

SESSION 2012

AGRÉGATION
CONCOURS EXTERNE

Sections : GÉNIE MÉCANIQUE / MÉCANIQUE

ÉPREUVE D'ANALYSE ET DE CONCEPTION DES SYSTÈMES

Durée : 8 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

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

Dès la distribution du sujet, le candidat s'assurera que l'exemplaire du dossier remis est complet.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A

Le sujet comporte 57 pages :

- une présentation de l'étude (pages 3/57 à 8/57) ;
- le texte de l'étude (pages 9/57 à 35/57) ;
- le dossier technique constitué des documents repérés Document Technique DT1 à DT11 ;
- le dossier réponses contenant des documents repérés Document Réponse DR1 à DR7.

L'étude est composée de 5 parties. Il est proposé au candidat de répartir son temps de travail sur les différentes parties de l'étude.

STIMULATION MAGNÉTIQUE TRANSCRÂNIENNE ROBOTISÉE

Introduction

La Stimulation Magnétique Transcrânienne

La dépression nerveuse est une pathologie qui représente aujourd'hui, selon l'Organisation Mondiale de la Santé, la première cause mondiale de handicap. Pour guérir les patients souffrant de dépression, la voie chimique, avec l'utilisation d'anti-dépresseurs, est la voie la plus largement développée. Dans des cas de dépressions sévères, cette voie reste d'une efficacité limitée. Actuellement, une technique alternative prometteuse est la Stimulation Magnétique Transcrânienne, ou SMT.

Principe de la technique

La SMT est une technique qui vise à moduler l'activité de certaines zones du cortex cérébral. Pour ce faire, on crée des courants électriques dans ces zones, par émission d'un champ magnétique à proximité. La technique est sans danger pour le patient, contrairement à un traitement comme l'électroconvulsivothérapie, et en fait sans douleur ou effet secondaire notable. Son efficacité est constatée après une vingtaine de séances quotidiennes de l'ordre de 30 minutes chacune.

Pour créer un champ magnétique suffisant, la SMT est basée sur l'emploi de sondes de en forme de huit (Figure 1).

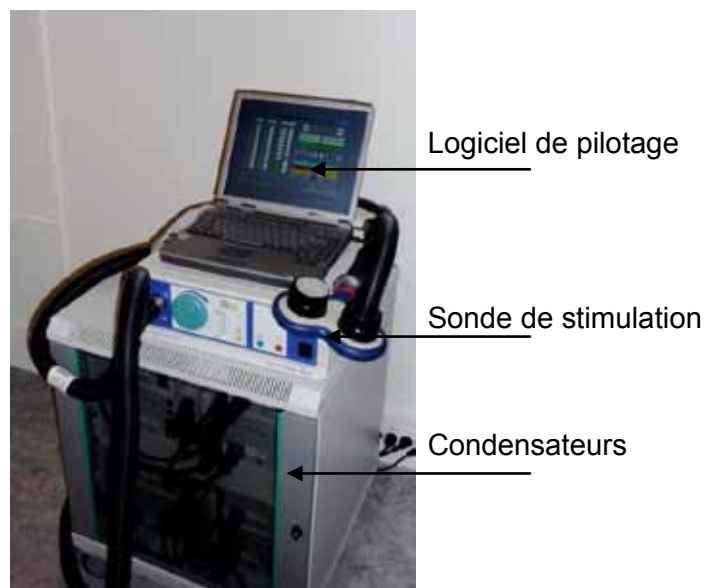


Figure 1 : sonde de stimulation magnétique transcrânienne et son système de commande

Par le biais de condensateurs (Figure 1), on produit une impulsion de courant électrique à la fois puissante et brève, libérée de façon intermittente à travers la sonde qui est formée d'un bobinage en cuivre. Pour les systèmes de stimulation actuellement utilisés, le courant électrique génère par induction un champ magnétique d'une intensité généralement comprise entre 1 et 2 Tesla. Les variations du flux magnétique induisent alors un courant électrique dans les tissus du cortex cérébral. Les zones pouvant être ainsi activées sont à une distance de l'ordre d'une trentaine de millimètres sous la surface du crâne.

Les limitations des systèmes actuels

La technique est aujourd'hui reconnue et approuvée aux USA, au Canada et en Israël. Des études sont en cours en Europe. La principale difficulté réside aujourd'hui dans le positionnement de la sonde de stimulation : pour statuer sur l'efficacité de la technique, il

s'agit de pouvoir traiter un point sur le cerveau à l'aide de la sonde avec une précision de l'ordre du millimètre. Pour ce faire, les systèmes les plus performants sont basés sur la procédure suivante :

- reconstitution du cerveau et du crâne du patient à l'aide d'images obtenues par IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) ;
- définition des zones à traiter par le neurologue ;
- séance de SMT à l'aide d'un outil de navigation ; cet outil (Figure 2) est constitué de deux caméras qui permettent de connaître à tout moment durant la séance la position de la sonde par rapport au cerveau du patient. Ainsi le praticien peut à l'aide d'un retour sur écran positionner correctement la sonde sur la tête.



Figure 2 : SMT réalisée avec un outil de navigation pour positionner la sonde de stimulation

L'air étant un très bon isolant, la sonde de stimulation doit impérativement être maintenue en contact avec la tête du patient. Le contact est obtenu en bloquant la sonde à l'aide d'un système mécanique (Figure 2) ou en tenant en permanence la sonde. Dans le premier cas tout mouvement du patient va dégrader la qualité du geste. Dans le deuxième cas, le geste est délicat et pénible pour le praticien :

- il doit assurer le maintien du contact de la sonde avec la tête du patient, en assurant à ce dernier un certain confort ;
- il doit maîtriser la position et l'orientation de la sonde par rapport au patient, en suivant les informations fournies par l'outil de navigation ;
- il doit compenser les éventuels mouvements du patient, qui peut avoir tendance à déplacer sa tête durant les 30 minutes d'une séance.

Afin de soulager le praticien, de rendre possible le traitement à grande échelle de patients avec la SMT et d'affiner l'évaluation de ses effets, il est proposé de développer un système robotique pour la SMT. Ce système fait l'objet de cette étude.

Le système robotique

Principes de conception

Le système robotique est un ensemble qui peut être déplacé pour être installé dans une salle d'accès standard, avec un encombrement global d'environ 0,96 m x 1,6 m sur une hauteur de 1,9 m (Figure 3 et document DT1) et une masse totale d'environ 400kg.

Le système proposé vise à positionner avec précision une sonde de SMT autour du patient, tout en lui assurant un haut niveau de sécurité ainsi qu'au praticien supervisant le déroulement de la séance. Une des caractéristiques fondamentales du système est donc son niveau de sécurité, qui est obtenu en adoptant les principes suivants :

- limiter la zone physiquement atteignable par le robot (son espace de travail) à une zone la plus proche possible de celle qui nous intéresse pour l'application. Celle-ci correspond approximativement au scalp du patient (Figure 4) ;

- contrôler l'effort de contact de la sonde sur la tête du patient, en mesurant directement cet effort de contact ;
- limiter matériellement les vitesses du robot, afin qu'il ne puisse surprendre le patient et le praticien.



Figure 3 : vue générale du système robotique

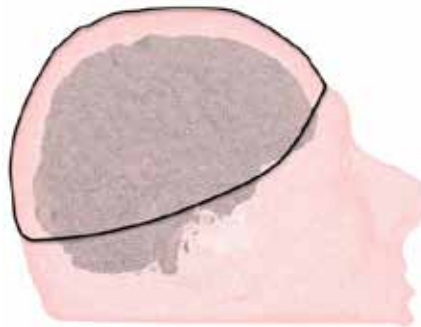


Figure 4 : délimitation de la zone de stimulation. Celle-ci comprend la zone couverte par les cheveux, les tempes et le front

Définition du geste

Pour chaque zone du cerveau à stimuler, le positionnement sur la tête du patient est défini comme suit, afin d'optimiser l'efficacité du traitement (Figure 5) :

- la normale à la face d'appui sur la tête du patient partant du centre de la sonde doit passer par le point à traiter sur le cerveau du patient ;
- le plan d'appui de la sonde doit être en contact avec la tête du patient, avec tangence localement à cette dernière ;
- le plan passant par le plan de symétrie du huit formé par la sonde (Figure 6) doit contenir la tangente au sillon cortical au niveau du point à traiter. Le sillon est une structure anatomique identifiée sur le cortex cérébral lors de la désignation du point à traiter. Cette contrainte impose la valeur de la rotation propre de la sonde, c'est-à-dire la rotation autour l'axe normal à sa face d'appui.

La recherche automatisée de la position optimale de la sonde sur le crâne à partir de la position d'un point à traiter sur le cerveau ne sera pas abordée dans l'étude. On retiendra cependant que la sonde est positionnée pour minimiser la distance entre le point à traiter sur le cerveau et le point de contact sur le crâne.

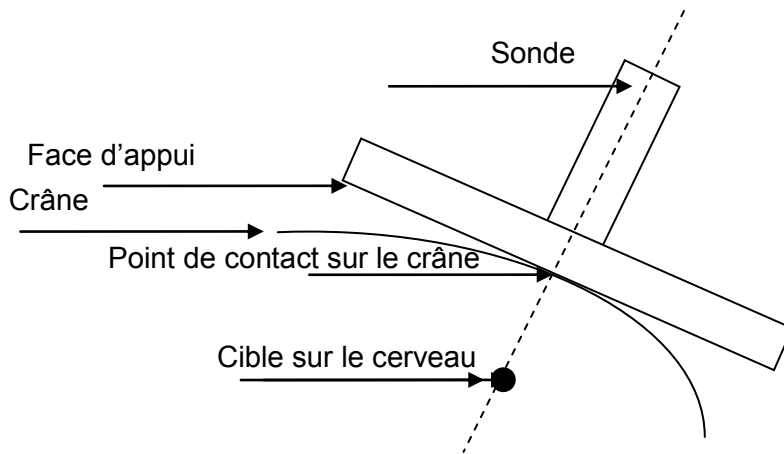


Figure 5 : principe de positionnement de la sonde pour stimuler une zone du cerveau déterminée

Structure du système

La tête humaine peut être considérée en première approximation comme une sphère afin de réaliser le positionnement de la sonde avec une sécurité maximale. Cette approximation faite, le système permet en trois temps de réaliser le geste décrit dans le paragraphe précédent :

- un premier sous-système, dénommé dans la suite « bras » permet de déplacer le centre de la sonde sur une sphère centrée sur la sphère modélisant le crâne du patient (Figure 6). Le mécanisme correspondant est qualifié de mécanisme « sphérique » ; l'extrémité du bras se déplace sur une sphère ;
- un deuxième sous-système, comprenant une liaison glissière, permet de mettre en contact la sonde sur la tête ;
- un troisième sous-système, dénommé dans la suite « poignet », permet d'orienter la sonde pour assurer à la fois la contrainte de tangence sur la tête et la contrainte portant sur la rotation propre de la sonde. Ce troisième sous-système n'aurait pas lieu d'être si la tête humaine était une sphère parfaite ; c'est lui qui va permettre de gérer la géométrie réelle de la tête.

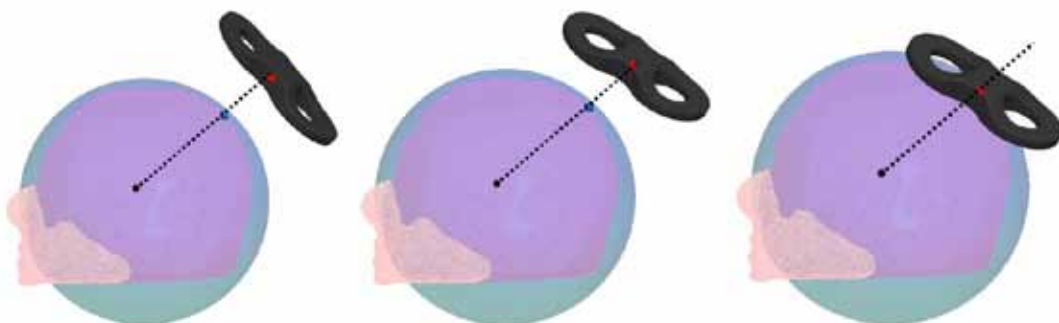


Figure 6 : Décomposition de la tâche de positionnement. À gauche, la normale à la sonde est positionnée pour passer par le point à traiter. Au milieu, la sonde est orientée pour assurer la tangence de la sonde avec la surface de la tête. À droite, la sonde est translaturée pour assurer le contact sonde/tête

Cette décomposition cinématique suppose que le centre géométrique de la tête est quasiment confondu avec le centre de la sphère qui caractérise le premier sous-système (Figure 6). Afin de vérifier au mieux cette condition, le siège du patient est réglable manuellement selon deux directions (Figure 7) pour prendre en compte les différences de morphologie entre les patients.

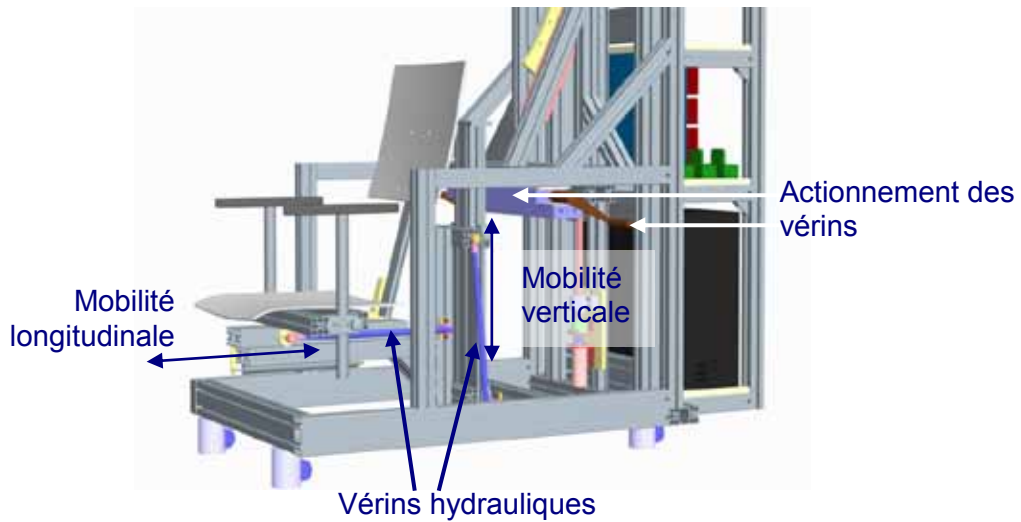
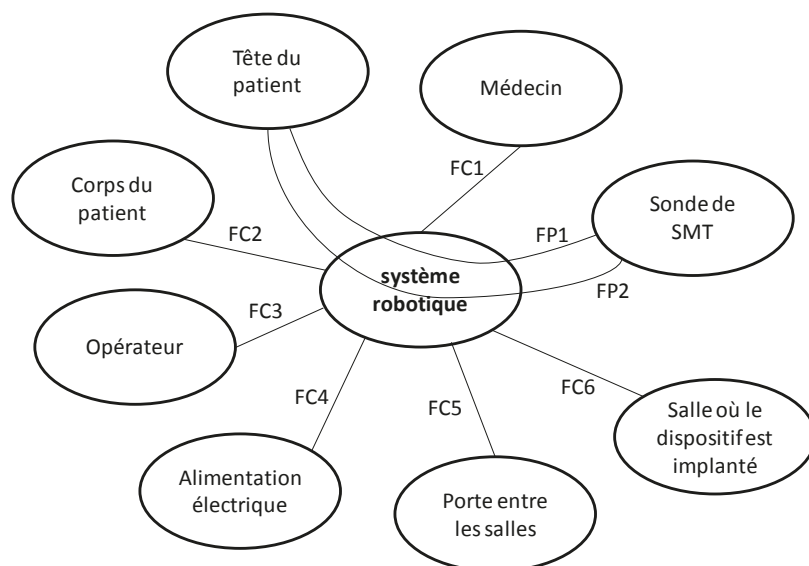


Figure 7 : vue partielle de la structure du système robotique avec la présence de systèmes de réglage de la position du patient

Contraintes principales de conception

Le tableau 1 reprend les éléments principaux du cahier des charges fonctionnel du système.



Fonction		Critères	Valeurs
FP1	Positionner la sonde de SMT à la surface de la tête du patient	Distance tête/sonde	Le contact doit être assuré en permanence
		Positionnement du plan de la sonde	Tangent à la surface de la tête
		Effort de contact	$2,5 \text{ N} \leq F \leq 5 \text{ N}$
		Précision de positionnement	2 à 3 mm

FP2	Déplacer la sonde de SMT à la surface de la tête du patient	Vitesse	De l'ordre de 0,33 mm/s
		Zone de déplacement du centre de la sonde	Toute la partie supérieure du crâne, comprenant la zone couverte par les cheveux, les tempes et le front
FC1	Permettre la planification à l'avance du geste médical par le médecin	Compatibilité des données numériques	Images IRM
FC2	Assurer le positionnement du patient	Positionnement du menton	
		Positionnement du corps	
FC3	Permettre à l'opérateur de contrôler l'exécution du traitement		
FC4	Être alimenté par l'énergie électrique	Caractéristique	Monophasé 230 V
FC5	Être adapté aux portes	Encombrement	Franchissement des portes de taille standard requis
		Mobilité	Mécanisme monté sur roulettes
FC6	Être adapté à la salle	Encombrement du mécanisme	Il ne doit pas imposer de contraintes particulières concernant l'aménagement de la salle
		Mobilité	Il ne doit pas imposer de contraintes particulières concernant l'aménagement de la salle

Tableau 1 : éléments principaux du cahier des charges fonctionnel

Le contexte médical et l'utilisation d'une sonde générant un champ magnétique intense dans son périmètre immédiat (de l'ordre de 60 mm) rendent le problème de conception du système robotique singulier. En conséquence, l'étude proposée vise à valider le dimensionnement correct des solutions techniques par rapport au besoin décrit ci-dessus, et en particulier :

- la compatibilité du dispositif avec le champ magnétique (Partie 5.3) ;
- le respect de la sécurité du patient (Parties 1.4, 3.1 et 4.2) ;
- l'assurance de pouvoir accéder à toute la zone de traitement sur la tête du patient (Parties 1.1, 1.2 et 1.3) ;
- le respect des performances cinématiques et dynamiques nécessaires au déplacement de la sonde (Parties 2.1, 2.2, 4.1 et 5.1) ;
- la précision du système (Parties 3.2 et 5.2).

L'analyse sera faite sous deux angles. Une partie de l'étude consistera à valider des performances spécifiées dans le cahier des charges par l'étude des solutions techniques adoptées par le constructeur. Une autre partie de l'étude consistera à confronter les solutions techniques intégrées au système à des solutions alternatives, et critiquer les solutions retenues par comparaison.

Partie 1 : Validation de l'architecture générale du système robotique

L'objectif de cette partie est de valider la cinématique retenue. Pour cela, une analyse en quatre étapes sera développée :

1. validation de la décomposition du mouvement de la sonde par rapport au patient ;
2. validation de l'architecture du système robotique ;
3. mise en évidence de l'impact des variations de morphologie des patients sur le dimensionnement du système robotique ;
4. mise en évidence de l'importance du comportement cinématique pour la commande du système robotique.

Documents à consulter :

Documents techniques

- **DT1** Vues principales du système robotique
- **DT2** Vues principales CAO de la structure du système robotique

Documents réponses

- **DR1** Conséquences d'un décalage du positionnement du patient

1.1. Réflexion préliminaire sur la décomposition cinématique de la tâche

Objectif : Valider le mode de déplacement de la sonde.

La zone que doit parcourir le centre de la sonde est représentée en figure 4. La figure 8 présente par ailleurs les plans et axes de référence utilisés par la suite pour décrire des positions ou des mouvements relatifs à la zone de stimulation. Les plans et les axes sont concourants en un point : le centre géométrique de la tête du patient.

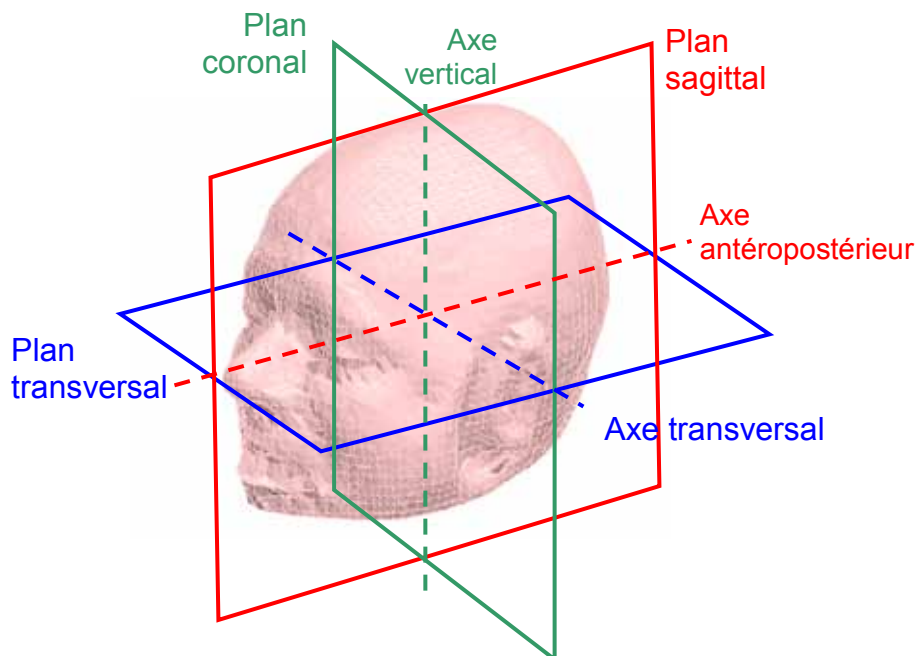


Figure 8 : définition des plans et axes de référence

L'espace de travail doit être parcouru par la sonde à des vitesses faibles, de l'ordre de 0,33 mm/s. En effet, au vu des informations fournies par le médecin, la sonde parcourt une trajectoire d'environ 10 cm pendant environ 5 minutes, cette stimulation étant répétée plusieurs fois pendant la séance.

