

TP de CINEMATIQUE – CYCLE 2 : ROBOT HAPTIQUE

La durée est de *deux heures* et les activités feront l'objet d'un *compte-rendu*.

Programme - Compétences		
B29	MODELISER	Solide indéformable: vecteur-vitesse angulaire de deux référentiels en mouvement l'un par rapport à l'autre
B211	MODELISER	Torseur cinématique
B214	MODELISER	Liaisons: torseur cinématique des liaisons normalisées
C26	RESOUDRE	Dérivée temporelle d'un vecteur par rapport à un référentiel Relation entre les dérivées temporelles d'un vecteur par rapport à deux référentiels distincts Composition des vitesses angulaires Composition des vitesses



Le Groupe de l'**îlot de TP** sera constitué de:

- Un **Chef de Projet**, **responsable** du bon déroulement du TP et unique **rédacteur** du compte rendu de TP rendu impérativement en fin de séance;
- Un **Analyseur Expérimentateur** prenant en charge l'aspect **mesure** et **expérimentation** sur le système réel;
- Un **Analyseur Résolveur** travaillant sur la **modélisation** du système réel et la **résolution** du modèle par des outils analytiques ou numériques.

NB: Il est important que chaque personne constituant l'îlot échange de poste entre chaque séance de TP. La fonction de chacun est à indiquer sur le compte rendu, S.V.P. Si l'îlot n'est constitué que de deux personnes, le **Chef de Projet** devra aussi prendre en charge la fonction d'**Analyseur Résolveur**.

OBJECTIFS DU TP :

- **Analyser** et **modéliser** le fonctionnement du Robot Haptique.
- **Calculer** la loi d'entrée sortie du mécanisme du Robot Haptique par méthode analytique.
- **Déterminer** la loi d'entrée sortie du mécanisme du Robot Haptique par méthode numérique.
- **Mesurer** la loi d'entrée sortie du mécanisme du Robot Haptique par méthode expérimentale.
- **Quantifier l'écart** entre modèles expérimental, analytique et numérique.
- **Conclure** quant à la validation des exigences cinématiques du cahier des charges

PRESENTATION DU SYSTEME

1.1.– Définition :

L'haptique (du grec *απτομαι* qui signifie « je touche ») désigne la science du toucher, par analogie avec l'acoustique ou l'optique. Au sens strict, l'haptique englobe la perception tactile et les phénomènes kinesthésiques, c'est-à-dire la perception du corps dans l'environnement. (WIKIPEDIA)

1.2.– La perception haptique :

La perception haptique met en œuvre à la fois des récepteurs spécifiques et des processus psychophysologiques. Il est à noter qu'à la différence de la vision ou de l'audition le prélèvement d'information haptique nécessite une interaction « mécanique » avec le support de l'information, donc susceptible de modifier le support.

1.3.– La restitution de sensations haptiques artificielles :

Elle nécessite d'utiliser un dispositif, dit « à retour d'effort », générant des forces dont l'amplitude et la fréquence reproduisent les sensations réelles. Il s'agit généralement d'actionneurs mettant en œuvre des convertisseurs électro-mécaniques de taille variable selon la partie du corps à stimuler : extrémité du doigt (fig 1), main (fig 2), bras (fig 3)...). Sur le plan technologique on rencontre des dispositifs piézo-électriques, à lévitation magnétique, à électroaimants, à moteurs électriques...

Pour enrichir la perception globale d'une réalité virtuelle on peut combiner différents « canaux » sensoriels : par exemple haptique + visuel + auditif...

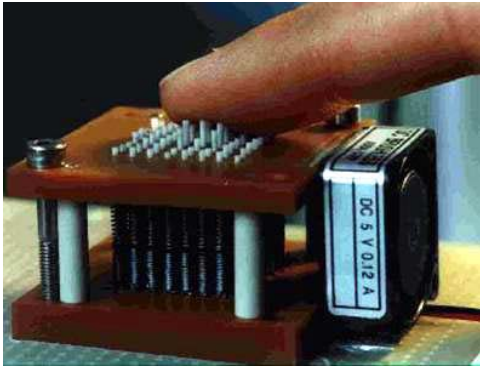


Fig 1 : « Touchpad » vibrotactile



Fig 2 : « Cybergant »

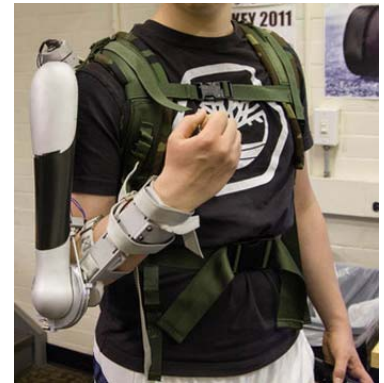


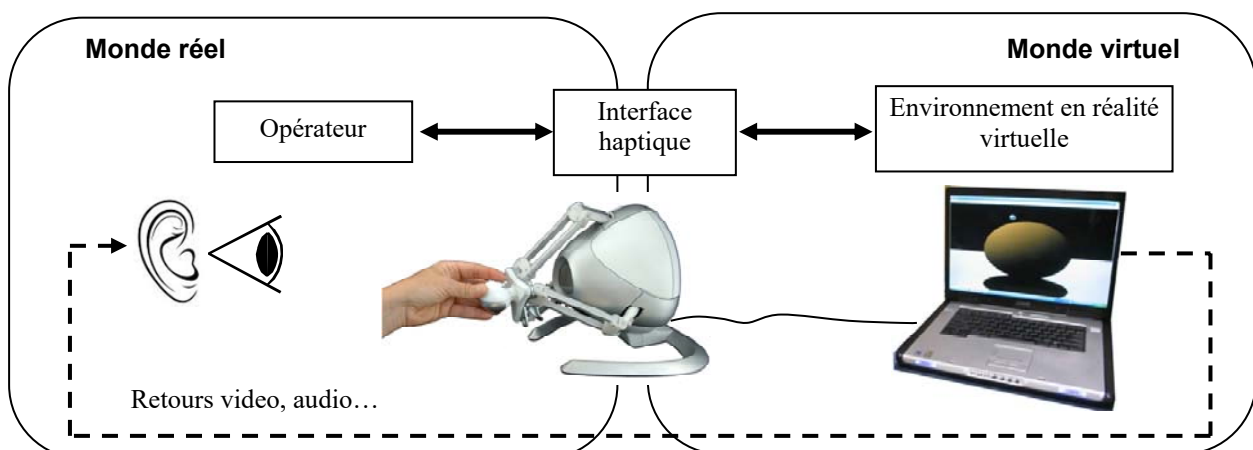
Fig 3 : Bras exosquelette

Nota : le rendu haptique nécessite des performances en fréquence de boucle assez élevées, de l'ordre de 1kHz. Par comparaison une boucle visuelle nécessite une fréquence de 25 à 50Hz. En terme de force, selon le type d'interface haptique, la valeur à générer est de quelques N pour un touchpad, d'une dizaine de N pour une manette de jeu et peut atteindre plusieurs centaines de N pour un exosquelette.

