

Filière Systèmes industriels

Orientation Power and Control

Diplôme 2007

*Bastien Richard*

*Télé-opération :  
servomécanismes  
maître-esclave*

Professeur

Fariba Bützberger

Expert

André Rotzetta

SI	TV	EE	IG	EST
X	X	X	X	

Filière / Studiengang : Systèmes industriels

Confidentiel / Vertraulich ☐

<b>Etudiant / Student</b> Bastien Richard	<b>Année scolaire / Schuljahr</b> 2006/07	<b>No TD / Nr. DA</b> SI/2007/27
<b>Proposé par / vorgeschlagen von</b> HES-SO Valais, UPC		<b>Lieu d'exécution / Ausführungsort</b> HES-SO Valais, DSI  <b>Expert / Experte</b> André Rotzetta

<b>Titre / Titel:</b>  <p style="text-align: center;"><b>Télé-opération : servomécanismes maître-esclave</b></p>
<b>Description / Beschreibung:</b>  <p>Réalisation d'un système de télé-opération 'maître et esclave' se communiquant via le réseau Ethernet ou le Bus de terrain. On propose de télé-manipuler un robot bilatéral (à 2 axes ou 2 degrés de liberté) à l'aide d'un JoyStick.</p> <p>Les données à transmettre de manière bidirectionnelle sont les positions des 2 servomoteurs du robot ainsi que la force exercée.</p> <p>On utilisera des produits SIEMENS (automates programmables, cartes d'axe, servomoteurs, amplificateurs, codeurs,...) dont l'étudiant s'est familiarisé pendant le projet de semestre.</p>
<b>Objectifs / Ziele:</b>  <ul style="list-style-type: none"> <li>— Conception, dimensionnement et réalisation d'un robot bilatéral avec 2 bras télé-manipulables.</li> <li>— Communication bidirectionnelle entre le JoyStick et le robot.</li> <li>— Concevoir et développer des méthodes de télé-opération à retour de force.</li> </ul>

<b>Signature ou visa / Unterschrift oder Visum</b>  Resp. de l'orientation power and control  .....  Professeur/Dozent: Fariba Bützberger  .....  Etudiant/Student: .....	<b>Délais / Termine</b>  Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 03.09.2007  Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: 23.11.2007  Exposition publique / Ausstellung Diplomarbeiten: 30.11.2007  Défenses orales / Mündliche Verfechtungen Semaine 49
---	--

## Téléopération : servomécanisme maître-esclave

## Téléopération : servomechanismus meister-sklave

Objectif	<p>Le projet consistait en la réalisation d'un système de téléopération 'maître et esclave' communiquant via le réseau Profibus. On propose de télé-manipuler un robot bilatéral à l'aide d'un joystick.</p> <p>Les données à transmettre de manière bidirectionnelle sont la position et le couple des moteurs.</p> <p>Le matériel utilisé sera le même que celui employé durant le projet de semestre.</p>
Résultats	<p>Le design choisis pour le robot a été inspiré de celui de la grue. Il est commandé par un joystick ou le retour de force a été réalisé à l'aide d'un moteur à courant continu sur un joystick industriel.</p> <p>Le système est enfin visualiser par un PC avec le logiciel Intouch.</p>
Mots-clés	Conception, Programmation, Régulation, Visualisation, Robot, Joystick, Retour de force

Ziel	Das Ziel des Projekts war einer Telemanipulation Meister – Sklave zu realisieren. Sie tauschen die Informationen über ein Profibus Netzwerk aus. Die Informationen sind die Lage und das Drehmoment. Die Ausrüstung ist die gleiche wie beim Semester.
Resultate	Was für den Roboter gewählte Design ähnelt dem eines Krans. Er wird mit einen Joystick gesteuert. Man kann mit einem Motor das Drehmoment fühlen. Man kann das System auch sehen mit dem programm Intouch auf ein computer.
Schlüsselwörter	Programmierung, Regulierung, Visualisierung, Roboter, Joystick, Drehmoment, Kraft

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## Téléopération : servomécanisme maître - esclave