Le concepteur a choisi de maintenir le patient dans une position fixe laissant le système robotique réaliser l'ensemble des mouvements nécessaires au traitement. La cinématique choisie est la suivante : la sonde est articulée par l'intermédiaire d'une liaison rotule sur un bras mobile qui permet de réaliser la totalité des mouvements de la sonde par rapport au patient.

Question 1

À l'aide de la présentation du système et de la tâche à réaliser, citer au moins une raison pratique qui ait poussé le concepteur à maintenir le patient dans une position fixe.

1.2. Démarche d'évaluation des différentes cinématiques possibles

Objectif : Validation de la cinématique adoptée pour le bras.

Nous nous focalisons ici sur le positionnement du centre de la sonde, sans considérer l'orientation de cette dernière qui dépend du poignet. Trois solutions sont envisagées.

Solution 1 : architecture série à 2 degrés de liberté (DDL)

La première architecture envisageable pour positionner le centre de la sonde est celle constituée de deux segments de forme circulaire ayant chacun une longueur d'arc de 90° . La figure 9 illustre les configurations extrêmes avec une modélisation CAO d'un tel mécanisme dont la première liaison pivot se trouve selon l'axe transversal sur le côté droit de la tête.

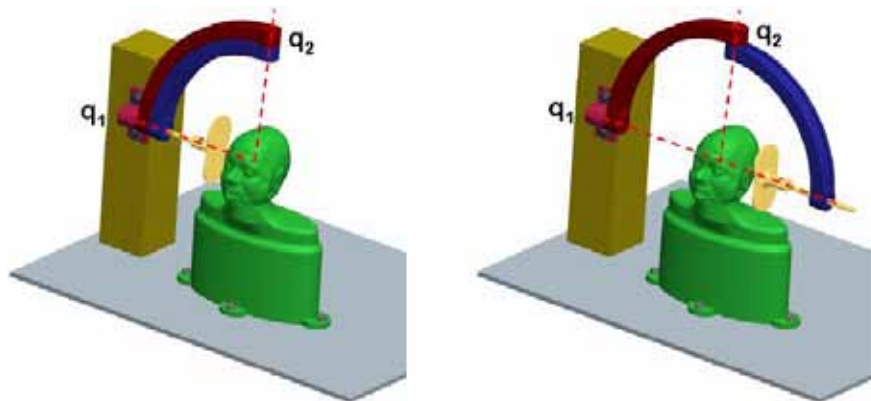


Figure 9 : configurations extrêmes pour un mécanisme sphérique à deux segments de 90° . Le bras est replié à gauche et tendu à droite

Solution 2 : architecture série à 3 DDL

Il est également possible d'ajouter un troisième segment (Figure 10). Cette cinématique permet d'obtenir une famille de mécanismes sphériques constitués de trois liaisons pivot concourantes, chaque segment les liant étant défini par sa longueur d'arc et le positionnement de l'axe de la première liaison pivot.

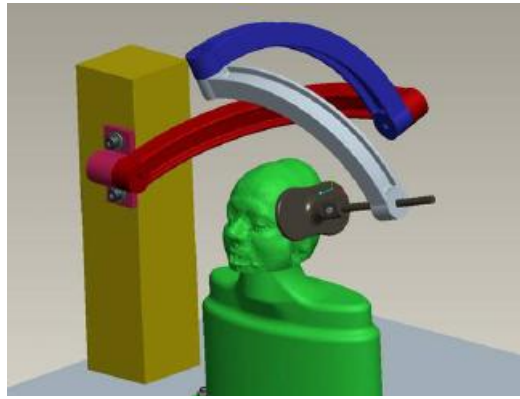


Figure 10 : architecture constituée de trois segments de 90° montés en série et dont l'axe de la première liaison pivot se trouve confondu avec l'axe transversal sur le côté de la tête du patient

Solution 3 : architecture série à 3 DDL (version 2)

Il est également possible d'opter pour une solution utilisant des guidages de forme circulaire (Figure 11). De tels guidages permettent de réaliser un mouvement relatif de rotation entre deux solides, tout comme avec un segment de 90° de longueur d'arc monté sur une liaison pivot. L'architecture proposée en figure 12 utilise un guidage circulaire pour le premier degré de liberté, et un autre pour le troisième degré de liberté.

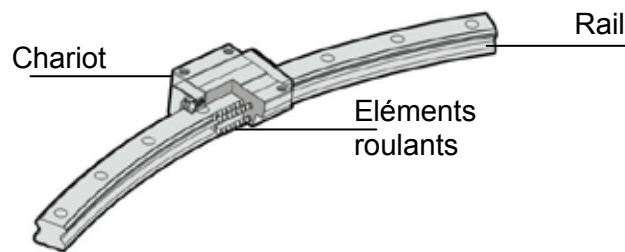


Figure 11 : constitution d'un guidage circulaire par circulation d'éléments roulants

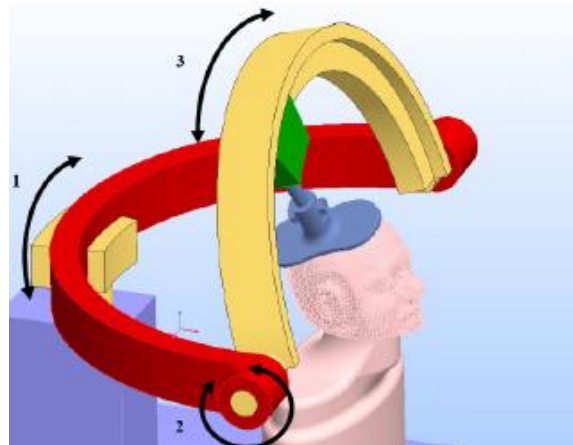


Figure 12 : architecture constituée de deux guidages circulaires en liaison pivot l'un par rapport à l'autre

Question 2

Justifier à l'aide d'un ou plusieurs schémas cinématiques que la solution 1 permet de réaliser un déplacement de la sonde sur une sphère.
Préciser, par des schémas, l'amplitude des mouvements des bras nécessaire pour balayer la zone délimitée en figure 4.

Question 3

Préciser la zone atteignable par la sonde dans la solution 2. Peut-on simplement restreindre les plages angulaires des trois liaisons pivots de façon à ne balayer que la zone représentée en figure 4 ? Justifier les réponses.

Question 4

À l'aide des descriptifs du comportement attendu et des solutions 1, 2 et 3, établir un tableau de synthèse des avantages et inconvénients de chacune des solutions envisagées (positions atteignables, encombrement, rigidité, position des bras par rapport au patient). Justifier brièvement les réponses.

La figure 13 présente la structure du système retenu, basée sur la solution 2, pour laquelle deux liaisons pivots sont réalisées par des guidages circulaires. Sur cette figure apparaît également la liaison glissière et le poignet qui composent le système.

Les sous-systèmes permettant de contrôler les mouvements de la sonde sont au nombre de 7 : 3 pour le bras, 1 pour la liaison glissière et 3 pour le poignet. Ils sont désignés dans la suite comme les axes du robot (Figure 13).

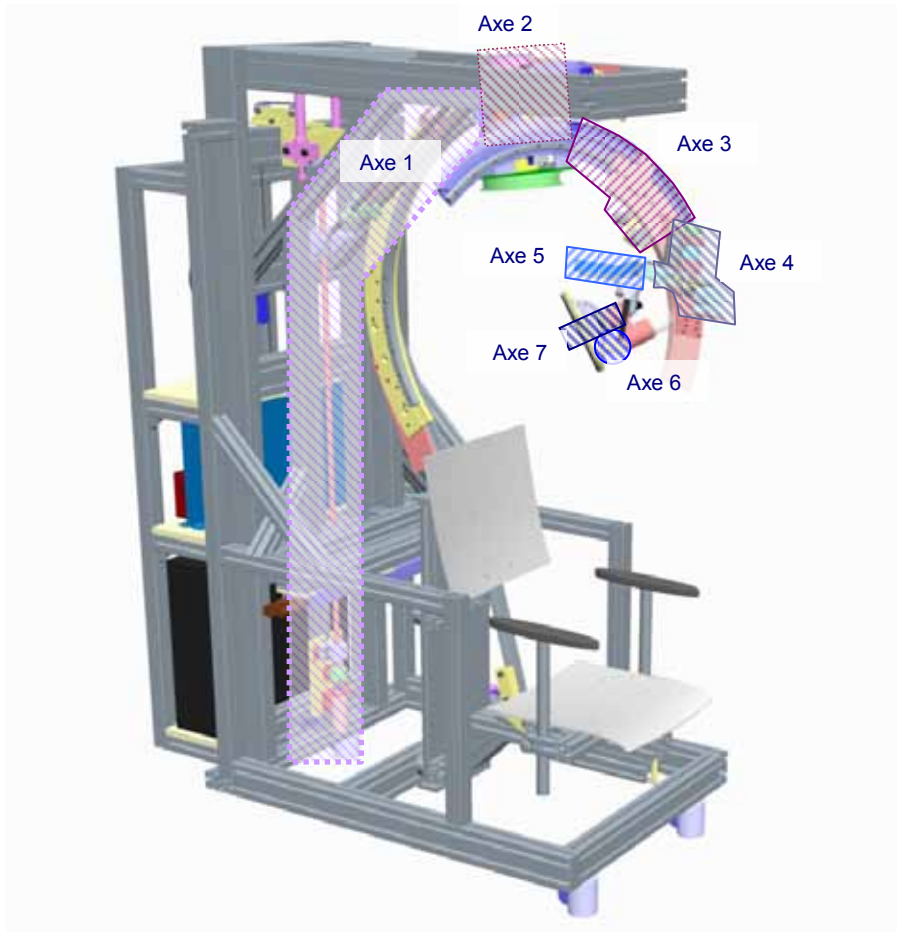


Figure 13 : les sept axes de déplacement du robot

Le schéma cinématique du système robotique dans son ensemble est représenté en figure 14. Il est composé du bras dont l'extrémité parcourt une sphère centrée sur le point d'intersection O grâce aux trois liaisons pivots notées J1, J2 et J3 et d'éléments de longueurs d'arc égales à 90° . Ce bras correspond donc sur le plan cinématique à la figure 10, solution 2. Le poignet composé des liaisons J5, J6 et J7 est un mécanisme sphérique qui permet d'orienter la sonde liée au dernier corps du mécanisme en tournant autour d'un point fixe E, situé à l'intersection des liaisons pivots J5, J6 et J7. Enfin une

liaison glissière J4 de direction EO assure la liaison entre les deux mécanismes sphériques (J1, J2, J3) et (J5, J6, J7).

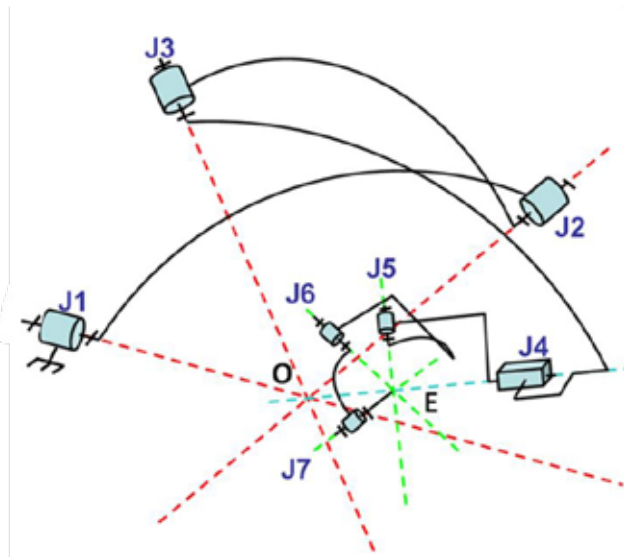


Figure 14 : schéma cinématique du mécanisme complet

Les guidages circulaires sont utilisés pour réaliser la première et la troisième liaison du bras. L'actionnement de la liaison pivot J1 s'effectue par une liaison avec un moteur électrique via un dispositif bielle-manivelle (Figure 15).

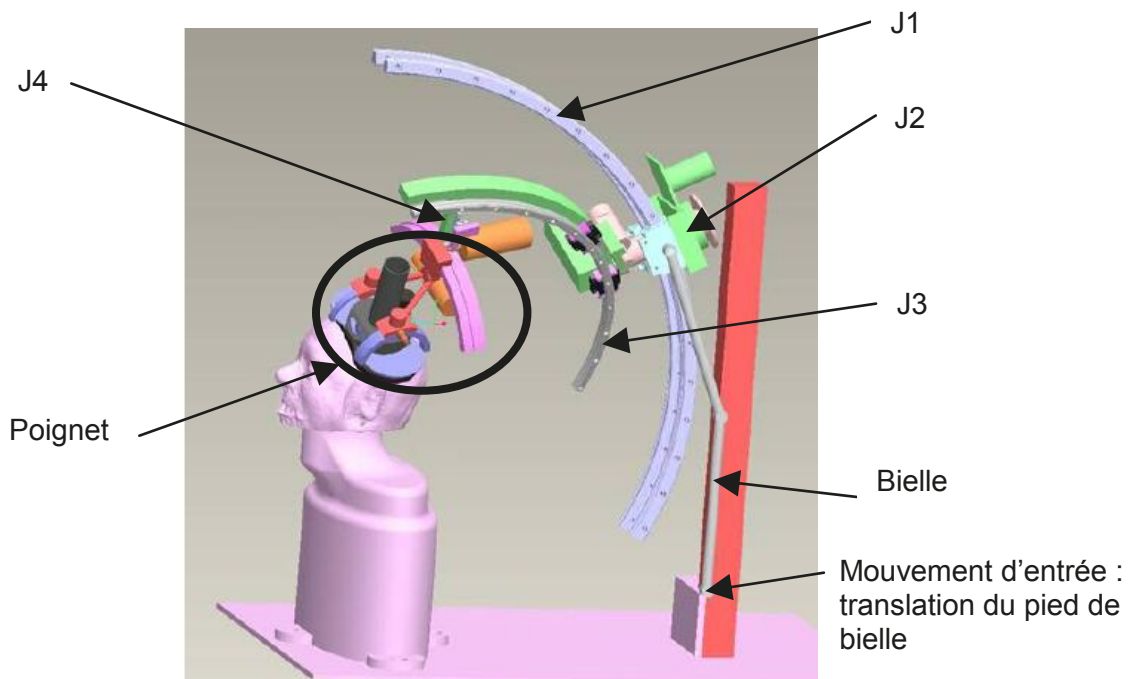


Figure 15 : architecture mécanique retenue constituée de deux guidages circulaires reliés par une liaison pivot et dont l'axe du premier guidage se trouve dans le plan sagittal

Dans la suite de la partie 1, la cinématique des axes 4 à 7 sera prise en compte.

Question 5

Déterminer le torseur de la liaison J_{eq} équivalente aux liaisons J1, J2, J3 et J4.

Question 6

Déterminer la liaison équivalente aux liaisons J5, J6 et J7.

Question 7

Justifier, à partir des réponses précédentes, que la cinématique choisie permet bien de valider les deux premiers critères de la fonction FP1.

1.3. Prise en compte de la morphologie du patient

Objectif : Analyser l'impact des variations de morphologie des patients sur le dimensionnement du système robotique.

Le système doit permettre de traiter tout patient, quelle que soit sa morphologie. Il faut donc vérifier ici que son dimensionnement est adapté.

Le tableau 2 fournit les données anthropométriques (l'anthropométrie est la technique qui concerne la mesure des particularités dimensionnelles d'un homme) incluant hommes et femmes. L'écart entre les mesures mini et maxi permet d'inclure 99% de la population.

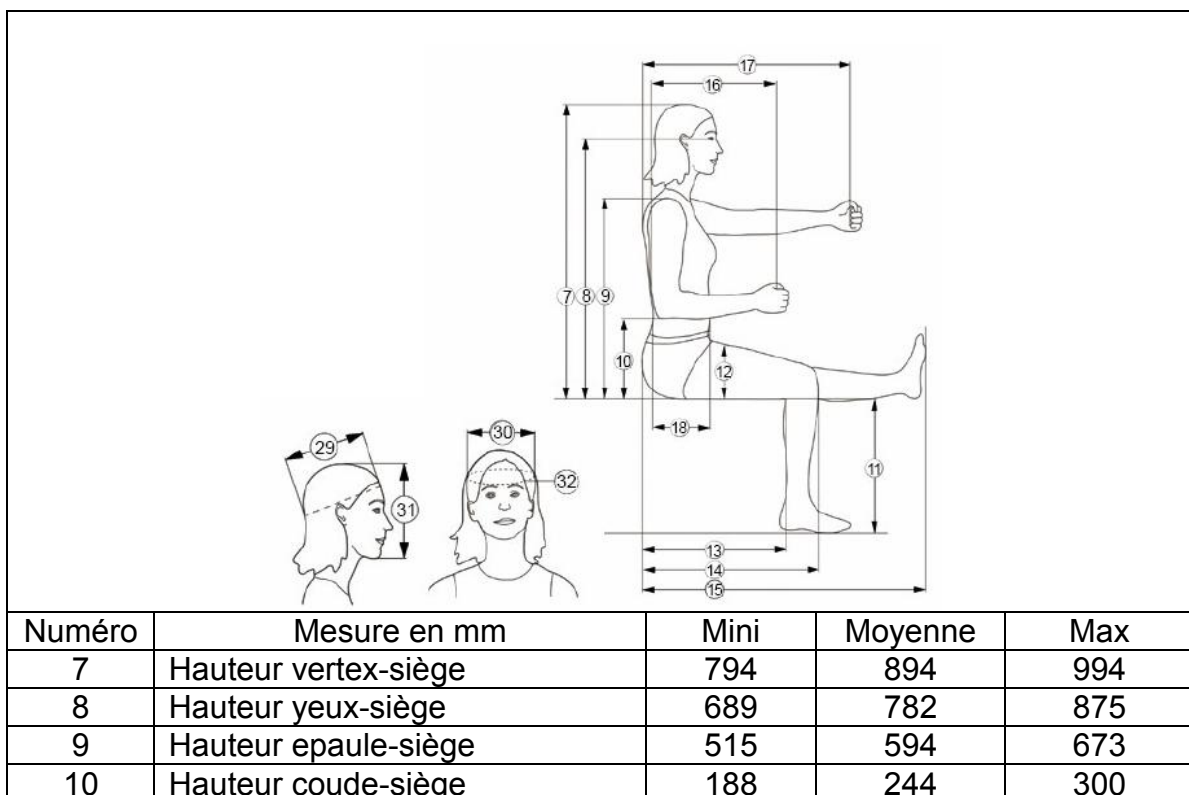
Question 8

À partir des données fournies dans le tableau 2, du document **DT2** et des mouvements explicités en figure 7, vérifier si tout patient peut être positionné correctement dans le système (gestion de la taille du corps et de la tête du patient).

Si le praticien ne prend pas le temps d'effectuer correctement le positionnement du patient, ou si ce dernier tend à bouger durant une séance, des décalages sensibles entre le centre de la tête du patient et le centre O du mécanisme peuvent apparaître.

Question 9

Un décalage peut-il être compensé avec la cinématique retenue ? Quelle est la conséquence principale de l'existence de décalages pour le mécanisme ? Répondre sur le document **DR1**.



11	Hauteur creux poplité-sol	385	446	507
12	Epaisseur de la cuisse	116	149	182
13	Longueur fesses-creux poplité	435	496	557
14	Longueur fesses-genou	532	607	682
15	Longueur fesses-pied	928	1058	1188
16	Longueur coude-main	277	335	393
17	Longueur du bras	651	767	884
18	Profondeur abdomen	167	237	307
29	Longueur de la tête	169	188	207
30	Largeur de la tête	131	145	159
31	Hauteur de la tête	195	228	261
32	Périmètre de la tête	515	569	623

Tableau 2 : données anthropométriques pour hommes et femmes en position assise

1.4. Influence du comportement cinématique

Objectif : Mettre en évidence l'importance du comportement cinématique pour la commande du système robotique.

Dans cette partie, l'influence des propriétés cinématiques du mécanisme sur sa commande est analysée. La question est notamment d'évaluer dans quelle mesure ces propriétés peuvent influencer sur la sécurité du système lors de sa commande.

Pour cette analyse on se ramène, pour des raisons de simplicité, à un mécanisme plan, avec une chaîne cinématique série à 2 corps (Figure 16).

