

SCIENTES INDUSTRIELLES

Système de déploiement d'une antenne de satellite

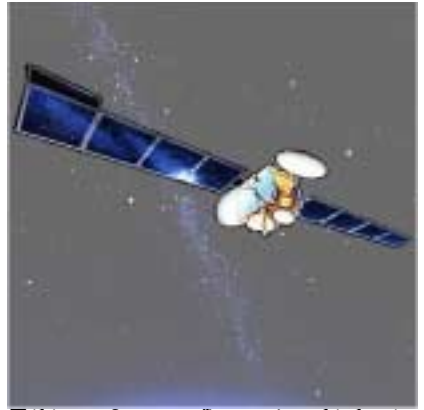
Partie I - Présentation

La France ayant décidé très tôt de disposer d'un système national de télécommunications, quatre satellites de seconde génération Télécom 2 ont été mis en orbite géostationnaire entre décembre 1991 (Télécom 2A, pour les besoins des Jeux Olympiques d'Albertville) et août 1996 (Télécom 2D).

Ces satellites, dont la durée de vie est de dix ans, peuvent acheminer 16000 conversations téléphoniques simultanées entre les Dom-Tom et la métropole, relayer 11 programmes de télévision au-dessus de l'Europe et assurer toute la gamme des services télématiques. Ils transportent en outre la charge utile Syracuse, système français de télécommunication militaire. L'ensemble de ces missions est assuré par un ensemble de dix « répéteurs » en bande C (6/4 GHz) et deux grandes antennes à réflecteur bien visibles sur les photos ci-contre.

Ces antennes à réflecteur de 2,2 m de diamètre, permettent de concentrer la puissance d'émission ou de réception des signaux radio-électriques du satellite sur une zone déterminée (l'Europe par exemple). Ces deux réflecteurs sont stockés et immobilisés 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 l'orbite géostationnaire, les réflecteurs sont déployés et restent dans cette position jusqu'à la fin de la vie du satellite.

L'immobilisation de chaque réflecteur est assurée en trois points par trois tripodes de conception identique. La libération du réflecteur est effectuée par la mise à feu des écrous pyrotechniques qui équipent chaque « point » de fixation. Le déploiement est réa-



Télécom 2 en configuration déployée



Télécom 2 en cours d'essais (configuration stockée)

Filière PSI

lisé par une rotation du réflecteur autour de deux articulations reliées par un axe. La motorisation est obtenue à l'aide des ressorts précontraints fixés à chaque articulation et la vitesse angulaire de déploiement est régulée grâce à un régulateur centrifuge installé sur une des articulations, afin de limiter le choc final lors de la mise en position opérationnelle déployée. À ce moment, l'immobilisation de l'antenne est assurée par un système de verrouillage sans jeu.

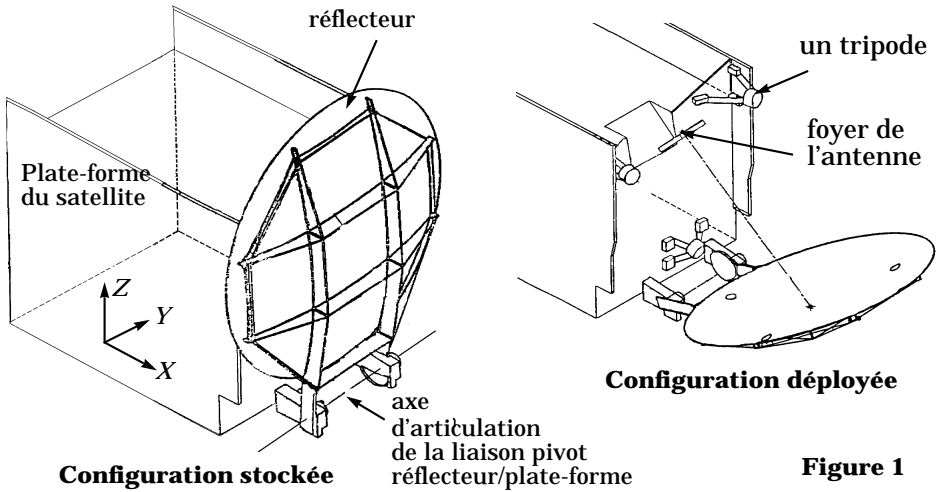
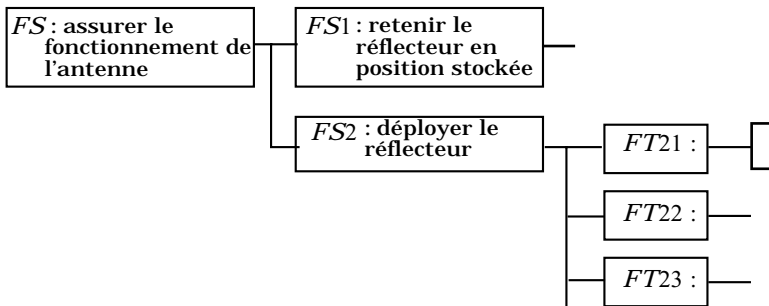


Figure 1

Q.1 - Représenter les différentes fonctions techniques assurées par les dispositifs de fixation et de déploiement de l'antenne à l'aide d'un diagramme FAST et donner la solution technique associée à chaque fonction.



