

SPOINT : MÉCANISME À QUATRE DEGRÉS DE LIBERTÉ POUR LE GUIDAGE D'INSTRUMENTS DE CHIRURGIE DU RACHIS

Enoncé du projet effectué en groupes de cinq étudiants durant le semestre de printemps 2019

Contexte

La chirurgie du rachis (colonne vertébrale) consiste à traiter les instabilités pathologiques de la colonne vertébrale au moyen d'éléments mécaniques de stabilisation, tout en protégeant la moelle épinière et les liaisons nerveuses. Ces techniques impliquent généralement le placement de vis dans des régions bien spécifiques des vertèbres, typiquement le pédicule, où l'on trouve l'os le plus dense. Le placement de vis dans une vertèbre doit être suffisamment précis pour garantir une bonne tenue mécanique sur le long terme, en évitant toute détérioration des tissus vitaux situés à proximité (artères et moelle épinière). Ceci est particulièrement délicat dans la région cervicale où la structure osseuse est la plus fine et où tout dommage à la moelle épinière, aux artères cervicales ou aux liaisons nerveuses peut avoir des conséquences irréversibles pour le patient.

Dans la région cervicale, le placement de vis transarticulaires dans les vertèbres C1 et C2 est l'opération la plus délicate. Elle consiste à lier mécaniquement ces deux vertèbres de manière rigide au moyen de deux vis. La place à disposition pour le placement des vis étant très restreinte, celles-ci sont positionnées à seulement quelques millimètres des artères et de la moelle épinière. Aujourd'hui, la technique chirurgicale la plus répandue est manuelle. Elle consiste à utiliser un tube rigide appelé trocart, tenu manuellement par le chirurgien. Ce dernier effectue les opérations de perçage et de placement de la vis au travers du trocart avec un système d'assistance à la navigation. Avec cette procédure, le taux de vis transarticulaires mal placées est de l'ordre de 30% à 50%. Des causes reconnues de ces mauvais placements sont le manque de stabilité de la main du chirurgien sous l'effet des forces agissant sur le trocart durant l'opération, ainsi que la mobilité des vertèbres cervicales.

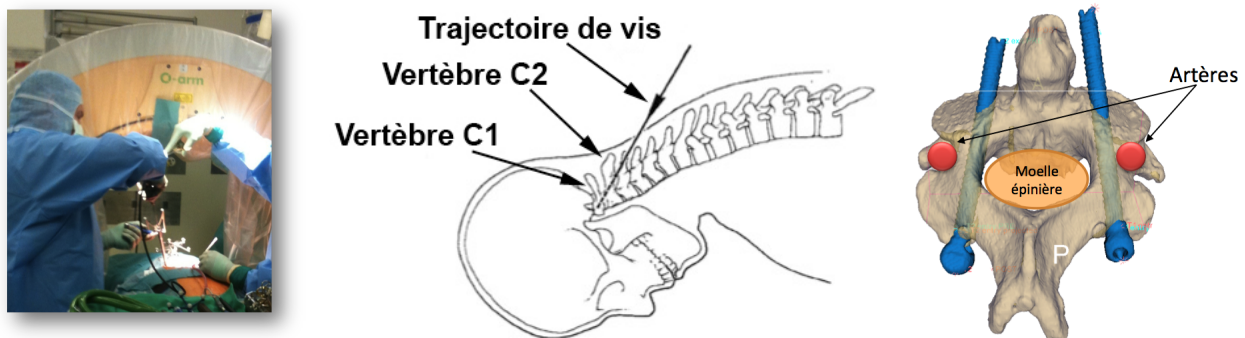


Fig. 1 . GAUCHE : Chirurgien perçant à travers un trocart tenu manuellement. CENTRE : Trajectoire de vis transarticulaires à travers les vertèbres C2 et C1. DROITE : Segmentation 3D d'une vertèbre C2 avec deux vis transarticulaires, sur la base d'images CT-Scan (Computerized Tomography) post-opératoires.