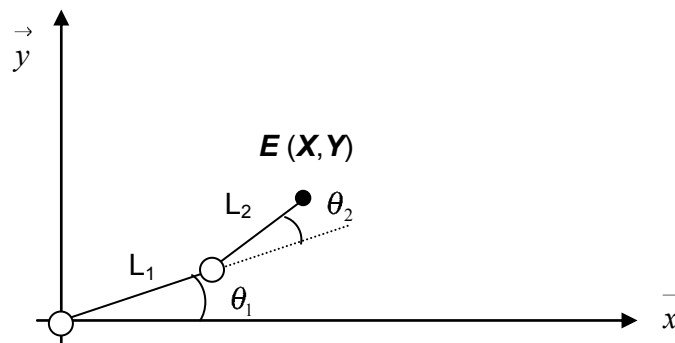


Figure 16 : Mécanisme plan à deux degrés de liberté

Les longueurs des 2 corps sont notées L_1 et L_2 . L'angle θ_1 définit la position du premier corps par rapport au repère fixe. L'angle θ_2 définit la position du deuxième corps par rapport au premier.

Question 10

Écrire le modèle géométrique direct, c'est-à-dire le modèle décrivant la position de l'effecteur du système en fonction des coordonnées articulaires, c'est-à-dire les angles décrivant l'état de chaque liaison.

Question 11

Exprimer, sous une forme matricielle $\dot{X} = J\dot{q}$, les relations liant les vitesses des actionneurs aux composantes de la vitesse de l'effecteur.

Le modèle obtenu est le modèle cinématique du mécanisme. Il décrit le comportement en vitesse du mécanisme en une position (X, Y) fixée. La matrice J , dénommée matrice jacobienne du mécanisme, caractérise ce comportement cinématique.

Un traitement de SMT est défini par un ensemble de points dont la position est connue par rapport à la base du mécanisme. La commande du robot va consister à suivre une trajectoire passant par l'ensemble des points à stimuler. En se ramenant au cas simplifié du mécanisme étudié ci-dessus, cela revient à dire que la trajectoire de référence $(X(t), Y(t))$ du point E à respecter est connue à l'avance.

La mesure de la position de l'effecteur ne peut être effectuée directement. Les seules mesures disponibles sont les mesures des valeurs angulaires θ_1 et θ_2 qui permettent d'obtenir une estimation de la position de l'effecteur en utilisant le modèle géométrique direct. Il est alors possible de calculer à tout instant une erreur en position.

Question 12

À quelle(s) condition(s) peut-on utiliser le modèle cinématique pour déterminer, à partir de l'erreur en position, une erreur articulaire, c'est-à-dire une erreur au niveau des liaisons ?

Question 13

Proposer un schéma-bloc décrivant la commande du robot qui fasse apparaître la trajectoire de référence, l'estimation de position, l'erreur en position et l'erreur articulaire.

Question 14

Représenter une configuration du mécanisme de la figure 16 posant problème lors de l'utilisation de ce type de commande.

Les positions pouvant poser problème sont dénommées les singularités du mécanisme. La sécurité du système est alors mise en jeu. L'existence et la position des singularités dépendent de l'architecture du mécanisme et de ses dimensions.

Question 15

Pour les solutions 1 et 3, des singularités existent-elles dans l'espace de travail du mécanisme ? Si oui, préciser les positions où ces singularités apparaissent. Préciser si ces observations peuvent modifier le bilan réalisé en question 4.

Partie 2 : Analyse et conception du premier axe

Le but de cette partie est de valider les solutions adoptées pour le premier axe. Pour cela, une analyse en trois étapes sera menée :

1. discuter du choix de la solution de transformation de mouvement en la confrontant à une solution alternative ;
2. valider les composants de la chaîne d'action en vérifiant qu'ils répondent au cahier des charges ;
3. mettre en évidence les contraintes géométriques générées par l'assemblage et vérifier la faisabilité de l'assemblage.

Documents à consulter :

Documents techniques

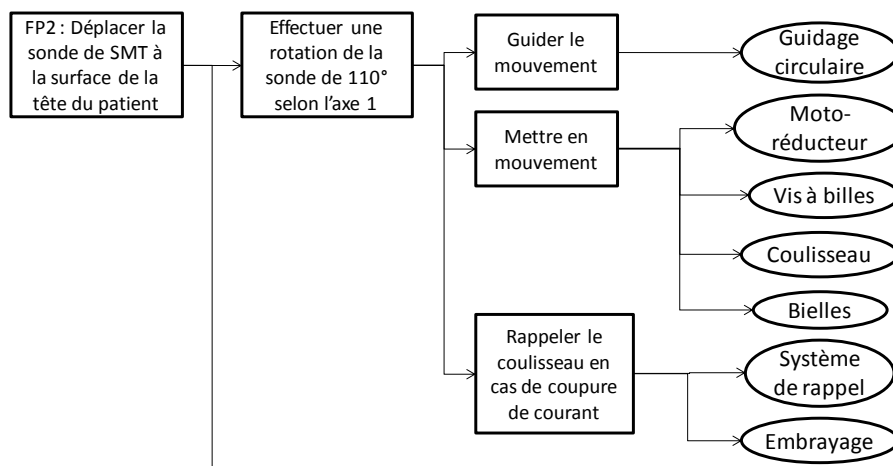
- **DT3** Ensemble de transmission de puissance du premier axe
- **DT4** Détail de la partie inférieure du mécanisme de transformation de mouvement

Documents réponses

- **DR2** Surfaces fonctionnelles de la platine
- **DR3** Cotation géométrique de la platine

L'étude porte dans cette partie sur le premier axe de déplacement du système. La figure 13 permet de situer l'axe 1 par rapport au reste du mécanisme.

Décomposition partielle de la fonction principale FP2 :



2.1 Mode d'actionnement du premier axe

Objectif : Discuter du choix de la solution de transformation de mouvement.

Le choix d'un guidage de forme circulaire permet d'obtenir le mouvement souhaité de rotation pour le premier axe. On souhaite ici discuter du choix de l'ensemble d'actionnement de l'axe 1.

Deux possibilités sont envisagées pour la réalisation de l'actionnement :

- une solution à base de galet moteur ;
- l'utilisation d'un mécanisme de transformation de mouvement ; l'élément à contrôler ayant un mouvement de rotation, il est possible d'utiliser un dispositif bielle-manivelle pour contrôler l'orientation de la manivelle (élément dont on veut contrôler la position).

Question 16

Proposer un schéma de principe à main levée d'une solution de transmission par galet moteur. Proposer une démarche de choix des éléments : galet (matériau, taille), actionneur, capteur. Les critères qui peuvent aider aux choix des différents composants seront précisés, ainsi que les situations à considérer pour effectuer un dimensionnement.

Question 17

Discuter des avantages et inconvénients des 2 types de solutions (complexité, fiabilité, commande). Conclure.

2.2 Validation du dimensionnement de l'actionneur

Objectif : Validation du groupe moto-réducteur.

Un dispositif de type bielle-manivelle est retenu pour la transformation de mouvement pour l'axe 1.

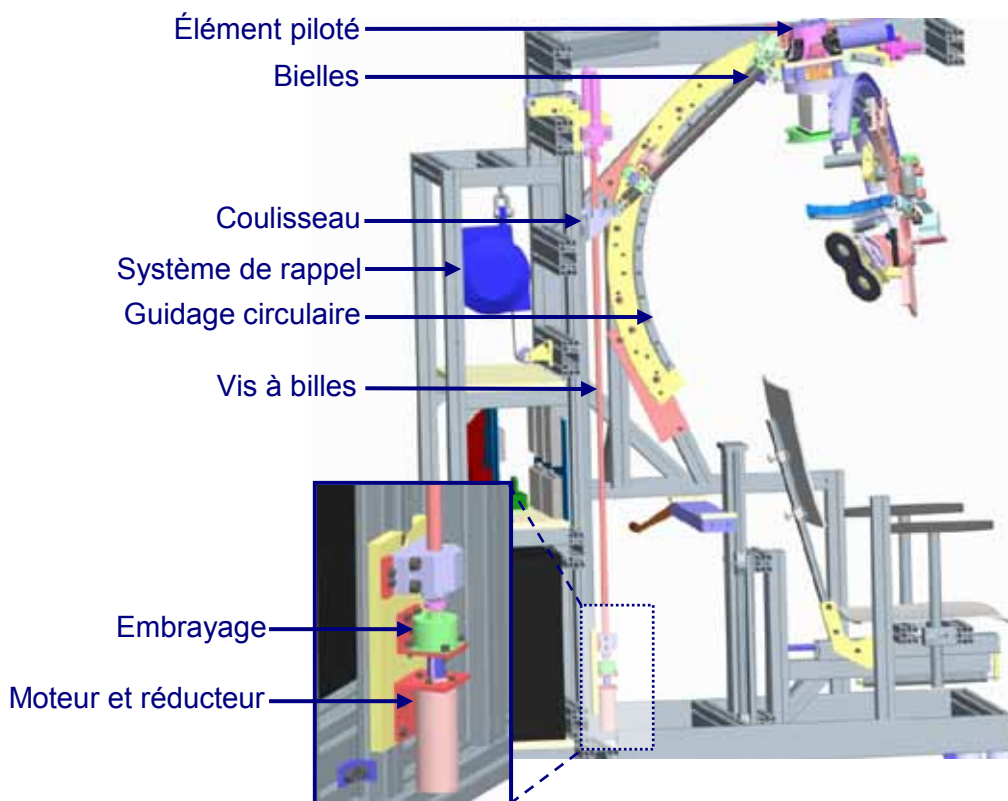


Figure 17 : éléments constituant l'axe 1 de déplacement

Le mouvement de rotation, d'amplitude 110° , est obtenu par l'utilisation d'un guidage de forme circulaire (Figure 17 et document **DT3**). L'actionnement est obtenu à l'aide d'un dispositif bielle-manivelle ; un moteur à courant continu Maxon RE-40 assurant le déplacement du coulisseau par le biais d'un réducteur GP-42C lié à une vis à billes ; le coulisseau étant lié à l'écrou. Un système de rappel exerce en permanence un effort vertical pour tendre à ramener le coulisseau en position haute en cas de coupure de courant. Dans cette situation, un embrayage assure le découplage entre l'ensemble moteur-réducteur et la transmission.

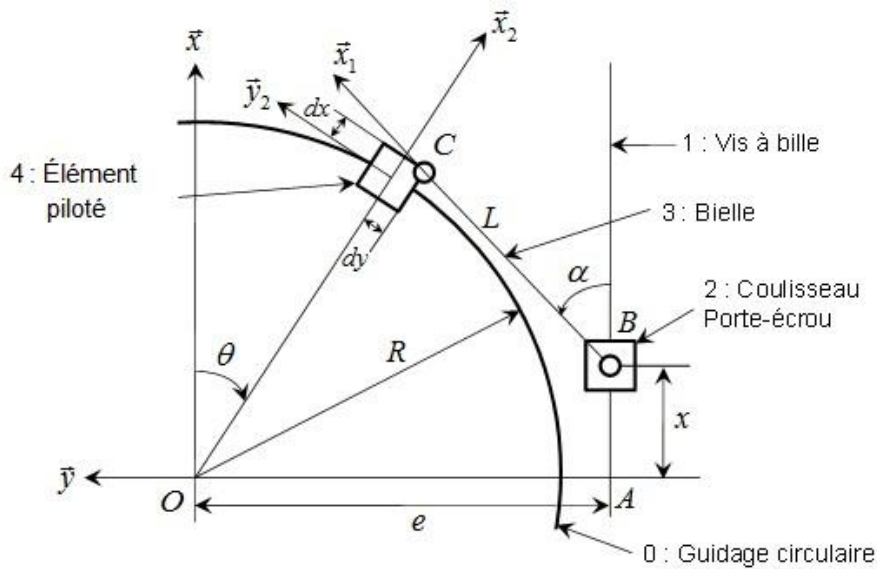


Figure 18 : schéma du système de transformation de mouvement de l'axe 1

Les propriétés de masse et d'inertie du système permettent de le modéliser dans la situation la plus défavorable par une masse m_{mobile} de 15 kg dont la position est identique à celle du chariot situé sur le guidage circulaire. Cette masse est soumise à l'action de la pesanteur, du guidage circulaire et des bielles. Le mouvement des bielles est obtenu en exerçant un couple moteur converti par la vis à billes (de masse m_{eq}) en un effort s'exerçant sur l'écrou selon l'axe de la vis. Cet écrou subit également l'action du système de rappel.

Valeurs numériques : $R = 500$ mm, $L = 560$ mm, $dx = 35$ mm, $dy = 96$ mm, $e = 619$ mm, $d = 16$ mm (diamètre de la vis à bille), $p = 5$ mm (pas de la vis à bille), $k = 1/4,3$ (rapport de réduction du réducteur), $N_{mot} = 6930$ tr/min (vitesse de rotation nominale du moteur), $R_{red} = 21$ mm (rayon de l'arbre de sortie du réducteur), rendement de l'ensemble vis à billes+réducteur : 0,8, effort de rappel $F_{rappel} = 200$ N.

Question 18

À l'aide du schéma de la figure 18, déterminer la relation géométrique d'entrée/sortie du mécanisme liant les variables x et θ .

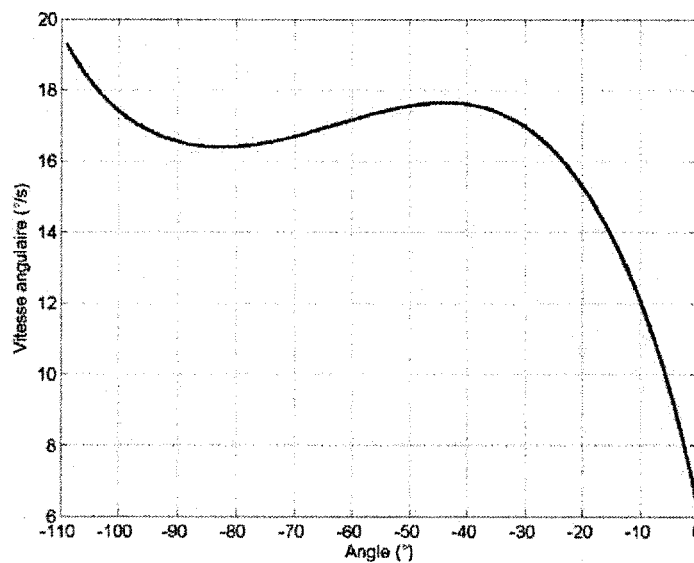


Figure 19 : vitesse angulaire de l'élément piloté en fonction de son angle, à vitesse de rotation nominale du moteur de l'axe 1

Question 19

La courbe de la figure 19 est obtenue par simulation numérique du comportement cinématique du système. En utilisant cette figure, vérifier que les performances cinématiques souhaitées sont atteintes : θ doit varier de 0° à 110° pour une variation maximale de x de 0 mm à 1200 mm, la motorisation doit permettre le parcours d'un secteur angulaire de 110° en une dizaine de secondes.

Le couple nominal (couple permanent maximal) du moteur Maxon RE-40 est $C_m = 0,17 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Question 20

La configuration la plus défavorable est obtenue lorsque la bielle est verticale, c'est-à-dire lorsque $\theta = -90^\circ$. Dans ce cas, il est possible d'approximer $(R+dx) \approx e$. Avec cette hypothèse, préciser si le couple moteur permet l'obtention de l'équilibre en statique.

Une loi de commande de type trapèze est utilisée pour la commande de l'axe. La vitesse nominale de déplacement doit être atteinte en 0,1s, quelle que soit la position de l'axe 1.

Question 21

Une simulation numérique dynamique du système a permis d'identifier, dans le cas le plus défavorable, que l'accélération maximale atteignable par le coulisseau est de $0,2 \text{ m/s}^2$. Cette accélération permet-elle de satisfaire le cahier des charges ? Conclure sur le choix de la motorisation et de la réduction.

2.3 Cotation du système d'entraînement

Objectif : Étude de faisabilité de l'assemblage.

L'ensemble moteur-réducteur-codeur est monté sur une platine, fixée sur le bâti. Elle permet également le positionnement de l'embrayage et l'installation d'un palier de guidage de la vis à billes (Document **DT3** et **DT4**).

L'assemblage de chaque composant est effectué à l'aide de pions de positionnement et de vis de fixation. La plaque de positionnement située à gauche du palier de guidage sert à la mise en position latérale du palier (Document **DT4**).

Question 22

On considère la totalité des éléments décrits ci-dessus (Document **DT4**). Doit-on prendre des précautions particulières pour assurer le fonctionnement de l'ensemble, notamment de la vis à billes ?

Question 23

Sur le document réponse **DR2**, identifier les surfaces fonctionnelles nécessaires au montage de l'ensemble des composants sur la platine ainsi que les surfaces fonctionnelles nécessaires à l'assemblage de la platine sur le bâti.

Question 24

À partir des réflexions menées dans les deux questions précédentes, proposer une cotation géométrique de la platine sur le document réponse **DR3** permettant d'assurer la mise en position du support moteur sur la platine.

Question 25

Quelle(s) solution(s) alternative(s) peuvent être adoptées afin de limiter les exigences de la cotation géométrique ?

Partie 3 : Analyse et conception du deuxième axe

Le but de cette partie est de valider les solutions adoptées pour le deuxième axe. Pour cela, une démarche en deux étapes sera menée :

1. valider le choix du frein et du réducteur par rapport au comportement attendu dans le cahier des charges pour assurer la sécurité du patient ;
2. évaluer les erreurs de positionnement introduites par les flexibilités du réducteur et du bras pour déterminer le respect de la précision de positionnement de la sonde spécifiée dans le cahier des charges.

Documents à consulter :

Documents techniques

- **DT5** Maquette numérique de l'axe 2
- **DT6** Caractéristiques du réducteur Harmonic Drive CPU 17 de l'axe 2
- **DT7** Caractéristiques du guidage circulaire de l'axe 3

Le deuxième axe est conçu à partir d'un réducteur Harmonic Drive, intégré dans un composant qui joue à la fois le rôle de liaison pivot et de réducteur. Ce type de réducteur est composé essentiellement de 3 éléments (Figure 20) :

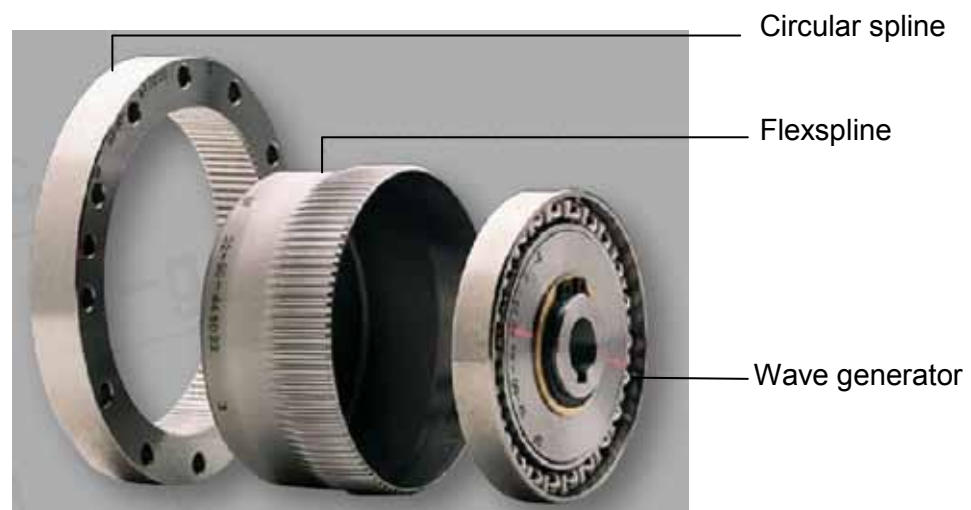


Figure 20 : composant principaux d'un réducteur Harmonic Drive

Le Circular spline est une bague circulaire à denture interne. Le Flexspline est une cloche en acier déformable à denture interne et le Wave generator est un moyeu elliptique serti d'un roulement à billes, utilisé comme convertisseur de couple. Le Flexspline a un diamètre primitif légèrement inférieur à celui du Circular Spline et compte deux dents en moins. Il est déformé par le Wave Generator elliptique. Le Flexspline engrène selon le grand axe de l'ellipse.

L'entraînement en rotation est assuré de la manière suivante, en partant depuis l'actionneur :

- moteur à courant continu Maxon F2260, couple nominal 0,25 N·m, vitesse nominale 2440 tr/min ;
- renvoi conique, rapport de réduction 3 : 1 ;
- réducteur Harmonic Drive CPU-S, taille 17, rapport de réduction 100 : 1. Couple à délivrer sur l'arbre de sortie en l'absence de couple d'entrée pour obtenir la réversibilité du réducteur : 8 N·m. Couple nominal $T_N=24$ N·m.

L'arbre d'entrée du réducteur est à la fois en liaison avec la couronne de sortie du renvoi conique et le rotor d'un frein par manque de courant (Warner Electric, WR220, couple de freinage 1 N·m). En marche normale, ce frein électromagnétique est ouvert : le rotor peut

tourner librement par rapport au stator qui est fixé sur le carter du deuxième axe. En cas d'arrêt d'urgence, déclenché par une défaillance du circuit électrique ou volontairement par le patient ou le praticien, le stator et le rotor du frein sont mis en contact par le biais d'un système de rappel mécanique.

3.1. Validation du réducteur et du frein par manque de courant

Objectif : Valider la sécurité du deuxième axe en cas de coupure de courant.

Question 26

Quel est l'intérêt du réducteur employé par rapport aux autres technologies de réduction existantes ?

Question 27

À partir des vues de la maquette numérique fournies en document **DT5**, représenter sous forme de schéma technologique l'ensemble de la transmission du deuxième axe.

Question 28

Indiquer le rôle du roulement à billes installé en sortie du moteur.