### TABLE DES MATIERES

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>5</b>
1.1	Projet de semestre .....	5
1.2	But.....	5
1.3	Téléopération .....	5
<b>2</b>	<b>Cahier des charges .....</b>	<b>6</b>
2.1	Conception .....	6
2.1.1	Conception robot .....	6
2.1.2	Conception joystick.....	6
2.2	Programmation.....	6
2.2.1	Régulation de position ou de vitesse.....	6
2.2.2	Retour de force.....	6
2.3	Visualisation et commande .....	6
2.3.1	Commande .....	6
2.3.2	Visualisation .....	6
<b>3</b>	<b>Environnement Hardware .....</b>	<b>7</b>
3.1	Matériel utilisé .....	7
3.1.1	Introduction .....	7
3.1.2	Interface maître-esclave .....	8
3.1.3	Robot 2 axes .....	8
3.1.4	Joystick à retour de force .....	8
3.1.5	Commande et visualisation .....	8
3.2	Automate .....	9
3.2.1	Introduction .....	9
3.2.2	CPU .....	9
3.2.3	Caractéristiques techniques .....	10
3.2.4	Modules entrées/sorties analogiques.....	10
3.2.5	Module de communication .....	10
3.3	Module de puissance .....	11
3.3.1	Introduction .....	11
3.3.2	Fonctionnement.....	11
3.3.3	Caractéristiques.....	12
3.4	Unité de contrôle .....	13
3.4.1	Introduction .....	13
3.4.2	Fonctionnement.....	13
3.5	Inductance réseau.....	14
3.5.1	Introduction .....	14
3.5.2	Caractéristiques.....	14
3.6	Moteur synchrone.....	15
3.6.1	Introduction .....	15
3.6.2	Caractéristiques.....	15

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

3.7	Codeur résolveur .....	16
3.7.1	Introduction .....	16
3.7.2	Fonctionnement .....	16
3.7.3	Caractéristiques .....	16
3.8	Joystick .....	17
3.8.1	Introduction .....	17
3.8.2	Caractéristiques .....	17
3.9	Moteur DC .....	18
3.9.1	Introduction .....	18
3.9.2	Caractéristiques .....	18
3.10	Amplificateur moteur DC .....	19
3.10.1	Introduction .....	19
3.10.2	Caractéristiques .....	19
<b>4</b>	<b>Transmissions des données .....</b>	<b>20</b>
4.1	Profibus .....	20
4.2	MPI .....	20
4.3	TCP/IP .....	20
<b>5</b>	<b>Environnement Software .....</b>	<b>21</b>
5.1	Programmes utilisés .....	21
5.1.1	Introduction .....	21
5.1.2	Conception mécanique .....	21
5.1.3	Configuration et Programmation .....	21
5.1.4	Commande et visualisation .....	21
5.2	Inventor .....	22
5.3	Simatic Manager .....	23
5.4	Hw config .....	23
5.5	S7T config .....	23
5.6	STEP 7 .....	24
5.6.1	Introduction .....	24
5.6.2	Blocs de code .....	24
5.6.3	Blocs technologiques .....	24
5.6.4	Mémento .....	24
5.6.5	Langage .....	25
5.6.6	Table des variables .....	25
5.6.7	Table des mnémoniques .....	25
5.7	Intouch .....	26
5.7.1	Introduction .....	26
5.7.2	Fonctionnement .....	26
5.8	SMC .....	26
<b>6</b>	<b>Conception mécanique .....</b>	<b>27</b>
6.1	Robot .....	27
6.1.1	Introduction .....	27
6.1.2	Design .....	27
6.1.3	Accouplement .....	28
6.1.4	Dimensionnement de la charge .....	29
6.2	Joystick .....	31

<b>Hes-so</b> <small>Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz</small>	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

6.2.1	Introduction .....	31
6.2.2	Méthodes .....	31
6.2.3	Accouplement .....	31
6.2.4	Dimensionnement .....	32
<b>7</b>	<b>Câblage .....</b>	<b>36</b>
7.1	Introduction .....	36
7.2	Schéma d'encombrement .....	36
7.2.1	Introduction .....	36
7.2.2	Schéma .....	36
7.3	Schéma de puissance .....	37
7.3.1	Introduction .....	37
7.3.2	Schéma .....	37
7.4	Schéma de commande .....	38
7.4.1	Introduction .....	38
7.4.2	Schéma .....	38
7.5	Code couleur .....	39
7.5.1	Introduction .....	39
7.5.2	Tableau .....	39
<b>8</b>	<b>Programmation .....</b>	<b>40</b>
8.1	Structure du code .....	40
8.2	Régulation de position axe x .....	40
8.2.1	Fonctionnement .....	40
8.2.2	Code .....	40
8.3	Régulation de position/vitesse axe y .....	40
8.3.1	Fonctionnement .....	40
8.3.2	Code .....	41
8.4	Retour de force .....	41
8.4.1	Fonctionnement .....	41
8.4.2	Code .....	41
8.4.3	Dimensionnement retour de force .....	41
<b>9</b>	<b>Dimensionnement régulateur .....</b>	<b>45</b>
9.1	Introduction .....	45
9.2	Dimensionnement par Ziegler-Nichols .....	46
9.2.1	Introduction .....	46
9.2.2	Marche à suivre .....	46
9.3	Axe x .....	47
9.3.1	Régulateur de vitesse .....	47
9.3.2	Régulateur de position .....	48
	Axe y .....	49
9.3.3	Régulateur de vitesse .....	49
9.3.4	Régulateur de position .....	50
<b>10</b>	<b>Visualisation et commande .....</b>	<b>51</b>
10.1	Structure .....	51
10.2	Commande .....	52
10.3	Visualisation axe X .....	53

