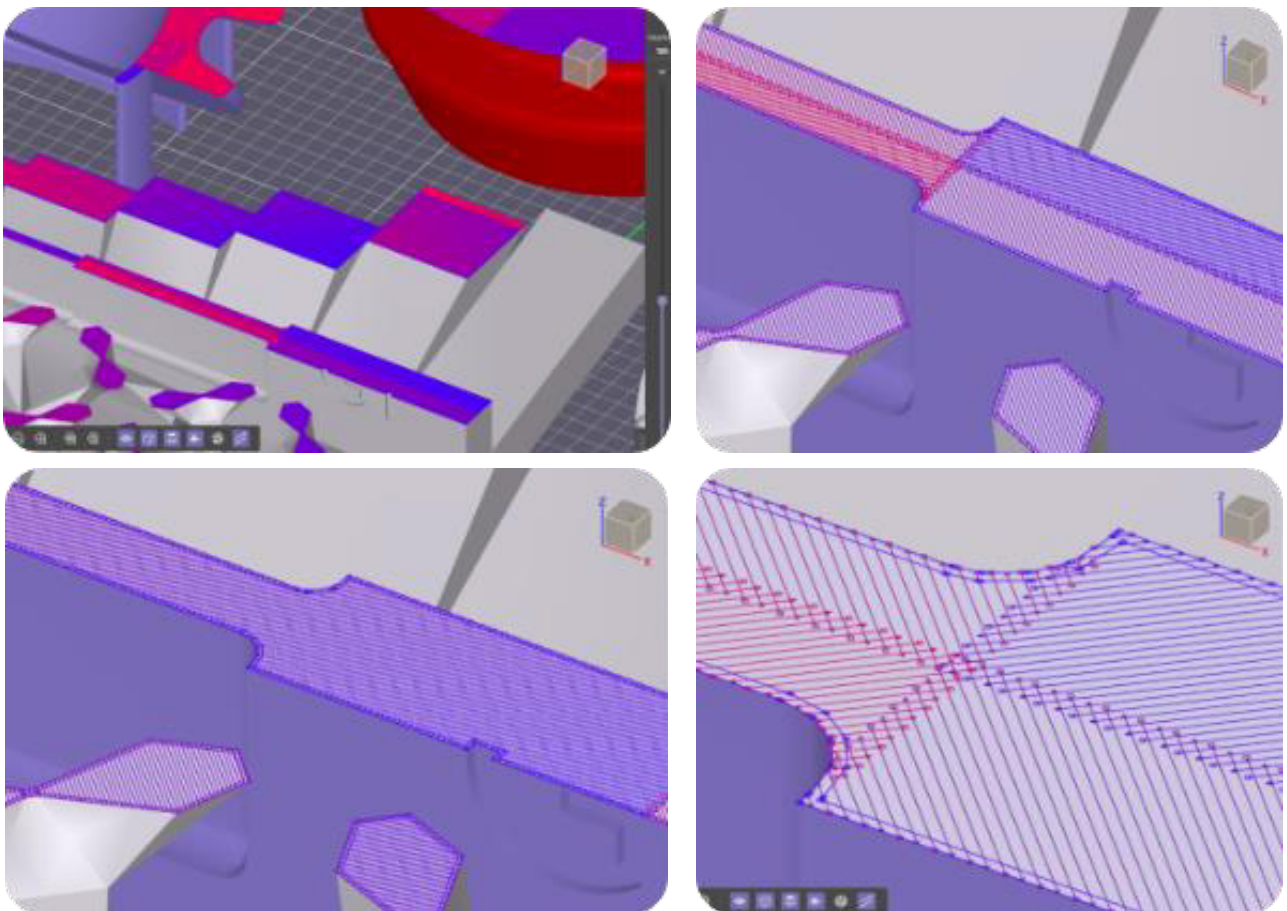
QUESTION 3.3
Feuille de copie
DT11

Identifier l'impact du changement de géométrie intermédiaire (nature du brut par rapport à la gamme actuelle) sur l'étape d'usinage (caractéristiques à réaliser, difficultés de réalisation supplémentaires). **Conclure** sur la pertinence du changement de procédé de brut sans anticipation sur le processus global.

QUESTION 3.4
Feuille de copie
DT11

Proposer, sous forme de croquis, une orientation possible de pièce sur le plateau permettant de maximiser le rapport « nombre de pièces / durée du cycle fabrication » en détaillant et en justifiant les modifications de géométrie envisagées et les supports éventuels compatibles avec la proposition. (L'optimisation topologique ne sera pas abordée, le cas de chargement n'étant pas étudié.)

Figure 16 : Tests de trajectoires de lasage



QUESTION 3.5
Feuille de copie
DT11

Afin de maîtriser thermiquement le refroidissement des plateaux de pièces réalisés, différentes trajectoires de lasage sont possibles, comme des stratégies en damiers ou l'alternance de stratégies différentes entre couches successives (voir *figure 16*).

Préciser l'impact de ces choix sur la fabrication des pièces, en association avec les vitesses et puissance du laser.

QUESTION 3.6
Feuille de copie

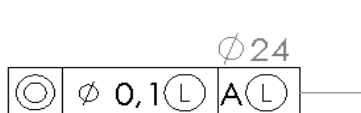
Proposer un bilan des intérêts et des inconvénients apportés par la fabrication additive dans ce contexte de production.

Étude d'optimisation du processus d'usinage des end-fittings.

En attente de qualification matériau-procédé des étapes de fabrication additive, une optimisation du processus actuel d'usinage, caractérisé par de nombreuses reprises sur des machines 2 ou 3 axes, est requise. L'investissement dans un centre de tournage-fraisage bi-broches SOMAB GENYMAB équipé d'une broche de reprise est envisagé.

QUESTION 3.7
Feuille de copie
DT11

Détailler le tolérancement associé au groupe de spécifications :



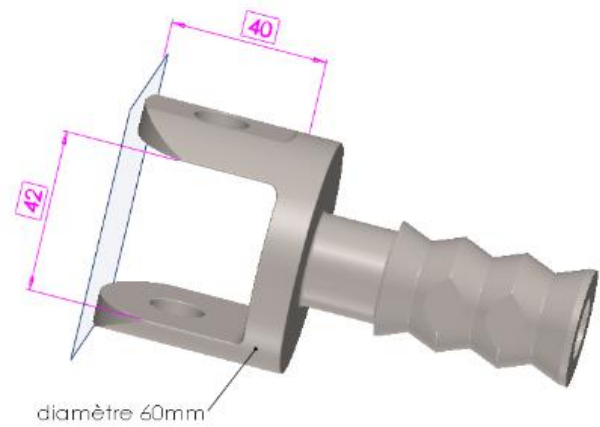
Proposer une justification fonctionnelle de ce tolérancement et **expliquer** l'impact que peut avoir ce type de spécification sur la gamme de fabrication.

QUESTION 3.8
Feuille de copie
DT11

Proposer une gamme d'usinage de la pièce adaptée à ce nouveau moyen de fabrication, à partir d'une barre cylindrique de TA6V, en précisant pour chaque étape les groupes de surfaces réalisés, la mise en position retenue, la cinématique nécessaire et la géométrie générique des outils. **Justifier** l'ordonnancement proposé.

La productivité de l'usinage du TA6V reste toujours délicate, indépendamment du moyen de production. Dans ce contexte d'augmentation de la demande, des pistes d'amélioration sont étudiées afin d'augmenter les débits copeaux.

Dans ce but, on souhaite mesurer les apports du fraisage dynamique sur l'opération de rainurage d'une référence de end-fitting, rainure dont les dimensions sont données ci-contre.



L'usinage de la rainure est actuellement réalisé avec l'outil et les paramètres suivants :

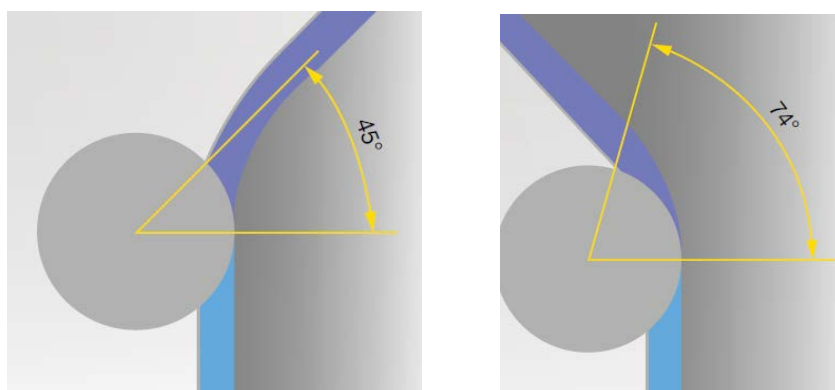
Fraise en carbure monobloc avec dentition d'ébauche $\varnothing 25$ mm, longueur totale 135 mm, longueur utile 40 mm.