Les différentes fonctions étant recensées, il s'agit maintenant de les caractériser. Les principaux critères de dimensionnement des dispositifs de fixation et de déploiement de l'antenne sont :

- S_1 : angle de déploiement : 65° ,
- S_2 : capacité de réglage en position déployée : $\pm 0, 25^\circ$,
- S_3 : capacité de réglage à l'interface du réflecteur
et des points de fixation : ± 10 mm ,
- S_4 : raideur de l'antenne (en supposant la plate-forme rigide) :
1ère fréquence de résonance en position déployée : 5 Hz minimum,
1ère fréquence de résonance en position repliée : 70 Hz minimum.
- S_5 : résistance mécanique aux efforts à l'interface avec la plate-forme, pendant le lancement :
composante de l'effort normale au plan d'interface : 2500 N maximum,
composante de l'effort tangentielle au plan d'interface : 2000 N maximum.
- S_6 : précision d'orientation du réflecteur en position déployée : $0, 02^\circ$.

Q.2 - Associer chacun des critères spécifiés à la (ou les) fonction(s) de service correspondante(s) FS_1 ou FS_2 . La réponse sera présentée sous la forme d'un tableau :

Fonctions	Critères	Niveaux
FS_1 : - - - - -	- - - - -	- - - - -

Des fonctions contraintes pourront éventuellement intervenir dans le tableau.

La vérification des critères S_4 et S_5 fait l'objet du paragraphe suivant.

Le dispositif pyrotechnique de libération du réflecteur et le dispositif de déploiement sont étudiés par la suite.

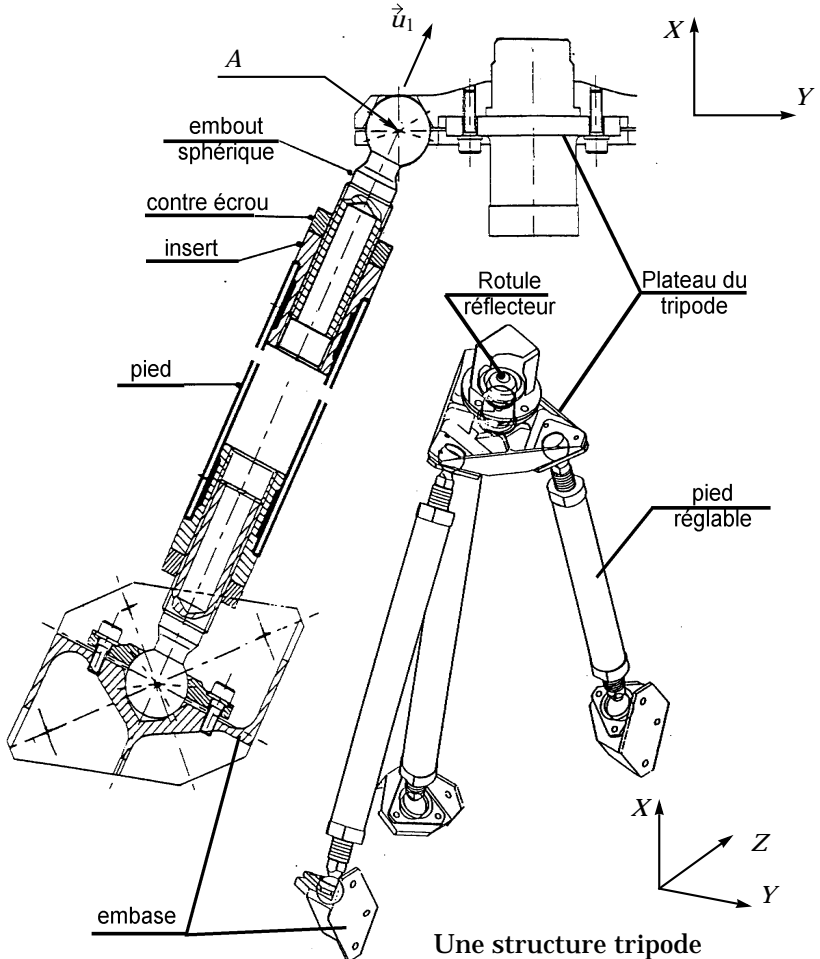
Nota : *l'attention des candidats est attirée sur l'importance de la dernière question dans l'évaluation ; cette question 28 peut être traitée sans avoir répondu à l'ensemble des questions précédentes, mais elle exige néanmoins une lecture attentive de l'ensemble du sujet.*

Partie II - Fixation du réflecteur sur la plate-forme

La fixation du réflecteur sur la plate-forme doit assurer deux fonctions : d'une part, autoriser une grande capacité de réglage lors du montage au sol pour éviter de déformer le réflecteur et, d'autre part, supporter les efforts lors du lancement sans solliciter le mécanisme de déploiement. On se propose dans cette partie de vérifier que ces deux fonctions sont correctement assurées.