<b>Hes-so</b> <small>Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz</small>	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

10.4	Visualisation axe Y .....	54
<b>11</b>	<b>Analyse des résultats.....</b>	<b>55</b>
11.1	Conception robot.....	55
11.1.1	Objectif à atteindre .....	55
11.1.2	Analyse.....	55
11.2	Conception joystick .....	56
11.2.1	Objectif à atteindre .....	56
11.2.2	Analyse.....	56
11.3	Programmation.....	57
11.3.1	Objectif à atteindre .....	57
11.3.2	Analyse.....	57
11.4	Câblage.....	57
11.4.1	Objectif à atteindre .....	57
11.4.2	Analyse.....	57
11.5	Régulation .....	58
11.5.1	Objectif à atteindre .....	58
11.5.2	Analyse.....	58
11.6	Commande et visualisation .....	58
11.6.1	Objectif à atteindre .....	58
11.6.2	Analyse.....	58
11.7	Répartition du temps .....	59
<b>12</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>60</b>
<b>13</b>	<b>Remerciements.....</b>	<b>60</b>
<b>14</b>	<b>Bibliographie .....</b>	<b>60</b>
<b>15</b>	<b>Annexes .....</b>	<b>61</b>

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 1 Introduction

### 1.1 Projet de semestre

Mon projet de semestre consistait à mettre en place des systèmes de téléopération à retour de force à l'aide de matériel Siemens. Il s'agissait principalement de se familiariser avec le matériel et les programmes mis à disposition afin de me préparer à mon projet de diplôme.

### 1.2 But

Mon projet de diplôme consiste à réaliser un système de téléopération 'maître esclave' se basant sur un robot à 2 axes et un joystick à retour de force. Les données à transmettre sont la position des deux axes ainsi que la force exercée.

Les produits utilisés sont identiques à ceux utilisés lors du projet de semestre.

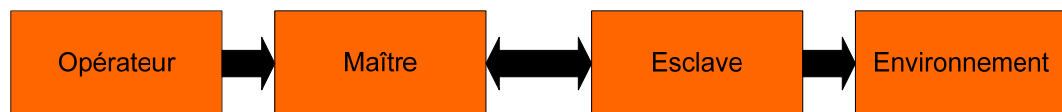


Figure 1 : Principe de la téléopération

### 1.3 Téléopération

La téléopération consiste en la réalisation d'une tâche à distance au moyen d'un système électromécanique maître et esclave. L'opérateur humain manipule le robot maître et le robot esclave, situé au contact de l'environnement distant réalise la tâche imposée. L'utilisateur tente de réaliser la tâche en se basant sur un retour visuel. Il est possible d'accroître la sensation d'immersion dans l'environnement distant en ajoutant un retour de force. Ce système est employé dans la médecine, l'industrie et même les jeux vidéo.

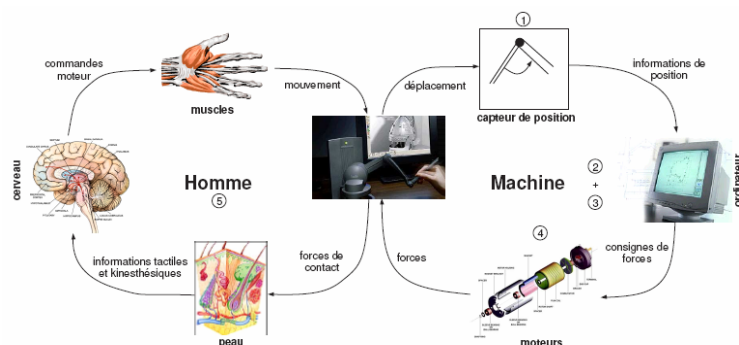


Figure 2 : Exemple de téléopération



<b>Hes-so</b> <small>Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz</small>	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 2 Cahier des charges

### 2.1 Conception

#### 2.1.1 *Conception robot*

Réaliser une conception mécanique permettant d'accoupler deux moteurs afin d'avoir un robot à deux axes.