$z = 8$ dents, largeur de coupe $a_e = 3,82$ mm, profondeur de coupe $a_p = 38$ mm, $V_c = 60$ m·min⁻¹, $f_z = 0,083$ mm·tr⁻¹·dent⁻¹.

QUESTION 3.9
Feuille de copie
DT12

Choisir l'orientation d'outil la plus adaptée à cette opération d'ébauche en travail dynamique et justifier ce choix.

Figure 17 : Exemples d'angles d'engagement (source Gühring)



L'angle d'engagement influe sur les efforts de coupe et constitue donc un paramètre important à prendre en compte pour une opération de fraisage dynamique.

QUESTION 3.10 | À partir des recommandations du carburier concernant le fraisage dynamique, **déterminer** le diamètre maxi de la fraise ainsi que l'angle maximum d'engagement φ_s préconisé pour cette stratégie.

Feuille de copie
DT12

En fonction de ces paramètres, **calculer** la valeur maximum de a_e .

Pour ce type de stratégie dynamique, le carburier préconise une fraise spéciale de dimensions similaires à la précédente mais présentant un brise-copeaux adapté. ($\varnothing 25$ mm, longueur totale 135 mm, longueur utile 40 mm, $z = 8$ dents).

Des essais de coupe avec $a_p = 38$ mm et a_e max déterminé précédemment conduisent à retenir des valeurs de vitesses suivantes : $V_c = 96 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f_z = 0,18 \text{ mm}\cdot\text{tr}^{-1}\cdot\text{dent}^{-1}$.

QUESTION 3.11 | **Calculer et comparer** les débits copeaux des deux stratégies.

Feuille de copie

Des essais de coupe en fraisage (Germain – 2022) montrent qu'une assistance cryogénique à la place d'une lubrification par émulsion classique permet d'augmenter la vitesse de coupe par 1,5 dans du TA6V en se basant sur un critère $V_b = 0,3\text{mm}$.

QUESTION 3.12 | **Définir** le critère V_b et **expliquer** en quoi la faible conductivité thermique de l'alliage TA6V par rapport aux autres familles de métaux influe sur ce critère lors des opérations de coupe.

Feuille de copie

DOCUMENTS TECHNIQUES

Documents spécifiques relatifs au support de l'étude, données techniques diverses

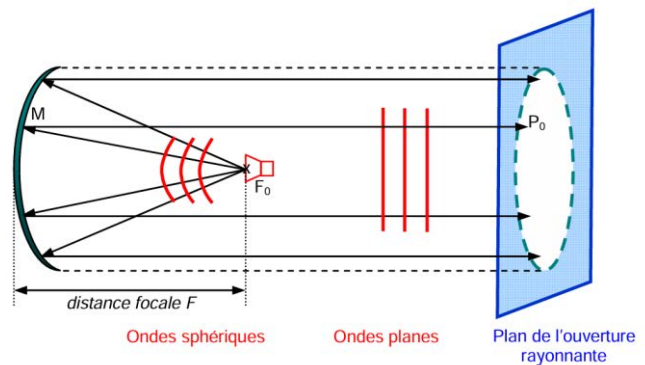
DT01	Principes essentiels relatifs aux antennes à réflecteur parabolique	1 page
DT02	Dépointage de faisceaux	1 page
DT03	Cahier des charges relatif au mécanisme de pointage d'antenne	2 pages
DT04	Extrait de la norme ECSS-E-ST-33-01C	1 page
DT05	Fiche produit actionneur rotatif de COMAT Space	1 page
DT06	Diagrammes de propriétés des matériaux	2 pages
DT07	Brevet – Dépôt européen (extraits)	1 page
DT08	Détermination des coefficients d'expansion thermique	1 page
DT09	Fiche matériau fournisseur - TA6V	1 page
DT10	Caractéristiques SOMAB GENYMAB Bi-broches	2 pages
DT11	Définition End-fitting Type 2 "chape"	1 page
DT12	Données fraisage dynamique (source Walter Prototyp)	1 page

DT01 : PRINCIPES ESSENTIELS RELATIFS AUX ANTENNES A REFLECTEUR PARABOLIQUE

L'antenne à réflecteur parabolique est constituée d'une antenne placée au foyer du paraboloïde, nommée source primaire. Elle permet de concentrer la puissance d'émission ou de réception des signaux radioélectriques du satellite sur une zone déterminée. Son fonctionnement repose sur deux principes essentiels.

- Tous les rayons émanant du point focal (F_0) d'une parabole de révolution sont renvoyés par le réflecteur parallèlement à son axe.
- Tout rayon émis à partir du point focal et renvoyé par le réflecteur, atteint un plan orthogonal à l'axe du réflecteur en ayant effectué le même trajet optique, soit $F_0M + MP_0 = \text{constante} = 2F + F_0P_0$.

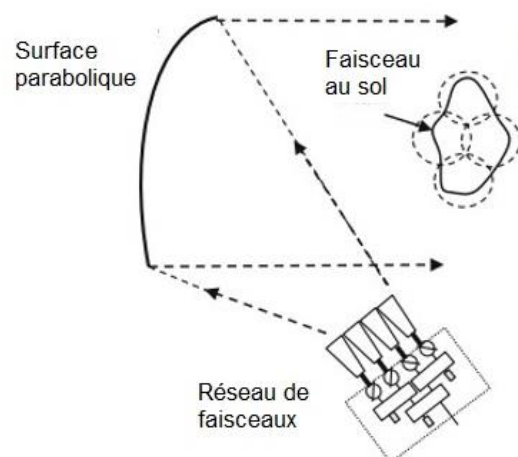
Schéma de principe d'une antenne à réflecteur parabolique



Exemple de mise en œuvre d'une antenne à réflecteur et d'un réseau des sources multiples

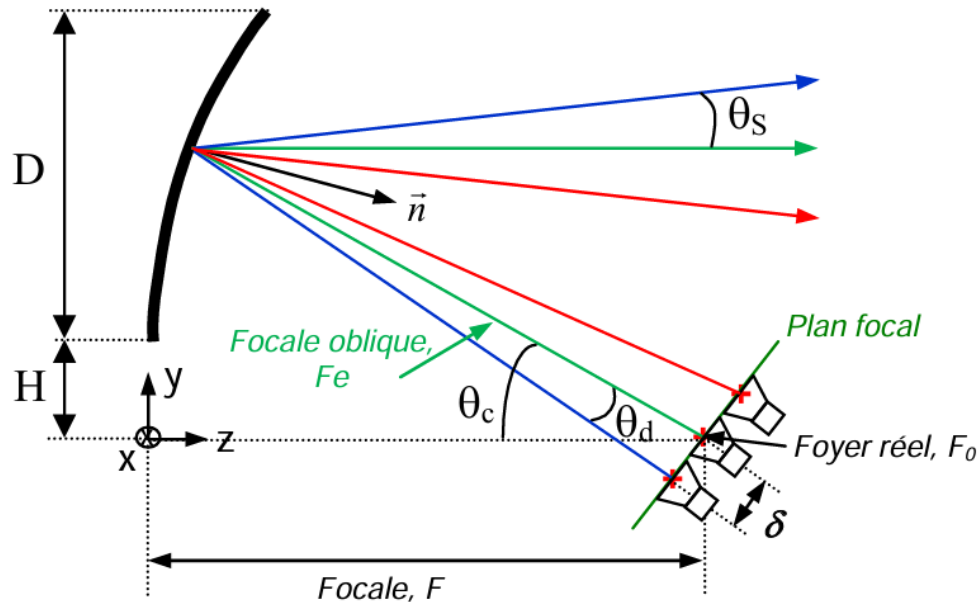
Les antennes situées à bord des satellites doivent pouvoir former plusieurs milliers de faisceaux simultanés vers les différents utilisateurs. Ce sont des antennes sophistiquées utilisant des réseaux multiples d'éléments répartis sur des surfaces de quelques m^2 capables d'orienter, en temps réel, de façon adaptative des faisceaux dans la zone géographique concernée, communément appelée zone de couverture.

Illustration du faisceau au sol couvert par chacune des 4 sources d'un réseau de faisceaux



DT02 : DEPOINTAGE DE FAISCEAUX

Lorsqu'une source focale illuminant un réflecteur est déplacée latéralement d'une distance δ par rapport au foyer, le faisceau résultant en sortie du dioptré subit un dépointage proportionnel à δ , on parle alors de dépointage dans le plan focal. Ce phénomène, illustré par la figure ci-dessous, s'explique par un déphasage du champ rayonné.



Le dépointage θ_s en sortie peut être déterminé par l'équation 1, où le terme *BDF* correspond au facteur de déviation de faisceau, calculé à partir de l'équation 2. Le paramètre k dépend de la source focale et de son apodisation (paramètre utilisé pour améliorer la mise au point en supprimant les effets de la diffraction).