1.4.– L'interaction haptique :

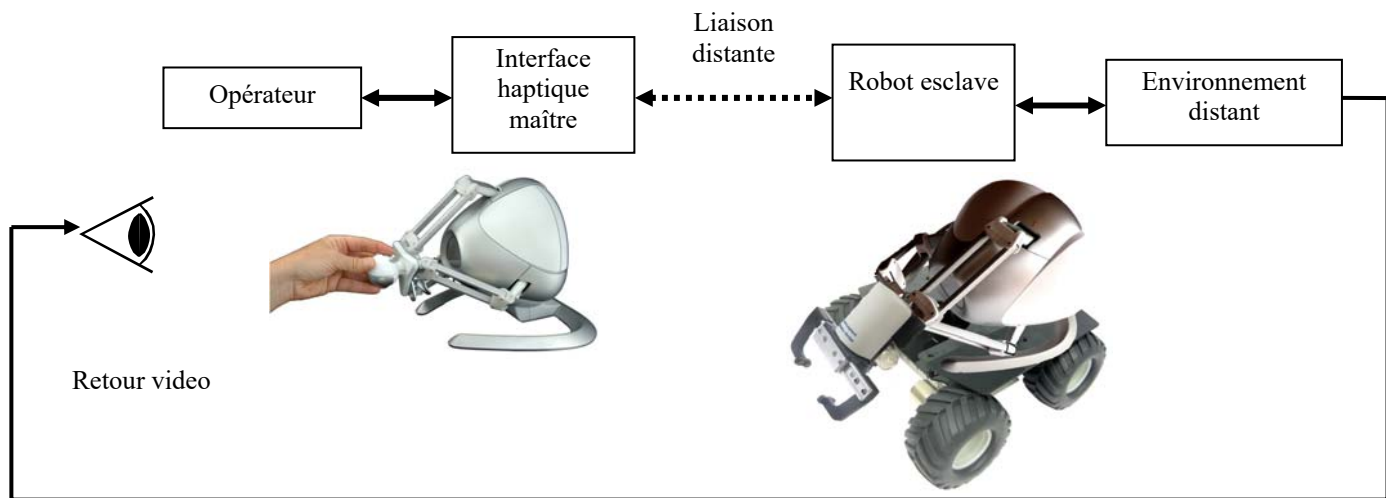
1.4.1 L'interaction avec un monde virtuel :

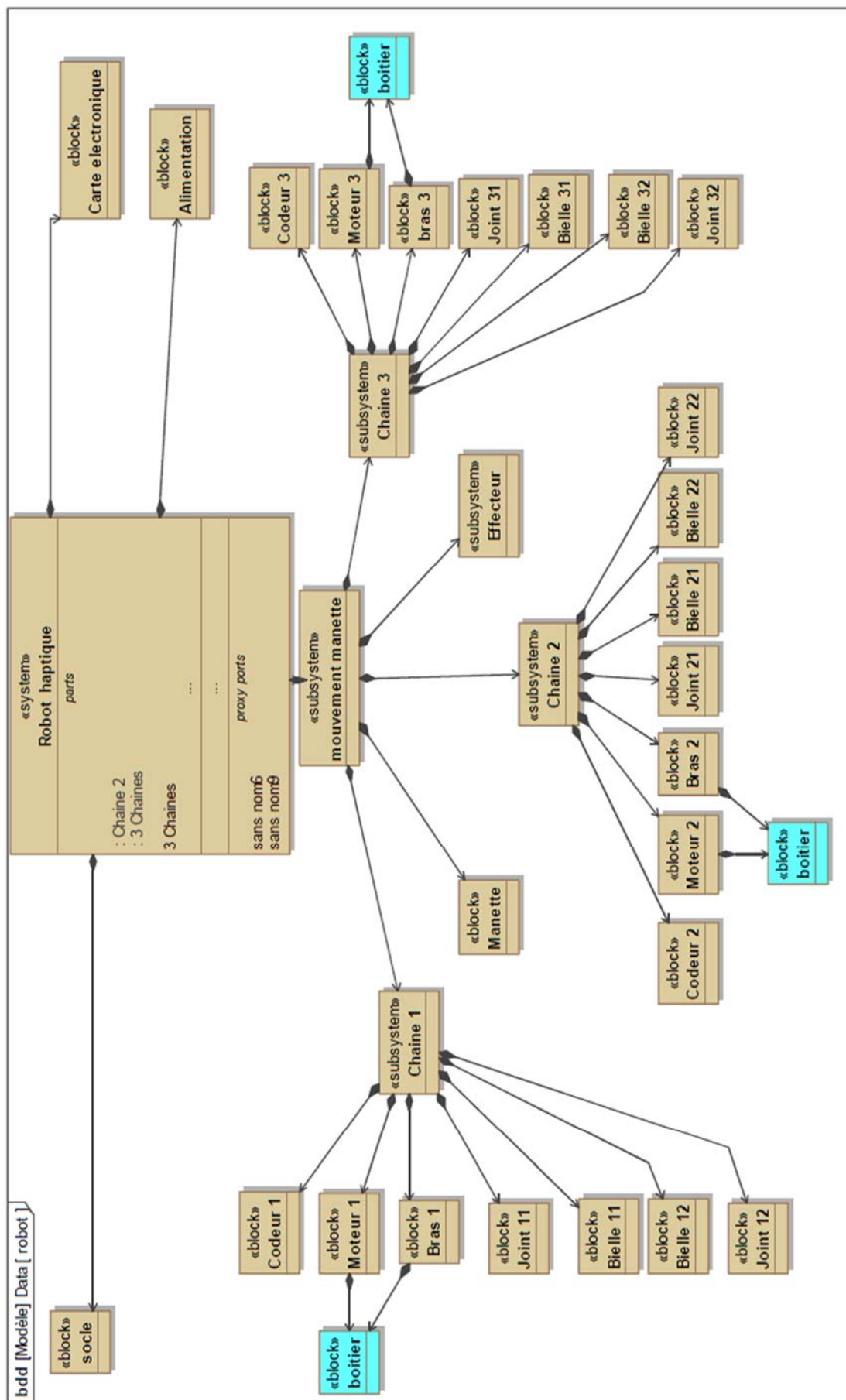
Elle consiste à permettre à un opérateur d'agir sur un environnement virtuel généré sur PC et à renvoyer à cet opérateur des sensations haptiques liées à ses actions. Pour ce faire on utilise un dispositif appelé « interface haptique », capable de fournir à l'environnement virtuel les informations, principalement du type déplacement, découlant des actions de l'opérateur et de renvoyer à l'opérateur des effets de type effort mécanique (on parle de retour d'effort).



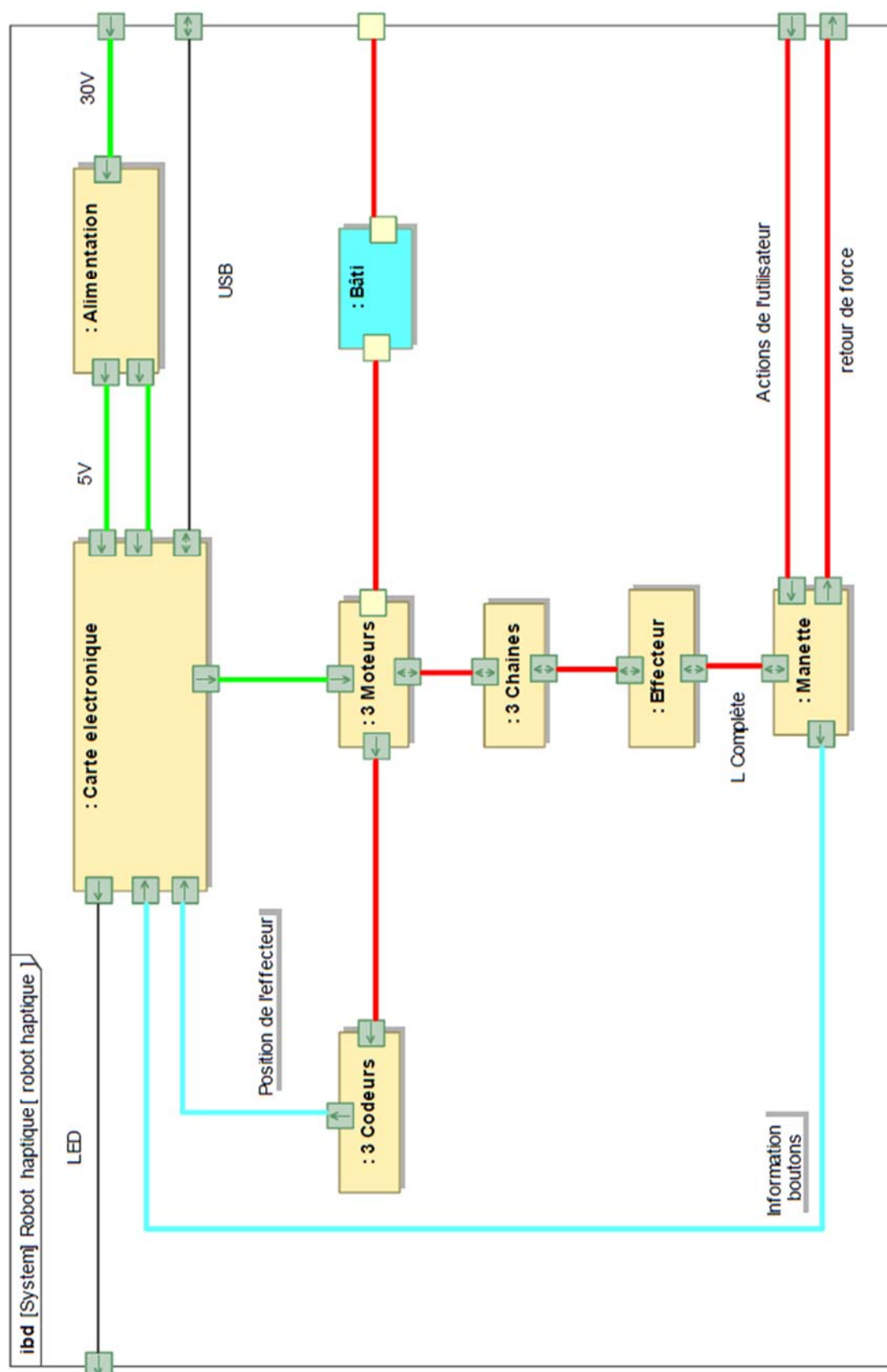
1.4.2 La télémanipulation haptique :