La partie mécanique n'étant pas la principale tâche, la conception doit être simple. Comme le travail consiste en la réalisation d'une maquette la solution choisie doit être également démonstrative.

#### 2.1.2 *Conception joystick*

Réaliser un retour de force sur un joystick industriel permettant de commander notre robot à deux axes. La réalisation étant un prototype le 'design' importe peu mais doit être fonctionnel.

### 2.2 Programmation

#### 2.2.1 *Régulation de position ou de vitesse*

Réguler les axes en fonction de la position du joystick.

#### 2.2.2 *Retour de force*

Etablir un retour de force sur le joystick via l'automate et les cartes d'axes en mesurant le couple sur les moteurs du robot.

### 2.3 Visualisation et commande

#### 2.3.1 *Commande*

Etablir un système de commande permettant d'effectuer les diverses tâches demandé par chacun des axes (activation, mise à zéro, initialisation,...).

#### 2.3.2 *Visualisation*

Le système étant manipulable à distance il serait judicieux de pouvoir visionner diverses valeurs (position, vitesse, couple...).

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

### 3 Environnement Hardware

#### 3.1 Matériel utilisé

##### 3.1.1 Introduction

Le matériel utilisé dans mon environnement hardware est divisé en quatres groupes :

- Interface maître - esclave
- Robot 2 axes
- Joystick avec retour de force
- Commande et Visualisation

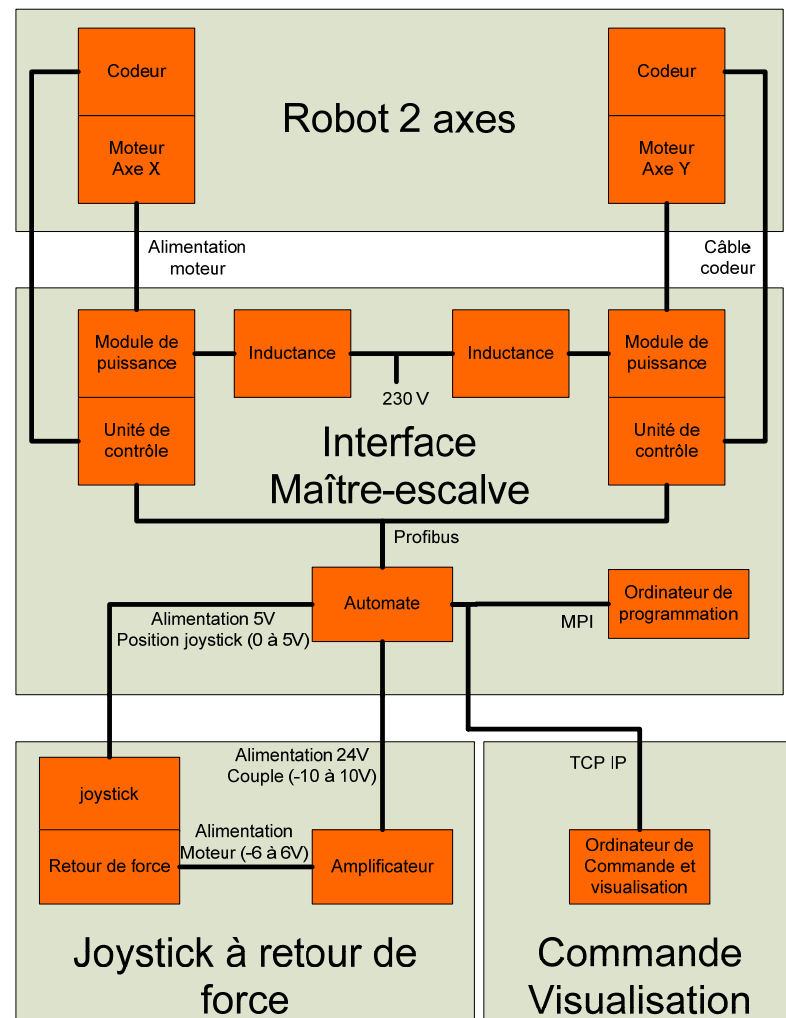



Figure 3 : Schéma bloc complet de l'installation

	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

### **3.1.2 Interface maître-esclave**

Automate Siemens SIMATIC S7-300 CPU 315T-2DP possédant une carte d'entrée analogique SM331, une carte de sortie analogique SM332 et un module de communication CP 343-1 IT :

- Unité centrale de notre processus qui coordonne le maître (joystick) et l'esclave (robot) et qui permet de transmettre les données pour les visualiser.

Module de puissance Siemens SINAMICS PM 340 :

- Module qui alimente les moteurs des 2 axes.