II - 1 - Fonction 1 : autoriser la capacité de réglage attendue lors du montage au sol

Le maintien du réflecteur en position repliée est assuré par trois structures tripodes identiques. Chaque pied de la structure est pourvu à chaque extrémité d'un embout sphérique monté dans un insert. Le plateau supérieur du tripode est lui-même lié au réflecteur par une rotule, non représentée sur le croquis détaillé du pied. La longueur des pieds est réglable. Lorsque tous les réglages du réflecteur sont terminés, les embouts sphériques et les rotules du réflecteur sont ensuite bloqués par rapport au plateau du tripode.



Une structure tripode

Q.3 - Tracer le schéma cinématique 3D de la structure tripode, une fois effectué le réglage de la hauteur des pieds mais avant le blocage des embouts sphériques et des rotules du réflecteur.

*Analyse des mobilités du mécanisme **avant** blocage des embouts sphériques (lorsque le réglage de la hauteur des pieds est effectué).*

La liaison pivot entre le réflecteur et la plate-forme est réalisée de façon isostatique par les deux articulations.

Q.4 - Montrer que la mobilité utile et le degré d'hyperstatisme du mécanisme constitué par le réflecteur et les trois structures tripodes, en mouvement par rapport à la plate-forme du satellite sont respectivement de 1 et 0. Identifier les mobilités internes.

Q.5 - Déterminer et justifier par une analyse de votre choix la liaison équivalente réalisée par un pied entre l'embase (fixée rigidement sur la plate-forme du satellite) et le plateau tripode. Donner les caractéristiques géométriques de cette liaison (point, normale ou axe). Déterminer, sans développer de calculs, le nombre de mobilités de la liaison équivalente isostatique réalisée par les trois pieds entre l'embase et le plateau du tripode.

*Analyse de l'hyperstatisme du mécanisme **après** blocage des embouts sphériques*

On bloque tout d'abord un seul des six embouts sphériques d'un tripode entre un des trois pieds et l'embase, en réalisant ainsi une liaison encastrement entre ce pied et l'embase.

Q.6 - Déterminer les conséquences de ce blocage sur les mobilités internes et utile du mécanisme constitué par le réflecteur et les trois structures tripodes.

Q.7 - Combien d'inconnues statiques de liaison supplémentaires sont introduites par le blocage d'un seul embout sphérique ? En déduire l'influence du blocage d'un seul des six embouts sphériques d'un tripode sur l'hyperstatisme du mécanisme.

À la fin des réglages au sol, tous les embouts sphériques et les rotules réflecteur du mécanisme sont bloqués. Le mécanisme est alors constitué de neuf pieds en liaison encastrement avec l'embase et avec les trois plateaux des tripodes. Ceux-ci sont également en liaison encastrement avec le réflecteur, lui-même en liaison pivot avec la plate-forme du satellite.

Q.8 - Déterminer le degré d'hyperstatisme du mécanisme en considérant que les inconnues statiques dans les liaisons encastrement au niveau des embouts sphériques, sont des grandeurs que l'on souhaite déterminer pour choisir le matériau constituant chaque embout (en effet, deux types de matériau sont possibles : inox ou titane, moins résistant mais plus léger).

Q.9 - Quel est l'intérêt d'un tel degré d'hyperstatisme. Pourquoi peut-on considérer que les déformations de la parabole du réflecteur restent néanmoins acceptables ?

II - 2 - Fonction 2 : supporter les efforts de lancement sans faire travailler le mécanisme de déploiement

La fixation du réflecteur sur la plate-forme est dimensionnée pour résister aux sollicitations pendant la phase de lancement, lorsque le satellite est fixé dans la coiffe de la fusée et le réflecteur en position repliée. Celles-ci proviennent soit des accélérations importantes au lancement de la fusée (accélérations dites « quasi-statiques »), soit de vibrations. Le dimensionnement sera vérifié successivement pour ces deux cas de charge.

II - 2 - A1 - Détermination des efforts « quasi-statiques »

Par rapport au repère terrestre supposé galiléen, les niveaux d'accélération pendant le lancement sont considérés constants : $20g$ suivant les directions \vec{X} et \vec{Z} et $10g$ suivant la direction \vec{Y} (les directions \vec{X} , \vec{Y} , \vec{Z} sont définis sur la figure 1). Pendant cette phase, le satellite n'est soumis à aucun mouvement de rotation. La masse du réflecteur avec les dispositifs de fixation et de déploiement est de $21,2 \text{ kg}$. g est l'accélération de pesanteur. On prendra $g = 10 \text{ m/s}^2$.

Q.10 - Déterminer numériquement le torseur dynamique galiléen du réflecteur au point G , centre de gravité du réflecteur.

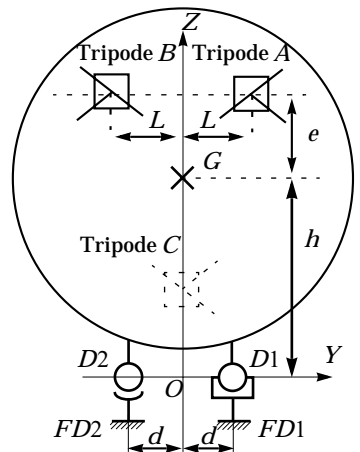
II - 2 - A2 - Optimisation de la position des tripodes

On se place dans l'hypothèse défavorable où il n'y a seulement que deux tripodes A et B , positionnés symétriquement par rapport à l'axe Z , qui participent à la fixation du réflecteur.