Pour information, les valeurs de k correspondant à une apodisation commune de la source primaire de 12 dB et de 20 dB sont respectivement de 0,36 et 0,59.

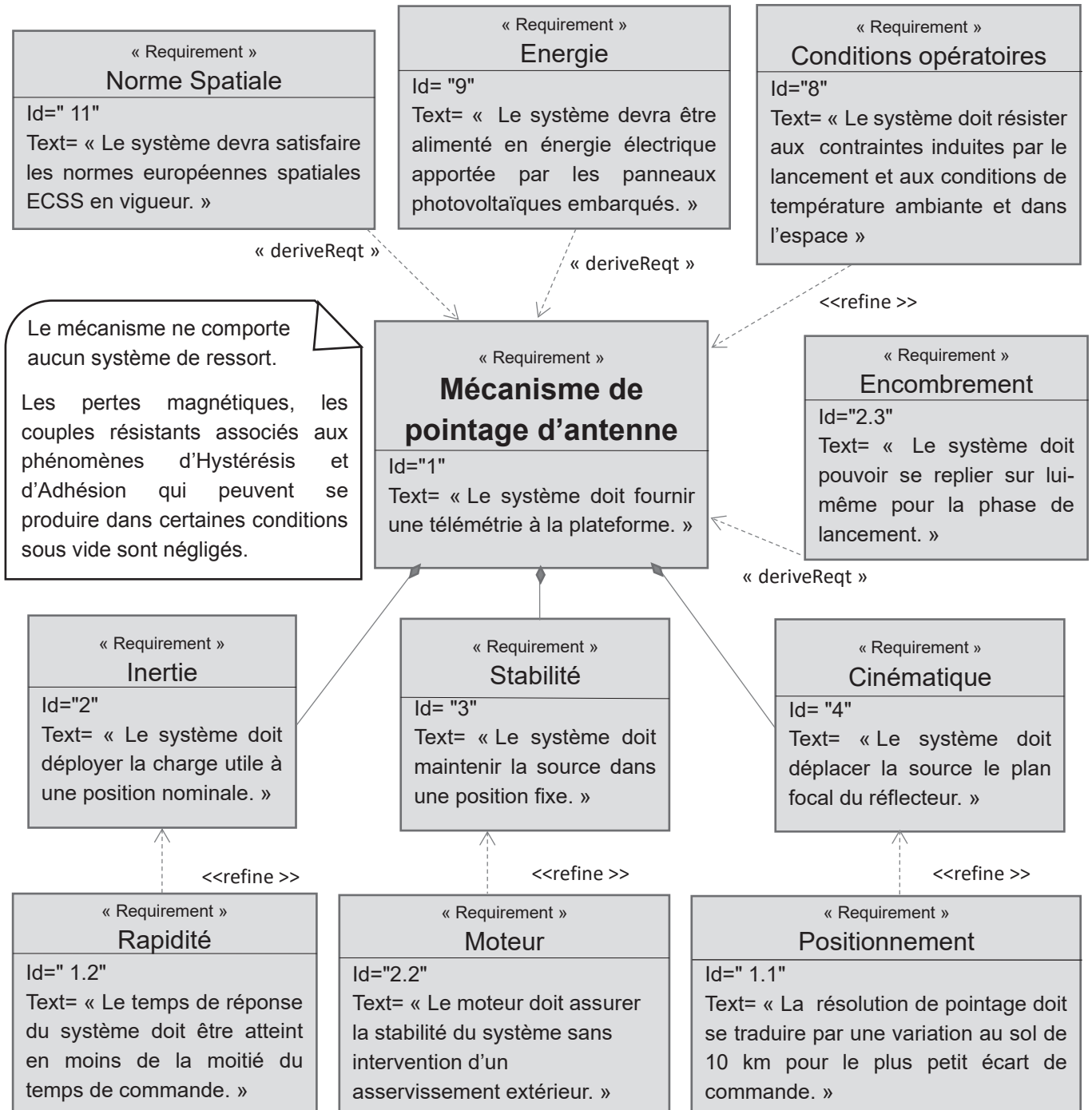
$$\text{Équation 1 : } \theta_s = BDF \cdot \arctan(\delta / F_e)$$

$$\text{Équation 2 : } BDF = \frac{\arcsin(\delta / F_e) \left\{ \left(1 + k(D / 4F_e)^2 \right) / \left(1 + (D / 4F_e)^2 \right) \right\}}{\arctan(\delta / F_e)}$$

$$\text{Équation 3 : } \theta_s = \arctan(\delta / F_e)$$

DT03 1/2 : CAHIER DES CHARGES RELATIF AU MECANISME DE POINTAGE D'ANTENNE

Ce diagramme SysML représente de manière synthétique les exigences fonctionnelles, les exigences de contraintes et de performances qui s'appliquent au système étudié.



DT03 2/2 : CAHIER DES CHARGES RELATIF AU MECANISME DE POINTAGE D'ANTENNE

Propriété	Exigence
Altitude géostationnaire	36 000 km
Réflecteur parabolique :	D = 1 m H = 0,2 m
Distance focale oblique	Fe = 2,2 m
Résolution de pointage	Variation au sol de 10 km
Température au sol pendant 12 ans	21°C
Durée de vie de 15 ans en orbite	50% du temps à 110°C 25% du temps à 80°C 25% du temps à 60°C
Masse maximale de l'ensemble du mécanisme	M _S = 6 kg
Inertie de l'ensemble du mécanisme à déployer selon l'axe \vec{Z} ramenée au point O	J _S = 1m ² .kg
Bras réalisé en deux demi-bras identiques	Entraxe = 400 mm Masse maximale = 380 g Matière : titane
Moteur électrique pas-à-pas	Nombre de pas par tour : 24 pas Fréquence 20 Hz
Frictions internes en sortie du moteur maximales à froid	F _{R max} = 0,3 Nm
Couple résistant provenant du câblage (harnais) maximal à froid	H _{A max} = 2 Nm
Couples induits par les accélérations orbitales	I _{max} = 0,1 Nm

DT04 : EXTRAIT DE LA NORME SPATIALE ECSS

L'European Cooperation for Space Standardization (ECSS) est une initiative créée pour développer un ensemble unique et cohérent de normes à utiliser dans toutes les activités spatiales européennes.



ECSS-E-ST-33-01C Rev.2
1 March 2019

4.7.5.3 Functional dimensioning

4.7.5.3.1 Motorization factors

- a. Actuators shall be sized to provide throughout the operational lifetime and over the full range of travel actuation torques or forces in conformance with 4.7.5.3.1d or 4.7.5.3.1e.

NOTE 1 Example of actuators are electrical, mechanical and thermal.

NOTE 2 Torque or force contributors providing helping torques or forces are treated as motorization.

- b. To derive the factored worst-case resistive torques or forces, each contributors, considering all mission phases worst-case conditions, shall be multiplied by the applicable minimum uncertainty factor specified in Table 4-2.

NOTE 1 Example of such environmental effects over the life are vacuum, temperature, and zero G.

NOTE 2 The resistive contributors due to Magnetic effects are all but those coming from the internal design of an electrical motor (e.g. motor detent torque).

NOTE 3 Increased factors are typically applied to take into account effects that cannot be measured by test.

Table 4-2: Minimum uncertainty factors for actuation function

Resistive torque or force contributors	Symbol	Theoretical Factor	Measured Factor
Inertia	I	1,1	1,1
Spring	S	1,2	1,1
Magnetic effects	H_M	1,5	1,1
Friction	F_R	3	1,5
Hysteresis	H_Y	3	1,5
Others (e.g. Harness)	H_A	3	1,5
Adhesion	H_D	3	3

QUELQUES TRADUCTIONS

actuator : actionneur
 actuator torque : couple moteur
 adhesion : adhésion
 deliverable output torque : couple de sortie supplémentaire spécifié par le client
 (to) derive : déduire
 force : force
 friction : friction
 harness : harnais (câblages)
 hysteresis : phénomènes d'hystérésis
 inertia : inertie induite par le mouvement orbital
 magnetic effects : effets magnétiques
 payload : charge utile
 resistive torque : couple résistant
 spinning spacecraft : vaisseau en rotation
 spring : ressort
 torque : couple
 worst-case : pire des cas

- c. The theoretical uncertainty factors in Table 4-2 may be reduced to the measured factors, provided that the worst-case resistive contributors are based on measurements, according to a test procedure approved by the customer.

- d. The minimum actuation torque (T_{min}) shall be derived by the equation:

$$T_{min} = 2 \times (1,1 I + 1,2 S + 1,5 H_M + 3 F_R + 3 H_Y + 3 H_A + 3 H_D) + 1,25 T_D + T_L$$

where:

- I is the resistive inertial torque applied to a mechanism subjected to acceleration in an inertial frame of reference (e.g. spinning spacecraft, payload or other).
- T_D is the inertial resistance torque caused by the worst-case acceleration function specified by the customer at the mechanism level.
- T_L is the deliverable output torque, when specified by the customer.


