

Epreuve de Sciences Industrielles B

Durée 6 h

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, d'une part il le signale au chef de salle, d'autre part il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

L'usage de calculatrices est autorisé.

Composition du sujet :

- 1 cahier de 21 pages de texte, numérotées de T1/21 à T21/21 ;
- 13 documents, intitulés « Document i », avec $i = 1$ à 13, numérotés D1/13 à D13/13 ;
- 1 cahier réponse format A4, imprimé recto verso, à rendre en fin d'épreuve ;
- 2 feuilles de calque format A3, pré imprimées, intitulées « Calque n°1 » et « Calque n°2 » à rendre en fin d'épreuve ;

TOUTE AUTRE DOCUMENTATION EST INTERDITE

Matériel autorisé : tous instruments usuels du dessinateur.

**LES CALCULATRICES SONT AUTORISEES.
LES AGENDAS ELECTRONIQUES ET LES TELEPHONES PORTABLES SONT
INTERDITS**

La présentation, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la rédaction, la clarté et la précision des raisonnements entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies.

Gestion du temps : En admettant une durée d'une heure pour la lecture et l'assimilation du sujet, il est vivement conseillé de consacrer entre 2 h 00 et 2 h 30 au maximum à la réponse aux questions de la notice et 2 h 30 à 3 h au tracé des dessins.



Figure 1 : Vue aérienne du synchrotron de Grenoble

ETUDE D'UN DISPOSITIF DE TRANSLATION VERTICALE D'UN SITE D'EXPERIENCE DE NANOTOMOGRAPHIE

A - Cahier des Charges Fonctionnel (Extraits)

A.1 - Présentation du problème

A.1.1 - Le contexte

La soif de connaissance nous pousse à nous poser des questions sur le monde qui nous entoure : de quoi est composée notre planète ? Comment expliquer les propriétés de la matière et imaginer de nouveaux matériaux ? Que sait-on du processus de la vie ? La plupart de ces questions ne peut être résolue que par une connaissance approfondie de la structure intime de la matière. Les scientifiques ont donc construit des instruments de plus en plus puissants, capables de sonder la matière à l'échelle des atomes et des molécules, tels que les sources de rayonnement synchrotron qui, comparables à des « super microscopes », apportent des informations inestimables dans de très nombreux domaines de recherche.

L'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility), construit à Grenoble en 1988 (cf **figure 1, page T1/21**), permet de réaliser des expériences inédites en utilisant la lumière synchrotron.

A.1.2 - Ligne ID22 : expérimentation de nanotomographie

L'anneau de l'ESRF permet d'alimenter en rayons X une cinquantaine de salles d'expérience. Dans la ligne ID22, le faisceau de photons, capté et guidé par des dispositifs optiques, est dirigé ensuite sur des échantillons pour réaliser des expérimentations de nanotomographie.

A.1.2.1 - Principe de la nanotomographie

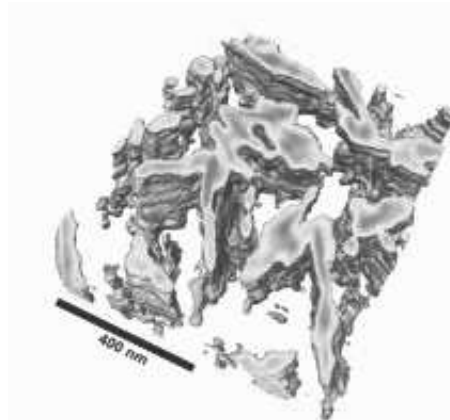


Figure 2 : *Nanotomographie d'une polyoléfine thermoplastique*

La nanotomographie est une technique d'imagerie 3D permettant d'obtenir l'image d'un échantillon (exemple donné **figure 2, page T2/21**), tranche par tranche, sans le détruire.

Elle repose sur le principe suivant : un rayonnement se trouve plus ou moins atténué, suivant la densité des matériaux qu'il rencontre sur sa route. Plus il a de mal à se frayer un passage à travers les atomes, plus son intensité s'affaiblit. Il suffit donc de placer l'objet à étudier sur le trajet d'un faisceau de rayons X, et de comparer le spectre du faisceau d'entrée avec celui du faisceau à la sortie.

En faisant tourner l'échantillon, et en utilisant un logiciel de reconstruction, il est alors possible d'obtenir l'image d'une tranche de l'objet, puis, en répétant l'opération de bas en haut, de reconstituer son volume tout entier.

Cette technique d'imagerie est bien connue dans le secteur médical, où depuis une vingtaine d'années, les scanners explorent le corps humain.

A.1.2.2 - Architecture de la ligne ID22

La **figure 3, page T3/21**, présente l'architecture retenue pour l'expérience mise en place sur la ligne ID22.

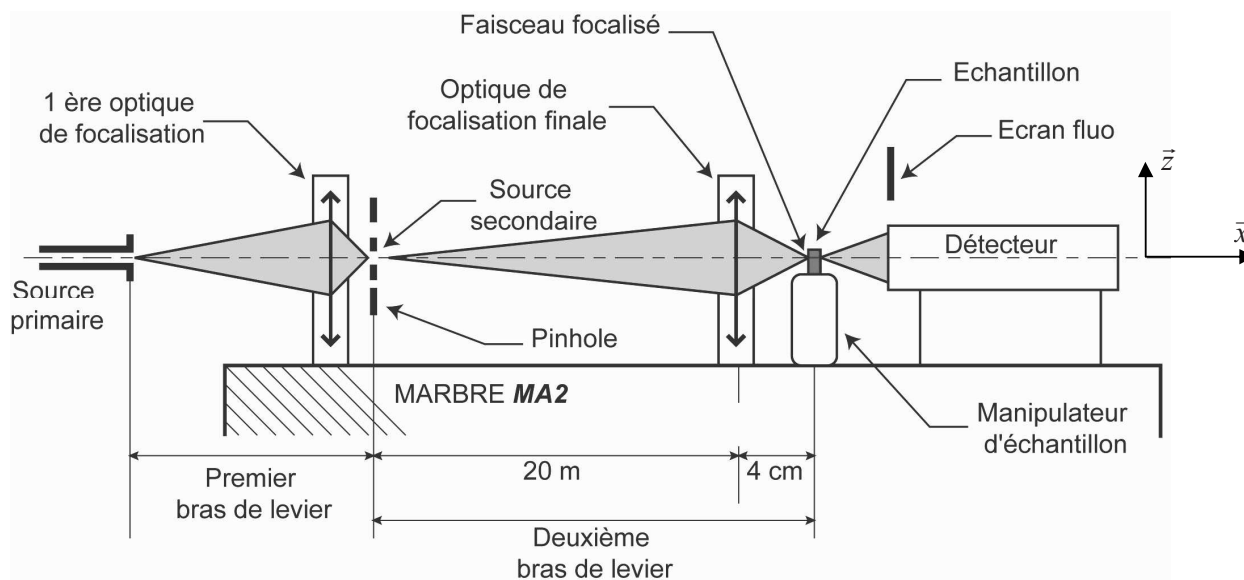


Figure 3 : Schéma de l'expérience

Le faisceau de photons arrive de l'anneau de stockage en traversant toute la ligne de lumière où il passe par un monochromateur. Le monochromateur est un dispositif permettant de sélectionner par diffraction une longueur d'onde (et ses harmoniques) parmi le continuum du faisceau blanc. Une fois que le faisceau a la constitution souhaitée pour l'expérience (spectre, flux de photons), il arrive sur une première optique de focalisation qui, en utilisant un phénomène de « bras de levier » optique, focalise une première fois le faisceau.