Un modèle simplifié d'analyse du comportement de l'axe 2 consiste à considérer (Figure 21) que le bras monté sur cet axe est équivalent à une masse ponctuelle m de 5 kg, équivalente à la masse du poignet, située sur l'axe 4, à une distance D variant entre 125 mm et 205 mm du centre de rotation de l'ensemble du bras. L'axe 2 permet d'effectuer une rotation de 360° au maximum. L'axe 3 permet de faire varier la longueur d'arc entre l'axe de rotation de l'axe 2 et le guidage linéaire de l'axe 4 entre 50° et 130° . Le rayon R' du guidage de l'axe 3 est égal à 400 mm.

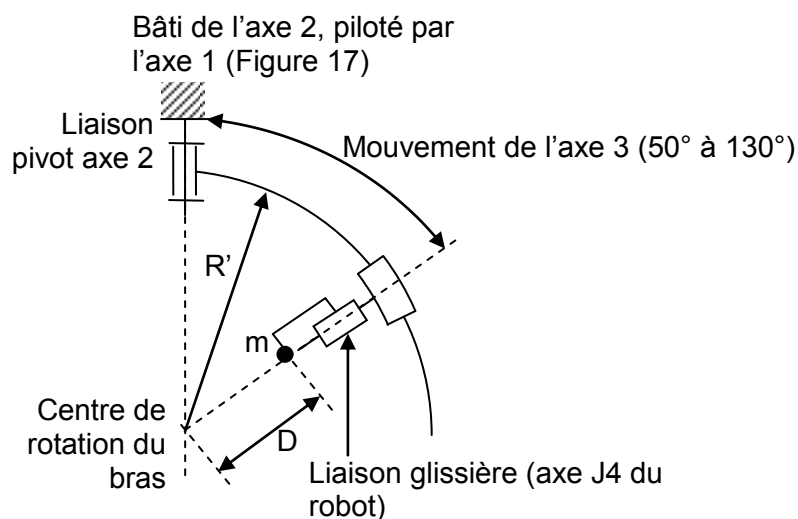


Figure 21 : schématisation du bras dans un plan contenant l'axe de rotation du deuxième axe

Question 29

Au moment de la fermeture du frein, quelle est la position la plus défavorable pour le système de freinage ? Évaluer le couple de freinage nécessaire au niveau du frein par manque de courant. Conclure sur le choix du frein.

En cas d'arrêt d'urgence, l'axe de rotation du deuxième axe doit revenir en position verticale du fait du système de rappel présent sur l'axe 1. Selon la position angulaire de ce

deuxième axe, le patient peut avoir des difficultés à sortir. Pour rendre l'opération aisée, un système de désarmement ponctuel permet sous l'action du praticien de débrayer le frein et manipuler manuellement le bras selon le deuxième axe en appuyant sur le poignet.

Question 30

Évaluer l'action mécanique maximale nécessaire de la part du praticien pour déplacer manuellement le deuxième axe et rendre possible la sortie du patient. Commenter la valeur numérique obtenue.

3.2. Évaluation de la précision sous charge

Objectif : Évaluer les déplacements de la sonde dus aux déformations du bras.

Le poids que représente le poignet crée un moment significatif sur le deuxième axe. On souhaite évaluer l'influence sur la précision :

- d'une part de la rigidité torsionnelle du réducteur ;
- d'autre part des déformations des éléments de structure du bras ainsi que du guidage circulaire correspondant à l'axe 3.

Question 31

En utilisant le modèle introduit en figure 21 et la documentation Harmonic Drive, évaluer la rigidité torsionnelle du composant dans le cas le plus défavorable et le déplacement induit du centre de la sonde.

Les éléments de structure formant les deux parties de l'axe 3 ont une forme curviligne (Figure 22). Leurs déformations sous charge peuvent présenter une contribution que l'on souhaite évaluer. La figure 23 en donne une représentation.



Figure 22 : représentation des éléments de structure du bras robotique en aval de l'axe 2

Le guidage circulaire utilisé pour l'axe 3 est du même type que celui utilisé pour l'axe 1 (guidage THK HCR 15 – 400 - Document **DT7**).

Question 32

Proposer, sans réaliser les calculs, une modélisation pour étudier le comportement sous charge de la glissière à éléments roulants. Comment avec cette modélisation évaluer la contribution du guidage de J3 au déplacement sous charge de la sonde ?

Le résultat d'une analyse réalisée à l'aide d'un logiciel de simulation par méthode des éléments finis est représenté en figure 23. L'analyse concerne les éléments de structure du bras situés en aval de l'axe 2. Le guidage est alors modélisé par un contact direct, en ne prenant pas en compte son comportement.

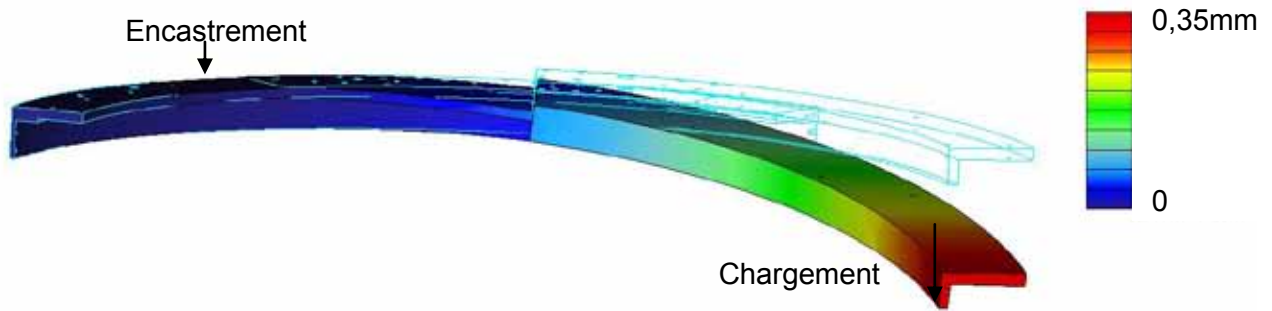


Figure 23 : champ de déplacement lors de l'application du chargement équivalent au poids du poignet dans la position la plus défavorable

Question 33

Comment peut-on utiliser cette analyse pour conclure sur la contribution du deuxième axe, du troisième axe et des éléments de structure associés dans le déplacement sous charge du centre de la sonde ? On précisera quels résultats précédents doivent être réutilisés, et le raisonnement pour conclure sur le déplacement résultant.

Question 34

Quelles dispositions constructives peut-on adopter pour réduire le déplacement sous charge si son amplitude est trop importante ?

Partie 4 : Analyse et conception du quatrième axe

Le but de cette partie est de valider les solutions adoptées pour le quatrième axe. Pour cela, une démarche en deux étapes sera menée :

1. discuter le choix de la solution de transformation de mouvement en la confrontant à une solution alternative ;
2. valider le comportement de l'axe lors de sa commande pour réguler l'effort de contact de la sonde sur la tête du patient.

Documents à consulter :

Documents techniques

- **DT8** FAST de description de la fonction FT11 : positionner la sonde SMT à la surface de la tête du patient

Documents réponses

- **DR4** Schéma bloc simplifié modélisant le comportement de l'asservissement en effort de l'axe 4
- **DR5** Schéma bloc complet modélisant le comportement de l'asservissement en effort de l'axe 4

4.1. Conception de l'entraînement de l'axe

Objectif : proposer des solutions constructives pour réaliser la sous-fonction technique FT11 « Effectuer une translation du poignet porte-sonde de 50 mm selon l'axe 4 ».

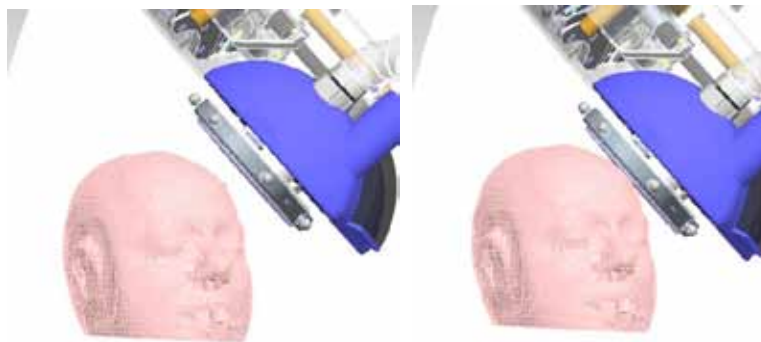


Figure 24 : mouvement de translation du poignet porte-sonde sous l'action de l'axe 4

Le mouvement de translation du poignet porte-sonde (Figure 24), d'amplitude 50 mm, est obtenu à l'aide d'une liaison glissière. L'actionnement est assuré par un moteur à courant continu (Figure 25) associé à un réducteur de rapport 200 : 1. Pour des raisons de compacité, la transmission est faite sur 2 axes parallèles, avec interposition d'un dispositif poulie-courroie de rapport unitaire en aval du réducteur. Un embrayage est installé avant le dispositif de transformation de mouvement de type pignon-crémaillère qui va finalement piloter la position du poignet. Associé à un dispositif de rappel à effort constant, l'embrayage permet d'assurer un mouvement de translation du poignet vers l'extérieur de la tête du patient en cas de coupure de courant.

La mesure de position angulaire de l'arbre moteur est réalisée en aval du réducteur, au niveau du pignon. L'amélioration de résolution obtenue usuellement en plaçant le codeur en amont du réducteur, près du moteur, n'est donc pas obtenue. La résolution angulaire du codeur choisi (100 pas/tour) permet tout de même une mesure de la position en translation du poignet porte-sonde avec une précision de l'ordre de 0,3 mm.

Pour des raisons de sécurité, nous devons obtenir une vitesse maximale de translation en régime permanent de l'ordre de 6 mm/s. Pour des raisons de sécurité et de confort, la

force appliquée par la surface de la sonde tangente à la surface en contact du crâne du patient doit être maintenue en dessous de 5 N selon l'axe orthogonal au plan de contact. La commande de l'axe 4 est effectuée par rapport à la mesure de cet effort fournie par un capteur intégré à la sonde.

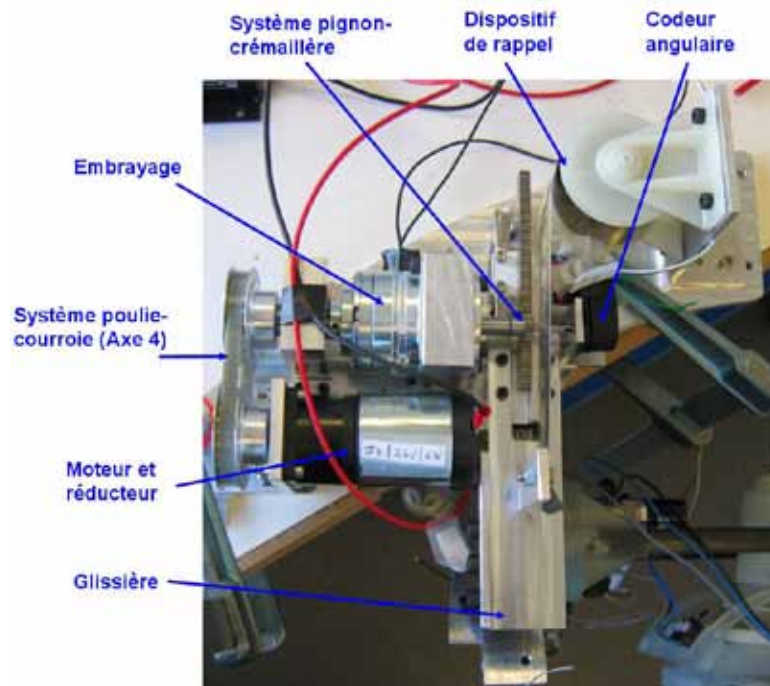


Figure 25 : éléments constituant l'axe 4 de déplacement

Question 35

Proposer au moins deux solutions, qui seront détaillées dans deux schémas cinématiques, pouvant être utilisées pour remplir la fonction technique FT11.

Question 36

Donner les avantages et les inconvénients en termes de sécurité, compacité, précision pour chaque solution proposée ainsi que pour la solution adoptée.

4.2 Analyse de la régulation en effort

Objectif : Évaluation du comportement de l'asservissement en effort.

Comme précisé précédemment, la commande de l'axe 4 est réalisée à partir de la mesure de l'effort de contact de la sonde sur le patient, à l'aide d'un capteur intégré à la sonde. Afin de valider la sécurité de la commande, un modèle sous forme de schéma-bloc est établi. Ce modèle permet notamment de faciliter la conception de la commande et de la partie opérative du mécanisme en fonction du comportement attendu en sortie.

Question 37

Compléter le schéma bloc du document **DR4** illustrant le comportement du système décrit ci-dessus. À l'intérieur des blocs seront notés les noms des composants utilisés. Les grandeurs physiques de chaque lien seront précisées ainsi que leurs unités.

Le comportement d'un moteur à courant continu est partiellement décrit par les équations ci-dessous :

$$\begin{cases}
 U(t) = U_L(t) + U_R(t) + e(t) \\
 U_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} \\
 U_R(t) = Ri(t)
 \end{cases}
 \quad
 \begin{cases}
 C_m(t) = K_i i(t) \\
 e(t) = K_e \omega(t)
 \end{cases}$$

Avec I_{eq} inertie équivalente de l'ensemble des éléments liés à l'axe moteur.

Question 38

Sur le schéma bloc du document réponse DR5, compléter partiellement la partie correspondante à la modélisation du moteur électrique Maxon F2140.

Nom du composant	Caractéristiques	Notation	Valeurs
Moteur	Inertie autour de l'axe moteur	I_m	$2,4 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
	Vitesse de rotation nominale	ω_m	59 rad/s
	Couple moteur	C_m	26,3 N·m
	Couple résistant	C_r	négligé
	Résistance électrique du moteur	R	3,28 Ω
	Inductance du moteur	L	0,341 mH
	Constante de force contre-électromotrice	K_e	0,0144 V/(rad/s)
	Constante de couple	K_i	0,0144 N·m/A
	Coefficient de frottement visqueux	f	$29 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad}/\text{s})$
Capteur de position angulaire de l'arbre moteur	Résolution angulaire	K_{mot}	100 pas/tr
Réducteur	Inertie équivalente ramenée à l'arbre de sortie du réducteur	I_R	$0,2 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
	Rapport de réduction	K_{red}	1/200
Poulies	Inertie autour de leur axe de rotation	I_P	$9,0 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
	Rapport de réduction	K_P	1
Arbre secondaire et pignon	Inertie autour de leur axe de rotation	I_{AS}	$2,6 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
	Rayon primitif du pignon	R_{PI}	5 mm
Crémaillère + poignet	Masse	M_{CP}	4,6 kg
Ressort de rappel Spiroflex	Effort de traction	F_R	53 N
Tête du patient	Raideur	K_T	5000 N/m
Capteur d'effort de la sonde	Résolution	K_F	1 V/N
Partie commande	Facteur de conversion	K_{C1}	1
Axe 4	Rendement global de l'axe 4	η	1

Tableau 3 – caractéristiques principales des éléments constituant l'axe 4

Question 39

À l'aide des éléments présentés ci-dessus, appliquer le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble des composants de l'axe 4. Le déplacement de la crémaillère par rapport au bâti sera noté $x(t)$. Le résultat sera exprimé en fonction de l'inertie équivalente I_{eq} de l'ensemble des éléments ramenée à l'axe moteur. L'expression de I_{eq} sera précisée.

Question 40

À l'aide du résultat de la question précédente et des données du tableau 3, finir de compléter le schéma bloc du document réponse **DR5**.

Le tracé des diagrammes de Bode correspondants au schéma bloc précédent en boucle ouverte (sur la boucle en effort) est donné en Figure 26.

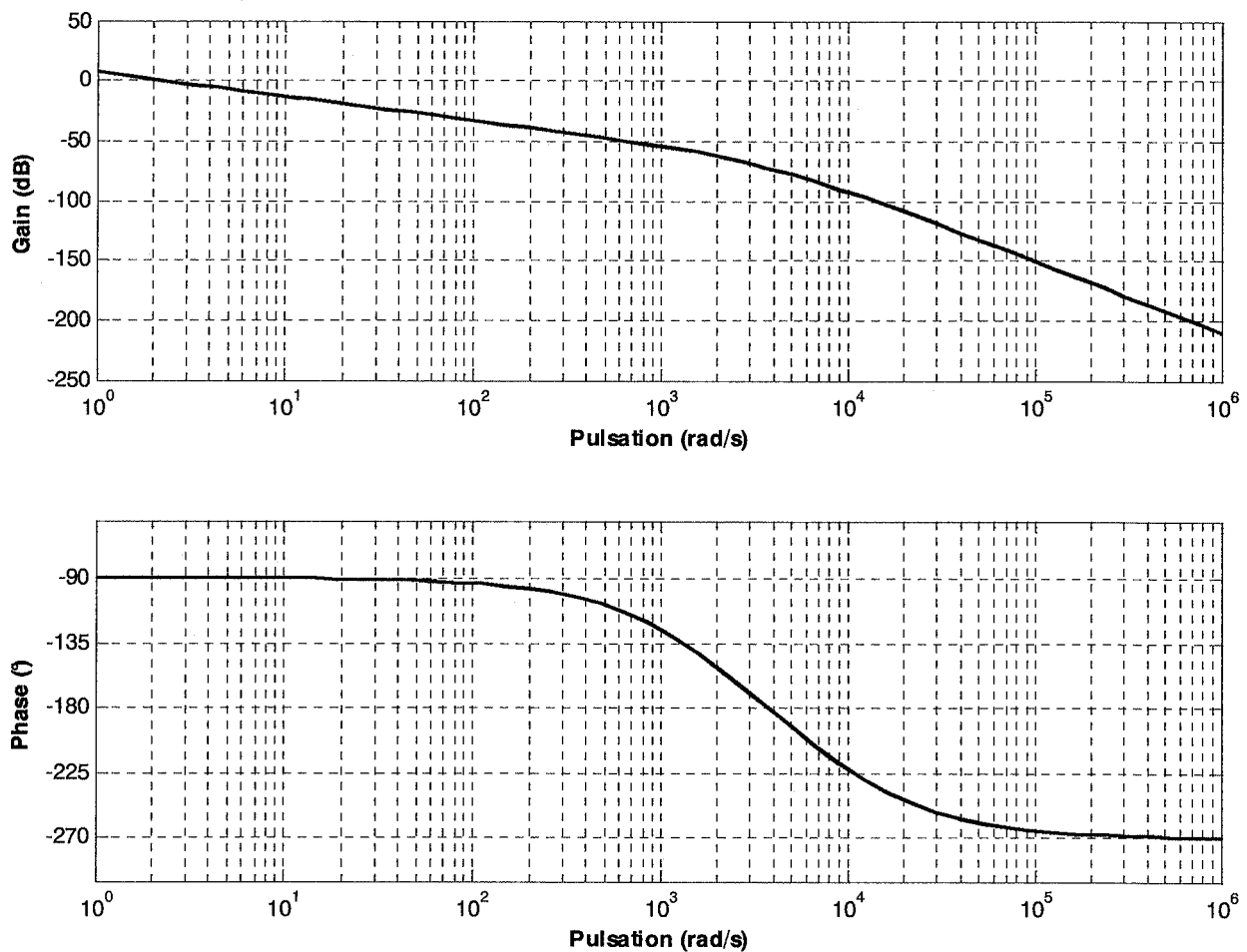


Figure 26 : diagrammes de Bode

Pour assurer le confort du patient, un temps de réponse à 5% de 1 s est souhaité.

Question 41

Dans le cas d'un système bouclé convenablement amorti, on pourra utiliser, sans aucune justification, la relation $t_{R5\%} \cdot \omega_{0dB} = 3$ où ω_{0dB} désigne la pulsation de coupure à 0 dB en boucle ouverte et $t_{R5\%}$ le temps de réponse à 5% de la valeur en régime permanent.

À l'aide du diagramme de Bode, préciser si la rapidité du système est suffisante.

Question 42

Proposer un correcteur permettant de corriger le système. Justifier ce choix.

Le concepteur a choisi un correcteur proportionnel.

Question 43

Proposer une méthode de réglage de ce type de correcteur et préciser la valeur du gain retenu permettant de respecter le cahier des charges.

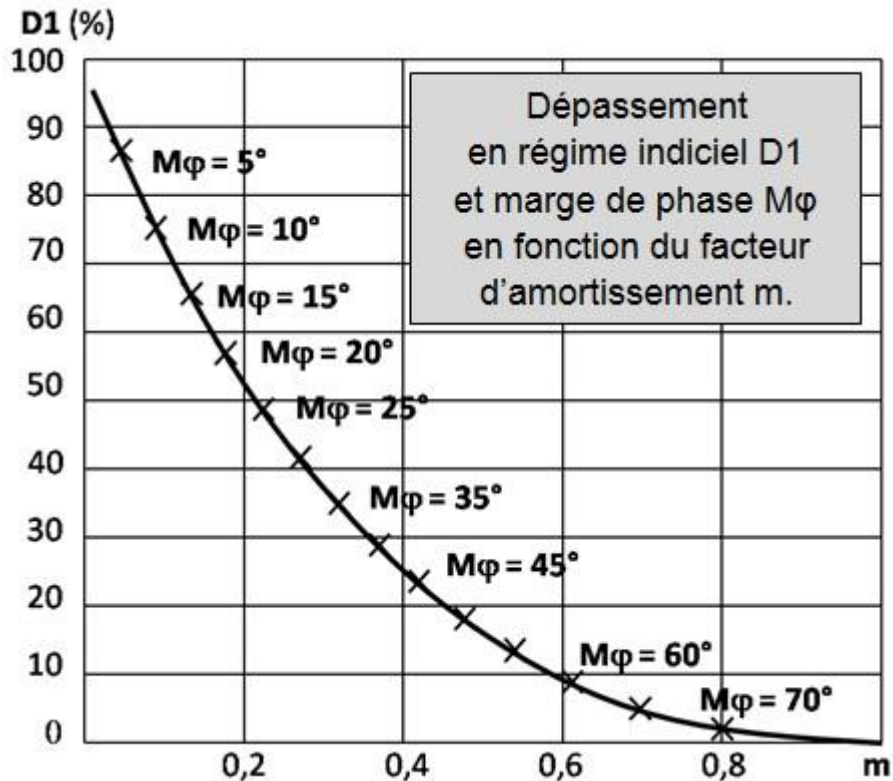


Figure 27 : abaque du dépassement et de la marge de phase en fonction du facteur d'amortissement.