DT05 : FICHE PRODUIT ACTIONNEUR ROTATIF COMAT SPACE

En partenariat avec le CNES, l'entreprise COMAT Space a qualifié son actionneur rotatif spécialement conçu pour les dispositifs de pointage agiles d'instruments ou d'antennes et de déploiement d'appendices.

RA

Rotary actuators

Comat has qualified a new rotary actuator for space systems, specifically dedicated for agile pointing devices.



Copyrights: COMAT - Groupe Agave Industries | freepik.com

Telecommunication & Observation






Context

The major space applications of this rotary actuator are: the pointing of instruments or antennas, or the deployment of appendages.

Main benefits

- ✓ Positioning accuracy
- ✓ High agility
- ✓ ITAR-free

Mechanical features

Power Consumption 5 W	Holding Torque Unpowered 1.2 N.m	Step/Revolution 10.800
Output Torque 6 N.m	Total Assembly Weight 1.17 kg	Harmonic Drive Ratio 30
Holding Torque Powered 16 N.m	Output Step Angle 0.033°	Motor Step Angle 1°
		Max Output Step 12°/s

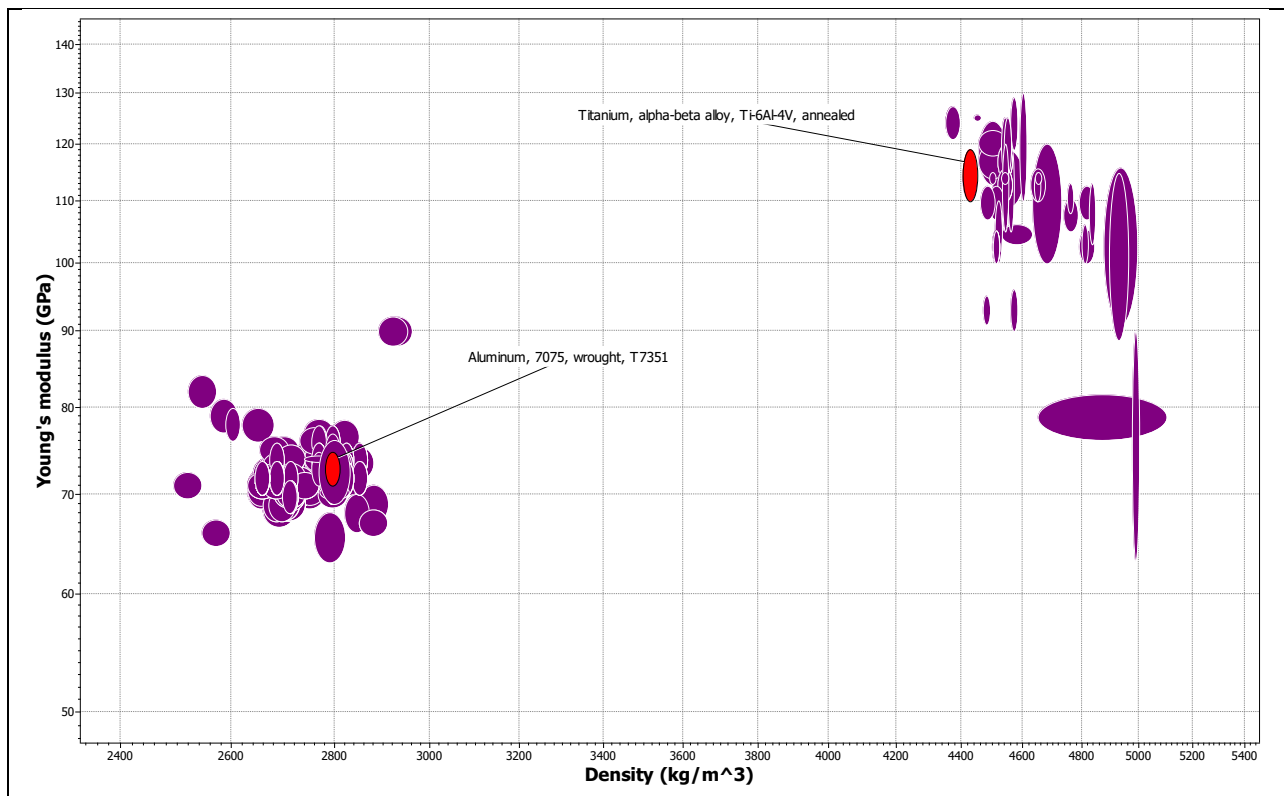
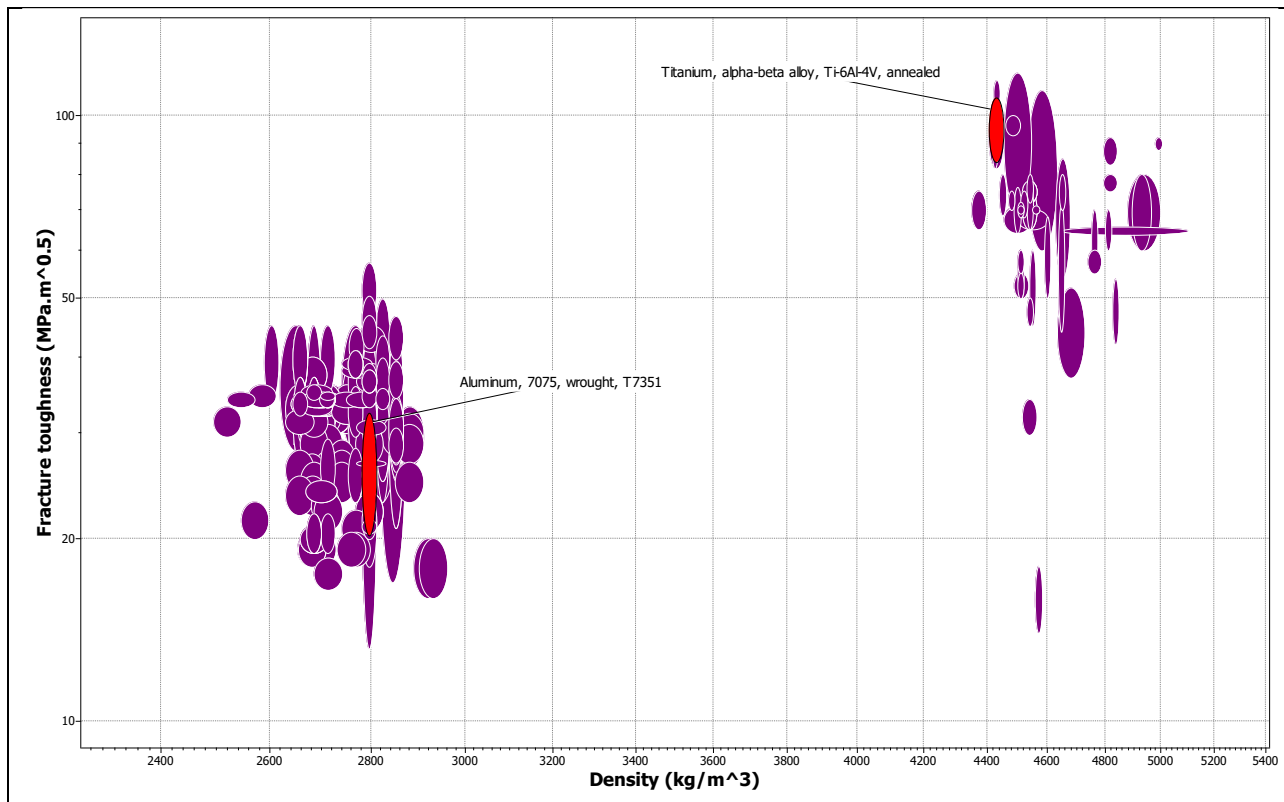