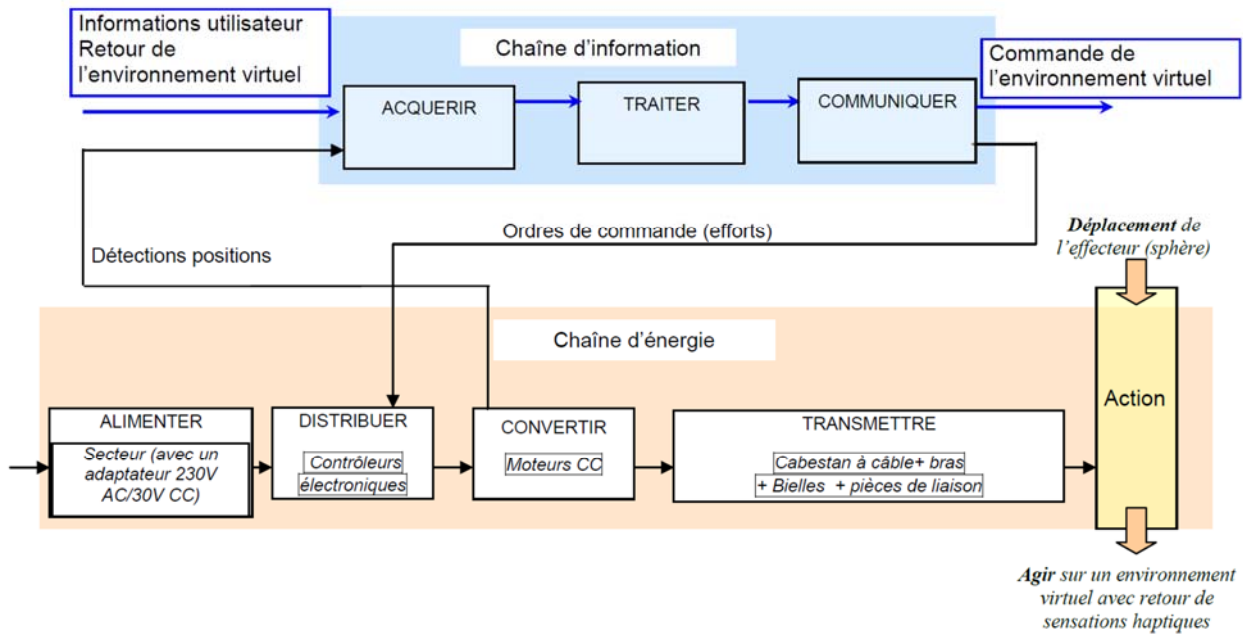
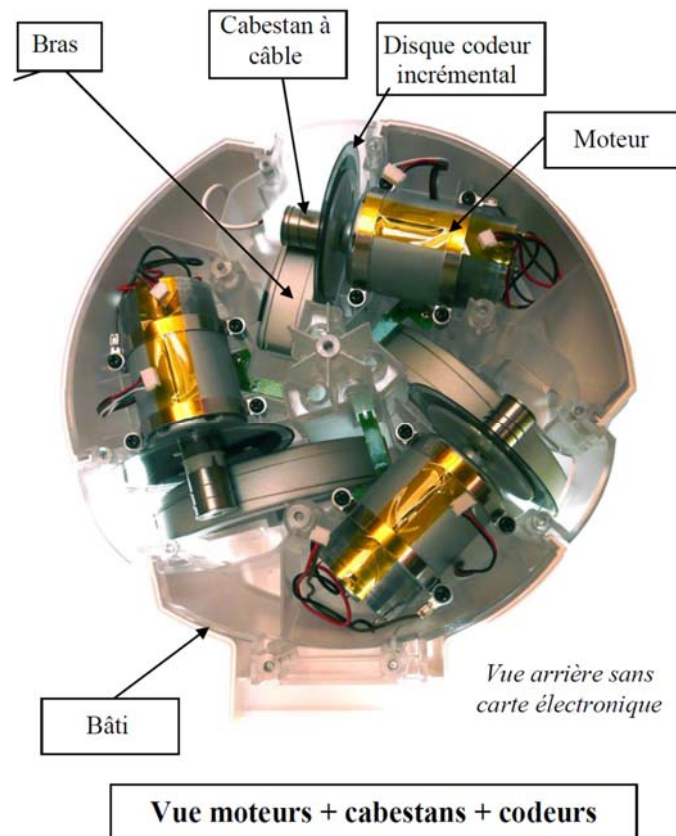
Un autre domaine de l'interaction haptique concerne la télémanipulation dans lequel l'opérateur, via l'interface haptique maître, commande un robot esclave distant qui restitue par la même chaîne en sens inverse les effets mécaniques liés aux actions de l'opérateur.