Hypothèses simplificatrices :

- problème plan (\vec{Y}, \vec{Z}),
- les composantes des actions mécaniques sur l'axe \vec{Z} sont égales ($Z_A = Z_B$ et $Z_{D1} = Z_{D2}$),
- les composantes de moment autour de l'axe \vec{X} des actions mécaniques en A et B sont nulles.

Q.11 - Déterminer la position notée e de ces tripodes suivant l'axe \vec{Z} , qui minimise les efforts sur le mécanisme de déploiement ($D1, D2$) lorsque le système est soumis à des accélérations « quasi-statiques » suivant l'axe \vec{Y} uniquement (l'action de pesanteur est supposée négligeable devant les autres actions). Préciser le système isolé et le choix de l'équation utile du PFD qui permet de conclure.



Q.12 - Même avec ces hypothèses simplificatrices, est-il possible de déterminer analytiquement un optimum pour la position d'un système de fixation avec trois tripodes ? Expliquer pourquoi en se référant au résultat de la question Q.8 ?

II - 2 - A3 - Vérification des efforts à l'interface avec la plate-forme

La géométrie des points de fixation du réflecteur sur la plate-forme est définie ainsi :

- Tripode *A* : points de fixation A_1 , A_2 , A_3 .
- Tripode *B* : points de fixation B_1 , B_2 , B_3 .
- Tripode *C* : points de fixation C_1 , C_2 , C_3 .
- Mécanisme de déploiement : points de fixation FD_1 et FD_2 .

Le calcul des efforts à l'interface avec la plate-forme ne pouvant être mené analytiquement, on donne le tableau des résultats issus d'un calcul numérique, exprimés dans les axes plate-forme \vec{X} , \vec{Y} , \vec{Z} . Ils représentent les composantes du torseur des actions mécaniques exercées par le satellite sur le réflecteur dues aux accélérations « quasi-statiques ».

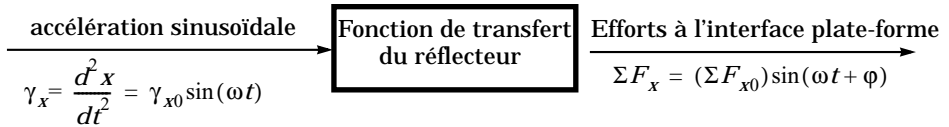
Point d'interface P_i	$F_X(N)$	$F_Y(N)$	$F_Z(N)$	M_X (Nm) en P_i	M_Y (Nm) en P_i	M_Z (Nm) en P_i	M_X (Nm) en G	M_Y (Nm) en G	M_Z (Nm) en G
FD_1	473	95	1055	8	-258	9	-215	-478	129
FD_2	404	161	567	12	-129	22	438	-402	-204
A_1	-498	9	506	15	-6	18	-448	-266	-433
A_2	2231	441	593	5	-10	-9	-732	1163	1891
A_3	-500	196	-9	-7	-13	7	-88	-238	-409
B_1	420	-1	-60	1	-4	11	-44	307	-308
B_2	442	9	225	-6	1	10	161	260	-327
B_3	412	118	163	-5	8	2	27	263	-263
C_1	107	32	104	1	-9	1	20	-57	-3
C_2	1256	540	1029	2	-21	9	479	-951	-86
C_3	-508	521	66	-5	-2	8	403	396	11
Total	4239	2121	4239				2	-2	-1

Q.13 - Vérifier la validité de ces résultats, en expliquant la démarche retenue. La spécification *S5* est-elle vérifiée ?

Q.14 - Calculer le taux de répartition (en pourcentage) des efforts provenant du mécanisme de déploiement et du système de fixation. Conclure sur le respect de l'objectif (II-2) du système de fixation du réflecteur.

II - 2 - B - Détermination des efforts dus aux vibrations

Lorsque le réflecteur est soumis à des vibrations, il peut être modélisé comme un système linéaire, soumis à des accélérations sinusoïdales :



Le diagramme de Bode de la fonction de transfert mécanique du réflecteur en position repliée est représenté sur le document réponse : il s'agit de la réponse fréquentielle des efforts à l'interface avec la plate-forme (somme des efforts d'interface sur l'axe \vec{X} , exprimés en Newton) pour une entrée sinusoïdale en accélération sur l'axe \vec{X} d'amplitude 1 g .

Q.15 - Identifier le gain statique. Donner la relation liant le gain statique et une grandeur caractéristique du réflecteur en utilisant une équation du PFD. Commenter.

Q.16 - À partir du diagramme de Bode, donner sous forme canonique l'expression littérale de la fonction de transfert du réflecteur. Tracer l'allure du diagramme asymptotique et identifier les caractéristiques de la première résonance (fréquence propre et coefficient d'amortissement) en négligeant l'impact des autres pôles de la fonction de transfert. La spécification S4 est-elle vérifiée ?