Le faisceau passe ensuite par un « pinhole » : trous minuscules permettant de réaliser une source secondaire de diamètre 20 μm puis traverse une seconde optique de focalisation qui, en utilisant le même phénomène de bras de levier, focalise le faisceau sur l'échantillon.

L'échantillon est fixé sur un manipulateur pouvant bouger selon les 6 degrés de liberté. La rotation et la translation suivant \vec{z} sont utiles pour la réalisation de la nanotomographie et les 4 autres degrés de liberté servent à positionner l'échantillon à l'endroit où le faisceau est focalisé.

Pour détecter précisément cet endroit et pour mesurer le diamètre du faisceau focalisé, on utilise un « knife-edge » ou un écran fluorescent. Le but de cet élément est de repérer le « spot » (faisceau focalisé) puis il se retire pour laisser la place à l'échantillon qui est alors amené à cet endroit.

Enfin, on place le détecteur sur le chemin du faisceau ayant traversé l'échantillon pour obtenir, par reconstruction numérique, l'image des tranches de l'échantillon, puis son volume.

Pour les besoins de la nanotomographie, le faisceau arrivant sur l'échantillon doit pouvoir être soit un faisceau rose (« pink beam »), soit un faisceau monochromatique

(« monochromatic beam »). En faisant varier l'écartement et l'inclinaison de deux miroirs en entrée de la ligne de lumière, comme schématisé sur la **figure 4, page T4/21**, on sélectionne le type de faisceau.

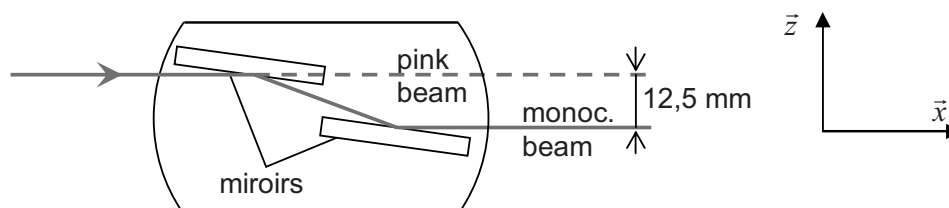


Figure 4 : Principe du monochromateur

On voit qu'entre les deux faisceaux, il y a un décalage selon la direction \vec{z} de 12,5 mm, ce qui implique un besoin pour l'équipement de pouvoir effectuer ce déplacement.

Pour finir, on doit également pouvoir escamoter l'ensemble de l'expérience car une autre salle se situe en aval. Il faut alors pouvoir libérer entièrement le chemin du faisceau lorsque les expériences ont lieu dans la salle suivante.

La **figure 5, page T4/21**, représente l'architecture retenue :

- un premier marbre **MA0** sert de support à l'ensemble de l'expérience ;
- un second marbre **MA1** effectuera le déplacement suivant \vec{z} permettant ainsi de s'aligner sur le faisceau utilisé ;
- un troisième marbre **MA2** effectuera une translation suivant \vec{y} afin de libérer le chemin du faisceau ;
- l'ensemble des instruments (optiques de focalisation, manipulateur, détecteur) seront positionnés sur le marbre **MA2**.

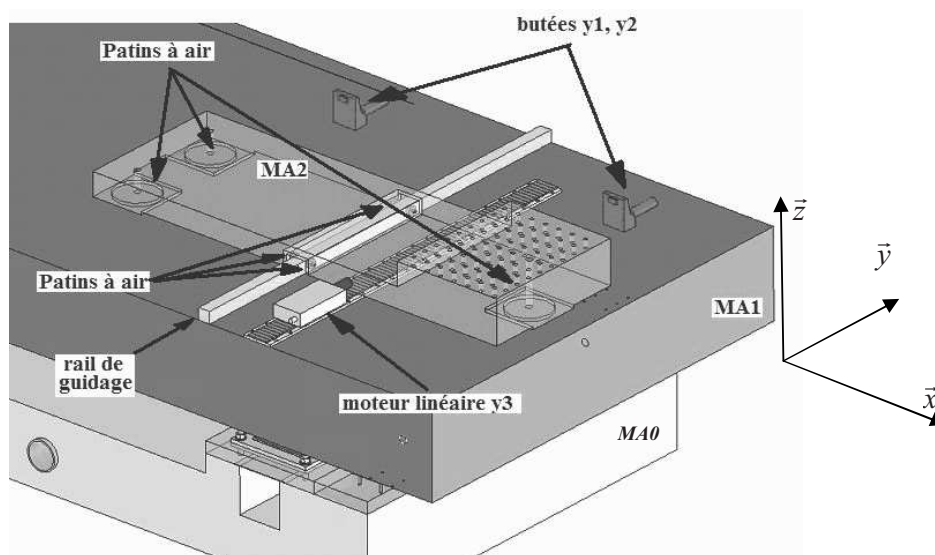


Figure 5 : Architecture du support

A.1.3 - Le produit à concevoir

Le sujet propose plus particulièrement de s'intéresser à la façon de réaliser le déplacement vertical entre les marbres **MA0** et **MA1**.

La principale caractéristique que doit avoir ce déplacement sera une excellente répétabilité afin d'éviter de devoir repositionner tous les éléments optiques à chaque passage d'un faisceau à l'autre.

Le marbre **MA1** est posé sur 4 points d'appui réglables. On utilise pour cela des butées couramment utilisées pour réaliser l'isolation vibratoire des machines-outils, développées par la société AIRLOC. Il est également relié au marbre **MA0** par trois bielles. La **figure 10, document 1, page D1/13**, donne la disposition de ces différents éléments.

Le diagramme FAST de la **figure 11, document 2, page D2/13**, précise les fonctions respectives des différents constituants.

A.1.4 - Limites de l'étude

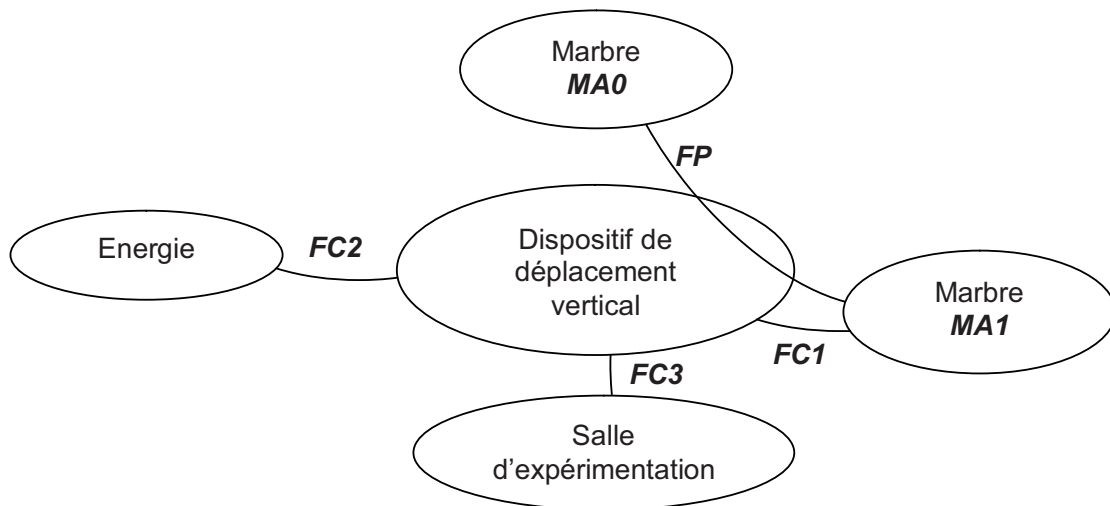
Limite en amont : Marbre **MA0**

Limite en aval : Marbre **MA1**

A.2 - Analyse fonctionnelle du besoin (extraits)

Le produit considéré dans cette partie est la liaison entre le marbre **MA0** et le marbre **MA1**.