Question 44

Afin d'éviter que la sonde ne heurte violemment la tête du patient, le diagramme temporel de l'asservissement en effort de l'axe 4 ne doit pas admettre de dépassement. Le système respecte-t-il le cahier des charges ? Justifier la réponse vis-à-vis de la sécurité du patient.

Partie 5 : Analyse et conception du poignet

Le but de cette partie est de valider les solutions adoptées pour le poignet du système robotique. Pour cela, une démarche en trois étapes sera menée :

1. valider les composants de la chaîne d'action en vérifiant qu'ils répondent au cahier des charges ;
2. évaluer les erreurs de positionnement introduites par la flexibilité du poignet pour une solution alternative ;
3. choisir un couple matériau-procédé pour la solution alternative considérée.

Documents à consulter :

Documents techniques

- **DT8** FAST de description de la fonction FT11 : positionner la sonde SMT à la surface de la tête du patient
- **DT9** Maquette numérique du poignet
- **DT10** Banque de données matériaux
- **DT11** Champ de déplacement et de contraintes de la pièce à deux arcs (S)

Documents réponses

- **DR6** Carte d'Ashby
- **DR7** Carte à bulles d'Ashby

Caractéristiques du poignet	Valeurs
Vitesses maximales de rotation : <ul style="list-style-type: none">- Axe 5- Axe 6- Axe 7	20°/s 30°/s 60°/s
Couples au niveau de l'axe de rotation : <ul style="list-style-type: none">- Axe 5- Axe 6- Axe 7	6 N·m 4,5 N·m 1,6 N·m
Masse de l'ensemble support de sonde + sonde	2 kg

5.1. Étude des liaisons et validation des actionneurs

Objectif : Valider les composants de la chaîne d'action en vérifiant qu'ils répondent au cahier des charges.

Le poignet est un mécanisme sphérique, correspondant sur le schéma cinématique de la figure 14 aux liaisons J5, J6 et J7 (Document **DT9**). Les liaisons J5 et J6 sont obtenues par le biais de guidages circulaires, qui permettent d'avoir un centre de rotation confondu avec le centre géométrique de la face d'appui de la sonde.

Pour la liaison J5, il s'agit d'un guidage standard, similaire à ceux utilisés pour les axes 1 et 3. Pour la liaison J6, il s'agit d'un guidage spécifique, réalisé pour améliorer la compacité du système. La liaison J7 est réalisée à l'aide d'un roulement à 4 points de contact à section mince, permettant là encore d'optimiser la compacité du système.

La transmission de mouvement est réalisée pour les liaisons J5 et J6 par le biais de transmissions à câbles. Un câble fixé à ses extrémités est enroulé autour d'un cabestan entraîné par un moteur (Figure 28). Pour la liaison J5, le cabestan est monté directement sur le moteur.

Pour la liaison J6, un dispositif poulie-courroie de rapport unitaire est employé pour déporter l'actionneur du cabestan.

La rotation du cabestan provoque son déplacement le long du câble, et par conséquent le déplacement de l'élément mobile sur lequel il est installé.

La transmission de mouvement de l'axe 7 est réalisée par le biais d'un dispositif poulie-courroie.

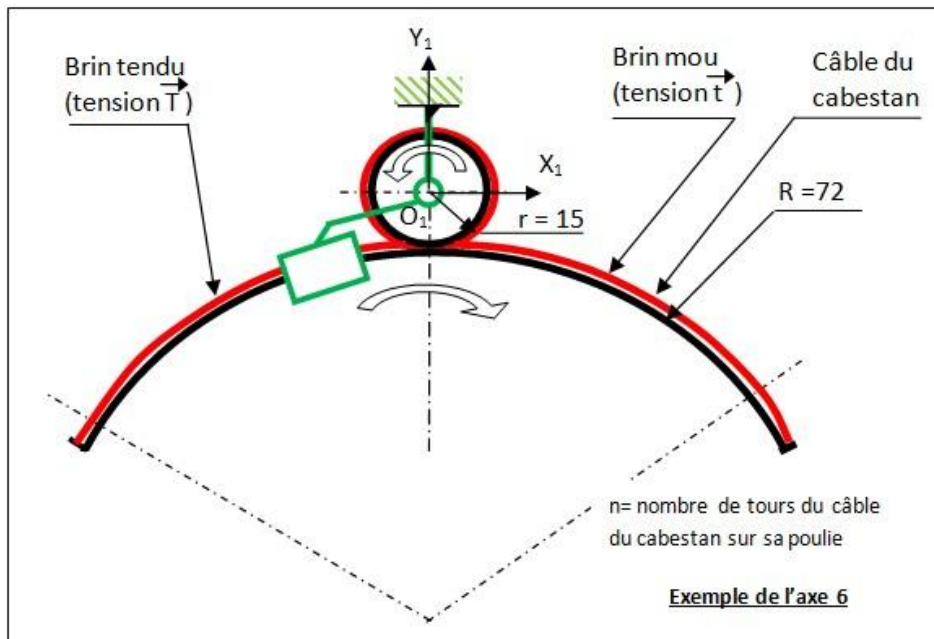


Figure 28 : principe d'une transmission par cabestan

Question 45

Représenter pour chacun des trois axes (5, 6 et 7), sous la forme d'un schéma cinématique, les solutions technologiques utilisées.

La figure 29 propose une modélisation du contact entre le câble et le cabestan sur lequel est enroulé le câble. Pour simplifier l'analyse, l'élément est supposé de forme circulaire, sans gorges.

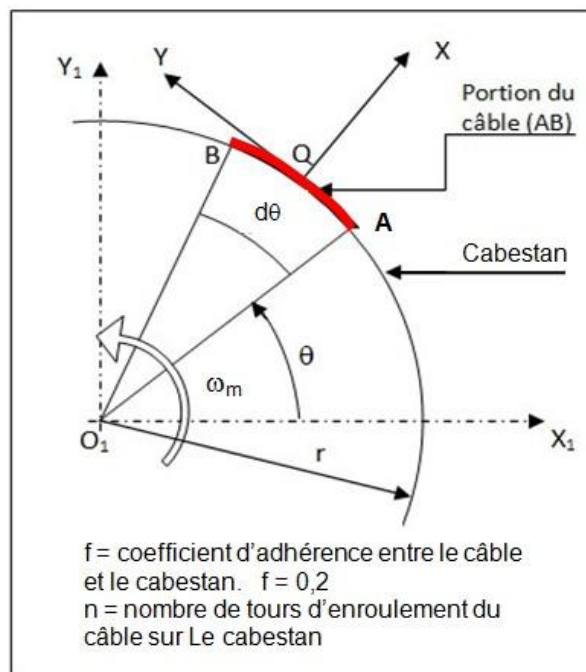


Figure 29 : modélisation du contact du câble sur le cabestan

Question 46

Dans ce cas, exprimer le couple transmissible sans glissement par le biais de ce dispositif. Faire apparaître explicitement l'angle α d'enroulement du câble, la tension $t = 35 \text{ N}$ du brin mou et T du brin tendu du câble. Commenter l'influence du choix des matériaux et de la géométrie du cabestan.

Question 47

À l'aide de la question précédente, déterminer l'enroulement nécessaire pour la transmission de l'axe 6.

Afin d'améliorer la compacité du poignet, on souhaite concevoir de manière spécifique un guidage permettant de remplacer celui installé pour l'axe 5.

Question 48

Décrire une solution constructive en indiquant les composants utilisés pour assurer la fonction de guidage, et la démarche de dimensionnement qu'il faudrait appliquer. Justifier vos choix.

5.2 Analyse de la précision du poignet sous charge.

Objectif : Évaluer les erreurs de positionnement introduites par la flexibilité du poignet pour une solution alternative. Choisir un couple matériau-procédé pour la solution alternative considérée.

Le poignet peut être une source de déformations nuisant à la précision de positionnement de la sonde sur le patient. Dans cette partie, on revient sur le choix de conception de la liaison J6 par un guidage non symétrique, en étudiant le comportement d'une autre solution, plus logique en apparence, à 2 bras. Cette solution est représentée en figure 30 : le caractère symétrique du poignet est alors conservé, avec un guidage réalisé par contact direct entre deux éléments obtenus par des techniques de prototypage rapide. La solution de transmission par cabestan est identique à celle décrite précédemment.

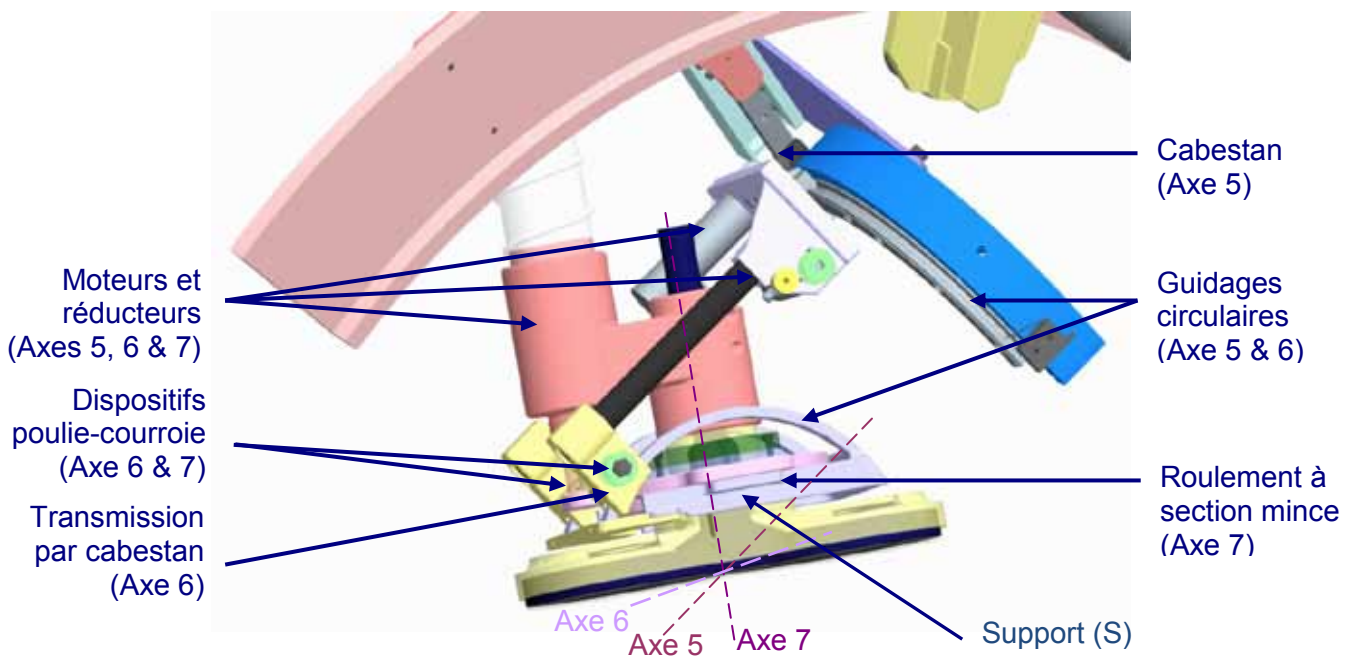


Figure 30 : conception symétrique du guidage de l'axe 6

Afin de comparer les solutions de guidage, on souhaite évaluer le comportement en fonctionnement de la solution représentée en figure 30 à l'aide d'outils numériques. Le

poignet possède un comportement qui varie *a priori* dans son espace de travail, c'est-à-dire lorsque l'on fait évoluer la position des axes 5, 6 et 7 ainsi que sa position à l'aide du bras.

Question 49

La maquette numérique complète du système est disponible. On se focalise ici sur les déformations de l'élément support (S), qui comprend les deux bras (Figure 30 et Figure 31), lors du fonctionnement du système robotique. Quelle démarche d'analyse adopter pour étudier avec des outils numériques les déformations de cette pièce ? Préciser les outils numériques qu'il serait intéressant d'utiliser, les informations qu'ils permettraient d'extraire, et l'ordonnancement qu'il faudrait adopter pour pouvoir conclure sur le comportement sous charge de l'élément lors du fonctionnement du robot.

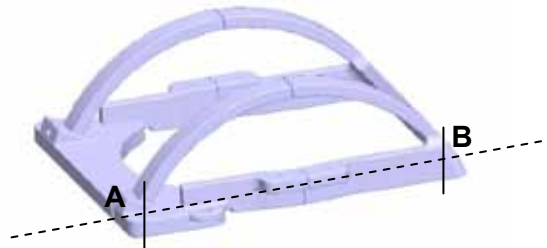


Figure 31 : vue du support (S)

Question 50

L'étude des déformations des différents éléments du système peut passer par l'emploi de logiciels de simulation par méthode des éléments finis. Préciser la chronologie des étapes de l'analyse qui doit être respectée avec ce type d'outil. Pour la pièce support (S), préciser et commenter les choix qu'il faudrait faire en ce qui concerne la modélisation des conditions aux limites, du chargement, du maillage.

On fournit le résultat d'une analyse par éléments finis de la pièce (S) (Document **DT11**). L'élément est considéré encasté en sa partie centrale sur l'arc supérieur. Le chargement correspond à l'action de la sonde sur le support. La situation considérée permet de se ramener à une étude plane, dans le plan de l'un des arcs.

Question 51

Quel critère mettre en place pour valider le choix d'un matériau à partir des résultats fournis dans le document DT11 ?

À partir de l'observation du champ de déplacements, quelle(s) information(s) est-il possible d'extraire concernant l'erreur de positionnement de la pièce. Comment en déduire l'erreur de positionnement du point cible sur le cerveau (Figure 5).

5.3. Choix de matériau et procédé d'obtention

Objectif : Choisir un couple matériau-procédé pour la solution alternative considérée

Dans cette partie, la solution alternative décrite en 5.2. est toujours considérée. Il est proposé de conduire une optimisation du matériau du support (S) afin de statuer sur l'adéquation de la solution en termes de précision. Différents objectifs fonctionnels doivent être pris en compte :

Objectif 1 - Rester dans le domaine élastique, avec un coefficient de sécurité de 2 ;

Objectif 2 - Conserver la légèreté du système en gardant une grande rigidité ;

Objectif 3 - Choisir un procédé d'obtention adapté à la forme de la pièce et à la production désirée (50 pièces / an) ;

- Objectif 4 - Minimiser l'empreinte carbone dans une démarche d'éco-conception ;
 Objectif 5 - Limiter l'influence du champ magnétique.

Afin d'optimiser le matériau du support (S), on souhaite dans un premier temps exprimer un indice de performance (M) permettant de procéder au choix du matériau par l'utilisation de cartes d'Ashby. On considère une situation très simplifiée, pour laquelle le chargement de la pièce (S) a lieu dans son plan de symétrie (Figure 32). On admettra que la poutre AB est de section constante, et que son comportement mécanique est comparable à une lame de ressort de flexion de rigidité k .

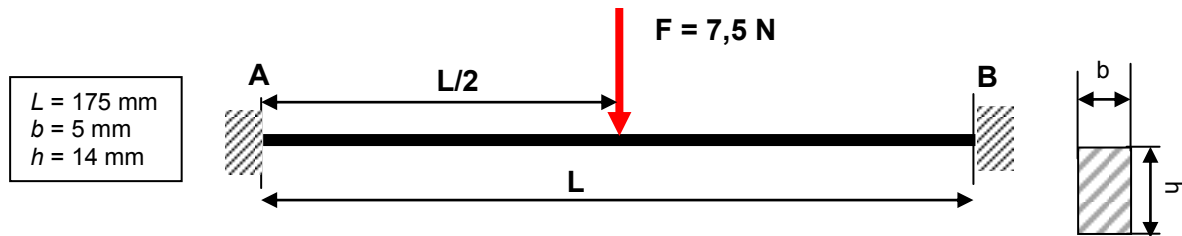


Figure 32 : modélisation simplifiée du chargement pour l'introduction d'un critère de performances

Question 52

Déterminer dans ce cas simplifié, la flèche maximale de la poutre AB, la contrainte maximale dans cette poutre, et exprimer la condition de résistance du support (S) simplifié.

Question 53

Exprimer pour ce cas simplifié, en tenant compte des résultats précédents, le coefficient de raideur k de ce support. En déduire un indice de performance $M = f(E, \rho, k...)$ répondant à l'objectif 2, pour lequel E représente le module d'Young, ρ la masse volumique et k la raideur.

Question 54

Compte-tenu de l'objectif 1, calculer la valeur de la limite élastique minimale. Représenter sur la carte d'Ashby (Limite élastique / matériaux) du document DR6 le champ des matériaux possibles.

Question 55

Après avoir tracé sur la carte à bulles du document DR7 l'indice de performance $M = f(E, \rho)$, proposer une exploitation de cet indice. En déduire un champ de matériaux possibles répondant aux objectifs 1 et 2. Identifier au moins deux matériaux situés dans la zone de choix.

Question 56

Compte-tenu de l'objectif 3, proposer, en le justifiant, un (des) procédé(s) d'obtention du support (S).

Question 57

À partir de la base de données des matériaux (Document DT10) indiquer quel matériau répond d'une façon optimale à l'ensemble des 5 objectifs fonctionnels retenus.

Synthèse globale du sujet

L'étude proposée a visé à valider le dimensionnement correct des solutions techniques par rapport au besoin, et en particulier :

- la compatibilité du dispositif avec le champ magnétique (Partie 5.3) ;
- le respect de la sécurité du patient (Parties 1.4, 3.1 et 4.2) ;
- l'assurance de pouvoir accéder à toute la zone de traitement sur la tête du patient (Parties 1.1, 1.2 et 1.3) ;
- le respect des performances cinématiques et dynamiques nécessaires au déplacement de la sonde (Parties 2.1, 2.2, 4.1 et 5.1) ;
- la précision du système (Parties 3.2 et 5.2).

Question 58

Proposer, **en 10 lignes au maximum**, une brève note technique présentant le résultat de votre analyse et de votre conception résumant le travail mené et en quoi le système répond au cahier des charges initial.