Q.17 - Les vibrations d'entrée sont supposées identiques pour les trois axes, avec le profil suivant :

- pour ω variant entre 5 rad/s et 100 rad/s :
déplacement sinusoïdal $x = x_0(\sin \omega t)$ d'amplitude $x_0 = 10$ mm .
- pour ω variant entre 100 rad/s et 5000 rad/s :
accélération sinusoïdale $\gamma_x = \frac{d^2x}{dt^2} = \gamma_{x0} \sin(\omega t)$ d'amplitude $\gamma_{x0} = 10$ g .

L'amplitude du mouvement d'entrée peut être représentée sous la forme d'un diagramme semi-logarithmique : par exemple, entre 5 rad/s et 100 rad/s , l'amplitude exprimée en déplacement, est représentée par une droite horizontale de module -40 dB ($20 \log 10^{-2}$ m) .

Les niveaux de vibrations en déplacement et en accélération sont-ils cohérents pour la pulsation $\omega = 100$ rad/s ? Tracer sous la forme d'un diagramme semi-logarithmique dans la bande 5 rad/s à 5000 rad/s , l'amplitude des vibrations

d'entrée exprimées en déplacement. Justifier les différentes pentes du diagramme obtenu. Tracer de même le niveau des vibrations d'entrée exprimées en accélération et justifier les différentes pentes du nouveau diagramme obtenu.

Q.18 - Le comportement dynamique du réflecteur et du dispositif de fixation sur la plate-forme est validé par des essais de vibrations sur un exemplaire du satellite Télécom 2 (le modèle de qualification) spécialement dédié aux essais d'environnement (vibrations, essais thermiques, essais dans le vide...).

Calculer l'amplitude de l'accélération pour $\omega = 5 \text{ rad/s}$ et l'amplitude du déplacement pour $\omega = 5000 \text{ rad/s}$. Sachant que les essais de vibrations sont pilotés par des capteurs de types différents, justifier pourquoi les niveaux de vibrations sont exprimés en déplacement dans les basses fréquences et en accélération dans les hautes fréquences et préciser le type de capteur qui doit être utilisé dans chaque cas.

Q.19 - Les niveaux de vibrations donnés ci-dessus constituent une enveloppe forfaitaire de la réalité du lancement du satellite, et conduisent à surdimensionner puis à surtester le satellite et son réflecteur s'ils sont appliqués sans réduction de niveau dans certaines bandes de fréquence. Or, les contraintes de réduction de masse imposent un dimensionnement au plus près de la réalité du vol. En conséquence, des réductions des niveaux d'amplitude vibratoires sont appliqués pendant les essais pour éviter de détériorer le réflecteur : le niveau maximum des efforts d'interface obtenu lors de ces essais ne doit pas dépasser le niveau maximum requis en chargement « quasi-statique », soit 4240 N sur l'axe \vec{X} .

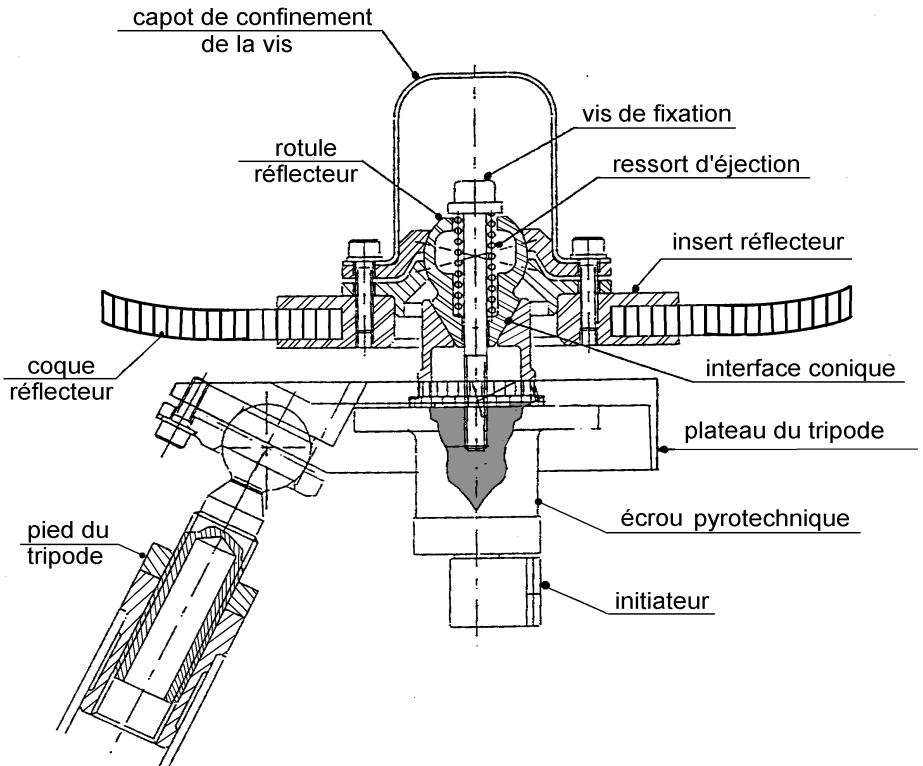
Pour cela, on déterminera les efforts maximum induits par les vibrations en utilisant le diagramme de Bode de la fonction de transfert mécanique du réflecteur. Si nécessaire, on modifiera ensuite le profil d'entrée des accélérations dans les bandes de pulsation où les efforts dépassent le niveau maximum requis.