Parmi toutes les situations du cycle de vie du produit, il ne sera considéré que la situation de fonctionnement normal.



Enoncés des fonctions de service

Fonction principale :

FP Déplacer le marbre **MA1** par rapport au marbre **MA0** entre deux positions définies

Fonctions contraintes :

FC1 Supporter les efforts

FC2 S'adapter à l'énergie disponible

FC3 S'adapter à la salle d'expérimentation

Caractérisation des fonctions

	Critères	Niveaux
FP	<ul style="list-style-type: none"> • Déplacement entre les deux positions • Précision • Résolution • Répétabilité • Encombrement disponible • Première fréquence propre du système 	<ul style="list-style-type: none"> • 12,5 mm portés par \vec{z} • 0,1 μm • 1 nm • 50 nm • 4 400 x 1 500 x 240 mm³ • 50 Hz mini
FC1	<ul style="list-style-type: none"> • Masse de l'ensemble {MA1 + son équipage} 	<ul style="list-style-type: none"> • 6 t
FC2	<ul style="list-style-type: none"> • Tension de courant électrique • Fréquence du secteur • Puissance disponible 	<ul style="list-style-type: none"> • 230 V monophasé • 50 Hz • non fourni
FC3	<ul style="list-style-type: none"> • Déplacements dus aux variations de température 	<ul style="list-style-type: none"> • non fourni

B - Etude et éléments de solutions proposés

B.1 - Repère de travail

Dans tout le sujet, on utilise la convention suivante :

- la direction \vec{x} est donnée par la direction du faisceau de photons ;
- la direction \vec{z} est donnée par la verticale ascendante ;
- $\vec{y} = \vec{z} \wedge \vec{x}$ de telle sorte que la base $B = (\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ forme un trièdre direct ;
- le point O , centré sur la face supérieure du marbre **MA0**, est pris comme origine du repère de travail. On note R le repère $R = (O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$.

La mise en place de ce repère est précisée sur :

- la **figure 10, document 1, page D1/13** ;
- la **figure 12, document 3, page D3/13** ;
- la **figure 13, document 4, page D4/13** ;
- la **figure 14, document 5, page D5/13**.

B.2 - Principe de fonctionnement du dispositif de déplacement vertical

L'ESRF a déjà réalisé pour une expérience de microtomographie un mécanisme permettant de déplacer verticalement une manipulation pour pouvoir fonctionner avec différents faisceaux. L'architecture retenue était alors la suivante :

- marbre guidé par 4 colonnes verticales ;
- marbre déplacé par 4 vérins mécaniques synchronisés et entraînés par un seul moteur.

Comme pour cette expérience il ne s'agissait « que » de microtomographie, cette solution était satisfaisante. Pour passer à l'échelle inférieure de la nanotomographie, cette architecture est devenue insuffisante pour les raisons suivantes :

- précision du guidage trop faible ;
- rigidité insuffisante conduisant à une première fréquence propre trop faible.

La nouvelle architecture retenue pour l'expérience de nanotomographie est alors la suivante (voir **figure 10, document 1, page D1/13**) : le marbre **MA1** est posé sur le marbre **MA0** par l'intermédiaire de 4 butées réglables **A1**, **A2**, **A3** et **A4** du constructeur AIRLOC. Dans la suite, nous les appellerons tout simplement les « AIRLOC ».

La **figure 13, document 4, page D4/13**, précise le fonctionnement des AIRLOC : un coin **Ac** glisse entre deux cales pentées, l'une fixe **Af** et l'autre mobile **Am**. La cale mobile **Am** est reliée au marbre **MA1** par l'intermédiaire de deux coupelles sphériques réalisant une liaison sphérique. La rotation de la vis d'entrée **V** provoque le déplacement du coin **Ac**. L'élévation du marbre **MA1** par rapport au marbre **MA0** est obtenue par déplacement du coin **Ac** de chacun des quatre AIRLOC entre les deux cales pentées **Af** et **Am**.

La **figure 12, document 3, page D3/13**, précise la motorisation des AIRLOC. Le déplacement des AIRLOC est synchronisé par deux boîtiers de renvoi conique **B1** et **B2**. Ils sont reliés aux AIRLOC par 4 doubles joints de cardan **C1**, **C2**, **C3** et **C4**. Les boîtiers de renvoi conique **B1** et **B2** sont entraînés par un moteur pas à pas **M** et un réducteur **R**. Les caractéristiques du moteur pas à pas sont fournies **document 10, page D10/13**.

Ces quatre AIRLOC ne peuvent pas être modélisés par des liaisons glissières car leurs jeux radiaux sont bien supérieurs à la précision exigée par le cahier des charges. Ces jeux

sont donc considérés comme des degrés de liberté. La liaison réalisée entre un coin **Ac** et le marbre **MA1** est alors une liaison ponctuelle, dont la normale est inclinée d'un angle α par rapport à \vec{z} (voir **figure 17, document 6, page D6/13**). Pour une élévation donnée de **MA1** par rapport à **MA0**, la liaison réalisée par les quatre AIRLOC entre le marbre **MA1** et le marbre **MA0** est une liaison pivot glissant d'axe Δ parallèle à \vec{y} . En effet, le marbre **MA1** est en appui sur les AIRLOC par quatre ponctuelles réparties dans deux plans symétriques par rapport à (O, \vec{y}, \vec{z}) inclinés d'un angle α par rapport à ce même plan (voir **figure 17, document 6, page D6/13**). La position de l'axe Δ suivant \vec{z} est pilotée par le déplacement du coin **Ac** de chacun des quatre AIRLOC entre les deux cales pentées **Af** et **Am**. Pour une élévation donnée, le marbre **MA1** a donc deux degrés de liberté par rapport au marbre **MA0**, limités par les jeux radiaux des AIRLOC. La solution retenue ici pour supprimer ces deux degrés de liberté, est l'utilisation de trois bielles **Bi1**, **Bi2** et **Bi3**, reliées à leurs extrémités aux marbres par des rotules. Leur implantation est précisée sur les **figures 14 et 15, document 5, page D5/13**. Sur ces deux figures, le système est représenté dans sa configuration médiane.

C - Etude de conception en construction mécanique

C.1 - Présentation du travail à rendre

Comme indiqué plus haut en **page T1/21**, en admettant une durée d'une heure pour la lecture et l'assimilation du sujet, il est vivement conseillé de consacrer entre 2 h 00 et 2 h 30 au maximum à la réponse aux questions de la notice et 2 h 30 à 3 h au tracé des dessins.