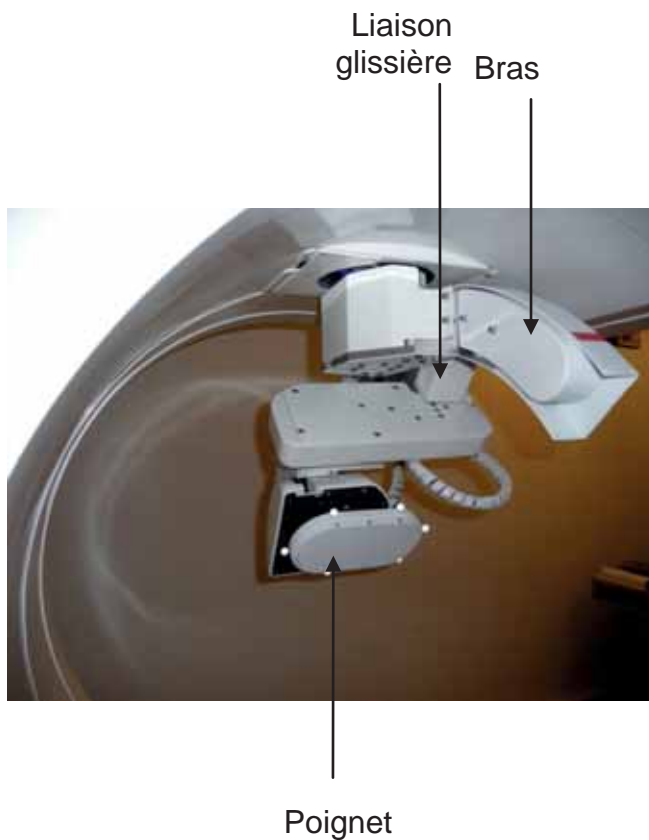
DOSSIER TECHNIQUE



Document Technique DT1 – Vues principales du système robotique



Vue générale

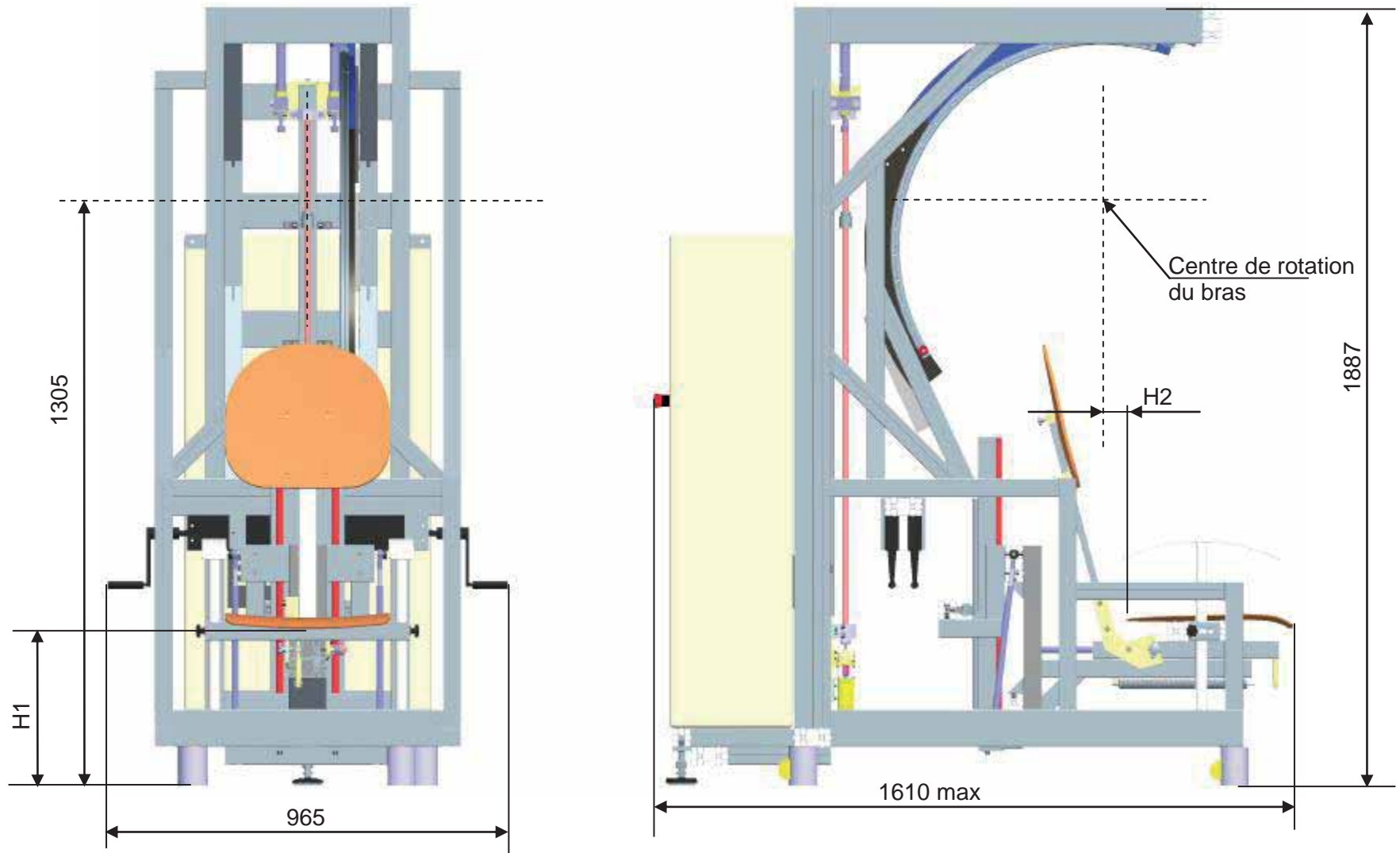


Zoom sur le bras robotique et le poignet



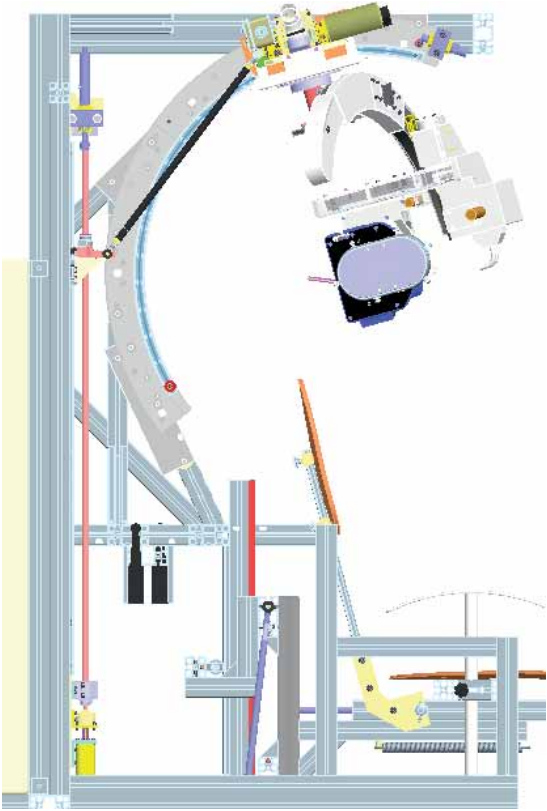
Vue du siège du patient et de son système de réglage

Document Technique DT2 – Vues principales CAO de la structure du système robotique (toutes les dimensions sont en mm)

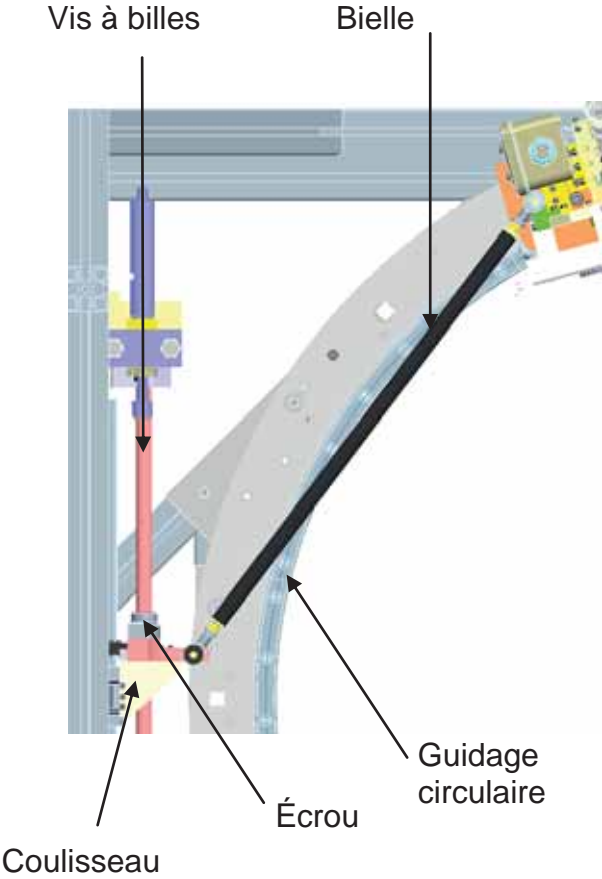


H1 varie de 410 à 650 mm
H2 varie de 7 à 157 mm

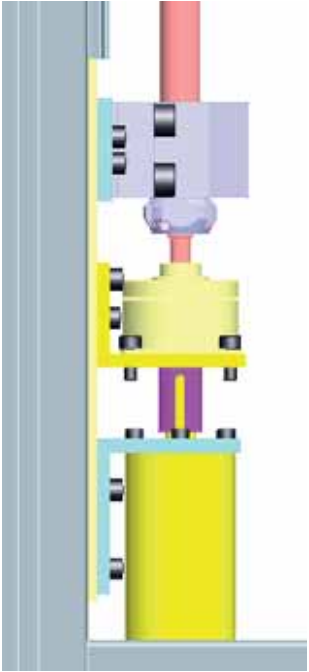
Document technique DT3 – Ensemble de transmission de puissance du premier axe



Vue générale du mécanisme de transformation de mouvement (une partie du système est masquée)

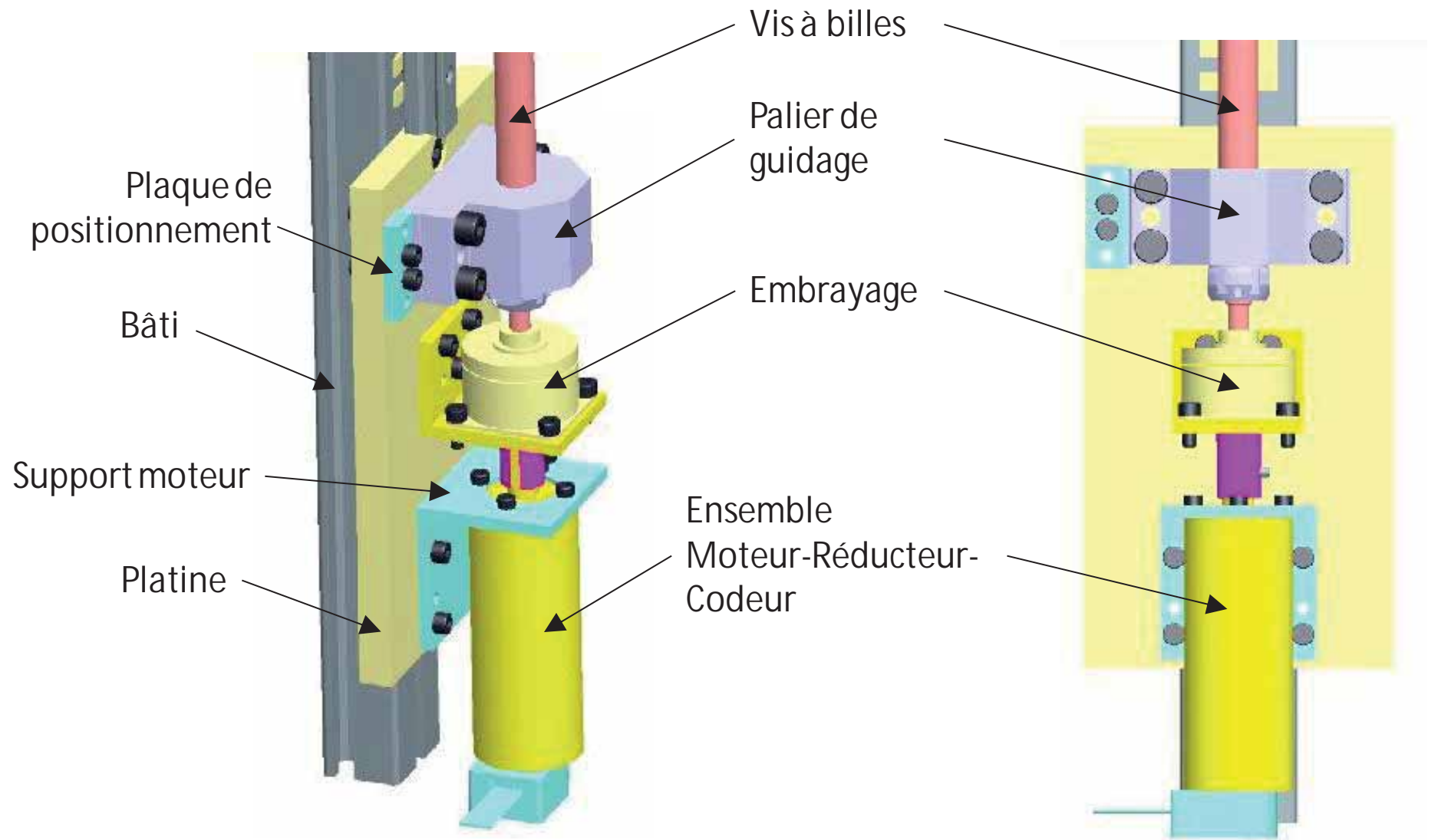


Détail de la partie supérieure du mécanisme de transformation de mouvement

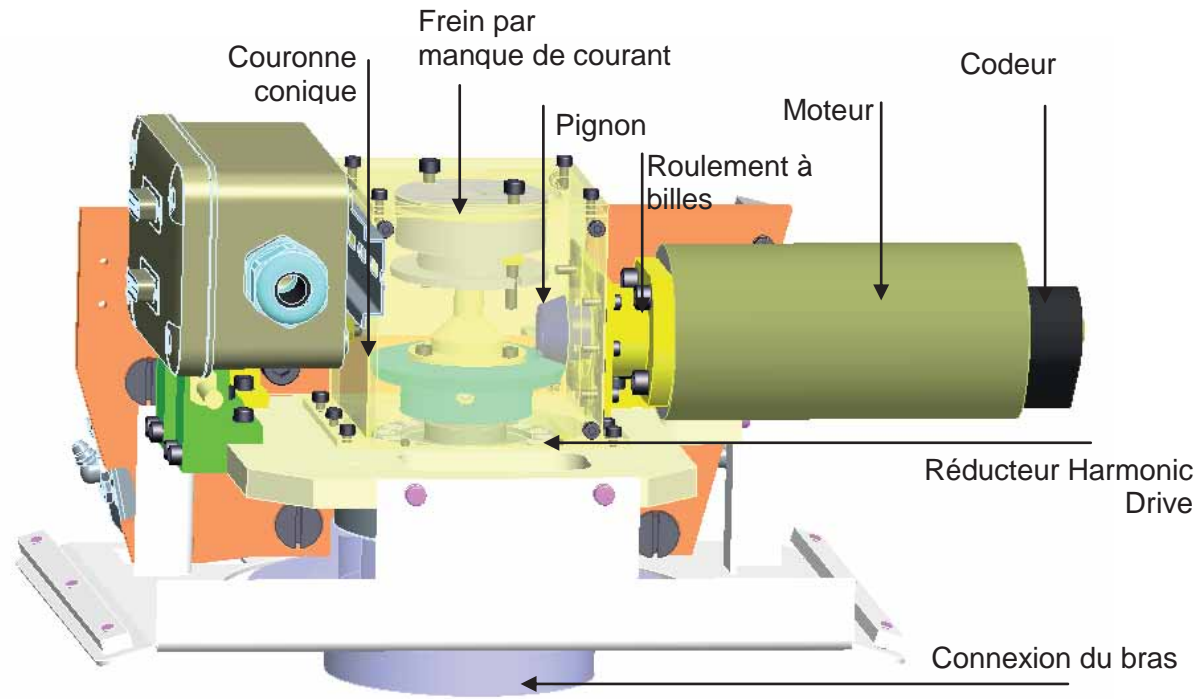


Détail de la partie inférieure du mécanisme de transformation de mouvement

Document technique DT4 – Détail de la partie inférieure du mécanisme de transformation de mouvement



Document Technique DT5 – Maquette numérique de l'axe 2



Document Technique DT6 – Caractéristiques du réducteur Harmonic Drive CPU 17 de l'axe 2

Evaluation du rendement du composant

Calcul du rendement total η_t
 Calcolo del rendimento globale η_t

$$\eta_t = K \cdot (\eta_n + \eta_s)$$

[Equation / Equazione 422.1]

avec:

- K = Facteur de correction
- K = 1; pour $T > T_n$
- η_n = Rendement au couple nominal
- η_s = Pourcentage de correction pour tenir compte du frottement des joints sur l'arbre creux en entrée, cf fig 422.4

con:

- K = fattore correttivo Fig. 422.3
- K = 1; per $T > T_n$
- η_n = rendimento alla coppia nominale, Fig. 429.1
- η_s = fattore correttivo (%) per l'influenza delle guarnizioni all'albero di ingresso, Fig. 422.4

Calcul du facteur V
 Calcolo del fattore di coppia V

$$V = \frac{T}{T_n}$$

[Equation / Equazione 422.2]

avec:

- T = Couple de votre application
- T_n = Couple nominal à la vitesse nominale

con:

- T = Coppia reale
- T_n = Coppia nominale alla velocità nominale

Fig. 422.3

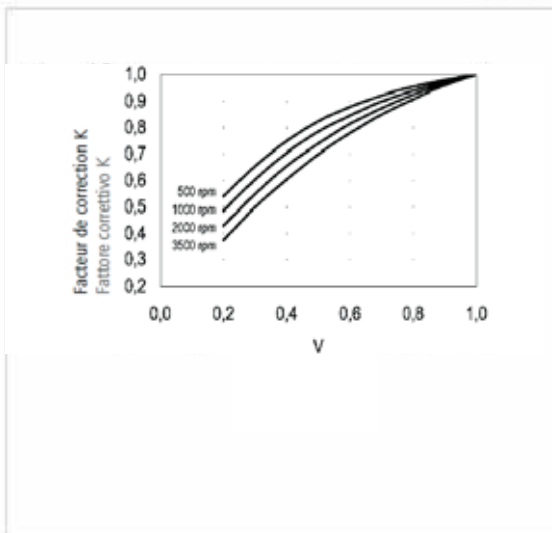
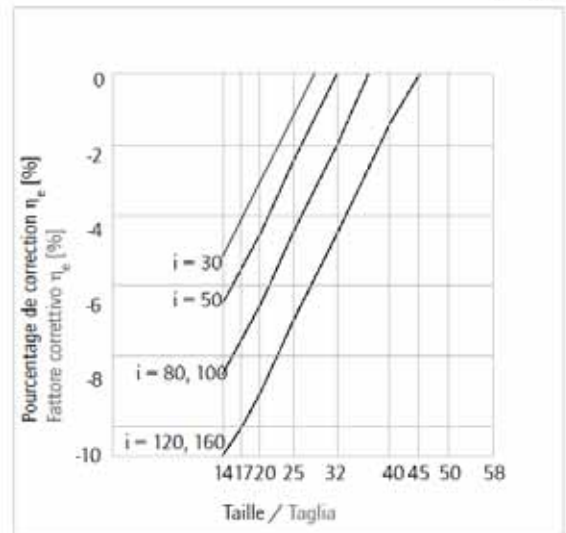
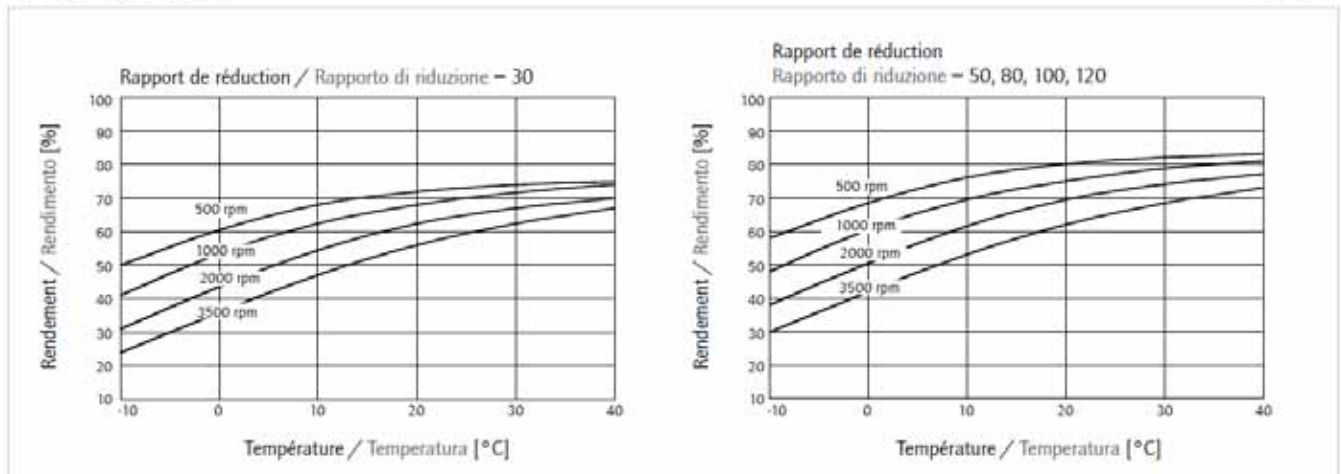


Fig. 422.4



Taille / Taglias 14-58

Fig. 430.1



Evaluation de la rigidité torsionnelle

■ Rigidité torsionnelle

La rigidité torsionnelle est donnée en divisant la courbe couple/torsion selon trois zones (fig. 408.3) :

Une zone de couple faible 0 – T₁
 Une zone de couple moyen T₁ – T₂
 Une zone de couple élevé > T₂

Les valeurs indiquées dans les tableaux sont les moyennes des mesures effectuées.

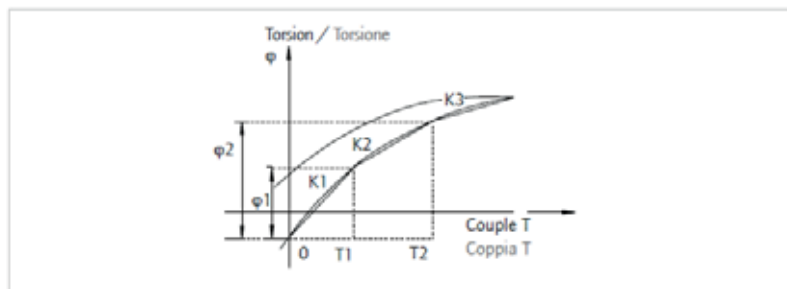
■ Rigidità torsionale

Per determinare la rigidità torsionale sul lato uscita si divide la curva coppia angolo di torsione in tre zone (fig. 408.3):

Una zona di bassa coppia 0 – T₁
 Una zona di coppia media T₁ – T₂
 Una zona di coppia elevata > T₂

I valori riportati nelle tabelle sono valori medi ottenuti da misure effettuate mediante numerose prove pratiche.