Unité de contrôle Siemens SINAMICS CU310 DP :

- Unité qui régule les deux axes du robot en vitesse et courant.

Ordinateur :

- Ordinateur servant à la programmation de l'automate.

### **3.1.3 Robot 2 axes**

Moteurs synchrones Siemens 1FK7-5AK21 :

- Moteurs qui commandent les axes du robot.

Codeurs résolveur Siemens 1UGO :

- Capteur fixé au moteur permettant de mesurer la position et la vitesse des axes.

### **3.1.4 Joystick à retour de force**

Joystick à capteur à effet hall Megatron 812-2-2-1-1-0-K1 :

- joystick donnant une consigne de position ou vitesse en fonction de sa position.

Moteur DC Maxon S2322.982-52.235-200 :

- Moteur permettant de réaliser un retour de force sur l'axe du joystick.

Amplificateur Maxon 4-Q-DC 145391 :

- Amplificateur faisant varier la tension du moteur et se faisant le couple du retour de force.

### **3.1.5 Commande et visualisation**

Ordinateur :

- Ordinateur servant à la commande et la visualisation des axes.

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 3.2 Automate

### 3.2.1 Introduction

L'API est structuré autour d'une unité de calcul ou processeur (CPU), d'une alimentation et de modules d'entrées/sorties numériques ou analogiques.

Les programmes des API sont traités selon un cycle précis: acquisition de toutes les entrées - traitement des données - mise à jour des sorties. Le temps d'un cycle d'API varie selon la taille du programme, la complexité des calculs et de la puissance de l'API.

L'absence d'interface homme-machine pour visualiser l'action et le fonctionnement du programme sur la partie opérative fait que les automates sont très souvent reliés par une communication à un pupitre opérateur, une interface graphique ou un PC.

### 3.2.2 CPU

La CPU 315T-2DP de Simatic apporte une solution simple aux tâches d'automatisation qui demandent des performances et de l'intégration de contrôle de mouvement. La configuration et la programmation automate des entraînements s'effectuent sans langage spécifique au contrôle de mouvement. L'utilisateur travaillera avec le langage STEP7 et des blocs Motion Control. Cette CPU technologique contient la régulation de position.



Figure 4 : Automate Siemens SIMATIC S7-300 CPU 315T-2DP

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

### 3.2.3 *Caractéristiques techniques*

L'alimentation est faite par une source 24V/5A.

La CPU 315T-2DP comporte un microprocesseur avec une vitesse de traitement d'env. 100 ns par instruction sur bit et de 3 µs par opération à virgule flottante.

Elle est dotée d'une mémoire de 128 ko ou 512Ko et comportent des entrées/sorties intégrées rapides.

Elle possède un emplacement pour une MMC (max. 8 Mo) servant de mémoire de chargement et permettant aussi de stocker sur la CPU les données du projet.

L'automate possède 2 interfaces Profibus (MPI/DP + DP DRIVE).

39 blocs Motion Control sont utilisables pour gérer toutes les fonctions comme l'asservissement, le synchronisme de transmission...

### 3.2.4 *Modules entrées/sorties analogiques*

La position du joystick ainsi que le retour de force sont des grandeurs analogiques. L'automate communique avec le joystick grâce à des cartes analogiques. Elles sont configurables soit en tension (0 à 10V...) soit en courant (4 à 20mA...) et donne au programme une valeur entière.

### 3.2.5 *Module de communication*

Ce module de communication permet de transmettre par TCP/IP les valeurs de l'automate au programme de visualisation et commande. Il est relié sur le réseau par un câble RJ-45.

Il travail à une vitesse de 10Mbits/s. Il communique avec l'automate par Ethernet. Il suffit de rentrer l'adresse IP sur laquelle le module est relié dans le programme de configuration. Un programme nommé SMC permet de communiquer avec le module et sert d'interface avec le programme de visualisation.



Figure 5 : Module de communication CP 343-1 IT

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

### 3.3 Module de puissance

#### 3.3.1 Introduction

La régulation s'effectue bien évidemment à une puissance très faible par rapport à la puissance du moteur. Le module de puissance est commandé par une unité de contrôle. Il sert d'interface de puissance entre le moteur et l'unité de réglage.



Figure 6 : Module de puissance PM340

#### 3.3.2 Fonctionnement

Ce circuit est un convertisseur de fréquence avec circuit intermédiaire à tension continu. C'est un pont à deux quadrants.

Un redresseur à diode monophasé redresse la tension 230 VAC alternative en tension continue stabilisée par un condensateur.

Dans l'étage intermédiaire à tension continue il est possible d'insérer une résistance de freinage commandé par un IGBT. Cela permet de dissiper l'énergie de freinage et l'énergie du condensateur.