Les réponses seront fournies uniquement sur les cinq documents présentés ci-dessous.

1 – Notice justificative (40 % de la note globale)

Fournir les réponses sur **le cahier réponse**, de format A4 vertical, pré imprimé recto verso.

Les réponses sur feuilles de copies additionnelles ou sur papier de brouillon ne seront pas acceptées.

2 – Dessin d'étude de construction mécanique (60 % de la note globale)

Il est à tracer sur **les deux calques** pré imprimés de format A3 horizontal, intitulés « **Calque n°1** » et « **Calque n°2** », joints au sujet, **et qui seront à rendre non pliés**.

C.2 - Notice justificative

Consignes spécifiques

Sur le cahier réponse, les réponses seront fournies dans les limites des cadres prévus pour chaque question.

Il sera tenu compte, dans la notation, de la clarté et de la concision des réponses. Les schémas doivent être lisibles, précis, et respecter la normalisation en vigueur.

Les écritures au crayon ne seront pas acceptées. La qualité de l'écriture, de l'orthographe et de la syntaxe sera prise en compte dans l'évaluation.

Le candidat trouvera sur le **tableau 4, document 13, page D13/13** un récapitulatif de l'ensemble des grandeurs utilisées au cours du sujet.

C.2.1 - Etude du mouvement du marbre **MA1**

Les quatre AIRLOC permettent de réaliser l'élévation du marbre **MA1**. Cependant, ces composants présentent un jeu latéral entre la partie mobile **Am** et la partie fixe **Af** d'environ $60\ \mu\text{m}$ (dans la direction \vec{y}), ce qui est tout à fait inacceptable compte tenu des critères de la fonction **FP**.

C.2.1.1 - Influence des bielles **Bi1** et **Bi2** seules

On considère dans cette partie que la bielle **Bi3** n'est pas assemblée.

Les bielles **Bi1** et **Bi2** sont liées au marbre **MA0**, respectivement en A et C, et au marbre **MA1**, respectivement en B et D.

La position d'étude est la position médiane définie **figure 14, document 5, page D5/13**. Dans cette configuration, on a $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{CD} = -2.c.\vec{y}$ et $\overrightarrow{AC} = \overrightarrow{BD} = 2.a.\vec{x}$.

Notations :

Le torseur cinématique du solide i par rapport au solide j , exprimé au point M dans le

repère R sera noté : $\{V_{i/j}\} = \{\vec{\Omega}_{i/j} \quad \vec{V}_{M,i/j}\}_{M,R}$ avec $\vec{\Omega}_{i/j} = \begin{pmatrix} \omega_{x,i/j} \\ \omega_{y,i/j} \\ \omega_{z,i/j} \end{pmatrix}$ et $\vec{V}_{M,i/j} = \begin{pmatrix} V_{Mx,i/j} \\ V_{My,i/j} \\ V_{Mz,i/j} \end{pmatrix}$

Q1 Inscrire votre réponse dans le **cadre R1 du cahier réponse**.

Donner la forme du torseur cinématique de la liaison entre la bielle Bi1 et le marbre MA0 au point A.

Q2 Inscrire votre réponse dans le **cadre R2 du cahier réponse**.

Donner la forme du torseur cinématique de la liaison équivalente entre les marbres MA1 et MA0 réalisée par l'association des liaisons en A et B au point A. En déduire la nature de la liaison équivalente réalisée.

Q3 Inscrire votre réponse dans le **cadre R3 du cahier réponse**.

Donner la forme du torseur cinématique de la liaison équivalente entre les marbres MA1 et MA0 réalisée par l'association des liaisons en A, B, C et D au point A. En déduire la nature de la liaison équivalente réalisée.

Conclure sur les mobilités bloquées par l'assemblage des deux bielles Bi1 et Bi2.

Comme expliqué dans la partie A.1.2.2, le marbre **MA1** doit pouvoir passer d'une position haute (position « pink beam »), à une position basse (position « monochromatic beam »). Le croquis du **cadre R4 du cahier réponse** (non à l'échelle) précise la position des points B_{pb} et B_{mb} que prend le centre de la rotule en B dans ces deux positions respectives.

La longueur des bielles **Bi1** et **Bi2** vaut : $L_{Bi12} = AB = CD = 988mm$.

On rappelle que le déplacement vertical (suivant \vec{z}) réalisé entre B_{pb} et B_{mb} vaut : $B_{pb}B_{mb} = 12,5mm$.

Lors du passage de la position haute à la position basse, les bielles **Bi1** et **Bi2** induisent un déplacement suivant \vec{y} du marbre **MA1** par rapport au marbre **MA0**. On note δy la valeur maximale de ce déplacement.

Q4 Inscrire votre réponse dans les **cadres R4a et R4b du cahier réponse**.

a) Compléter la figure du cadre R4a en esquissant la trajectoire du point B lors du passage de la position haute à la position basse, et faire apparaître sur ce tracé δy .

b) Donner l'expression de δy en fonction de L_{Bi12} et de $B_{pb}B_{mb}$. Donner la valeur numérique de δy .

Q5 Incrire votre réponse dans le **cadre R5 du cahier réponse**.

Conclure sur la valeur numérique de δy vis-à-vis des mouvements admissibles par les AIRLOC.

C.2.1.2 - Influence des trois bielles **Bi1**, **Bi2** et **Bi3**

Lorsque les trois bielles sont assemblées, il existe un couplage entre les mouvements imposés d'une part par **Bi1** et **Bi2**, et d'autre part par **Bi3**. Une étude paramétrée des mouvements imposés par ces trois bielles devient alors difficile. Cette étude se fait à l'aide d'un logiciel de simulation cinématique dans l'espace.

La **figure 16, document 6, page D6/13**, donne en particulier l'évolution de l'angle de rotation suivant la direction \vec{y} du marbre **MA1** par rapport au marbre **MA0** lors du passage de la position basse (« monochromatic beam ») à la position haute (« pink beam »).

On prend comme configuration de référence la position médiane du marbre **MA1**, c'est-à-dire celle occupée sur le schéma de la **figure 14, document 5, page D5/13**.

On note O' le projeté du point O dans le plan médian du marbre **MA1** lorsque celui-ci est en position médiane. Le déplacement suivant \vec{z} du point O' entre les deux positions « pink beam » et « monochromatic beam » sera pris égal à 12,5 mm.

Q6 Incrire votre réponse dans le **cadre R6 du cahier réponse**.

Compléter la figure du cadre R6 en esquissant la position du marbre MA1 en position haute et en position basse ; pour cela, on exagérera l'angle formé par le marbre MA1 par rapport au marbre MA0 en représentant 1° pour 10^{-7} rad, et on utilisera l'échelle fournie dans le cadre.

Ce mouvement imposé par les trois bielles est-il gênant pour les expérimentations ? Justifier votre réponse.

C.2.2 - Etude statique

C.2.2.1 - Etude des AIRLOC

Dans la section C.2.2.1, on s'intéresse à l'AIRLOC seul. Le candidat fera donc attention à ne pas tenir compte du marbre **MA1** et des doubles joints de cardan **Cj**.

Un modèle de l'AIRLOC est proposé sur la **figure 13, document 4, page D4/13**.