But du projet

Le but du projet est d'améliorer la fiabilité de cette opération en remplaçant la main du chirurgien qui tient le trocart par un mécanisme à 4 degrés de liberté (DDL) motorisés (deux translations et deux rotations) appelé *SPOINT* (Spinal Pointing Mechanism) permettant le positionnement et l'orientation du trocart dans l'espace, de façon plus précise et plus rigide, tout en permettant de suivre en temps réel les éventuelles mouvements parasites des vertèbres durant l'opération. La rotation et la translation respectivement autour et le long de l'axe principal du trocart ne sont pas guidées par le mécanisme car elles ne sont pas déterminantes dans le cadre de cette opération. Le mécanisme est monté sur une structure articulée passive (hors du cadre du présent projet) dotée de 6 DDL permettant le positionnement et le maintien rigide du mécanisme *SPOINT* dans son espace de travail. La stratégie de positionnement du trocart sur sa trajectoire se déroule en quatre phases :

Phase 0 : Planification pré-opératoire de la trajectoire

Le chirurgien définit la trajectoire rectiligne d'insertion de la vis en fonction de l'anatomie du patient sur la base des images acquises au moyen d'un scanner CT (Computerized Tomography).

Phase 1 : Positionnement grossier du mécanisme SPOINT

Le mécanisme *SPOINT* est positionné de telle sorte que lorsque le trocart est au centre de son volume de travail, son axe soit approximativement aligné sur la trajectoire planifiée.

Phase 2 : Positionnement fin du trocart par le mécanisme SPOINT

Le mécanisme *SPOINT* aligne précisément l'axe du trocart sur la trajectoire planifiée durant la phase pré-opératoire.

Phase 3 : Insertion de la vis avec correction en temps réel de trajectoire

Durant cette étape, le chirurgien effectue les opérations de perçage et de placement de la vis à travers le trocart. Ces différentes opérations génèrent des efforts qui peuvent modifier la position et l'orientation de la vertèbre opérée. Ces mouvements parasites sont mesurés par le système de navigation et le mécanisme *SPOINT* corrige activement la trajectoire en déplaçant le trocart en temps réel selon 4 DDL de manière à maintenir son alignement sur la trajectoire planifiée.

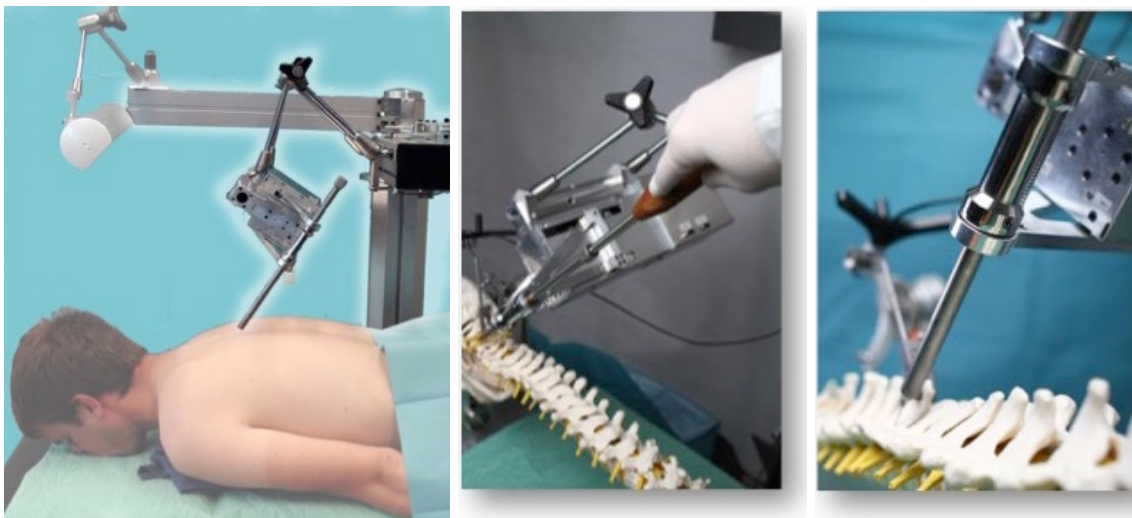


Fig. 2. GAUCHE : Mécanisme *SPOINT* positionné au-dessus du patient. CENTRE : Insertion d'une vis transarticulaire à travers les vertèbres C2 et C1. DROITE : Trocart équipé de son interface de fixation au mécanisme *SPOINT*.

Cahier des charges

1. Dimensions du trocart : tube en acier inox 316L, dont les dimensions sont données dans le dessin de détail annexé.
2. Masse du trocart : $m_{troc} = 80$ g.
3. Référentiel : l'axe X est colinéaire avec l'axe principale du trocart. Les axes Y et Z sont perpendiculaires entre eux et définissent un plan normal à l'axe X . L'origine O du référentiel se situe à 5 mm au delà de l'extrémité du trocart (voir dessin de détail annexé).