La tension continue monophasée est transformée en tension alternative triphasée et fréquence variable à l'aide d'un onduleur triphasé. La tension et la fréquence de sortie sont ainsi réglables en variant les instants de commutation. Ce qui permet donc de réguler la vitesse de notre moteur synchrone. Les commutations sont variées grâce à un signal de commande PWM qui provient des régulateurs de l'unité de contrôle.

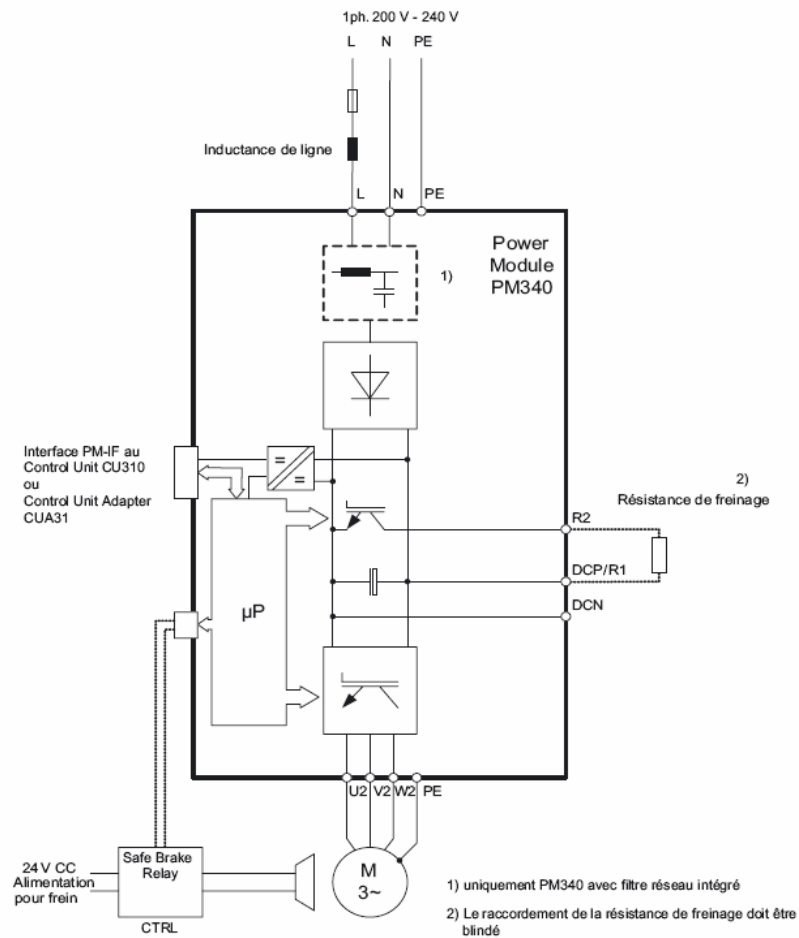


Figure 7 : Structure interne du module de puissance

### 3.3.3 Caractéristiques

Propriétés	Valeur
Tension réseau	230 V
Tension de sortie	0 à 230 V
Courant sortie nominal	2.3 A
Courant sortie maximal	4.6 A
Puissance assignée nominale	0.37 kW
Puissance dissipée nominale	75 W
Fréquence de découpage	4 kHz
Tension d'alimentation Unité de contrôle	24 VCC
Courant d'alimentation Unité de contrôle	1 A
Rendement	0.9

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

### 3.4 Unité de contrôle

#### 3.4.1 Introduction

Lorsqu'on souhaite obtenir un asservissement en position ou en vitesse il est obligatoire d'utiliser des entraînements régulés. La trajectoire de consigne est calculée en temps réel par le ou les processeurs d'axes.



Figure 8 : Unité de contrôle CU310 DP

#### 3.4.2 Fonctionnement

La position et la vitesse d'entrée sont mesurées à l'aide d'un codeur résolveur. Le courant est mesuré à l'aide d'un transformateur d'intensité. En fonction des informations d'entrées (position, vitesse, courant) mesurées, l'unité de contrôle régule la sortie à l'aide d'un signal PWM qui permet donc de varier la tension et la fréquence sur le moteur, et par conséquence sa vitesse ou sa position. Le système possède trois régulateurs :

- régulateur de position
- régulateur de vitesse
- régulateur de courant

Ces trois régulateurs sont en cascade. Le régulateur de position commande celui de vitesse qui commande celui de courant.