Q7 Incrire votre réponse dans le **cadre R7 du cahier réponse**.

Calculer le degré d'hyperstatisme du modèle d'AIRLOC proposé.

Pour pouvoir garantir la montabilité de l'AIRLOC, le constructeur devra entre autres assurer une perpendicularité suffisante de l'axe de la liaison hélicoïdale avec les axes des liaisons pivot glissant de l'écrou **E**, ainsi qu'une cylindricité suffisante de cette même pièce.

Q8 Incrire votre réponse dans le **cadre R8 du cahier réponse**.

Mettre en place ces deux tolérances sur le dessin de définition de l'écrou E fourni. L'objet de cette question n'est en aucun cas de chiffrer les valeurs des tolérances à indiquer : le candidat se contentera donc d'indiquer « t_i » pour l'étendue des zones de tolérance.

Afin de diminuer les coûts de production, on préfère souvent concevoir un mécanisme dont le modèle associé est isostatique.

Q9 Inscrire votre réponse dans le **cadre R9 du cahier réponse**.

Proposer un modèle minimisant le degré d'hyperstatisme de l'AIRLOC.

C.2.2.2 - Efforts dans les AIRLOC

C.2.2.3.1 Etude à l'aide d'un modèle simplifié

Le modèle global prenant en compte les quatre AIRLOC et les bielles étant hyperstatique, on travaille dans un premier temps sur un modèle simplifié afin de pouvoir mener des calculs de statique.

Dans cette partie, on se base sur le modèle de la **figure 17, document 6, page D6/13**.
Les bielles ne sont pas prises en compte dans ce modèle.

On note f le coefficient de frottement entre le coin **Ac** et le marbre **MA1**, et entre le coin **Ac** et le marbre **MA0**. Pour les applications numériques, on prendra $f = 0,2$. On introduit également l'angle de frottement φ tel que $\tan \varphi = f$.

Comme indiqué sur la **figure 13, document 4, page D4/13**, on note α l'angle que forment les cales pentées **Af** et **Am** avec la direction \vec{y} et on prendra $\alpha = 6^\circ$.

Le marbre **MA1** a une masse $m = 6000\text{kg}$. Son centre de gravité G est tel que les quatre AIRLOC sont disposés symétriquement par rapport à G (G est sur la droite $O\vec{z}$).

On prendra pour l'accélération de la pesanteur : $g = 10\text{m.s}^{-2}$.

Notations :

On note $N1$, $T1$ et $N2$, $T2$ les composantes normales et tangentielles respectivement du marbre **MA1** sur un coin **Ac**, et du marbre **MA0** sur le même coin **Ac**. Compte tenu des symétries du problème, ces composantes sont identiques en norme sur tous les AIRLOC.

Q10 Inscrire votre réponse dans le **cadre R10 du cahier réponse**.

Compléter le cadre R10 en dessinant les composantes normales et tangentielles des efforts du marbre MA1 sur le coin Ac et du marbre MA0 sur le coin Ac, dans le cas où le marbre MA1 est en phase de montée.

Q11 Inscrire votre réponse dans le **cadre R11 du cahier réponse**.

Déterminer littéralement l'expression des efforts normaux $N1$ et $N2$ en fonction de la masse du marbre m , de l'angle d'inclinaison du coin α et de l'angle de frottement φ . On précisera le (ou les) sous-ensemble(s) isolé(s), et le (ou les) théorèmes utilisés.

Dans le torseur d'actions mécaniques transmissibles dans la liaison hélicoïdale entre la vis d'entrée **V** et le coin **Ac**, on note F_a l'effort suivant \vec{x} de la vis d'entrée **V** sur le coin **Ac**. Cet effort est représenté dans le **cadre R10 du cahier réponse**.

Q12 Inscrivez votre réponse dans le **cadre R12** du cahier réponse.

- a) Déterminer littéralement l'expression de l'effort F_a en fonction de m , α et φ . Que devient cette relation lorsque le système est en descente ?
- b) Donner la valeur numérique à la montée et à la descente de l'effort F_a dans le cas où le coefficient de frottement vaut $f = 0,2$.

Q13 Inscrivez votre réponse dans le **cadre R13** du cahier réponse.

Déduire de la réponse à la question Q12, la condition sur φ pour que l'AIRLOC soit irréversible. Cette condition est-elle vérifiée ? Y a-t-il un autre élément dans la chaîne cinématique qui peut participer à l'irréversibilité, et si oui lequel ?

C.2.2.3.2 Etude à l'aide d'un modèle numérique

On cherche maintenant à étudier le comportement du mécanisme en prenant en compte les trois bielles. Le modèle étant hyperstatique, une simple étude statique ne suffit plus. On utilise alors un modèle de calcul numérique dans lequel les trois bielles sont considérées comme des barres. Les AIRLOC étant très rigides, ils sont supposés indéformables.

Lors des simulations, on impose aux AIRLOC des déplacements permettant de faire décrire au marbre l'ensemble de son déplacement en montée et en descente depuis la configuration basse, jusqu'à la configuration haute.

Les simulations permettent alors d'obtenir les efforts dans les trois bielles ainsi que les efforts moteurs nécessaires pour l'entraînement des quatre AIRLOC.

La **figure 18, document 7, page D7/13** donne l'évolution de l'effort dans la bielle **Bi1**. Les ordres de grandeur des efforts calculés dans les deux autres bielles étant comparables, les résultats correspondant ne sont pas fournis.

De même, la **figure 19, document 7, page D7/13** donne l'évolution de l'effort axial F_a de la vis d'entrée **V** sur le coin **Ac**.

Q14 Inscrivez votre réponse dans le **cadre R14** du cahier réponse.

Les courbes obtenues montrent un cycle particulier pour lequel les résultats obtenus à la montée sont différents de ceux obtenus à la descente. Indiquer le nom de ce type de cycle, ainsi que le phénomène à l'origine de ce cycle.

Q15 Inscrivez votre réponse dans le **cadre R15** du cahier réponse.

Comparer le résultat obtenu pour l'effort F_a avec le résultat obtenu à l'aide du modèle simplifié à la question Q12. Conclure.

C.2.3 - Vérification du moteur

Les deux sections suivantes ont pour but de vérifier que le critère de résolution associé à **FP** et le critère de masse associé à **FC1** peuvent être atteints par le moteur retenu.

C.2.3.1 - Vérification de la résolution

Dans toute la section C.2.3.1, on s'intéresse à un guidage réalisé par les quatre AIRLOC seuls. Les trois bielles ne sont donc pas prises en compte.

Le motoréducteur **MR** est constitué d'un moteur **M** associé à un réducteur **R**.

Le moteur utilisé est un moteur pas à pas de marque Pacific scientific, référence Powerpac K43HXHL, dont les caractéristiques techniques sont fournies **figures 23a et 23b, document 10, page D10/13.**

On note ω_{moteur} la vitesse de rotation du rotor du moteur **M**, et ω_{Aint} la vitesse de rotation de l'arbre intermédiaire **Aint** en sortie du réducteur **R**.

On note k le rapport de réduction du réducteur **R** ($k = \frac{\omega_{\text{Aint}}}{\omega_{\text{moteur}}}$) et on donne $k = \frac{1}{30}$.

On suppose que le double joint de cardan réalise une transmission homocinétique.