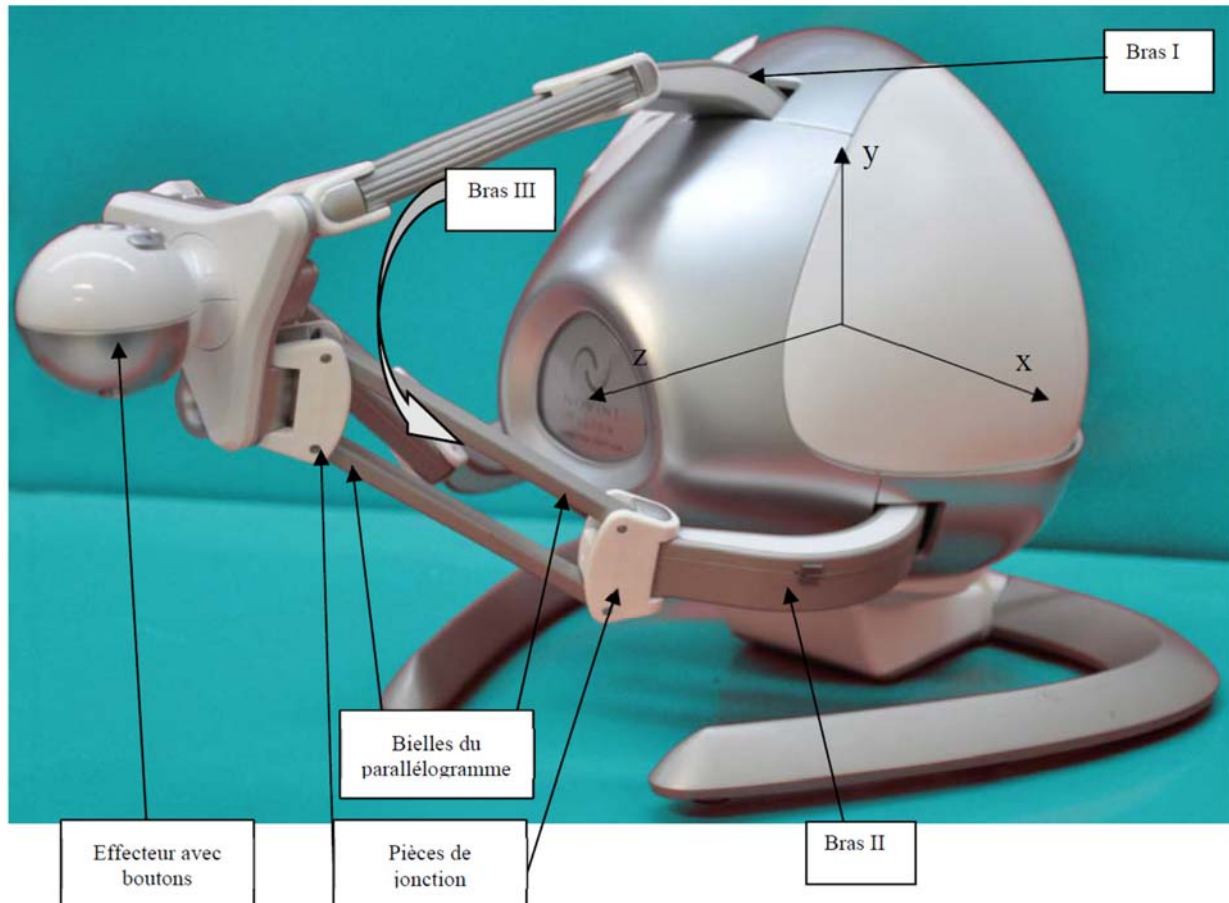
ANALYSE SYSML➤ **Diagramme bdd de définition des blocs du Robot Haptique :**

➤ Diagramme ibd des blocs internes du Robot Haptique :



➤ **Diagramme des chaînes d'information et d'énergie du Robot Haptique :****DESCRIPTION MATERIELLE :**

L'interface possède une architecture mécanique de type robot parallèle de structure « Delta ». Trois bras sont actionnés indépendamment et liés à un effecteur terminal par des parallélogrammes de jonctions. Les trois bras ont une constitution identique, décalée d'un angle de 120°.



CAHIER DES CHARGES ET DONNEES TECHNIQUES FABRICANT :

- **Cinématique :**
 - Degrés de liberté : 3 en translation
 - Facteur de réduction de vitesse moteur-cabestan-bras : 1/7,627
- **Espace de travail :** 101x101x101 mm
- **Force maxi :** env. 9N
- **Codeurs incrémentaux (3) :**
 - Nombre de points : 320 sur 1 piste avec double faisceau (soit 1280 pts/tr après traitement)
 - Résolution en position : >400 dpi
- **Communication vers PC :** Fréquence de rafraichissement de la transmission : 1000Hz
- **Masse totale :** 2,7 kg
- **Alimentation électrique :** 30VDC, puissance 30W
- **Bloc alimentation secteur :** entrée : 100-240VAC 50/60Hz sortie : 30VDC 1A

PARTIE 1 : Décrire la structure et vérifier les performances d'acquisition

L'objet de l'étude menée ici est la fonctionnalité « Acquérir la position » proposée par le robot Falcon, dans le cadre d'un mouvement à une seule mobilité. L'objectif est d'analyser les performances du système réel vis-à-vis du cahier des charges. Les objectifs intermédiaires sont :

- Caractériser l'écart d'espace de travail « exigé – réel » ;
- Analyser le mouvement de la poignée ;
- Modéliser le mécanisme dans le cadre de l'étude.

1.1. Caractériser l'écart d'espace de travail « exigé – réel »

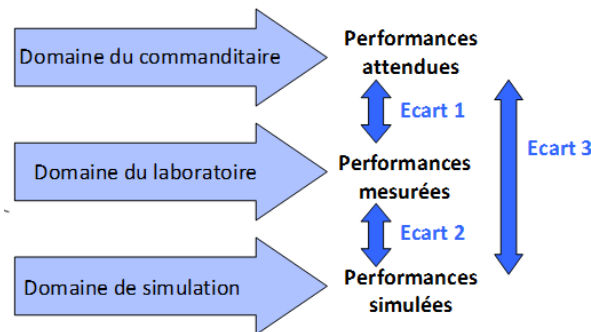
Une fonctionnalité de l'interface homme-machine est d'acquérir la position de la poignée dans l'espace. Mais, la poignée ne peut se déplacer que dans un espace limité. L'objectif de l'étude de cette partie est de déterminer et d'analyser ces limites.

- Brancher l'interface non instrumentée à l'ordinateur ;
- Si nécessaire, débrancher l'interface instrumentée ;
- Ouvrir l'application Falcon_decouverte ;
- Choisir la première fonctionnalité : *Acquérir la position* ;
- Déplacer la poignée de manière à parcourir les limites de l'espace de travail.

Q1. Rappeler les dimensions de l'espace de travail exigées (cf. Cahier des charges ci-dessus).

Q2. A partir des relevés expérimentaux , préciser les dimensions de l'espace de travail réel.

Q3. Quantifier l'écart entre le relevé expérimental et le cahier des charges. Conclure sur la vérification de cette performance



1.2. Analyser le mouvement de la poignée

Avant d'aller plus loin dans l'étude cinématique, observons et justifions le mouvement de la poignée.

Q4. Est-il possible de modifier l'orientation de la poignée ? Comment appelle-t-on ce mouvement ?