Fig. 408.3



φ: Angle de torsion / Angolo di torsione dell'uscita
 K: Rigidité torsionnelle / Costante di rigidità

■ Calcul de l'angle de torsion φ au couple T

$$T \leq T_1$$

$$\varphi = \frac{T}{K_1}$$

[Equation / Equazione 409.1]

■ Calcolo dell'angolo di torsione φ in corrispondenza di una coppia di carico T

$$T_1 < T \leq T_2$$

$$\varphi = \frac{T_1}{K_1} + \frac{T - T_1}{K_2}$$

[Equation / Equazione 409.2]

$$T > T_2$$

$$\varphi = \frac{T_1}{K_1} + \frac{T_2 - T_1}{K_2} + \frac{T - T_2}{K_3}$$

[Equation / Equazione 409.3]

φ = Angle / Angolo [rad]
 T = Couple / Coppia [Nm]
 K = Rigidité torsionnelle / Rigidità [Nm/rad]

■ Rigidité torsionnelle

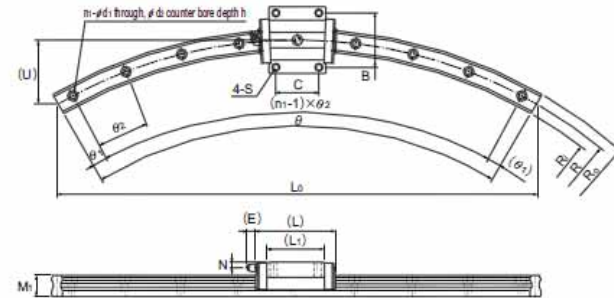
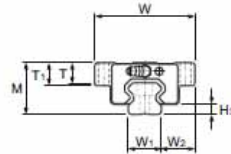
■ Rigidità torsionale

Tableau / Tabella 55.2

CPU Cartouche / Unità Taille / Taglia		14	17	20	25	32	40	45	50	58
T ₁ [Nm]		2	3,9	7	14	29	54	76	108	168
T ₂ [Nm]		6,9	12	25	48	108	196	275	382	598
i = 30	K ₃ [Nm/rad]	3,4 x 10 ³	6,7 x 10 ³	1,1 x 10 ⁴	2,1 x 10 ⁴	4,9 x 10 ⁴	–	–	–	–
	K ₂ [Nm/rad]	2,4 x 10 ³	4,4 x 10 ³	7,1 x 10 ³	1,3 x 10 ⁴	3,0 x 10 ⁴	–	–	–	–
	K ₁ [Nm/rad]	1,9 x 10 ³	3,4 x 10 ³	5,7 x 10 ³	1,0 x 10 ⁴	2,4 x 10 ⁴	–	–	–	–
i = 50	K ₃ [Nm/rad]	0,57 x 10 ⁴	1,30 x 10 ⁴	2,3 x 10 ⁴	4,4 x 10 ⁴	9,8 x 10 ⁴	1,8 x 10 ⁵	2,6 x 10 ⁵	3,4 x 10 ⁵	5,4 x 10 ⁵
	K ₂ [Nm/rad]	0,47 x 10 ⁴	1,10 x 10 ⁴	1,8 x 10 ⁴	3,4 x 10 ⁴	7,8 x 10 ⁴	1,4 x 10 ⁵	2,0 x 10 ⁵	2,8 x 10 ⁵	4,4 x 10 ⁵
	K ₁ [Nm/rad]	0,34 x 10 ⁴	0,81 x 10 ⁴	1,3 x 10 ⁴	2,5 x 10 ⁴	5,4 x 10 ⁴	1,0 x 10 ⁵	1,5 x 10 ⁵	2,0 x 10 ⁵	3,1 x 10 ⁵
i > 50	K ₃ [Nm/rad]	0,71 x 10 ⁴	1,6 x 10 ⁴	2,9 x 10 ⁴	5,7 x 10 ⁴	1,2 x 10 ⁵	2,3 x 10 ⁵	3,3 x 10 ⁵	4,4 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵
	K ₂ [Nm/rad]	0,61 x 10 ⁴	1,4 x 10 ⁴	2,5 x 10 ⁴	5,0 x 10 ⁴	1,1 x 10 ⁵	2,0 x 10 ⁵	2,9 x 10 ⁵	4,0 x 10 ⁵	6,1 x 10 ⁵
	K ₁ [Nm/rad]	0,47 x 10 ⁴	1,0 x 10 ⁴	1,6 x 10 ⁴	3,1 x 10 ⁴	6,7 x 10 ⁴	1,3 x 10 ⁵	1,8 x 10 ⁵	2,5 x 10 ⁵	4,0 x 10 ⁵

Document Technique DT7 – Caractéristiques du guidage circulaire de l'axe 3

R Guide Model HCR



Unit: mm

Model No.	Outer dimensions			LM block dimensions										Hi	LM rail dimensions											Basic load rating		Static permissible moment kN·m'									
	M	W	L	B	C	S	Li	T	T1	N	E	Grease nipple	R		R0	R1	L1	U	W1	W2	M1	d1 × d2 × h	n1	θ°	θ1°	θ2°	C	C1	Mx		My		Mz				
																													1 block	Double blocks	1 block	Double blocks		1 block			
HCR 12A+Ø100R	18	39	44.8	32	16	M4	30.5	4.5	5	3.4	3.5	PB1021B	3.1	100	106	94	100	13.4	12	13.5	11	3.5 × 6 × 5	3	60	7	23	4.7	8.53	0.0409	0.228	0.0409	0.228	0.0445				
HCR 15A+Ø150R	24	47	56.2	38	28	M5	38.8	10.3	11	4.5	5.5	PB1021B	3.5	150	157.5	142.5	150	20.1	15	16	15	4.5 × 7.5 × 5.3	5	60	8	12	8.33	13.5	0.0805	0.457	0.0805	0.457	0.0844				
HCR 15A+Ø200R			300											307.5	292.5	300	40	3																7	23	6.66	10.8
HCR 15A+Ø400R			400											407.5	392.5	400	54	9																9	8.33	13.5	
HCR 25A+Ø1600R	36	70	83	57	45	M8	59.5	14.9	16	6	12	B-M6F	5.5	500	511.5	488.5	500	67	23	23.5	22	7 × 11 × 9	9	12	60	2.5	5	10.9	34.4	0.307	1.71	0.307	1.71	0.344			
HCR 25A+Ø750R			750											761.5	738.5	750	100	7																	7	9	10.8
HCR 25A+Ø1000R			1000											1011.5	988.5	1000	134	15																	2	4	13.5
HCR 35A+Ø1000R	48	100	109.2	82	56	M10	80.4	19.9	21	8	12	B-M6F	7.5	800	817	883	800	80	34	33	29	9 × 14 × 12	11	60	2.5	5.5	37.3	61.1	0.782	3.93	0.782	3.93	0.905				
HCR 35A+Ø800R			800											817	783	800	107	7																3	9	10.8	
HCR 35A+Ø1300R			1000											1017	983	1000	134	12																2.5	5.5	13.5	
HCR 35A+Ø1300R			1300											1317	1283	1300	174	17																2	3.5	13.5	
HCR 45A+Ø1000R	60	120	138.7	100	70	M12	98	23.9	25	10	16	B-PT1/8	10	800	822.5	777.5	800	107	45	37.5	38	14 × 20 × 17	8	60	2	8	60	95.6	1.42	7.92	1.42	7.92	1.83				
HCR 45A+Ø1000R			1000											1022.5	977.5	1000	134	12																3	6	10.8	
HCR 45A+Ø1200R			1200											1222.5	1177.5	1200	161	15																2.5	5	13.5	
HCR 45A+Ø1600R			1600											1622.5	1577.5	1600	214	15																2	4	13.5	
HCR 65A+Ø1000R	90	170	197.8	142	106	M16	147	34.9	37	19	16	B-PT1/8	14	1000	1031.5	968.5	1000	134	63	53.5	53	18 × 26 × 22	8	60	2	8	141	215	2.45	13.2	2.45	13.2	3.2				
HCR 65A+Ø1500R			1500											1531.5	1468.5	1500	201	12																45	0.5	4	10.8
HCR 65A+Ø2000R			2000											2031.5	1968.5	2000	252	15																1.5	3.5	13.5	
HCR 65A+Ø2500R			2500											2531.5	2468.5	2500	313	19																1.5	3.5	13.5	
HCR 65A+Ø3000R			3000											3031.5	2968.5	3000	374	23																1.5	3	13.5	

Note) LM rail radiuses other than the radiuses in the above table are also available. Contact THK for details.
 The R-Guide center angles in the table are maximum manufacturing angles. To obtain angles greater than them, rails must be additionally corrected. Contact THK for details.
 Static permissible moment:: 1 block: static permissible moment value with 1 LM block
 Double blocks: static permissible moment value with 2 blocks closely contacting with each other

Model number coding

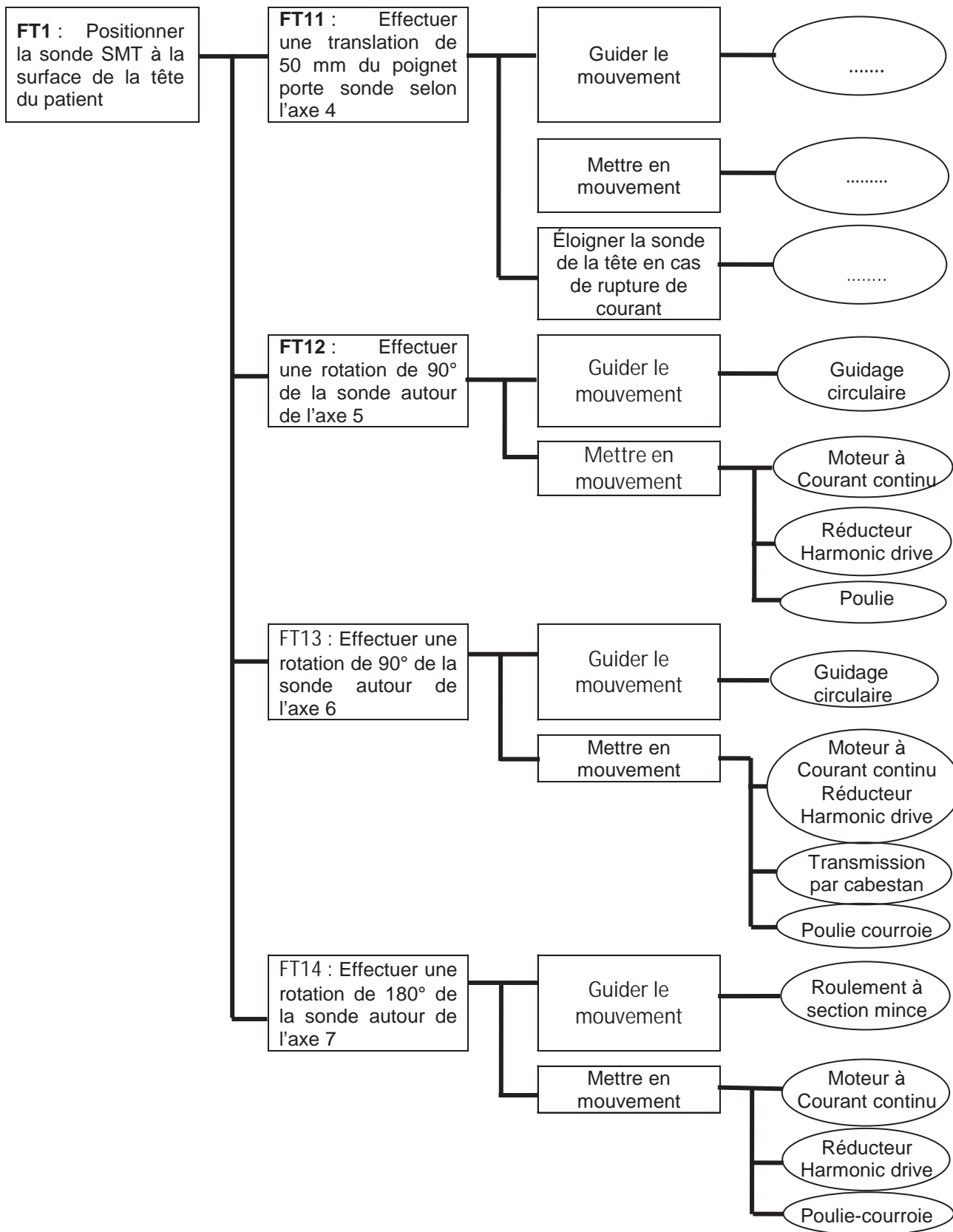
HCR25A 2 UU +60 / 1000R T

Model number: HCR25A
 Contamination protection accessory symbol (*1): UU
 R-Guide center angle: +60
 LM rail length (in mm): 1000
 Symbol for LM rail jointed use: T

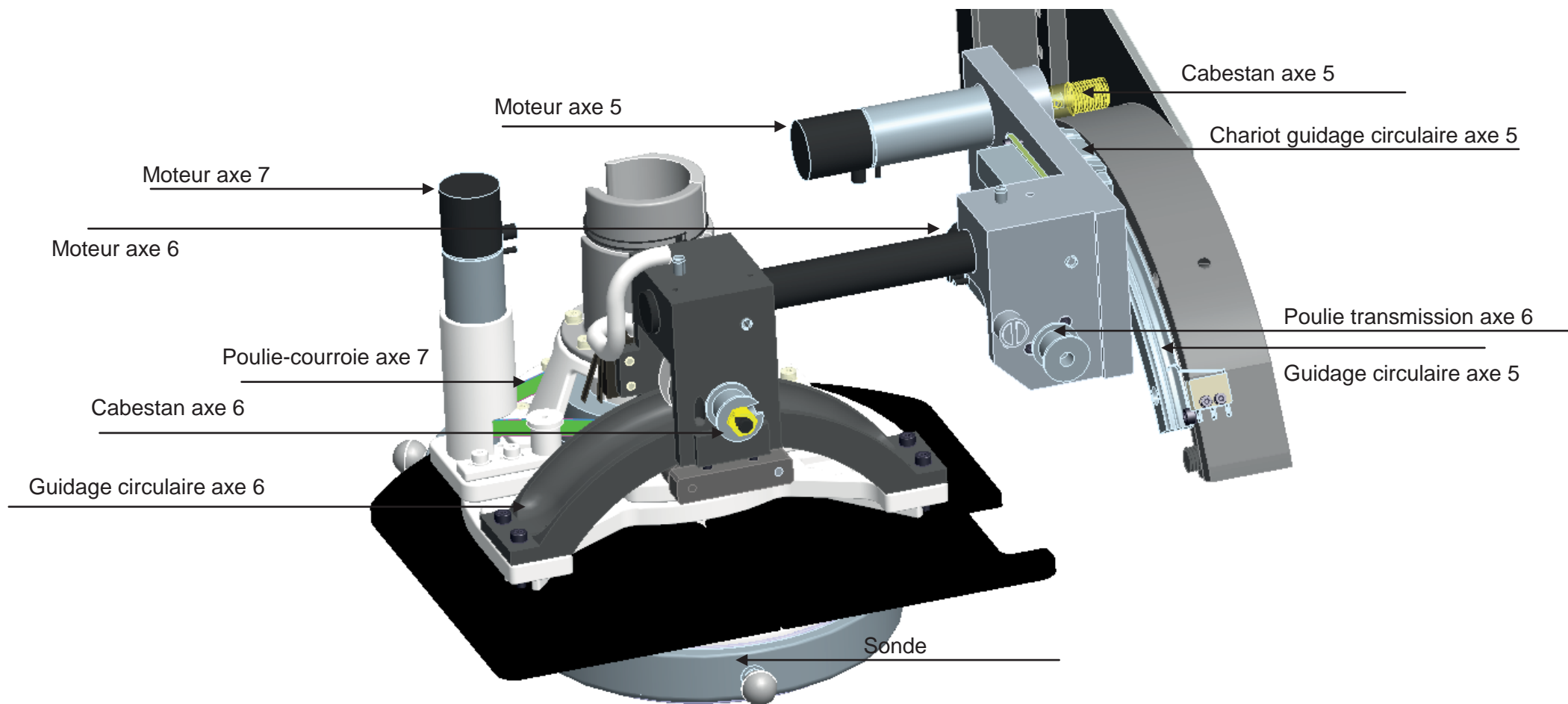
No. of LM blocks used on the same rail: 2

(*1) See contamination protection accessory on A-368.

Document Technique DT8 – FAST de description de la fonction FT11



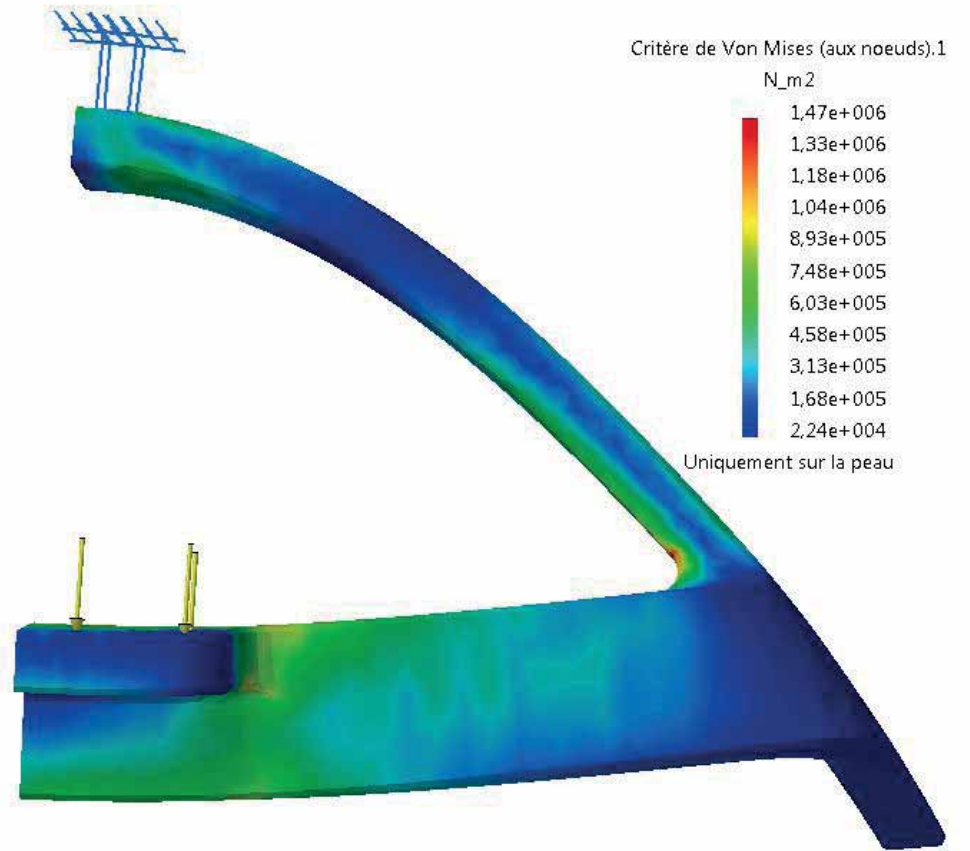
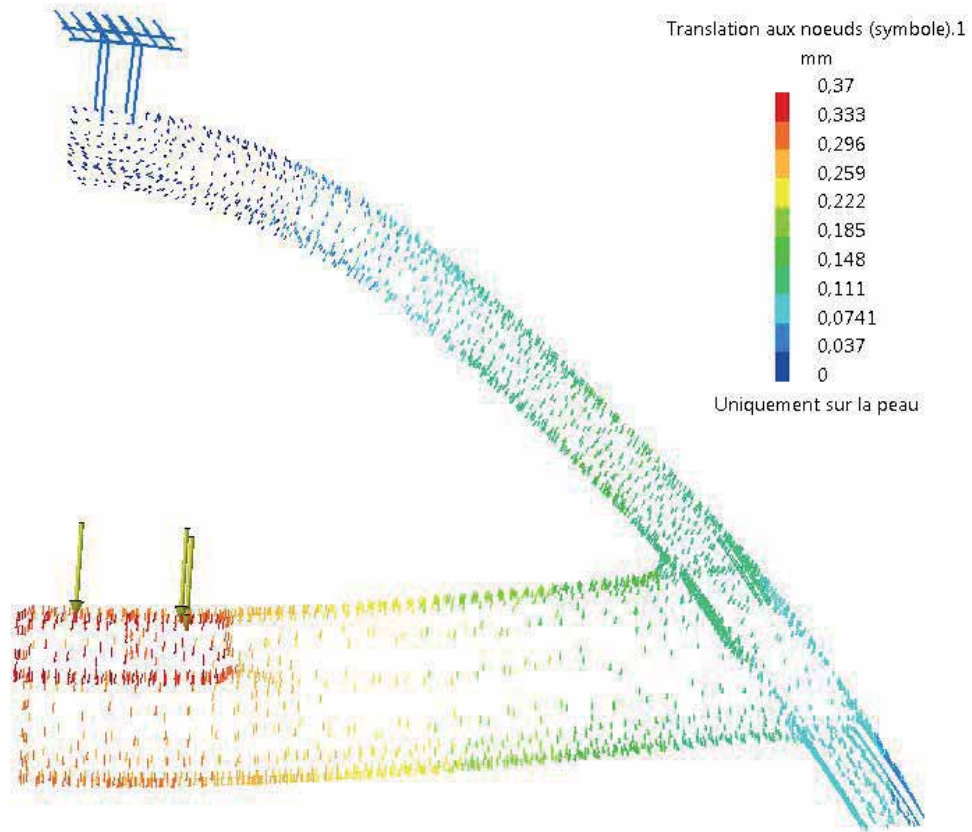
Document Technique DT9 – Maquette numérique du poignet