Tous les pignons coniques constituant les boîtiers de renvoi conique **B1** et **B2** ont le même nombre de dents.

Comme indiqué sur la **figure 13, document 4, page D4/13**, on rappelle que α désigne l'angle que forment les cales pentées **Af** et **Am** avec la direction \vec{y} . La liaison hélicoïdale entre l'écrou **E** et la vis d'entrée **V** a un pas $p = 2\text{mm}$.

Q16 *Inscrire votre réponse dans le cadre R16 du cahier réponse.*

Donner l'expression littérale de la variation de hauteur δz de la cale pentée Am par rapport à la cale pentée Af lorsque le moteur effectue une rotation d'un angle $\delta\theta_{\text{moteur}}$ (avec $\delta\theta_{\text{moteur}}$ exprimé en tour).

Q17 *Inscrire votre réponse dans le cadre R17 du cahier réponse.*

Sachant que la course souhaitée pour le déplacement vertical du marbre MA1 est de 12,5 mm, donner la valeur numérique du nombre de tours Nb_m que devra effectuer le moteur M.

Comme indiqué dans la documentation du moteur **M figures 23a et 23b, document 10, page D10/13**, le moteur peut être commandé en mode micropas avec une résolution de 64 000 pas/tour.

Q18 *Inscrire votre réponse dans le cadre R18 du cahier réponse.*

Compte tenu de la résolution indiquée dans le cahier des charges, quelle est l'angle minimal $\delta\theta_{\text{moteur min}}$ (exprimé en tours) que doit pouvoir effectuer le moteur M. La résolution du moteur est-elle donc suffisante ?

Q19 *Inscrire votre réponse dans le cadre R19 du cahier réponse.*

Quel doit être le sens du filet pour les AIRLOC A1 à A4 pour qu'une rotation dans le sens négatif du motoréducteur MR entraîne un déplacement vertical positif du marbre MA1 ? Préciser également les sens de rotation des différents arbres.

C.2.3.2 - Calcul du couple moteur

On vérifie le moteur à la montée. Quel que soit le résultat obtenu à la question **Q12**, on prendra pour la suite l'effort de la vis d'entrée **V** sur l'écrou **E** d'un AIRLOC **Ai** $F_a = 10000\text{N}$.

Hypothèses :

On néglige les frottements dans les boîtiers de renvoi conique **B1** et **B2**. Leur rendement sera donc pris égal à 1.

Le réducteur **R** associé au moteur **M** a un rendement $\eta_R = 0,9$.

La liaison hélicoïdale entre la vis d'entrée **V** et le coin **Ac** d'un AIRLOC **Ai** a un rendement $\eta_H = 0,3$.

Le système étudié est très peu dynamique. On ne s'intéresse donc pas aux phases transitoires. La vitesse de rotation du moteur est alors supposée constante.

Q20 Inscrire votre réponse dans le **cadre R20 du cahier réponse**.

Donner l'expression littérale du couple moteur C_m nécessaire pour équilibrer le système en fonction de F_a et des différentes données. Préciser le(s) sous-ensemble(s) isolé(s) et le(s) théorème(s) utilisé(s). Faire l'application numérique. Conclure en comparant les données du moteur retenu avec le résultat obtenu.

C.2.4 - Résistance des matériaux

C.2.4.1 - Dimensionnement de la bielles **Bi1**

Comme les mouvements effectués sont de faible amplitude, on pourra supposer que les bielles restent en configuration médiane afin de simplifier les calculs.

La **figure 20, document 8, page D8/13** donne les dimensions de la bielle **Bi1**.

Notations :

On note $\{T_{coh}\} = \left\{ \begin{array}{c|c} T_x & M_{fx} \\ N & M_t \\ T_z & M_{fz} \end{array} \right\}_{G,R}$ le torseur de cohésion exprimé au centre de gravité de

la section, avec $\overrightarrow{AG} = -s.\vec{y}$.

Hypothèse :

Compte tenu des faibles efforts transmis par les bielles, le poids des bielles n'est pas négligeable. Par contre son influence est faible sur le déplacement du marbre **MA1** par rapport au marbre **MA0**. Il n'est donc pas pris en compte.

Q21 Inscrire votre réponse dans le **cadre R21 du cahier réponse**.

Compte tenu des liaisons retenues pour le montage de la bielle **Bi1, donner la forme du torseur de cohésion (on ne cherchera pas dans cette question à quantifier les différents termes, mais uniquement à déterminer les composantes nulles du torseur de cohésion).**

On se place dans le cas le plus défavorable issu du calcul de statique, c'est-à-dire celui pour lequel l'effort du marbre **MA1** sur la bielle **Bi1** vaut $F_{\max} = 10N$ (résultat tiré de la courbe de la **figure 18, document 7, page D7/13**).

On souhaite limiter l'allongement des bielles à $\delta l_{adm} = 0,025\mu m$ (moitié de la répétabilité).

La **figure 20b, document 8, page D8/13** montre la section de la bielle **Bi1**. Son diamètre extérieur est noté D_{Bi1}^e avec $D_{Bi1}^e = 100mm$, et son diamètre intérieur est noté D_{Bi1}^i avec $D_{Bi1}^i = 80mm$.

On rappelle que la bielle **Bi1** a une longueur : $L_{Bi12} = 988mm$.

Donnée :

Le module d'Young du matériau constituant la bielle **Bi1** est noté E avec $E = 210GPa$.

Q22 Inscrire votre réponse dans le **cadre R22 du cahier réponse**.

Déterminer l'allongement δl_{\max} de la bielle Bi1 en fonction des différentes données lorsque l'effort appliqué vaut F_{\max} . Donner la valeur numérique de δl_{\max} et conclure vis-à-vis de δl_{adm} .

C.2.4.2 - Torsion de l'arbre reliant les boîtiers de renvoi conique

Les boîtiers de renvoi conique **B1** et **B2** sont reliés comme indiqué sur la **figure 12, document 3, page D3/13** par un arbre intermédiaire **Aint**. La géométrie de cet arbre est fournie **figure 21, document 8, page D8/13**. Son diamètre extérieur est noté D_{Aint}^e avec $D_{Aint}^e = 45mm$, son diamètre intérieur est noté D_{Aint}^i avec $D_{Aint}^i = 32mm$, et sa longueur est notée L_{Aint} avec $L_{Aint} = 726mm$.

La sortie du boîtier de renvoi conique **B1** exerce sur l'arbre intermédiaire un couple $C.\vec{y}$.

On note θ_y l'angle relatif que fait la section de sortie de l'arbre intermédiaire $\left(y = \frac{L_{Aint}}{2}\right)$ par rapport à sa section d'entrée $\left(y = -\frac{L_{Aint}}{2}\right)$.

Données :

Quel que soit le résultat trouvé à la question **Q20**, on prendra pour la suite $C = 20Nm$.

Le module de cisaillement du matériau constituant l'arbre intermédiaire **Aint** est noté G avec $G = 80GPa$.

Q23 Inscrire votre réponse dans le **cadre R23 du cahier réponse**.

Déterminer littéralement l'angle θ_y en fonction des différentes données lorsque le couple appliqué vaut C . Donner la valeur numérique de θ_y (en radians).

Cette rotation relative θ_y génère une différence de déplacement vertical entre les AIRLOC **A2** et **A4** d'une part, et **A1** et **A3** d'autre part. On note δh cette différence de déplacement.