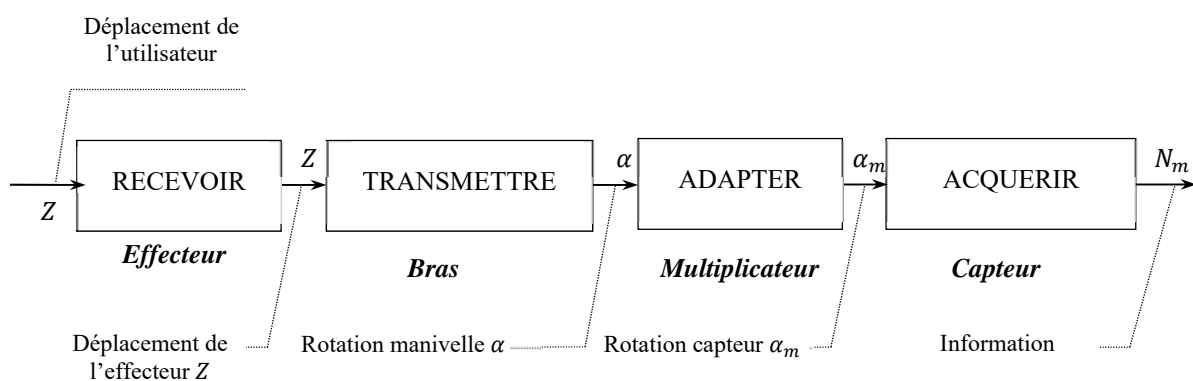
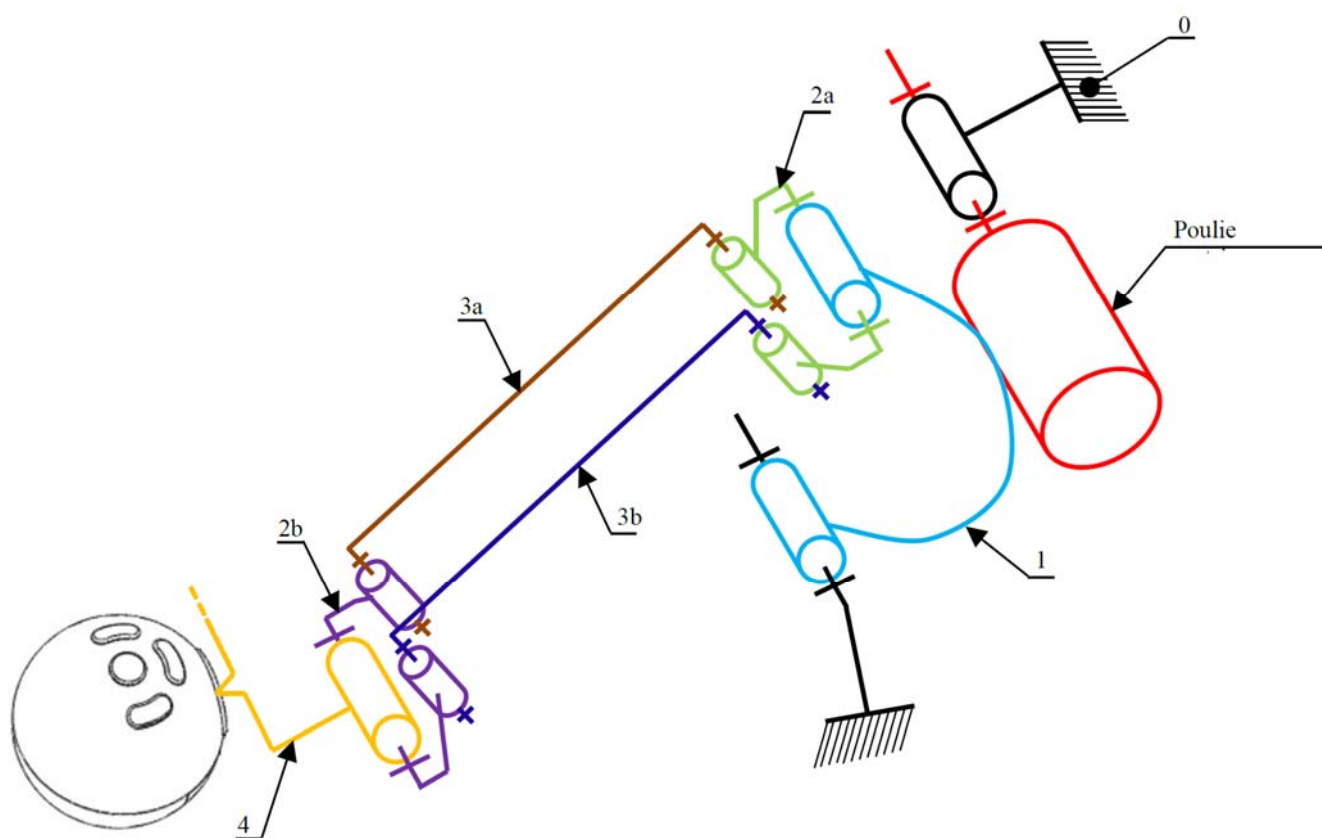
Q5. Quelle performance du cahier des charges correspond au mouvement constaté ?

PARTIE 2 : Valider la Loi d'entrée – sortie du Robot Haptique

L'objet de l'étude menée ici est la fonctionnalité « Acquérir la position » proposée par le robot Falcon, dans le cadre d'un mouvement à une seule mobilité. L'objectif est d'analyser les performances réelles du système réel instrumenté vis-à-vis des performances théoriques.

L'estimation de la position en Z de la poignée est réalisée à partir d'une mesure au sein du boîtier du *falcon* par un capteur numérique.

La chaîne fonctionnelle étudiée comprend l'effecteur ou « poignée », un bras, un multiplicateur de déplacement et un capteur angulaire.

Schéma bloc fonctionnel de la chaîne d'énergie du Robot Haptique :**Modèle cinématique 3D d'un bras du Robot Haptique :**

Modèle cinématique plan simplifié d'un bras du Robot Haptique :

Le mouvement de translation rectiligne modélisé par la liaison glissière est obtenue par le guide.

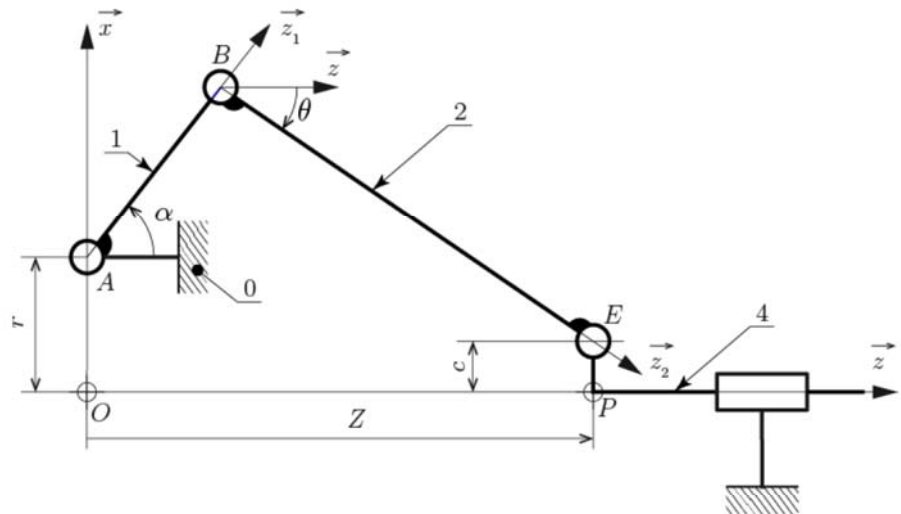
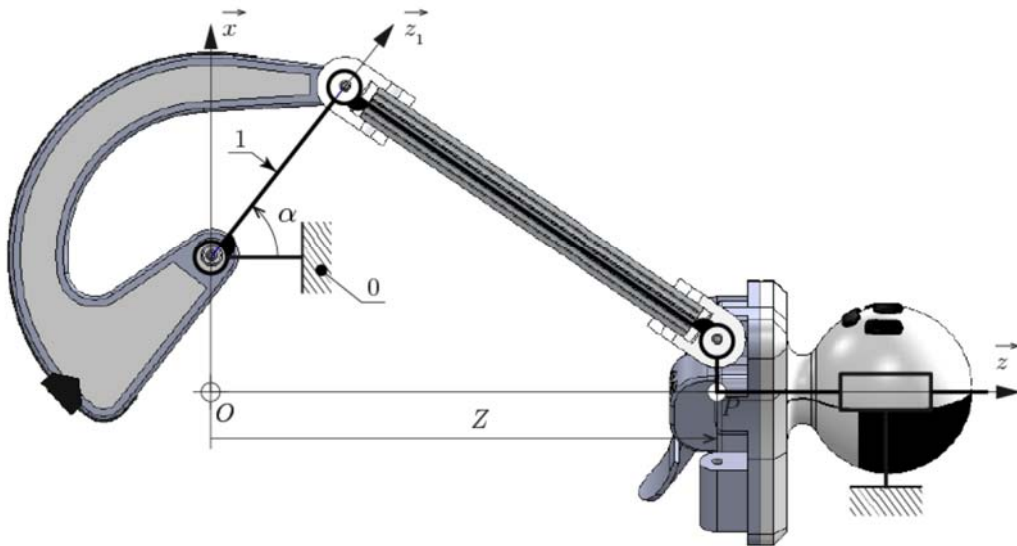
Solides :bâti **0**manivelle **1**tige **2**l'effecteur **4**Paramétrage des liaisons :glissière **0-4** de direction \vec{z} : $Z = \overrightarrow{OP} \cdot \vec{z}$ pivot **0-1** d'axe (A, \vec{y}) : $\alpha = (\vec{z}, \vec{z}_1)$.pivot **2-4** d'axe (E, \vec{y}) : $\theta = (\vec{z}, \vec{z}_2)$ pivot **1-2** d'axe (B, \vec{y}) : $\beta = \theta - \alpha$ Notations :