INSPIRED BY SPACE

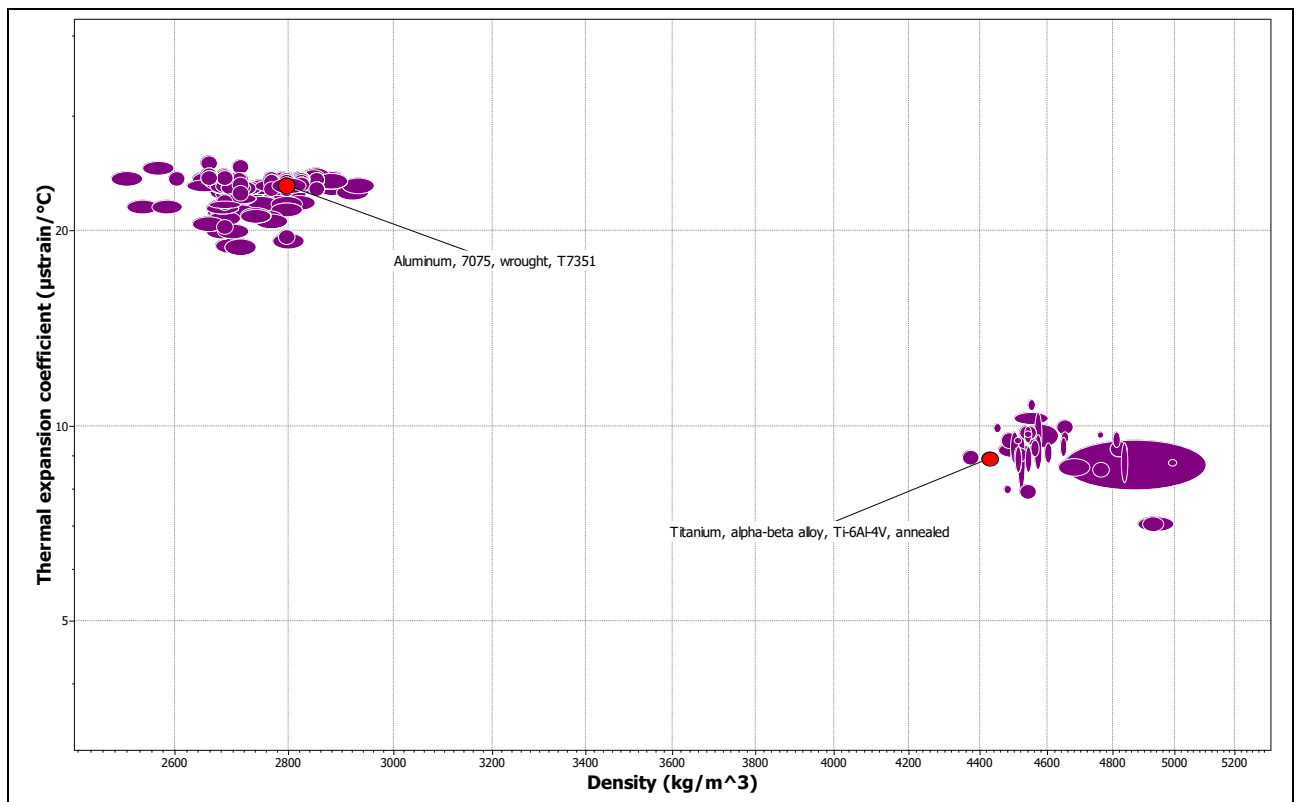
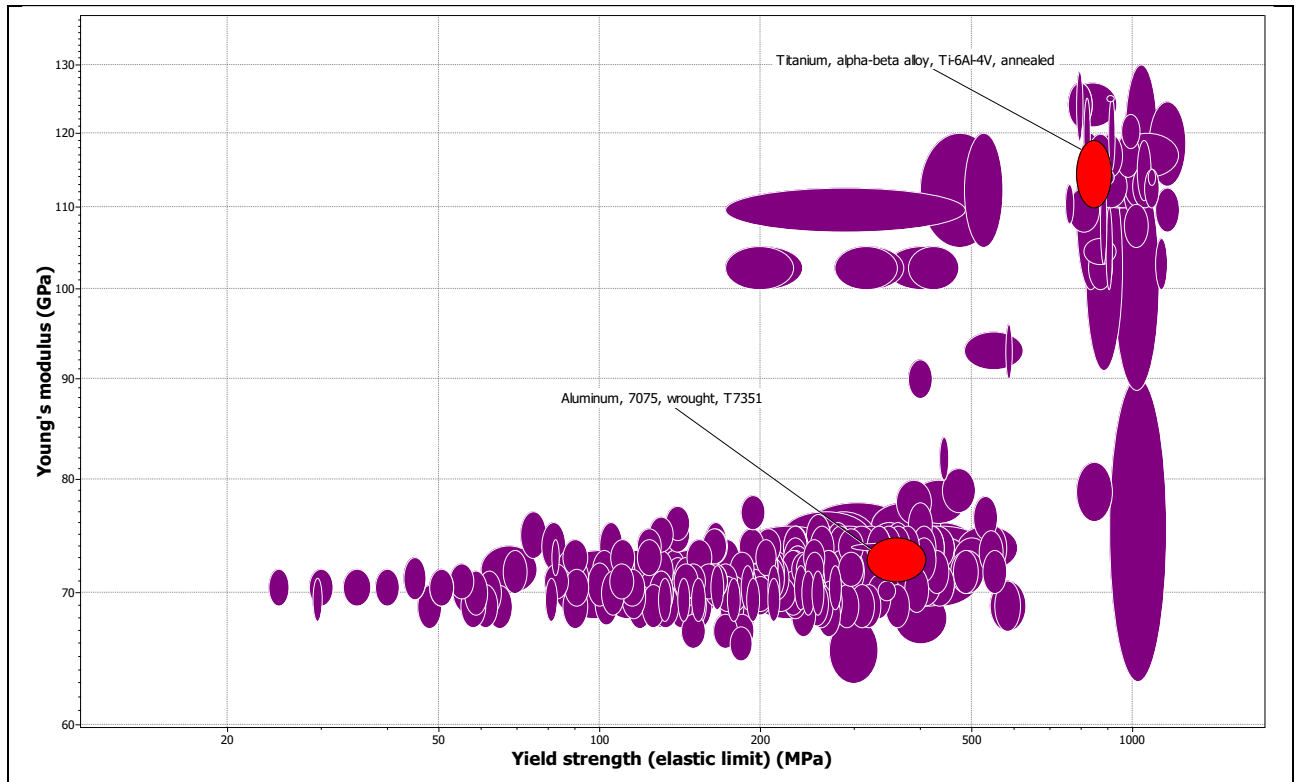
6 Chemin de Vignalis, 31130 Flourens, FRANCE
+33(0)5 612 426 16

comat.space

DT06 1/2 : DIAGRAMMES DE PROPRIETES DES MATERIAUX



DT06 2/2 : DIAGRAMMES DE PROPRIETES DES MATERIAUX



DT07 : BREVET – DEPOT EUROPEEN (EXTRAITS)

(19)  **Europäisches Patentamt**
European Patent Office
Office européen des brevets

(11)  **EP 1 154 166 B1**

(12) **EUROPEAN PATENT SPECIFICATION**

(45) Date of publication and mention of the grant of the patent:
13.10.2004 Bulletin 2004/42

(51) Int Cl.7: **F16B 7/00**

(21) Application number: **00304001.1**

(22) Date of filing: **12.05.2000**

(54) **Attachment fitting for composite material structures**

Befestigungsanordnung für Verbundwerkstoffstrukturen

Dispositif de fixation pour structures en matériau composite

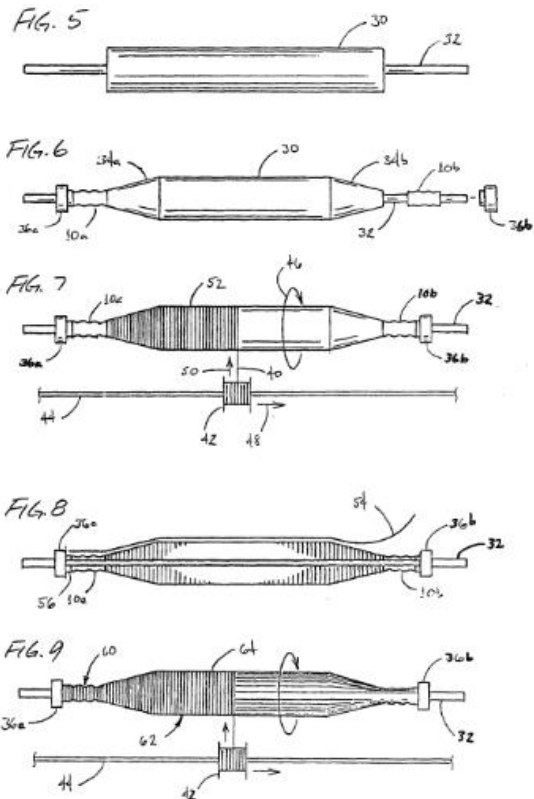
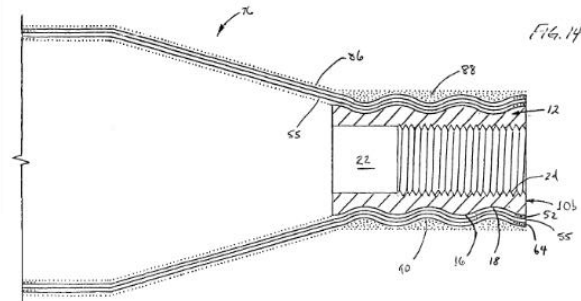
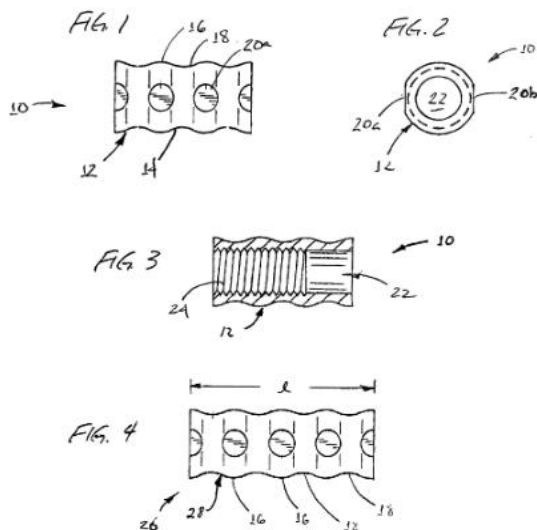
(84) Designated Contracting States:
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC NL PT SE