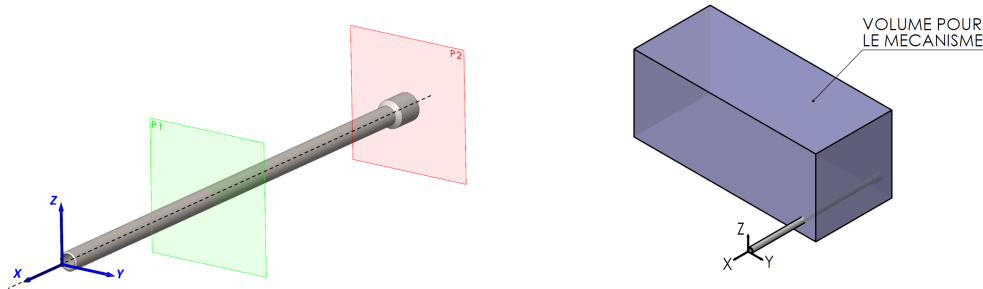


Fig. 3. GAUCHE : Référentiel du trocart, et plans P_1 et P_2 . DROITE : Volume alloué pour le mécanisme. Toutes les dimensions sont spécifiées dans le dessin de détail annexé.

4. Course angulaire autour des axes Y et Z : $-7^\circ \leq \theta_Y \leq 7^\circ$ et $-7^\circ \leq \theta_Z \leq 7^\circ$.
5. Résolution angulaire des rotations autour des axes Y et Z : $R_{\theta_Y} \leq 0.01^\circ$ et $R_{\theta_Z} \leq 0.01^\circ$.
6. Course linéaire le long des deux axes Y et Z : $-10 \text{ mm} \leq y \leq 10 \text{ mm}$ et $-10 \text{ mm} \leq z \leq 10 \text{ mm}$. La course linéaire doit être garantie pour toutes les orientations du trocart (courses θ_Y et θ_Z définies ci-dessus).
7. Résolution linéaire des translations le long des axes Y et Z : $R_y \leq 0,01 \text{ mm}$ et $R_z \leq 0,01 \text{ mm}$.
8. Vitesse maximale de déplacement de l'origine O en translation le long de Y et de Z : 10 mm/s .
9. Vitesse maximale de déplacement en rotation autour de Y et de Z : $1^\circ/\text{s}$.
10. Pour des questions de sécurité, le mécanisme doit être irréversible afin de rester immobile en cas de coupure de courant.
11. Les quatre axes doivent être motorisés par des moteurs choisis parmi la gamme Maxon imposés¹, équipés d'un encodeur rotatif et éventuellement d'un réducteur, également tirés de la gamme Maxon. Les axes linéaires utiliseront obligatoirement une vis et un écrou lisses (pas de vis à billes, ni de vis à rouleaux).
12. Le volume alloué pour le mécanisme est représenté en Figure 3. Les dimensions de ce volume sont spécifiées sur le dessin de détail annexé.
13. Le trocart est équipé d'une interface de fixation qui permet de monter et de le démonter aisément sur le mécanisme SPOINT pour stérilisation. Celle-ci devra impérativement se trouver entre les plans P_1 et P_2 .
14. Charge maximale à l'origine O du trocart pendant la chirurgie : 20 N (direction quelconque).
15. La rigidité du mécanisme mesurée à l'origine O du trocart, dans n'importe quelle direction, doit être supérieure à 60 N/mm . Note : cette valeur est indicative ; il n'est pas demandé dans le cadre de ce projet de prouver par calcul que cette spécification est respectée.
16. Masse totale maximale admissible du mécanisme SPOINT équipé d'un trocart : $M_{tot} \leq 6 \text{ kg}$ (cette contrainte garantit que la structure passive à 6 DDL puisse soutenir le mécanisme)
17. Le mécanisme SPOINT devra être conçu sans jeu, en limitant autant que possible les hyperstatismes. Pour ce faire, le recours aux guidages flexibles est fortement encouragé.
18. Le mécanisme SPOINT doit être équipé de cinq taraudages M6 répartis tous les 60° sur un cercle de 50 mm de diamètre pour son montage sur la structure passive à 6 DDL.