$$\overrightarrow{OP} = Z\vec{z}$$

$$\overrightarrow{OA} = r\vec{x}$$

$$\overrightarrow{AB} = a\vec{z}_1$$

$$\overrightarrow{BE} = (2d + b)\vec{z}_2$$



$$\overrightarrow{PE} = c\vec{x}$$

distances (mm)			
a	60	e	11,25
b	102,5	f	25
c	14	r	37,23
d	11,25	s	27,33

Problématique : Décrire les moyens d'acquisition et réaliser l'acquisition

Prise en main

- Q6.** Combien de capteurs sont présents sur le mécanisme ? Quelle grandeur physique est mesurée par les capteurs ? Quelle est leur nature ? Quelles sont ses caractéristiques ? Combien sont utiles dans le cadre de l'interface instrumentée ? Repérer sur le document réponse : le disque gradué et la cellule photosensible.
- Q7.** Quelle est la nature du multiplicateur utilisé ? Quelles sont ses caractéristiques ?

Loi entrée-sortie selon le système Falcon

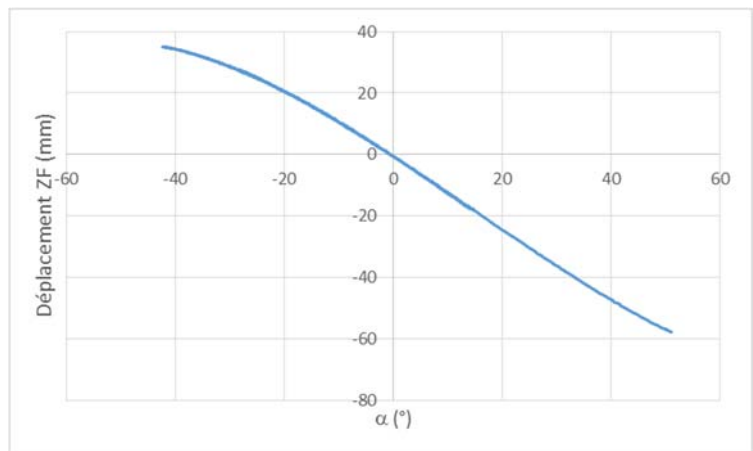
La position Z de la poignée est liée à la position α du bras par une loi, idéalement, bijective. L'objectif de cette partie est de déterminer la loi utilisée par l'interface *Falcon* entre Z_F et α_F (l'indice F fait référence au fait que ces positions sont obtenues par le robot *Falcon* lui-même).

- Brancher l'interface *Falcon* instrumentée au réseau électrique.
 - Relier l'interface *Falcon* instrumentée au PC.
 - Lancer l'application *Falcon_acquerir*.
 - Déplacer à la main l'effecteur, dans un mouvement d'aller-retour, pour couvrir tout l'intervalle de déplacement.
- Q8.** Pour une position particulière, les informations d'angle en incrément et en degré sont-elles cohérentes entre elles ?

2.1. Déterminer la loi entrée-sortie théorique

La poignée est animée d'un mouvement de translation rectiligne selon \vec{Z} par rapport au bâti. On considère le mouvement comme étant plan : l'étude se ramène à un plan contenant l'un des trois bras (l'étude pour les deux autres bras est identique).

On cherche à lier la rotation α de la manivelle du bras au déplacement Z de la poignée. (α et Z correspondent au paramétrage présenté sur le document d'accompagnement 8).





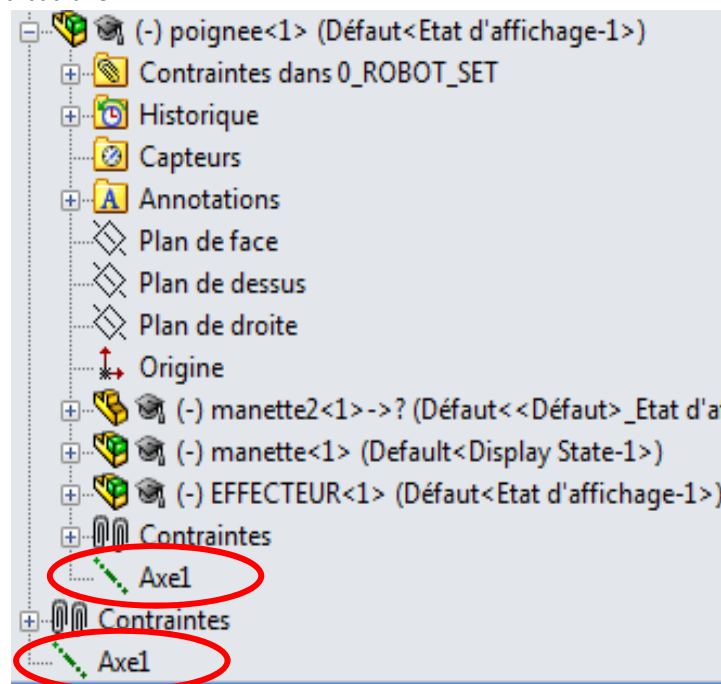
- Q9.** A partir du modèle cinématique plan simplifié, tracer le graphe de liaisons associé au mécanisme présenté
- Q10.** Tracer la ou les figure(s) de changement de base associée(s) aux angles α et θ .
- Q11.** En réalisant une fermeture de chaîne géométrique, déterminer une relation ne faisant apparaître que les variables α et Z , et les constantes géométriques.
- Q12.** En déduire :

$$Z = \sqrt{(2d+b)^2 - (r + a \sin \alpha - c)^2} + a \cos \alpha$$

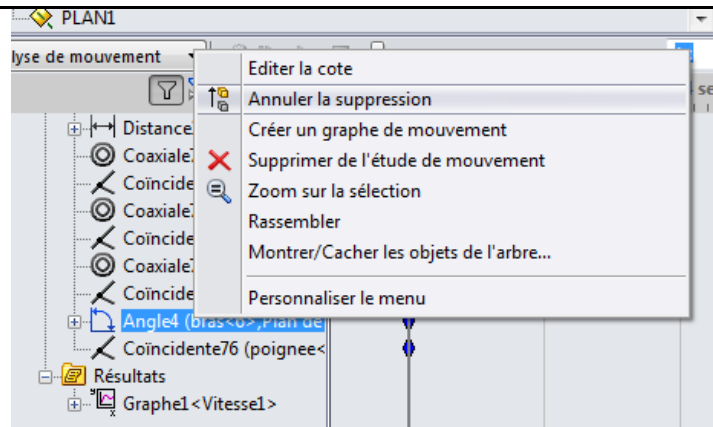
2.2. Déterminer la loi entrée-sortie par simulation numérique


Le graphe de la position de la poignée en fonction de l'angle de la manivelle peut aussi être obtenu par simulation. Nous utiliserons le logiciel Solidworks et le module de simulation SolidworksMotion.