Q24 Inscrire votre réponse dans le **cadre R24 du cahier réponse**.

Déterminer littéralement la différence de déplacement δh en fonction de θ_y (en radians). Donner la valeur numérique de δh . Conclure vis-à-vis de la fonction FP du cahier des charges.

L'arbre intermédiaire **Aint** est réalisé dans un acier dont la résistance à la limite élastique vaut $Re = 600MPa$.

Q25 Inscrire votre réponse dans le **cadre R25 du cahier réponse**.

Déterminer littéralement l'expression de la contrainte de cisaillement maximale τ_{\max} dans l'arbre intermédiaire Aint en fonction de C et des données du problème. Conclure sur la tenue mécanique de l'arbre intermédiaire Aint.

C.2.5 - Tolérancement

Lors de la commande des marbres, il est nécessaire de spécifier au sous-traitant l'emplacement des inserts qui ensuite serviront à fixer les différents éléments sur les marbres. La **figure 22, document 9, page D9/13** fournit un tolérancement partiel du marbre MA0.

Q26 Inscrire votre réponse dans le **cadre R26 du cahier réponse**.

Expliquer la signification de la tolérance $4 \times \phi 14.8 \text{ H}6$

ϕ	ϕ	t	A	B
--------	--------	---	---	---

. On rappelle que $14.8 \text{ H}6 = 14.8^{+11}_0$.

C.2.6 - Etude de solutions techniques pour réaliser un joint d'accouplement

Le mécanisme étudié comporte plusieurs sous-ensembles de pièces devant être accouplés. C'est le cas notamment de la sortie des boîtiers de renvoi conique avec les AIRLOC. Il existe un très grand nombre de solutions techniques pour réaliser ces liaisons.

Un joint d'accouplement peut être caractérisé par de nombreux critères : nature du joint, homocinétie, désalignements possibles, angle de brisure admissible, amortissement, coût relatif, durée de vie, encombrement, résistance...

Afin de répondre au mieux aux spécifications générales des liaisons, il est judicieux de caractériser les solutions techniques permettant de réaliser ce type de liaison.

AVERTISSEMENT : les solutions techniques évoquées dans la question suivante ne représentent qu'une partie des familles de solutions et ne restreignent absolument pas le candidat dans ses choix dans la partie C3 – Dessin d'étude en construction mécanique.

Q27 Inscrire votre réponse dans le **cadre R27 du cahier réponse**.

Compléter les cases non grisées dans les tableaux de caractérisation partielle de solutions techniques évoquées.

C.2.7 - Désignation des matériaux

Les carters et les pignons coniques des boîtiers de renvoi conique seront réalisés dans des matériaux de désignation normalisée EN-GJL 400 et 36 Ni Cr Mo 16 respectivement.

Q28 Inscrire votre réponse dans le **cadre R28 du cahier réponse**.

Donner la signification de ces deux désignations normalisées.

C.3 - Dessin d'étude de construction mécanique

C.3.1 - Présentation des supports de travail

Pour cette partie de l'étude, il vous est demandé de définir plusieurs sous-ensembles du mécanisme sur les deux calques format A3 fournis avec le sujet. Les éléments pré imprimés sur ces calques sont destinés à faciliter la mise en place des différents composants.

Le calque n°1, de format A3 horizontal, pré imprimé, fourni avec le sujet, est destiné à l'étude du boîtier de renvoi conique **B2** et aux liaisons entre les arbres d'entrée **Ae2** et de sortie **As21** et **As24** avec respectivement l'arbre intermédiaire **Aint** et les cardans **C1** et **C4**. La figure 6, page T18/21 précise la mise en page du calque n°1. Le candidat trouvera sur le calque fourni une ébauche des arbres d'entrée **Ae2** et de sortie **As21** et **As24**. La figure 7, page T18/21, précise l'implantation des différents composants introduits dans ce paragraphe.

Figure 6 : Mise en page du calque n°1 pré imprimé fourni

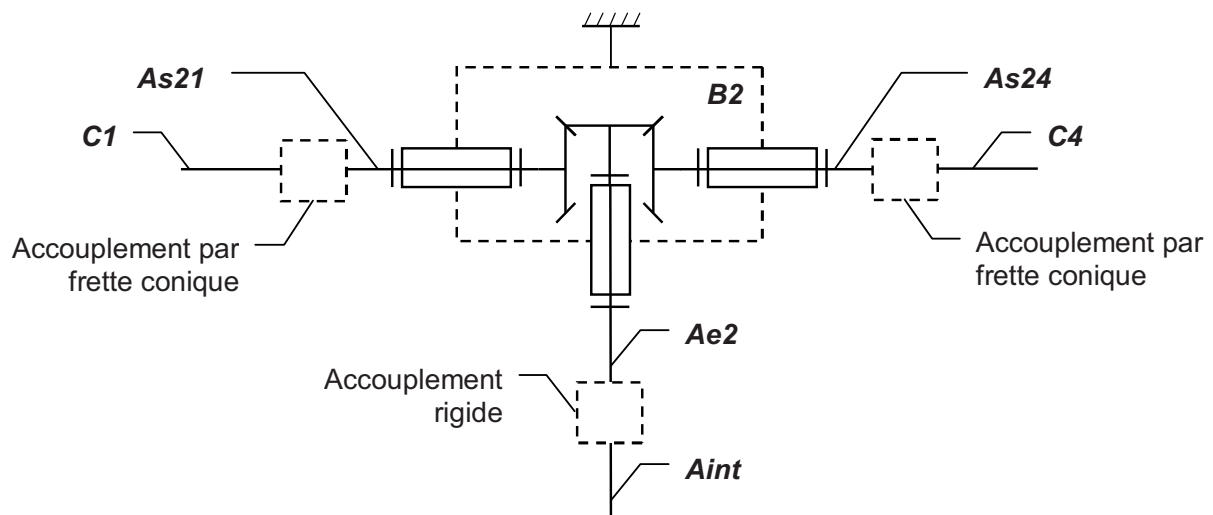
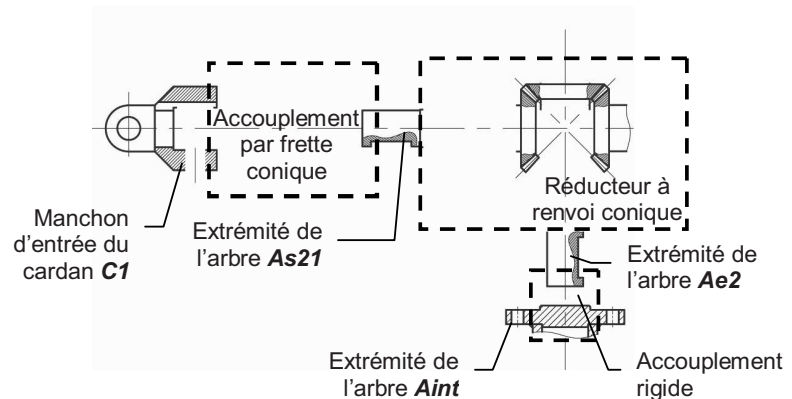
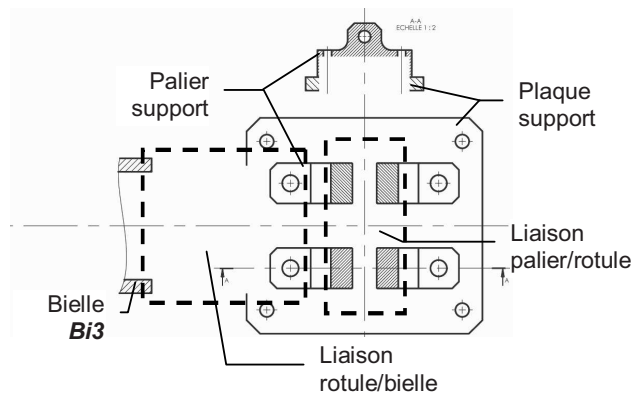


Figure 7 : Implantation des composants du calque n°1

Le calque n°2, de format A3 horizontal, pré imprimé, fourni avec le sujet, est destiné à l'étude d'une des liaisons sphériques entre le corps de la bielle **Bi3** et le marbre **MA0**, les autres liaisons sphériques étant identiques. La figure 8, page T19/21 précise la mise en page du calque n°2.