Document Technique DT10 – Banque de données matériaux

Propriétés	Matériaux			
	Phénoliques	Polyester	Acrylonitrile butadiène styrène (ABS)	Polypropylène (PP)
Masse Volumique kg/m ³	1.24e3 - 1.32e3	1.04e3 - 1.4e3	1.01e3 - 1.21e3	890 - 910
Propriété mécaniques				
Module de Young GPa	2.76 - 4.83	2.07 - 4.41	1.1 - 2.9	0.896 - 1.55
Module de cisaillement GPa	0.996 - 1.74	0.744 - 1.59	0.319 - 1.03	0.316 - 0.548
Limite élastique MPa	27.6 - 49.7	33 - 40	18.5 - 51	20.7 - 37.2
Résistance en traction MPa	34.5 - 62.1	41.4 - 89.6	27.6 - 55.	27.6 - 41.4
Résistance à la compression MPa	30.4 - 54.6	36.3 - 44	31 - 86.	25.1 - 55.2
Allongement %	1.5 - 2	2 - 2.6	1.5 - 100	100 - 600
Propriétés électriques				
Conducteur ou isolant électrique?	Bon isolant	Bon isolant	Bon isolant	Bon isolant
Résistivité électrique μohm.cm	3.3 e18 - 3e19	3.3 e18 - 3e19	3.3 e21 - 3 e22	3.3 e22 - 3 e23
Constante diélectrique (permittivité relative)	4 - 6	2.8 - 3.3	2.8 - 3.3	2.1 - 2.3
Possibilités de traitement				
Coulabilité	3 - 4	3 - 4	1 - 2	1 - 2
Aptitude à être moulé	3 - 5	3 - 4	4 - 5	4 - 5
Usinabilité	4	3 - 4	3 - 4	3 - 4
Soudabilité	1	1	5	5
Propriétés environnementales				
Énergie intrinsèque, production primaire MJ/Kg	8 5.9 - 95	84 - 93	91 - 102	85 - 105
Empreinte CO2, production primaire Kg/Kg	2.83 - 3.12	2.7 - 3	3.27 - 3.62	2.6 - 2.8
Recyclable	non	non	oui	Ouï
Applications typiques	Pièces électriques – douilles, interrupteurs, connecteurs, coussinets lubrifiés à l'eau, relais, pièces pour pompes, pistons de freins, plats pour le four à micro-ondes, bouchons de bouteilles, enductions, adhésifs, structures moussées et sandwich.	Structures laminées, pièces coulées, mobiliers, boules de bowling, bateaux ; cabines de camions, moules pour le béton, luminaires, lucarnes, cannes à pêche.	Casques de sécurité ; toits des caravane, panneaux d'instruments automobiles, raccords de tuyau, enjoliveur de roue, habillage interne des réfrigérateurs, coques de valise, capots de tondeuses à gazon, coques de bateau.	Cordages, filtres à air, et plages arrières pour l'automobile, mobilier de jardin, coques de chaise, capacités diélectriques, pare-chocs de voiture, valises, gazon synthétique, sous-vêtements thermiques.
Noms commerciaux	Bakelite, Durez, Ferroreg, Fiberite, Norsophen, Plaslok, Plenco, Polychem, Reliapreg, Resinoid, Texolite, Trolitan, Vyncolite, Tufnol	Celanex, Eastar, Hytrel, Plenco, Rynite, Synolite, Valox, Vybrex	Claradex, Comalloy, Cycogel, Cycolac, Hanalac, Lastilac, Lupos, Lustran ABS, Magnum, Multibase, Novodur, Polyfabs,...	Adpro, Amoco, Appryl, Aqualoy, Astryn, Cefor, Comalloy, Comshield, Dypro, EA36NA, Eltex P, Empee,...
Remarques	Assez résistant, peuvent être colorées à un degré limité, facile à mouler. Rigides, chimiquement stables, ont de bonnes propriétés électriques.	Peuvent être des thermoplastiques ou des élastomères. La plupart des polyesters thermdurcissables sont utilisés dans des composites fibres de verre/polyester.	L'ABS offre la résistance au choc la plus élevée de tous les polymères. Il se colore bien. Il est solide, résilient et facile à mouler. Normalement opaque	il est produit en très grandes quantités. Léger et ductile mais il a une faible tenue mécanique Le PP est couramment produit sous forme de feuilles, de prlduits moulés et de fibres

Document Technique DT11 – Champ de déplacement et de contraintes de la pièce à deux arcs (S)



DOSSIER RÉPONSES

Nom : <i>(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'épouse)</i>	<input type="text"/>																								
Prénom :	<input type="text"/>																								
N° d'inscription :	<input type="text"/>								Né(e) le :	<input type="text"/>		/	<input type="text"/>		/	<input type="text"/>									
<i>(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)</i>																									

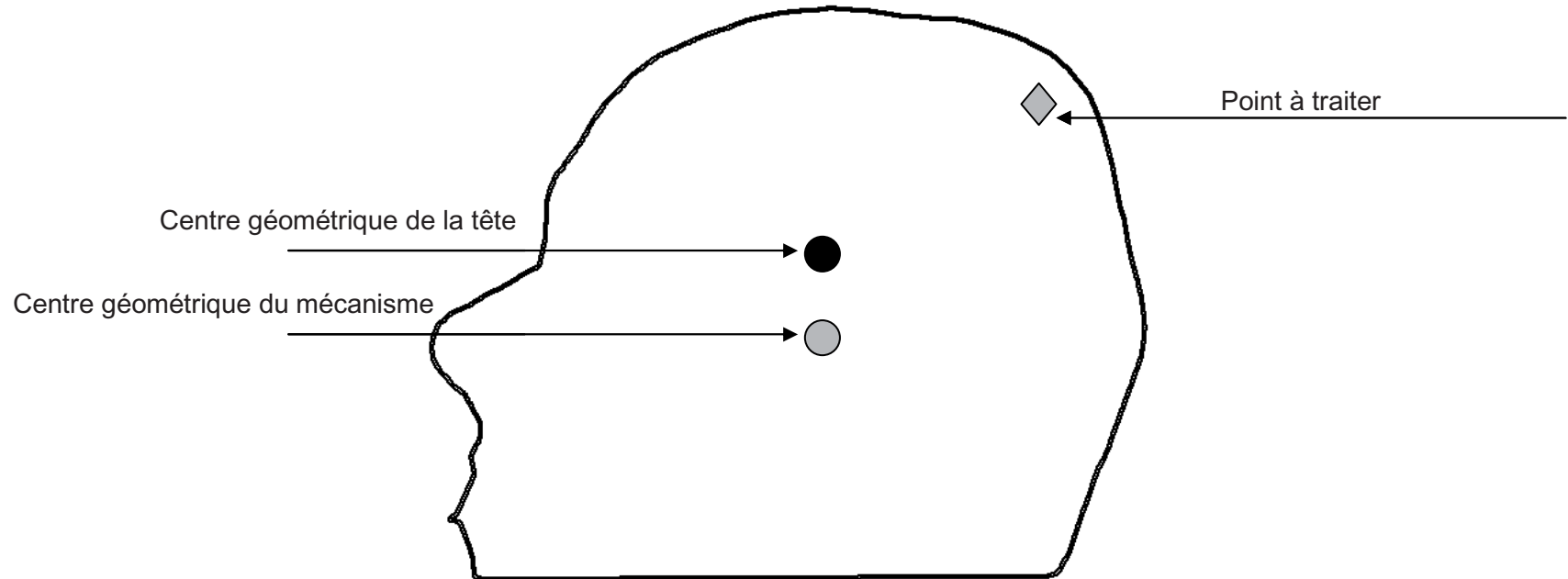
■	Concours	Section/Option	Epreuve	Matière
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

EAE GMM 2

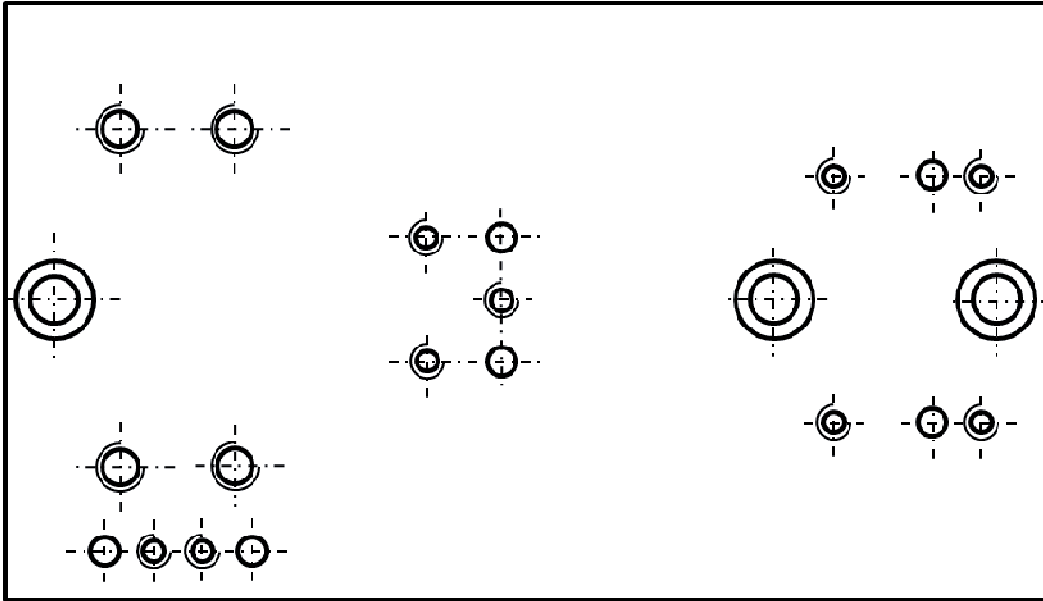
DR 1 - 2 - 3

Document Réponse DR1 – Conséquences d'un décalage du positionnement du patient

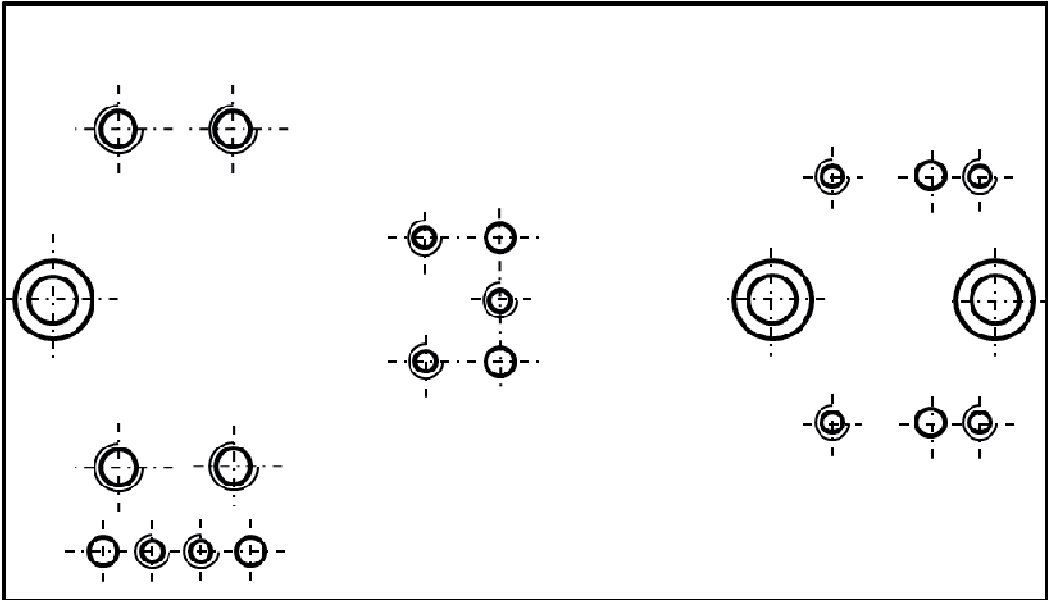
Vue en coupe mettant en évidence le point à traiter sur le cerveau, les centres géométriques du mécanisme et de la tête du patient :



Document réponse DR2 – Surfaces fonctionnelles de la platine



Document réponse DR3 – Cotation géométrique de la platine



Nom : <i>(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'épouse)</i>	<input type="text"/>																							
Prénom :	<input type="text"/>																							
N° d'inscription :	<input type="text"/>								Né(e) le :	<input type="text"/>		/	<input type="text"/>		/	<input type="text"/>								

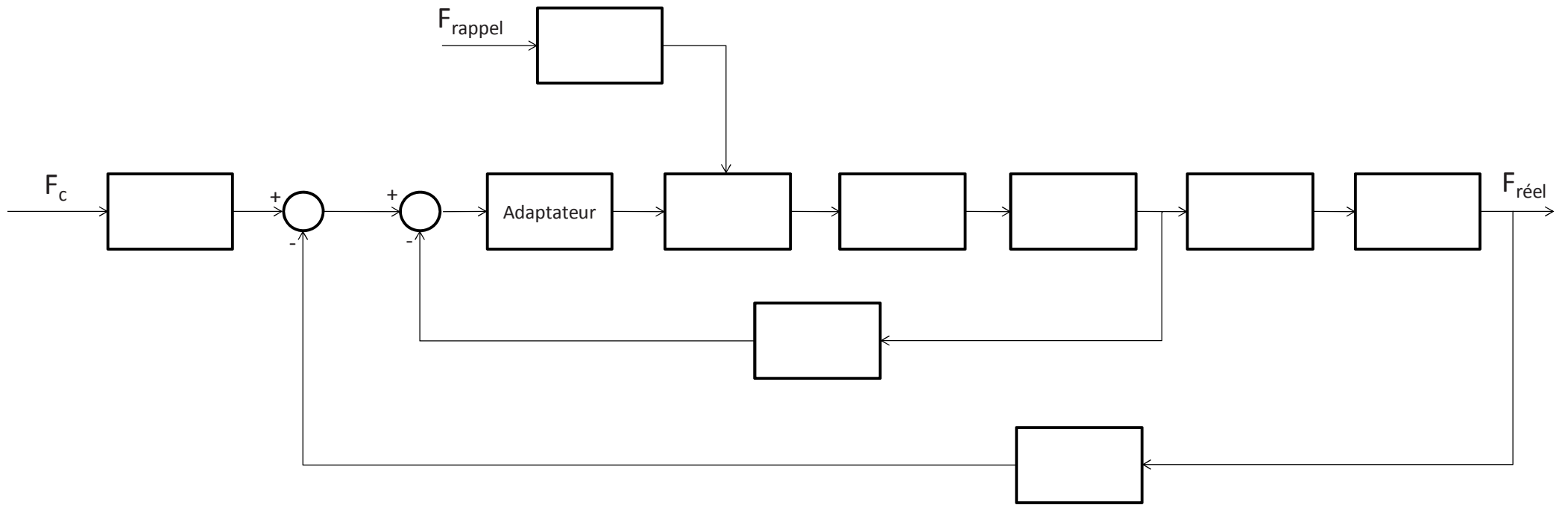
(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

Concours	Section/Option	Epreuve	Matière
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

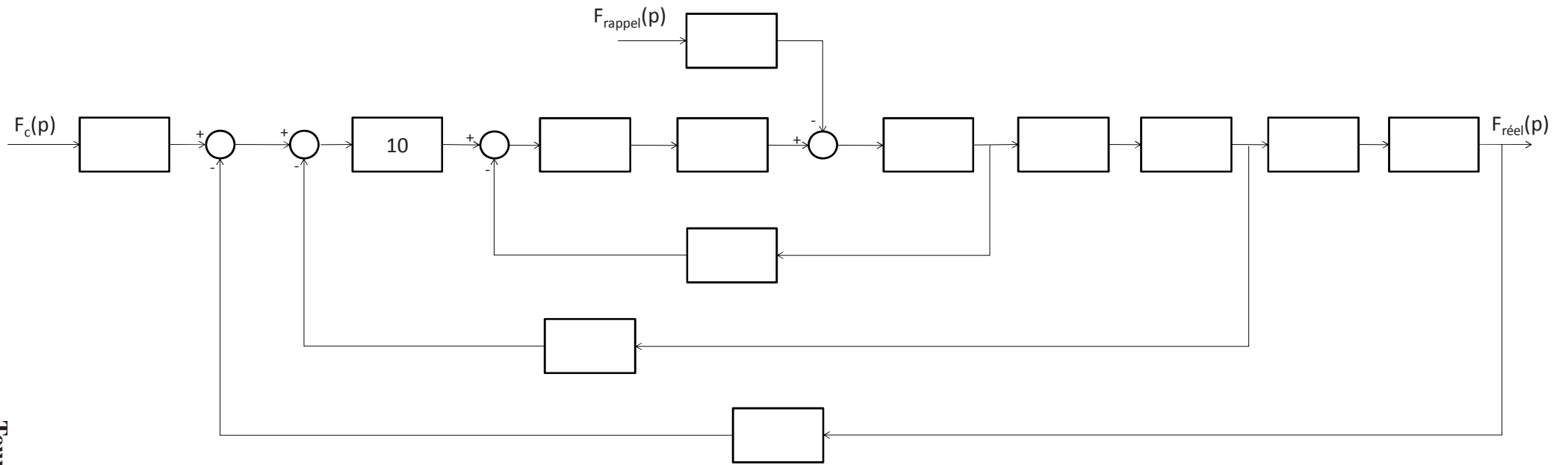
EAE GMM 2

DR 4 - 5 - 6

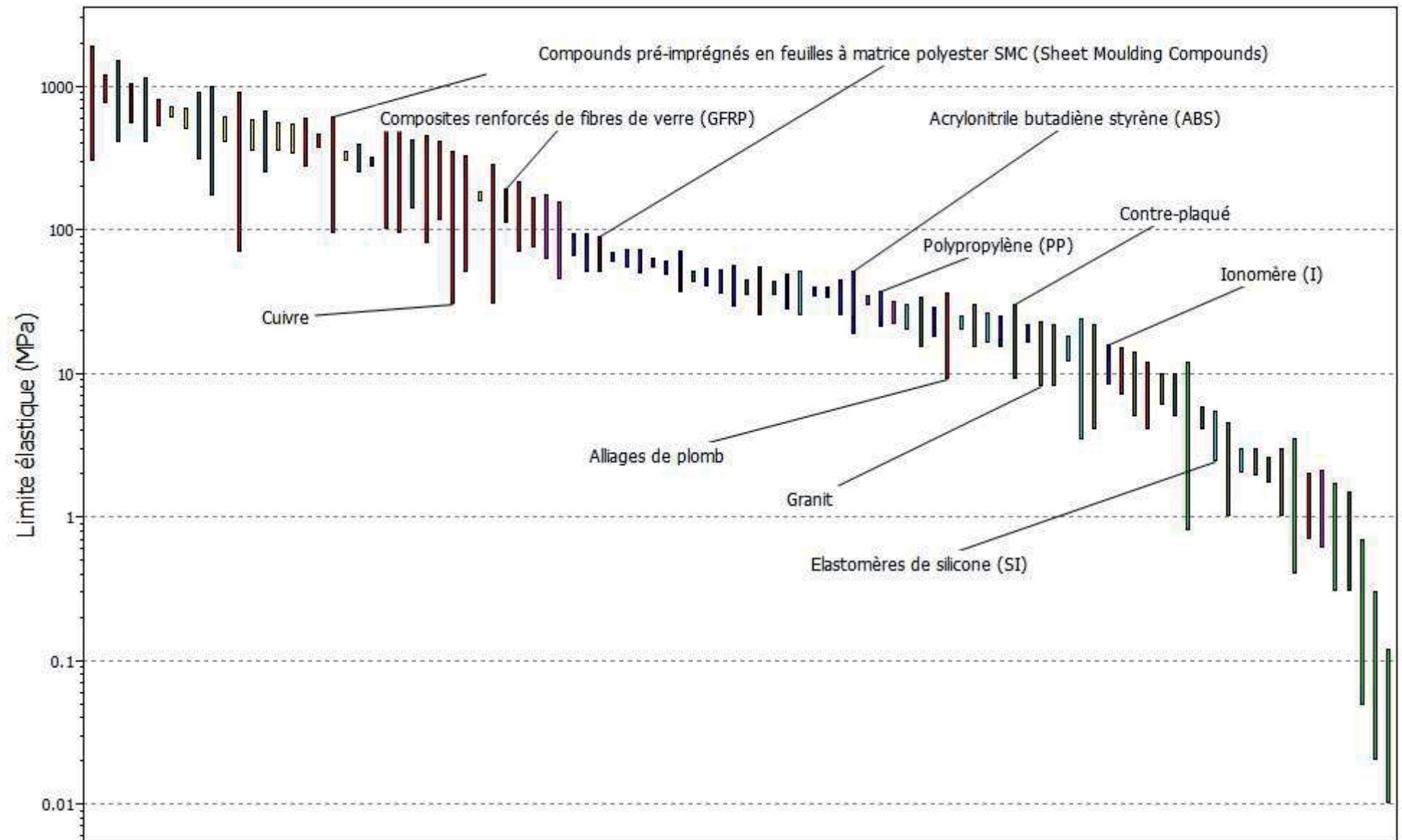
Document Réponse DR4 – Schéma bloc simplifié modélisant le comportement de l'asservissement en effort de l'axe 4



Document Réponse DR5 – Schéma bloc complet modélisant le comportement de l'asservissement en effort de l'axe 4



Document Réponse DR6 – Carte d'Ashby



Nom : <i>(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'épouse)</i>	<input type="text"/>																							
Prénom :	<input type="text"/>																							
N° d'inscription :	<input type="text"/>								Né(e) le :	<input type="text"/>		/	<input type="text"/>		/	<input type="text"/>								

(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

Concours	Section/Option	Epreuve	Matière
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

EAE GMM 2

DR 7

Document Réponse DR7 – Carte à bulles d'Ashby