Le régulateur interne fonctionne toujours beaucoup plus vite que le régulateur externe. Le régulateur de vitesse fonctionne à une période d'échantillonnage de 125 us tandis que celui de position entre 0.5 et 8 ms. Le régulateur de position est contenu à l'intérieur de l'automate dans une CPU technologique tandis que les 2 autres régulateurs se trouvent à l'intérieur de l'unité de contrôle.



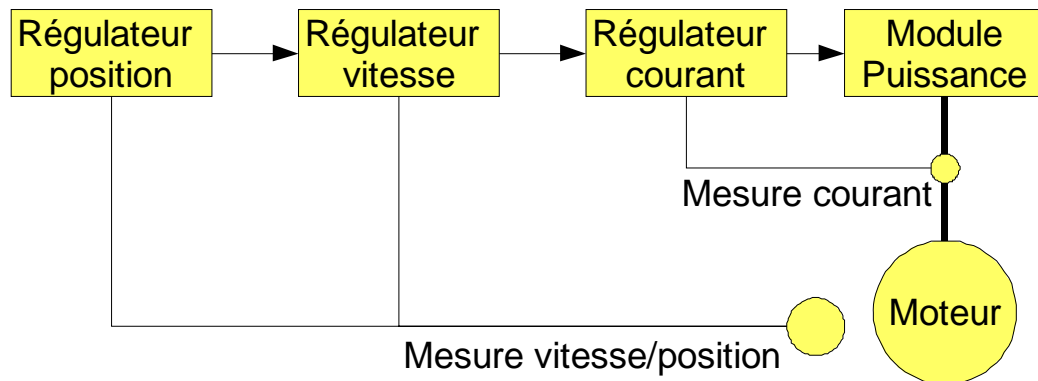


Figure 9 : Structure de la régulation cascadée

Le régulateur de position est un régulateur P. Ce régulateur est suffisant puisqu'un moteur asservi en position a un comportement intégrateur.

Le régulateur de vitesse est un régulateur PI.

Le régulateur de courant est le plus complexe. Le réglage est de type vectoriel (d,q). Il permet également de réguler le flux du rotor afin d'avoir également un bon comportement à basse vitesse.

### 3.5 Inductance réseau

#### 3.5.1 Introduction

Les inductances réseau limitent les répercussions sur le réseau à basse fréquence. Elles sont utilisées pour écrêter les pointes de tension ou maintenir la tension lors des creux de commutations.

#### 3.5.2 Caractéristiques

Propriétés	Valeur
Inductance	5 mH
Tension alimentation	200 à 240 V
Courant maximum	3.4 A
Puissance dissipée	12.5 W
Degrés de protection	IP 20

## 3.6 Moteur synchrone

### 3.6.1 Introduction

Les moteurs utilisés pour commander les axes du robot sont de types synchrones à aimants permanents.

Les options disponibles ainsi que les réducteurs et codeurs associés au système d'entraînement adéquat permettent de s'adapter de manière optimale à toutes les applications (réglage de position, vitesse).

Le principal avantage des moteurs synchrones à aimants permanents pour l'asservissement, par rapport au moteur à courant continu, est l'absence de collecteur (pas de contact mécanique entre le stator et le rotor). Ils ont donc une plus longue durée de vie.



Figure 10 : Moteur synchrone Siemens 1FK7-5AK21

### 3.6.2 Caractéristiques

Paramètre	Symbole	Valeur
<b>Caractéristiques nominales</b>		
Puissance nominale	$P_n$	380 W
Nombre de pôles	$p$	3
Vitesse nominale	$n_n$	6000 t/min
Couple nominal	$M_n$	0.6 Nm
Courant nominal	$I_n$	1.4 A
<b>Caractéristiques de démarrage</b>		
Couple démarrage	$M_0$	0.85 Nm
Courant démarrage	$I_0$	1.8 A
<b>Caractéristiques limites</b>		
Vitesse maximale	$n_{max}$	10000 t/min
Couple maximal	$M_{max}$	3.4 Nm
Courant maximal crête	$I_{max}$	7.5 A
<b>Caractéristiques physiques</b>		
Constante de couple	$k_T$	0.46
Constante de tension	$k_E$	29
Constante de temps électrique	$T_{él}$	1.3
Constante de temps mécanique	$T_{méc}$	1.7
Constante de temps thermique	$T_{th}$	18
<b>Divers</b>		
Poids	$m$	1.8 kg

### 3.7 Codeur résolveur

#### 3.7.1 Introduction

Les moteurs peuvent être équipés de différents codeurs selon la précision requise ou la vitesse de travail. Il est muni d'une bobine primaire tournante (rotor) et deux bobines secondaires décalées de 90° (stator).