1. Les spécifications des cinq moteurs imposés de la gamme Maxon (issus des séries RE 16, RE 25 et RE 30) sont disponibles en annexe. Les moteurs devront impérativement être sélectionnés parmi ces ceux-ci.

Critères d'optimisation

- Maximiser les accélérations linéaires et angulaires du trocart.
- Maximiser la rigidité du mécanisme.

Compléments d'information indicatifs (aucune justification quantitative requise)

- La température de fonctionnement de l'ensemble du système est $20^{\circ}\text{C} < T_{\text{fonc}} < 30^{\circ}\text{C}$.
- La durée de vie envisagée est de 10 ans, à raison de 3 opérations par jour, 250 jours par année, en considérant 50 mouvements exploitant les courses maximales de tous les axes du mécanisme durant chaque opération.
- Le coût de fabrication du mécanisme reste inférieur à 30'000. – CHF.
- Les catalogues suivants sont à disposition sous forme électroniques sur Moodle :
Guidages Schneeberger ; Roulements SKF ; Moteurs Maxon ;
- Un modèle CAD du trocart au format STEP est à disposition sur Moodle.

Performances clés à calculer

Les paramètres suivants sont à calculer, dans la mesure du possible, autour de la position d'origine du trocart : $y = z = 0$ et $\theta_Y = \theta_Z = 0$.

- a) Accélération linéaire maximale du trocart selon l'axe Y : $a_{y,\text{max}} = \dots \text{ m/s}^2$.
- b) Accélération linéaire maximale du trocart selon l'axe Z : $a_{z,\text{max}} = \dots \text{ m/s}^2$.
- c) Accélération angulaire maximale du trocart autour de l'axe Y : $\alpha_{y,\text{max}} = \dots \text{ rad/s}^2$.
- d) Accélération angulaire maximale du trocart autour de l'axe Z : $\alpha_{z,\text{max}} = \dots \text{ rad/s}^2$.
- e) Résolution linéaire théorique du trocart selon l'axe Y : $R_Y = \dots \text{ mm}$.
- f) Résolution linéaire théorique du trocart selon l'axe Z : $R_Z = \dots \text{ mm}$.
- g) Résolution angulaire théorique du trocart autour de l'axe Y : $R_{\theta Y} = \dots ^{\circ}$.
- h) Résolution angulaire théorique du trocart autour de l'axe Z : $R_{\theta Z} = \dots ^{\circ}$.
- i) Couples statiques maximaux requis au niveau des actionneurs.
- j) Contraintes maximale dans les guidages flexibles éventuellement utilisés.

Soutenance intermédiaire : mercredi 27 mars 2019, de 10h00 à 13h15

L'horaire de passage sera communiqué sur Moodle une semaine avant le jour de la soutenance. Chaque groupe élabore un catalogue de 4 solutions bien distinctes. Chaque solution est présentée sur une feuille A3 (recto) séparée en deux parties : une partie A qui montre une vue d'artiste de la solution ; une partie B qui décrit l'architecture cinématique représentée avec des guidages idéaux en montrant le principe de fonctionnement de la solution, ainsi que les sources d'inspiration qui y ont mené. Tous les dessins sont effectués à main levée et en couleur.

Livrables à apporter à la soutenance intermédiaire : 4 feuilles A3 (recto), avec une solution par feuille. Inscrivez vos noms et le numéro du groupe sur chaque feuille.

Déroulement de la soutenance intermédiaire (durée 15 minutes en tout, prière d'arriver avec 3 minutes d'avance) :

- Lors de la soutenance, 4 étudiants désignés au hasard présenteront chacun l'une des 4 solutions en 2 minutes.
- Ensuite, le cinquième étudiant, aidé du groupe, détaille en 4 minutes la solution que le groupe compte retenir pour la suite du projet et justifie son choix.
- Les examinateurs questionnent le groupe durant 3 minutes.
- Chaque élève reçoit individuellement une note portant sur la forme : clarté et pertinence des explications.
- Le groupe reçoit une note commune portant sur la qualité des planches et l'originalité et la diversité de l'ensemble des 4 solutions élaborées (contenu).
- Les planches seront conservées par les examinateurs.