Le critère est-il vérifié avec le profil d'accélération demandé ? Sinon proposer une modification locale du diagramme d'amplitude du niveau d'accélération d'entrée (par exemple en créant un trou au voisinage de la résonance, et en calculant le niveau maximum de l'accélération au voisinage de cette fréquence).

Partie III - Dispositif pyrotechnique de libération du réflecteur

Il s'agit dans cette partie de comprendre le fonctionnement du mécanisme permettant de libérer le réflecteur une fois que le satellite est mis à poste.

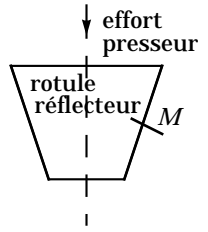
Chacun des trois tripodes de fixation est constitué de deux sous-ensembles :



- le premier assure l'interface avec le satellite et reçoit l'ensemble des composants qui restent, après séparation, solidaires du satellite (pieds et plateau du tripode, écrou pyrotechnique et initiateur),
- le second, solidaire du réflecteur, est composé de la rotule réflecteur, de la vis de fixation avec ressort d'éjection et du capot de confinement.

Q.20 - Expliquer le fonctionnement du système de libération. Représenter sur trois schémas technologiques différents la position des différents constituants lorsque le réflecteur est en position stockée, puis lorsque la vis est libérée et enfin lorsque le réflecteur est en cours de déploiement. Justifier la présence du capot de confinement.

Q.21 - Sur un schéma représentant l'interface conique entre la rotule réflecteur et la partie supérieure du plateau du tripode, représenter l'action mécanique élémentaire $d\vec{F}_{\text{plateau/rotule}}$ exercée en un point M de la surface de contact, lorsque le réflecteur est stocké, en se plaçant à la limite du glissement. Le ressort exerce dans ce cas un effort presseur sur la rotule réflecteur. Représenter sur ce même schéma l'action normale $d\vec{N}_{\text{plateau/rotule}}$, l'action tangentielle $d\vec{T}_{\text{plateau/rotule}}$, l'angle de frottement φ et le demi-angle d'ouverture du cône α . La pression de contact est supposée uniformément répartie sur la surface conique.



Q.22 - Lorsque la vis est libérée et que le réflecteur commence à se déployer, mettre en place sur un schéma identique l'action mécanique élémentaire pour assurer la libération du réflecteur sans aucun effort de déploiement au niveau de l'axe d'articulation. Y représenter les mêmes grandeurs. En déduire d'abord la relation entre α et φ qui conduit au coincement (arc-boutement) de la rotule réflecteur, puis la condition qui permet la libération du réflecteur sans effort de déploiement.

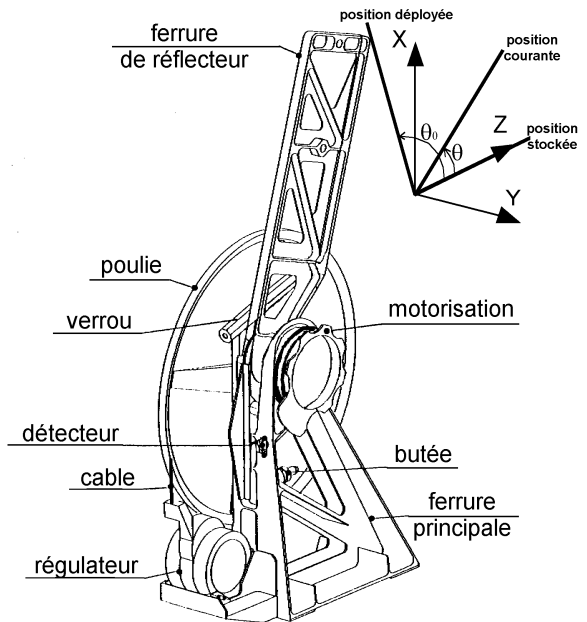
Partie IV - Dispositif de déploiement

Le déploiement du réflecteur est motorisé par deux ressorts. L'objectif de cette partie porte tout d'abord sur le choix du ressort qui permettra de respecter les contraintes du système, puis sur la proposition d'une nouvelle solution avec moteur électrique.

Chacune des deux articulations D_1 et D_2 assurant le déploiement du réflecteur est constituée :

- d'une ferrure principale liée à la structure du satellite,
- d'une ferrure liée au réflecteur (la liaison mécanique entre les deux

Dessin de l'articulation avec régulateur



ferrures est soit une liaison rotule pour D_2 soit une linéaire annulaire pour D_1),

- d'une butée ajustable avec détecteur,
- d'un système de verrouillage,
- d'un ressort hélicoïdal pour motoriser le déploiement.