Figure 8 : Mise en page du calque n°2 pré imprimé fourni



C.3.2 - Consignes spécifiques aux travaux graphiques

Les dessins sont à exécuter à l'échelle 1:1, sauf indication contraire, aux instruments, avec pour l'essentiel mise au net au crayon respectant les épaisseurs de traits normalisées et les exigences d'une bonne lisibilité ; seuls les axes et les écritures seront tracés à l'encre noire. Les tracés de couleur ne sont pas admis. Les normes AFNOR seront respectées.

Les principales conditions fonctionnelles relatives aux liaisons représentées seront clairement indiquées en respectant les règles normalisées AFNOR.

Les éléments normalisés utilisés par le candidat autres que ceux fournis dans le sujet, seront dessinés approximativement en respectant au mieux leurs proportions.

C.3.3 - Travail demandé

Afin d'assurer toutes les fonctions de service et de satisfaire toutes les contraintes définies dans le cahier des charges fonctionnel (pages **T5/21** et **T6/21**), et en utilisant au mieux les éléments fournis sur les **calques n°1 et 2**, on demande :

- L'étude de conception du boîtier de renvoi conique **B2** ;
- L'étude de l'accouplement rigide entre l'arbre intermédiaire **Aint** et l'arbre d'entrée **Ae2** du boîtier de renvoi conique **B2** ;
- L'étude de l'accouplement par frette conique entre l'arbre de sortie **As21** du boîtier de renvoi conique **B2** et le cardan **C1** ;
- L'étude de la liaison sphérique entre le corps de bielle **Bi2** et le marbre **MA0**.

C.3.3.1 - Conception du boîtier de renvoi conique **B2** – Répondre sur le calque n°1

Données :

Les choix suivants ont été réalisés :

- Guidage en rotation des arbres à l'aide de roulements à rouleaux coniques ; on respectera l'implantation des roulements suivant le schéma d'architecture de la **figure 9**, page **T20/21** ;

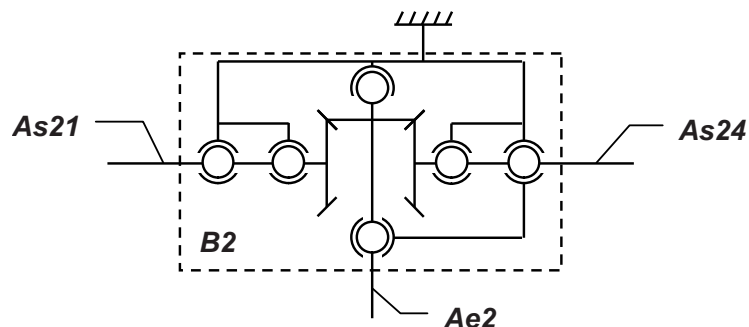


Figure 9 : Schéma d'architecture du boîtier de renvoi conique

- Montage de l'arbre d'entrée **Ae2** et des arbres de sortie **As21** et **As24** dans le carter du boîtier de renvoi conique **B2** ;
- Extrémités des arbres d'entrée **Ae2** et des arbres de sortie **As21** et **As24** clavetées ;
- Carter moulé ;
- Lubrification à la graisse.

Les roulements à rouleaux coniques utilisés sont des roulements de référence 32006 et 32206. La **figure 24, document 11, page D11/13** propose un dessin à l'échelle 1:1 de ces roulements.

Dessiner aux instruments, sur la vue prédéfinie du **calque n°1**, vos propositions de solutions pour la définition complète :

- de la liaison pivot entre l'arbre d'entrée **Ae2** du boîtier de renvoi conique **B2** et le carter du boîtier de renvoi conique **B2** ;
- de la liaison pivot entre l'arbre de sortie **As21** et le carter du boîtier de renvoi conique **B2** ;
- de l'accouplement rigide par plateaux entre l'arbre intermédiaire **Aint** et l'arbre d'entrée **Ae2** du boîtier de renvoi conique **B2** ;
- de l'accouplement par frette conique entre l'arbre de sortie **As21** et le cardan **C1** ; en effet, cela permet d'effectuer un réglage angulaire continu entre l'arbre de sortie **As21** et le cardan **C1**. La **figure 26, document 12, page D12/13** fournit un extrait de catalogue constructeur de la frette conique utilisée ;
- des éléments d'étanchéité ;
- du carter.

Remarque : la liaison pivot entre l'arbre de sortie **As24** et le carter du boîtier de renvoi conique **B2** étant identique à la liaison pivot entre l'arbre de sortie **As21** et le carter du boîtier de renvoi conique **B2**, elle ne sera pas représentée.

L'ajout de vues complémentaires (éventuellement un croquis à main levée) est laissé à la libre initiative du candidat.

Prévoir toutes dispositions permettant d'assurer :

- la montabilité de l'ensemble étudié ;
- le réglage de la position axiale des pignons coniques permettant d'assurer que les sommets des cônes primitifs des pignons coniques sont confondus ;

- une rigidité maximale des montages de roulements ;
- l'interchangeabilité des carters des boîtiers de renvoi conique **B1** et **B2** ;
- la maintenabilité.

C.3.3.2 - Liaison sphérique entre corps de bielle et marbre – Répondre sur le calque n°2

Le constructeur utilise la même liaison entre le corps de chaque bielle et les marbres **MA1** ou **MA0**.

Le **calque n°2** fournit les éléments suivants :

- la plaque support ;
- les paliers sur lesquels la rotule est montée ;
- la bielle **Bi3**.

Les vues définissant complètement la géométrie des rotules UNIBAL utilisées sont données **figure 25, document 11, page D11/13**. Le candidat pourra s'en inspirer pour toute vue complémentaire.

Dessiner aux instruments, sur la vue prédéfinie du **calque n°2**, vos propositions de solutions pour la définition complète :

- de la liaison encastrement de la rotule UNIBAL avec la bielle **Bi3**. Par ailleurs, la longueur de l'ensemble bielle – rotule doit pouvoir être réglée ;
- de la liaison entre la rotule et les paliers ; hormis le jeu interne à la rotule, cette liaison doit être sans jeu ;
- de la liaison encastrement des paliers avec la plaque support.

Compléter la vue en coupe A-A à l'échelle 1:2 pour préciser la solution retenue pour la liaison encastrement des paliers avec la plaque support.