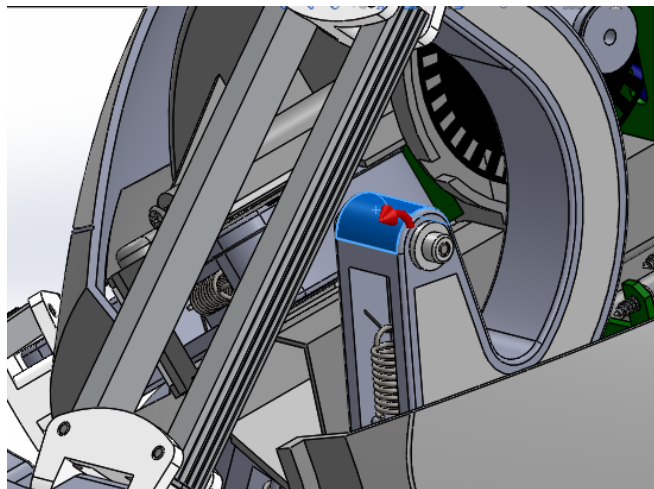
1. Prise en main du fichier
 - a. Ouvrir le fichier d'assemblage *ROBOT_SET*
 - b. Il est possible de déplacer la poignée, on observe le déplacement des trois bras.
 - c. Charger le module SolidworksMotion : cliquer sur la petite flèche à droite de l'icône  pour dérouler le menu, et choisir *Complément*. Vérifier que le module *Solidworks Motion* est bien validé (coche dans la colonne de gauche)
2. Préparation du modèle
 - a. Mise en place de la contrainte d'alignement : pour représenter la tige de guidage, il faut aligner la poignée avec l'axe central du robot *Falcon*. Cliquer sur l'icône *contrainte*  puis sélectionner l'axe central de la poignée *axe1* et l'axe central du bâti *axe1*.





3. Préparation de la simulation
 - a. Cliquer sur l'onglet *Etude du mouvement*, situé en bas de la fenêtre. Une nouvelle fenêtre s'affiche, indiquant que Solidworks a ouvert le module de simulation. Nous travaillerons uniquement dans cette fenêtre. Dans le menu déroulant en haut à gauche de cette fenêtre, choisir le type d'étude : **Analyse du mouvement**.
 - b. Il faut maintenant préciser la position initiale de la simulation : l'angle α varie entre 6° (butée avant) et 99° (butée arrière).
 - i. On peut facilement retrouver la position de butée arrière : il suffit d'*annuler la suppression* de la contrainte *Angle 4*. (clic droit sur la contrainte grisée)
 - ii. Remarque : le robot ne peut plus bouger : son seul degré de mobilité a été contraint. Une fois que le mécanisme est dans cette position de référence, il faut supprimer la contrainte pour retrouver la mobilité.



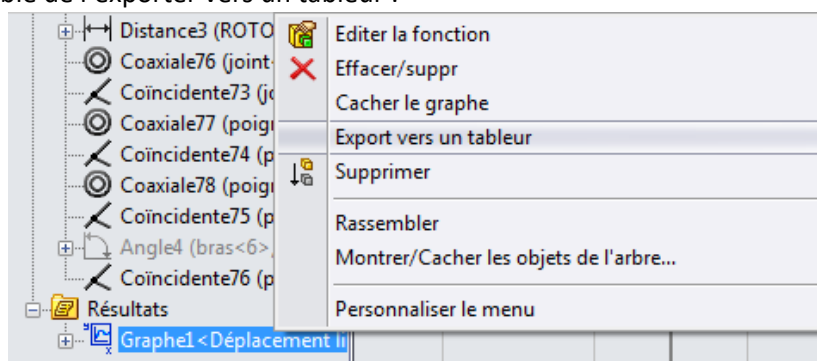
- c. Placer une source virtuelle de mouvement : on considèrera la rotation du bras.
 - i. Cliquer sur le bouton  **Moteur**, choisir un moteur circulaire.
 - ii. Cliquer sur un cylindre de la pièce motrice. Ce cylindre doit être choisit pour avoir la correspondance entre son axe et la direction de la rotation de la pièce.



- d. Préciser une vitesse de 1 tr/min ou (1 RPM en anglais). Attention au sens.
- e. Choisir la durée de la simulation (on rappelle : le débattement angulaire doit être de 93°)
 - i. La fenêtre de simulation se compose essentiellement de chronogrammes, en fonction du temps, décrivant si une fonction est active ou pas. Celui du haut définit la durée globale de la simulation.
 - ii. **Déplacer** le losange (appelé clé) de droite, de la ligne du haut, pour l'amener à l'instant final voulu (15 s par exemple).
- f. Cliquer sur le bouton  pour lancer le calcul. Une fois terminée, on peut animer le mécanisme par le bouton .

4. Exploitation de la simulation

- a. La courbe du déplacement en fonction de l'angle apparait.
- b. Il est possible de l'exporter vers un tableur :



2.3. Mesurer la loi entrée-sortie par expérimentation

Les différentes lois entrées-sorties obtenues par le système lui-même ou par une étude cinématique (théorique ou par simulation) doivent être confrontées au comportement réel. L'objectif de cette partie est d'obtenir la loi entrée-sortie géométrique par simulation.

Protocole

Pour réaliser cette série de mesures, le pied à coulisse doit être lié à la poignée par l'intermédiaire de du lardon fixé sur la face avant de la poignée.

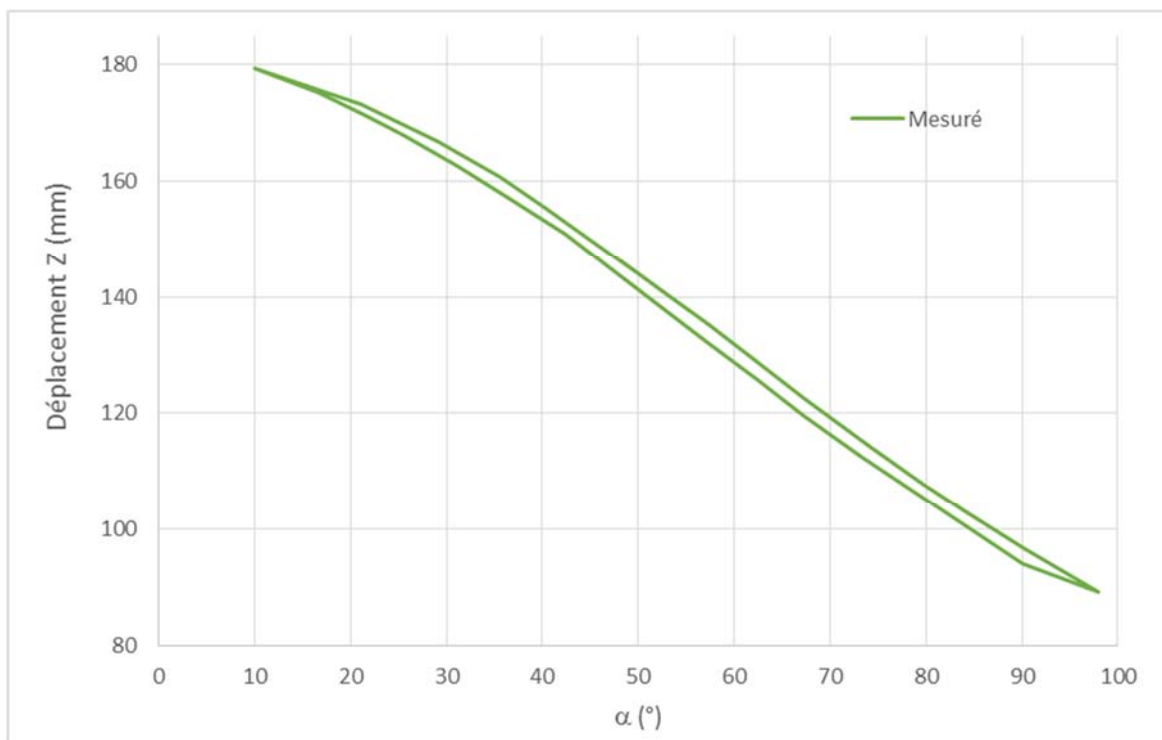
Nous allons utiliser la fenêtre dédiée :

- Avant d'ouvrir la fenêtre, il faut réaliser la « prise d'origine » :
 - Positionner à la main l'effecteur tel que Z soit proche de 0 (à $\pm 0,5 \text{ mm}$);
 - Appuyer sur le bouton « ZERO » du pied à coulisse.
 - La prise d'origine du pied à coulisse a été faite. (la mesure de l'angle par codeur sera celle du robot, donc avec la même origine)
- Ouvrir la fenêtre d'acquisition de la position par les capteurs :
 - Si la carte arduino n'est pas reconnue, vérifier les branchements et choisir le port COM correspondant à la carte.
 - Déplacer la poignée à la main d'une dizaine de millimètres. Arrêter le mouvement. Enregistrer la mesure (attention, le temps de réponse du pied à coulisse est long, de l'ordre de 0,5s – un enregistrement avant la stabilisation de la mesure serait erronée).
 - Recommencer de façon à parcourir un aller-retour complet sur la course du Falcon.
 - Lorsque l'effecteur est revenu à la position 0mm, valider la série de mesure.