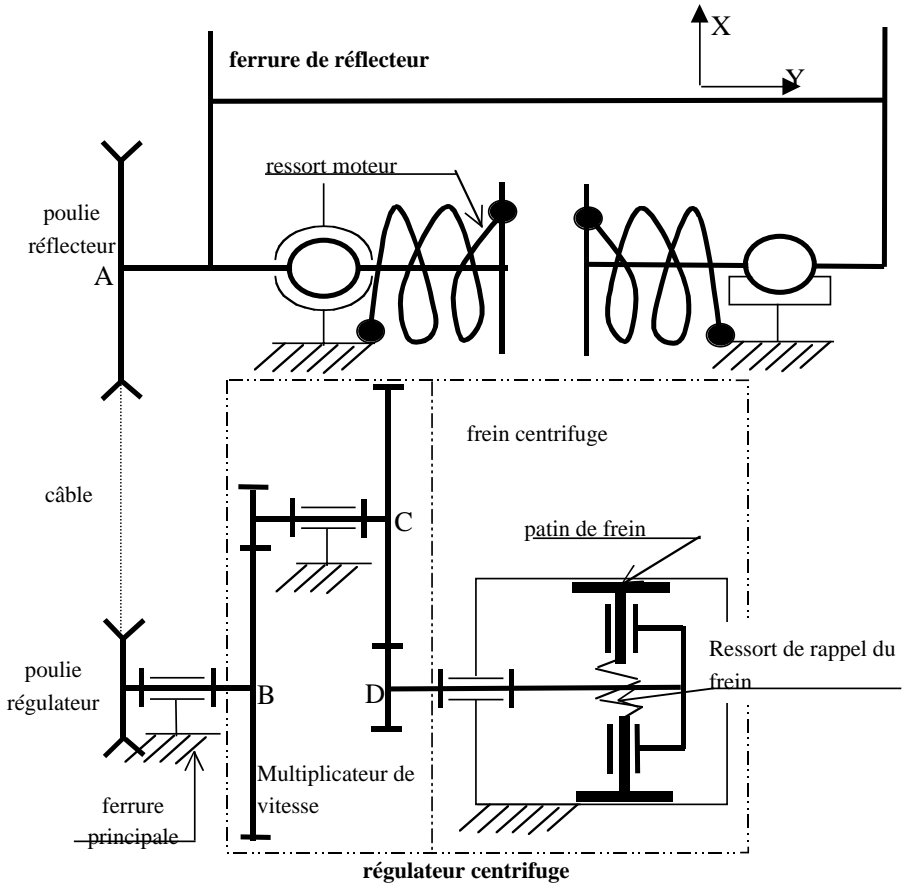
On appelle θ la position angulaire du réflecteur autour de l'axe \vec{Y} et θ_0 la position du ressort au repos. Les ressorts exercent un couple moteur sur la ferrure réflecteur : $\vec{C}_m = -K(\theta - \theta_0)\vec{y}$ où $K/2$ représente la raideur en torsion d'un ressort.

La régulation de la vitesse de déploiement est assurée par un régulateur centrifuge, fixé à la ferrure principale et actionné par un câble inextensible relié à une poulie solidaire de la ferrure réflecteur. Ce régulateur est constitué d'un multiplicateur de vitesse à engrenages avec 2 étages identiques. Le dernier étage entraîne en rotation un frein centrifuge, constitué de deux patins de forme cylindrique qui sous l'effet des forces centrifuges sont plaqués contre le corps du régulateur, exerçant ainsi un couple de freinage, qui peut être modélisé de façon simplifiée dans la plage de vitesse concernée, par :

$$\vec{f} = -f\dot{\theta}_f\vec{y} \text{ avec } \dot{\theta}_f \text{ vitesse de rotation du frein autour de l'axe } (D, \vec{y})$$

$$\text{et } f = 10^{-4} \text{ Nm}/(^{\circ}/s)$$

Le rôle du régulateur est d'éviter les chocs en fin de course qui pourraient provoquer des déformations permanentes incompatibles avec la précision de pointage requise pour l'antenne. La vitesse de rotation $\dot{\theta}$ du réflecteur en fin de déploiement est ainsi limitée à $0,5^{\circ}/s$.



Données :

Angle de déploiement :

$$\Delta\theta = 65^\circ$$

Rapport de multiplication de chaque étage du multiplicateur de vitesse :

$$k_1 = k_2 = 6$$

Rayon de poulie réflecteur :

$$R_f = 30 \text{ cm}$$

Rayon de poulie régulateur :

$$R_g = 10 \text{ cm}$$

Moment d'inertie de l'ensemble mobile (réflecteur, les deux ferrures liées au réflecteur et poulie) autour de l'axe de déploiement (A, \vec{y}) :

$$J_{ref} = 12 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Moment d'inertie de l'axe d'entrée du régulateur autour de l'axe (B, \vec{y}) :

$$J_1 = 92 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Moment d'inertie de l'axe intermédiaire du régulateur autour de l'axe

(C, \vec{y}) :

$$J_2 = 70 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Moment d'inertie de la partie mobile du frein centrifuge autour de l'axe