Soutenance finale : mercredi 22 mai 2019, de 10h00 à 13h15

L'horaire de passage ainsi que la durée et autres modalités de la défense seront communiquées via Moodle une semaine avant la soutenance. La présentation sera évaluée selon les critères suivants :

- Clarté, pertinence et concision de la présentation
- Connaissance générale du problème
- Réponse aux questions
- Bonne coordination du groupe
- Un bonus est attribué aux solutions particulièrement originales
- Un bonus est attribué aux éventuelles maquettes didactiques ou aux animations vidéo présentées lors de la soutenance

Livrables à remettre en main propre à votre assistant principal lors de la soutenance finale : tous les documents ci-dessous sont à placer dans une enveloppe A4 en papier (pas de chemise en plastique) sur laquelle sera mentionné visiblement le nom des étudiant(e)s, la section, le semestre, et le N° du groupe ; toutes ces informations seront portées sur la face "adresse" de l'enveloppe ; l'enveloppe ne sera pas collée :

1. **Un rapport de 15 à 25 pages** basé sur la table de matière proposée en annexe. Le rapport présente la conception détaillée du mécanisme avec des explications claires et concises du fonctionnement du mécanisme en faisant appel au maximum aux schémas. Donner les indications et explications nécessaires au suivi et à la compréhension de la démarche (hypothèses, simplifications choisies, dimensions considérées, valeurs utilisées pour le calcul, sources, etc.). Le rapport suivra la table des matières donnée en annexe.

2. **Le dessin de construction de l'ensemble du mécanisme** avec les cotes fonctionnelles, les cotes d'encombrement, les ajustements, le cartouche complet avec la liste de toutes les pièces et leurs matériaux indiqués selon ISO. Faire toutes les coupes et vues nécessaires à la compréhension et au contrôle du fonctionnement du mécanisme. Les plans seront rendus sous forme de tirages pliés de façon adéquate ; lors de l'établissement de l'original, on veillera à assurer un contraste suffisant pour qu'aucune ambiguïté n'apparaisse sur le tirage ; l'échelle des dessins (normalisée) sera choisie en conséquence ; les ajustements et tolérances seront explicités. Exemple : $\varnothing 4 \text{ H7 }_0^{+0.012} \text{ g6 }_{-0.012}^{-0.004}$. Pour des raisons pratiques et de coût, on se limitera autant que possible aux formats A4 à A2.
3. **Un dessin de détail** prêt pour l'envoi à l'atelier de fabrication de la pièce de votre mécanisme qui joue le rôle d'interface entre le trocart et le mécanisme (voir point 14 du cahier des charges).
Note : les dessins de détail des autres pièces du mécanisme ne sont pas requis.

Informations complémentaires

- Calcul de la note du cours Conception de Mécanismes I et II : $N = 0.40T + 0.1I + 0.5F$
avec T : note obtenue au Travail Ecrit ; I : note obtenue à la soutenance intermédiaire ; F : note obtenue au rendu du projet ; N : note finale du cours.
- L'assistant responsable de la coordination est M. Hubert Schneegans : hubert.schneegans@epfl.ch.

Table des matières indicative pour le rapport

- 1. Introduction**
- 2. Principe de fonctionnement du mécanisme développé**
 - 2.1. Explication du principe général de fonctionnement
 - 2.2. Schéma cinématique du mécanisme représenté avec des articulations idéales
 - 2.3. Calcul de la mobilité selon la méthode de Grübler et discussion des éventuels hypersatismes
 - 2.4. Implémentation des guidages flexibles
 - 2.5. Mise en évidence des concepts originaux et explications spécifiques à la solution retenue
- 3. Dimensionnement du mécanisme**
 - 3.1. Calcul géométrique des courses linéaire et angulaires, des résolutions théoriques et estimation des éventuels mouvements parasites
 - 3.2. Calcul des couples moteurs requis pour les 4 axes.
 - 3.3. Dimensionnement des articulations flexibles : calcul des rigidités et des contraintes maximales de chaque articulation
 - 3.4. Calcul de l'inertie réduite et de la masse réduite du mécanisme au niveau des actionneurs.
 - 3.5. Calcul détaillé des performances clés (selon donnée du projet) et discussion de leur conformité avec le cahier des charges.
- 4. Construction**
 - 4.1. Argumentation des choix faits pour la construction
 - 4.2. Argumentation des choix des matériaux
- 5. Conclusion**
- 6. Annexes**
 - 6.1. Dessin de construction de l'ensemble du mécanisme avec liste de toutes les pièces
 - 6.2. Dessin de détail du châssi prêt pour envoi en atelier de fabrication