(72) Inventor: **Fillman, Gregory L.**
Washington 98059 (US)

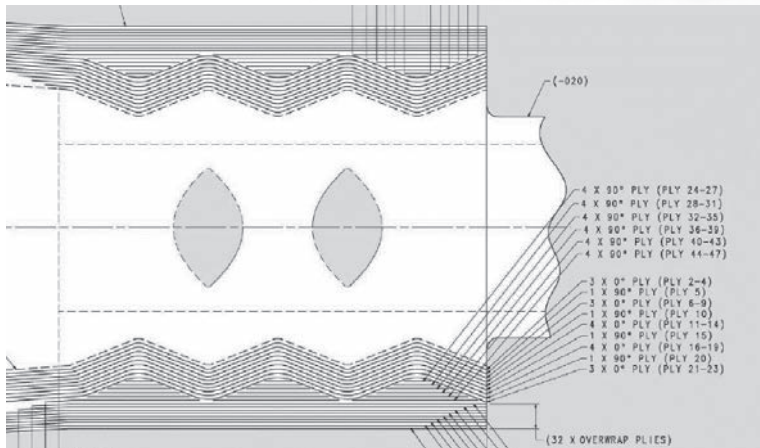
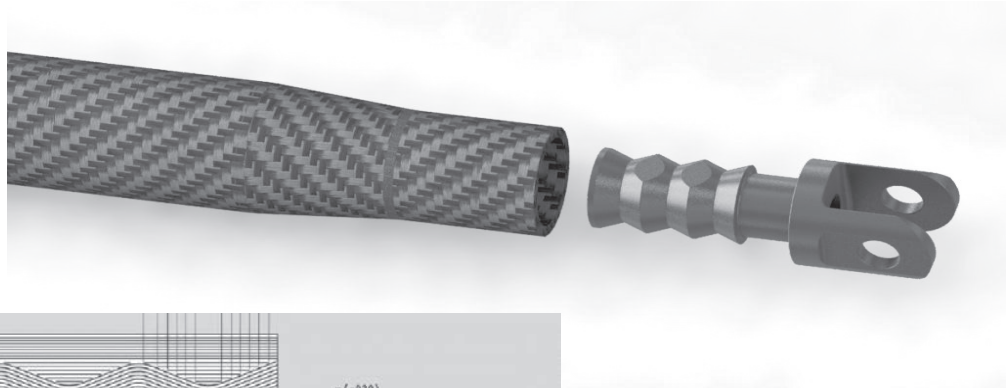
(43) Date of publication of application:
14.11.2001 Bulletin 2001/46

Revendications

- Dispositif de fixation supportant une charge (10, 26) pour une structure en matériau composite (76), ledit dispositif de fixation (10, 26) comprenant un élément de corps allongé (12, 28) comportant une partie de montage (20, 24) pour une fixation à une structure externe, **caractérisé en ce qu'une pluralité d'ondulations (16, 18) sont formées le long d'un côté longitudinal (14) dudit élément de corps (12, 28) pour venir en prise avec une matrice de fibres et de résine (52, 55, 64, 88) de ladite structure en matériau composite.**
- Dispositif de fixation (10, 26) selon la revendication 1, dans lequel ladite pluralité d'ondulations comprend une pluralité d'ondulations généralement sinusoidales (16, 18) formées dans ledit côté (14) dudit dispositif (10, 26).



DT08 : DETERMINATION DES COEFFICIENTS D'EXPANSION THERMIQUE – MATERIAUX COMPOSITES



	Masse volumique	Taux volumique	Module élastique	Coefficient de Poisson	Contrainte à la rupture	Expansion thermique longitudinale	Expansion thermique transversale
	ρ (kg.m ⁻³)	V_x (%)	E_x (GPa)	ν	σ_{RT} (MPa)	α (10 ⁻⁶ .K ⁻¹)	α_t (10 ⁻⁶ .K ⁻¹)
Fibre (f) : Carbone	1800	$V_f = 70$	$E_{if} = 235$	$\nu_f = 0,3$	4500	$\alpha_{fl} = -0,6$	$\alpha_{ft} = 8,5$
Matrice (m) : Époxy	1260	$V_m = 30$	$E_m = 3,6$	$\nu_m = 0,3$	110	$\alpha_m = 30$	$\alpha_m = 30$

Calcul des coefficients d'expansion thermique effectifs à l'échelle des plis : (d'après S.Drapier - 2021)

$$\alpha_L = \frac{(\alpha_{lf}E_{lf} - \alpha_m E_m)V_f + \alpha_m E_m}{(E_{lf} - E_m)V_f + E_m}$$

$$\alpha_T = \alpha_{ft}V_f + \alpha_m(1 - V_f) + \left(\frac{E_{fl}\nu_m - E_m\nu_{f,lt}}{E_L} \right) (\alpha_m - \alpha_{ft})(1 - V_f)V_f$$

avec : $E_L = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$

AUBERT&DUVAL



Alliage Titane

TA6V

Ti-6Al-4V

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES TYPIQUES

Etat recuit :

- Traction à température ambiante :
 - Résistance : $> 896 \text{ N/mm}^2$
 - Limite d'élasticité à 0,2 % : $> 827 \text{ N/mm}^2$
 - Allongement sur 5d : 10 %

COMPOSITION

Aluminium.....	6,00
Vanadium.....	4,00
Carbone.....	< 0,08
Fer.....	< 0,30
Oxygène.....	< 0,20
Azote.....	< 0,07
Titane.....	Base

PROPRIÉTÉS D'EMPLOI

- Alliage de Titane présentant une bonne résistance à la fatigue, à la propagation des criques, à la corrosion, au fluage (jusqu'à 300 °C).
- Alliage de titane du type alpha + beta.

APPLICATIONS

- Industries aéronautiques, spatiales et énergie : disques, aubes de compresseurs, pièces de structures, boulonnerie à froid et à chaud, etc.
- Industries chimiques.

TRAITEMENT THERMIQUE

- Recuit (Traitement d'emploi habituel) :
 - Chauffage à 700/750 °C
 - maintien 2 à 4 heures suivant sections
 - refroidissement à l'air.
- Recuit (pour diamètres équivalents < 40 mm) :
 - Trempe
 - Chauffage 825/850 °C, refroidissement à l'eau
 - Revenu
 - Dans le domaine 450/590 °C, suivant caractéristiques désirées.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

- Densité : 4,3
- Coefficient moyen de dilatation en m/m. °C :
 - entre 20 °C et 200 °C : $9,0 \times 10^{-6}$
- Module d'élasticité en N/mm² :
 - à 20 °C : 110×10^3
- Module de torsion en N/mm² : 45000
- Conductivité thermique en W.m/m². °C :
 - à 20 °C : 6,7
- Résistivité électrique en $\mu\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{cm}$:
 - à 20 °C : 170
- Perméabilité magnétique absolue en H/m : $1,269 \times 10^{-6}$
- Point de transformation :
 - Transus Beta : 1000 °C

FORGEAGE

- Température de dégrossissage : 1050 °C - 1100 °C
- Température de finition : 850 °C - 950 °C

TA6V-2

DT10 1/2 : CARACTERISTIQUES GENYMAB BI-BROCHES

Performance et Précision

- Banc en Granitan (granit reconstitué)
- Structure de haute stabilité
- Structure rigide : taux d'amortissement 8 fois plus élevé que la fonte
- Diminution par 3 de l'amplitude des vibrations en usinage