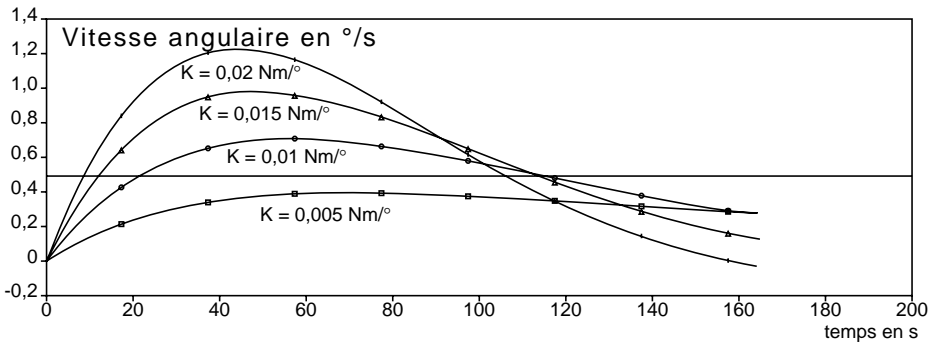
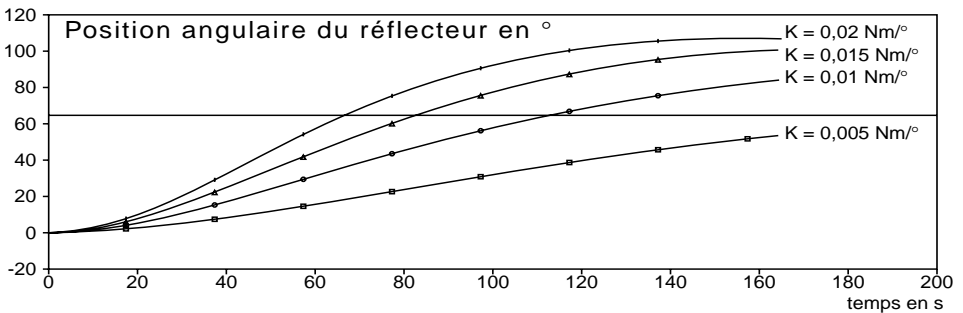
(D, \vec{y})

$$J_{frein} = 55 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Étant donné le fonctionnement en orbite géostationnaire, le poids des pièces sera évidemment négligé.

Q.23 - Justifier la présence du multiplicateur de vitesse.

Q.24 - Déterminer l'expression littérale de l'équation différentielle du mouvement en θ . Préciser la méthode de mise en équation retenue, récapituler toutes les hypothèses et formuler si nécessaire des hypothèses complémentaires.



Une simulation numérique a permis d'établir les courbes ci-dessus qui représentent la solution de l'équation différentielle de la position angulaire θ du réflecteur pour $\theta_0 = 100^\circ$ et pour quatre valeurs différentes de la raideur K du ressort moteur.

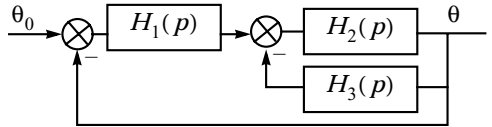
Q.25 - Justifier l'allure de la courbe de la position angulaire θ du réflecteur en fonction du temps à partir de l'ordre de l'équation différentielle. Déterminer

l'asymptote et justifier par un calcul numérique que la courbe de réponse ne dépasse pas l'asymptote pour les quatre raideurs de ressort proposées.

Q.26 - Choisir la raideur du ressort qui convient le mieux et déterminer le temps de déploiement.

Le contrôle de la vitesse par régulateur centrifuge peut sembler d'une technologie « obsolète » sachant que les satellites Télécom 2 ont été lancés au début des années 90 . On se propose de préparer une argumentation justifiant l'intérêt de l'étude d'une nouvelle solution avec moteur électrique à courant continu.

Q.27 - Pour la solution avec régulateur centrifuge, représenter l'équation différentielle de la position angulaire θ du réflecteur sous forme d'un schéma bloc comme ci-contre :



Indiquer la fonction de transfert dans le domaine de Laplace et la signification physique de chaque bloc $H_i(p)$, ainsi que le nom des variables intermédiaires.

Q.28 - Rédiger une argumentation pour défendre la faisabilité d'une solution avec moteur électrique à courant continu en gardant les contraintes imposées en fin de déploiement. La solution devra être présentée à partir d'un schéma bloc précisant les différents constituants nécessaires et la (ou les) boucle(s) d'asservissement retenue(s). La présence de chaque constituant sera justifiée ainsi que le choix de la ou des boucles d'asservissement. Le candidat pourra proposer une consigne sous forme de chronogramme permettant de diminuer le temps de déploiement tout en respectant la vitesse maximale en fin de déploiement. La solution retenue devra privilégier le gain de masse, sachant que la masse de la solution actuelle (ressort et régulateur centrifuge) est de 800 g environ. Le candidat pourra pour cela s'appuyer sur l'architecture et les ordres de grandeur des systèmes étudiés au cours des travaux pratiques.

••• FIN •••