Analyse des résultats expérimentaux

La courbe obtenue présente une forme d'hystérésis (cf. ci-dessous).

Q13. Justifier cette forme d'hystérésis.



3. Analyse des écarts entre modèles analytique, numérique et expérimental

Analyse et comparaison des résultats expérimentaux et théorique

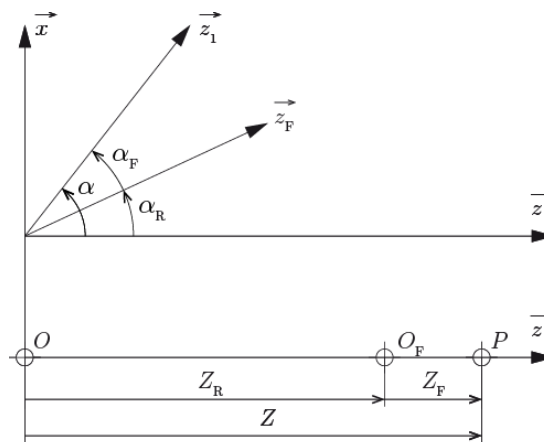
- A l'aide de l'application *Falcon_acquisition*, renseigner la loi théorique déterminée précédemment ;
- La courbe de déplacement selon le système *Falcon* et la loi théorique apparaissent sur le graphe.

Q14. Comparer et analyser les deux graphes

Mise en œuvre du recalage

Le principal écart entre les deux courbes a pour cause l'usage de repères et d'origines différents. En effet, les résultats théoriques et les mesures par l'interface *Falcon* ont été réalisés avec des références différentes :

- repère utilisé pour la loi théorique : $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$
- repère utilisé pour la mesure par *Falcon*: $(O_F, \vec{x}_F, \vec{y}_F, \vec{z}_F)$ (appelé aussi repère machine)

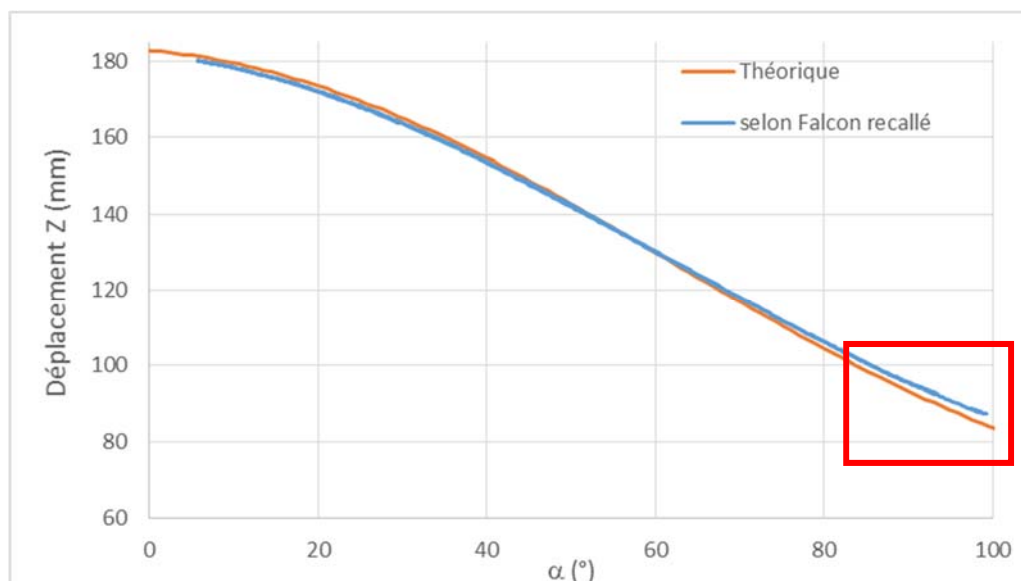


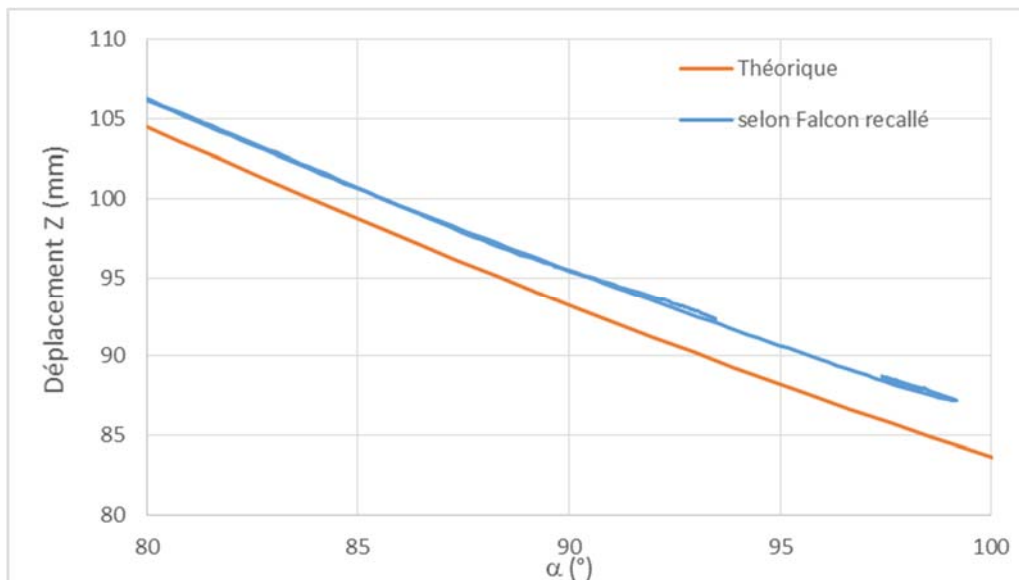
On donne :

- $\alpha_R = (\vec{z}, \vec{z}_F) = 48^\circ$
- $Z_R = \overline{OO_F}, \vec{z} = 145\text{mm}$

- Renseigner dans l'application *Falcon_acquisition*, les recalages nécessaires pour que les grandeurs théoriques et les celles mesurées par l'interface *Falcon* soient comparables.

Q15. Comparer et analyser les deux graphes





Comparaison des résultats théoriques et de simulation

- A l'aide des outils disponibles, exporter les résultats de simulation vers un tableur ;
- Copier la colonne des valeurs prises par α , et les coller dans le champ prévu dans le logiciel *Falcon_acquerir* ;
- Faire de même pour la colonne des valeurs prises par Z .

Q16. De manière analogue à l'exploitation des résultats précédent, justifier l'écart entre les courbes.

Q17. En notant que la valeur initiale de la simulation (0°) correspond à un angle de 99°, préciser les recalages nécessaires pour l'angle et le déplacement.

Q18. Comparer les courbes.

Comparaison des lois géométriques avec les mesures expérimentales

Sur un même graphe, afficher :

- la courbe obtenue par le Falcon,
- la courbe obtenue théoriquement ou par simulation,
- la courbe expérimentale.

Q19. Comparer les courbes. Conclure sur la performance du robot *Falcon* à estimer la position Z de l'effecteur.