Résultats sur l'usinage

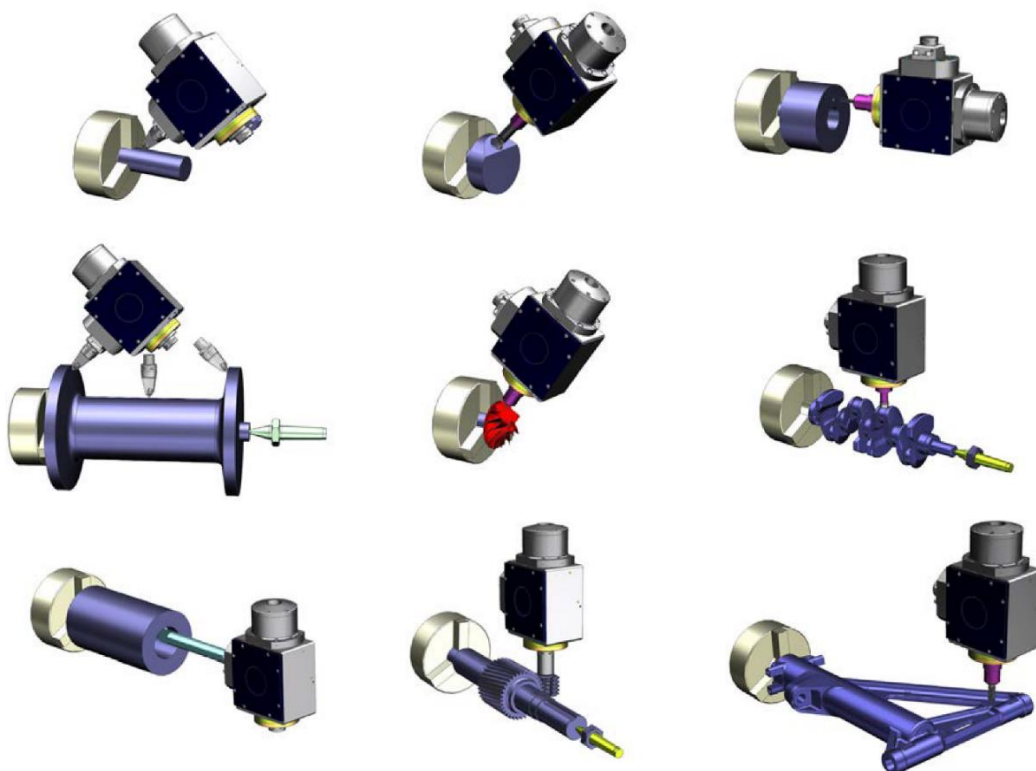
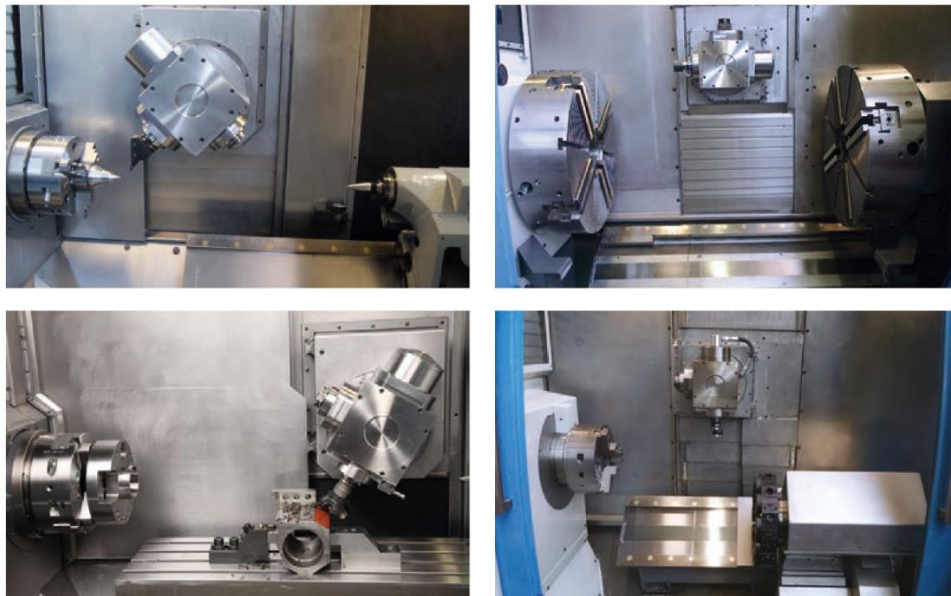
- Amélioration de l'état de surface
- Grande précision d'usinage
- Augmentation de la durée de vie des outils de 30%
- Tenue de cote dans le temps
- Permet l'usinage de matériaux durs

Données techniques

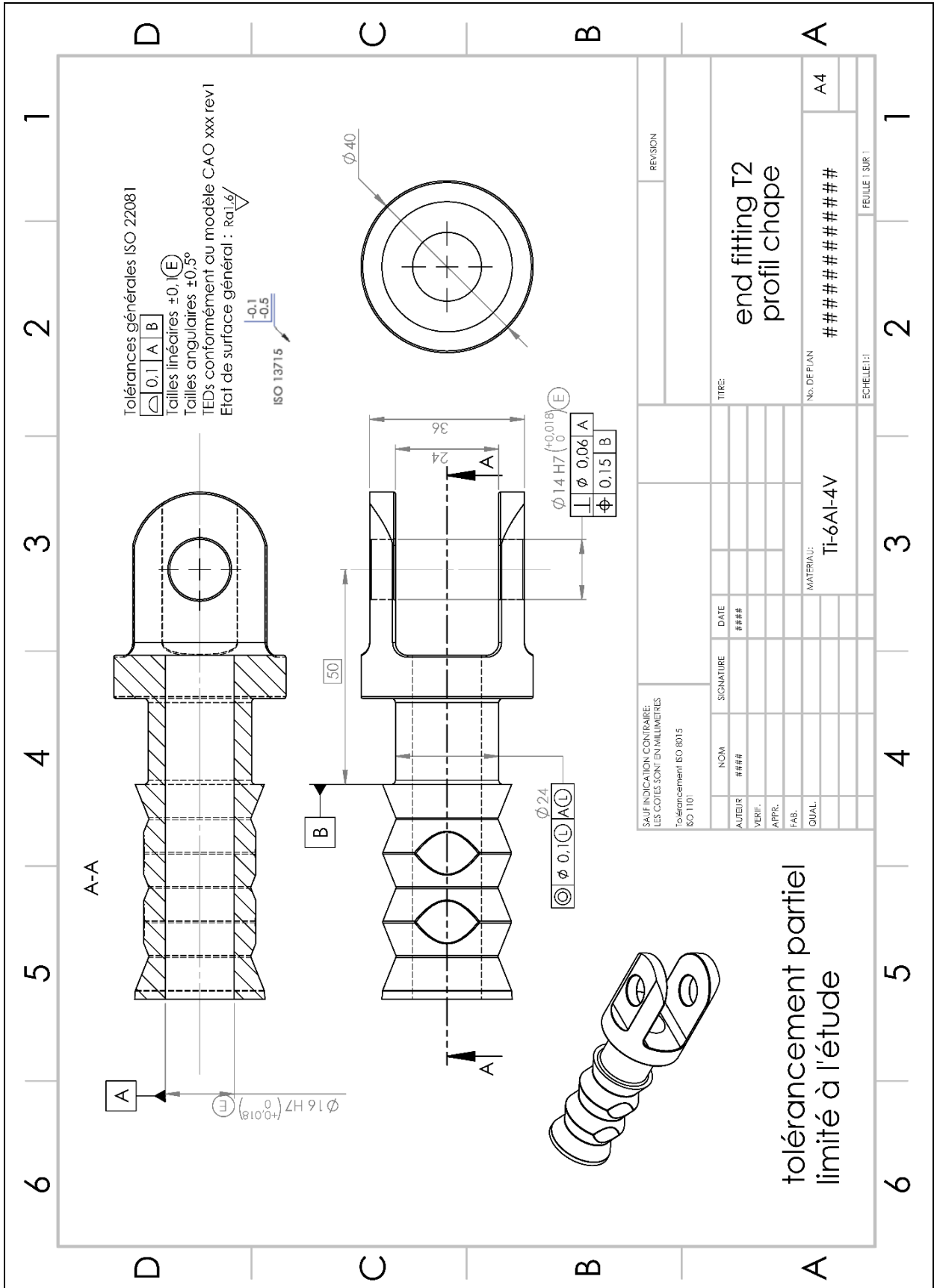
GENYMAB	400	630 C	630 L
Capacités			
Passage sur le banc (mm)	420	630	630
Passage maxi usinable en l'air (mm)	400	630	630
Longueur d'usinage maximum	884	915	1 460 - 2 040 - *3 150 - *4 150
Course verticale X (mm)	500	615	615
Course transversale Y (mm)	300	400	400
Course longitudinale Z (mm)	1 000	960	1 610 - 2 190 - 3 300 - 4 300
* Banc fonte			
Module de tournage - poupée porte-pièce			
Nez de broche	A1-8" - A2-8"	A1-8" - A2-8" - A1-11"	A2-8" - A1-11"
Alésage de broche (mm)	Ø73 - Ø105	Ø 73 - Ø105 - Ø122,5	Ø105 - Ø122,5
Puissance : Continue / 40% (kW)	24 / 26 - 37 / 39	24 / 26 - 37 / 39 - 51,5 / 57	37 / 39 - 51,5 / 57
Diamètre du mandrin (mm)	230 - 280	280 - 350 à 500	280 - 350 à 500
Vitesse de broche maxi (tr/min)	4 500 - 3 200	3 200 - 2 400	3 200 - 2 400
Résolution axe C	0,0001°	0,0001°	0,0001°
Module d'usinage - tête porte-outils			
Puissance broche de fraisage : Continue / 40% (kW)	10 / 14 - 15 / 29	10 / 14 - 15 / 29 - 25 / 37,5	10 / 14 - 15 / 29 - 25 / 37,5
Vitesse de broche maxi (tr/min)	6 000 - 8 000 - 12 000 - 15 000	6 000 - 8 000 - 12 000 - 15 000	7 000 - 8 000 - 12 000 - 15 000
Indexage mécanique de la tête	tous les 2,5°	tous les 2,5°	tous les 2,5°
Course axe B	320° continue	320° continue	320° continue
Changeurs d'outils			
Capacité du magasin d'outils	28 - 36 - 50 - 60	28 - 36 - 50 - 60	28 - 36 - 50 - 60
Types d'attachement	ISO 40 - HSK-T63 - CAPTO C5 / C6	ISO 40 - HSK-T63 - CAPTO C5 / C6	ISO 40 - HSK-T63 - CAPTO C5 / C6
Équipements			
Banc avant avec contre-pointe	Option	Option	Dans la base
Longueur maxi face broche - contrepointe (mm)	1 000	1 500	2 000 - 2 600 - 3 630 - 4 630
Diamètre de passage sur le banc (mm)	420	630	630
Diamètre / course du fourreau (mm)	Ø 90 / 100	Ø 110 / 160 - Ø 150 / 160	Ø 110 / 160 - Ø 150 / 160
Table rainurée et contre-pointe	Option	Option	
Longueur / Largeur de la table (mm)	1 400 / 340	1 400 / 340	
Diamètre de passage sur la table (mm)	420	600	
Longueur entrepointe (mm)	1 150	1 150	
Diamètre - course du fourreau (mm)	Ø 90 - 100	Ø 110 - 160	
Table rainurée amovible et banc avant	Option	Option	
Longueur / Largeur (mm)	500 / 400	600 / 400	
Diamètre de passage sur la table (mm)	280	440	
Broche de Reprise poupée mobile	Option	Option	Option
Nez de broche	A1-6"	A1-8" - A2-8" - A1-11"	A1-8" - A2-8" - A1-11"
Alésage de broche (mm)	Ø 62	Ø 73 - Ø 105 - Ø122,5	Ø 73 - Ø 105 - Ø122,5
Puissance: Continue / 40% (kW)	18 / 21	24 / 26 - 37 / 39 - 51,5 / 57	24 / 26 - 37 / 39 - 51,5 / 57
Vitesse de broche maxi (tr/min)	4 500	4 500 - 3 200 - 2 400	4 500 - 3 200 - 2 400
Distance maxi entre faces broches (mm)	1 230	1 500	2 050 - 2 650 - 3 680 - 4 680
Diamètre du mandrin (mm)	210	230 - 350 - 500	230 - 350 - 500

DT10 2/2 : CARACTERISTIQUES GENYMAB BI-BROCHES

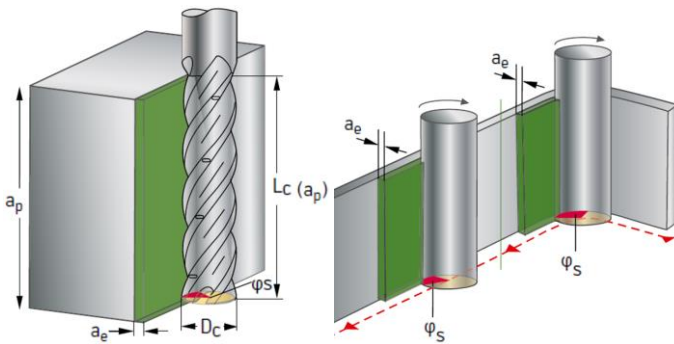
GENYMAB



DT11 : DEFINITION END-FITTING TYPE2 "CHAPE"



DT12 : DONNEES FRAISAGE DYNAMIQUE (SOURCE WALTER PROTOTYP)



Le fraisage dynamique (high Dynamic Cutting – HDC) repose sur les facteurs suivants :

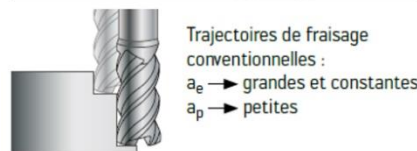
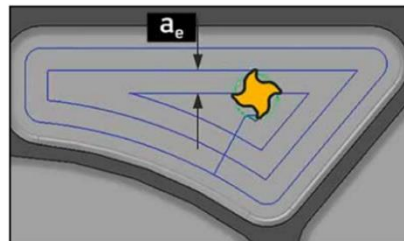
- Débit de copeaux par unité de temps maximum (Q_{max}) ;
- Petite largeur de coupe radiale (a_e) ;
- Grande profondeur de coupe axiale (a_p) ;
- Constante h_m = épaisseur de copeau Moyenne constante (h_m) ;
- Angle d'engagement (φ_s) déterminé en fonction du matériau à usiner.

Lors d'un fraisage trochoïdal statique (de : trochos = roue), l'outil de fraisage se déplace en trajectoires circulaires (trochoïdales).

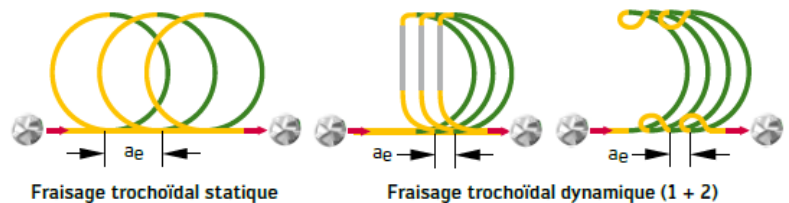
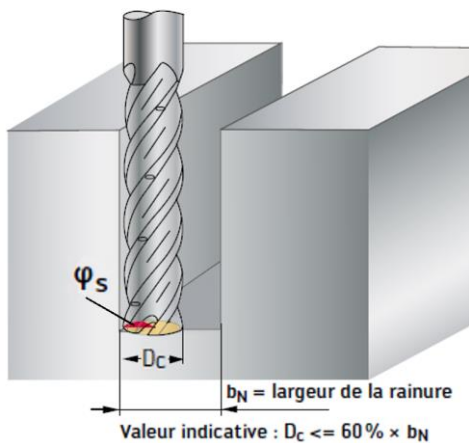
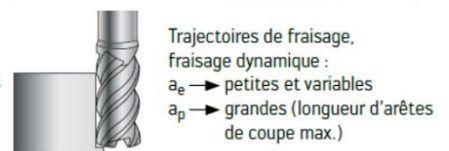
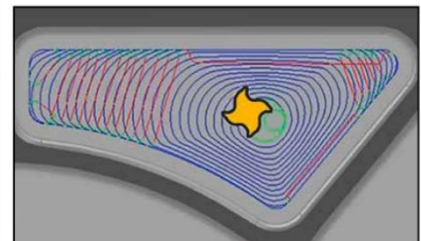
Dans le cadre de stratégies de fraisage dynamique, les trajectoires de l'outil sont ajustées de façon optimale à la pièce à usiner et évitent les trajets à vide. Cela augmente le débit de copeaux par unité de temps.

Comparaison fraisage conventionnel et fraisage dynamique :

High Performance Cutting (HPC)



High Dynamic Cutting (HDC)



Recommandations pour le choix d'outil pour la réalisation d'une rainure dans le cas d'une stratégie de fraisage dynamique :

- Identification de D_c et L_c selon la géométrie à réaliser ;
- Détermination de φ_s en fonction de D_c et du matériau ;
- Calcul de a_e ;
- Choix de paramètres de coupe adaptés aux conditions géométriques précédentes.

Angle d'engagement (φ_s) ϕ [°]

a_p	ISO P		ISO M	ISO S
	ST37 – 490 N/mm ²	42CrMo4 – 1.000 N/mm ²	1.4301 – 675 N/mm ²	TAI6V4 – 1.100 N/mm ²
$2 \times D_c$	53°	42°	31°	28°
$3 \times D_c$	42°	31°	20°	16°
$4 \times D_c$	31°	20°	16°	14°
$5 \times D_c$	23°	18°	14°	11°