#### 3.7.2 Fonctionnement

La tension alternative de la bobine primaire est transmise à une bobine sur le rotor. La bobine du rotor transmet ensuite le signal aux deux bobines décalées de 90°. La fréquence du signal peut aller de 4 à 10kHz. Les 2 signaux recueillis sur la partie secondaire sont :

$$u_1 = U \sin \varphi$$

$$u_2 = U \cos \varphi$$

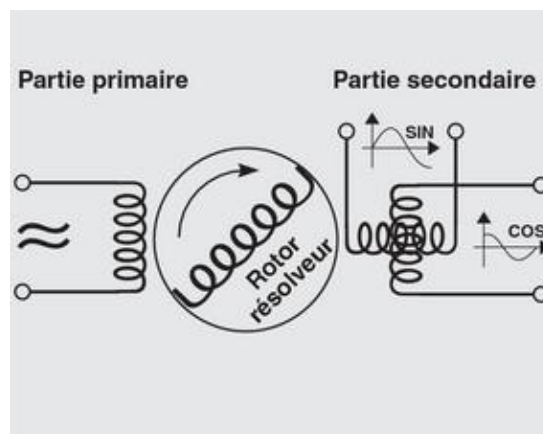


Figure 11 : Structure d'un résolveur

$$\varphi = \arctan \frac{U \sin \varphi}{U \cos \varphi}$$

Les principaux avantages de ces capteurs sont leur robustesse, leur durée de vie, et leur résistance mécanique du fait qu'il n'y a pas de contact glissant. Sa précision est d'environ 4 min d'angle (1/15°).

#### 3.7.3 Caractéristiques

Propriétés	Valeur
Vitesse mécanique limite	15000 tr/min
Tension d'excitation	5 à 13V
Fréquence d'excitation	4 à 10 kHz
Courant absorbé maximal	80 mA
Précision	≤ 4'
Nombre de pôles	6
Rapport de transmission	0.5

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 3.8 Joystick

### 3.8.1 Introduction

Le joystick choisi pour commander notre système est un joystick à effet hall. Des capteurs nous fournissent un signal 0 à 5V (2.5 V point milieu) en fonction de la position. Il s'incline de  $-25^\circ$  à  $25^\circ$ .



Figure 12 : Joystick Megatron 812-2-2-1-1-0-K1

### 3.8.2 Caractéristiques

Propriétés	Valeur
Tension d'alimentation	5 V
Consommation	4.8 à 11mA
Durée de vie	1 million h
Résolution	Infini

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

### 3.9 Moteur DC

#### 3.9.1 Introduction

Le retour de force est réalisé grâce à un moteur DC qui travaille à rotor bloqué. La tension ne doit pas dépasser une certaine valeur afin d'éviter d'endommager le moteur à courant élevé. Le moteur possède un couple maximal constant à respecter. L'avantage est que le couple fourni est proportionnel à la tension.



Figure 13 : Moteur Maxon S2322.982-52.235-200

#### 3.9.2 Caractéristiques

Propriétés	Valeur
Tension d'alimentation	18 V
Vitesse nominale	6690 tr/min
Courant nominal	26 mA
Couple maximal	31.4 mNm
Couple constant maximal	13 mNm
Constante de vitesse	223
Constante de couple	389
Constante mécanique	13 ms
Inertie	5.4 gcm <sup>2</sup>
Réducteur	19
Résistance	117

### 3.10 Amplificateur moteur DC

#### 3.10.1 Introduction

L'amplificateur nous permet de faire varier la tension du moteur, et par conséquent le couple du retour de force tout en servant d'interface de puissance. Il peut également être utilisé comme régulateur de position, vitesse, et courant. Dans notre cas on varie simplement un gain de tension. Le moteur n'a donc pas besoin de codeur. Il sert seulement d'interface de puissance.



Figure 14 : Amplificateur Maxon 4-Q-DC 145391

#### 3.10.2 Caractéristiques

Propriétés	Valeur
Tension d'alimentation	12-50 VDC
Tension sortie max	0.9 VCC
Courant max	10 A
Fréquence commutation	50 kHz
Rendement	95%
Consigne	-10 à 10V
Enable	4 à 50 VDC

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 4 Transmissions des données

### 4.1 Profibus

Profibus (Process Field Bus) est le nom d'un type de bus de terrain inventé par Siemens et devenu peu à peu une norme de communication dans le monde de l'industrie. Le principal avantage des réseaux de terrain est que l'alimentation et la communication sont groupées sur un même câble. Un protocole de communication permet d'échanger des données entre chaque intervenant.

La Transmission des données atteint jusqu'à 12MBit/s. On l'utilise pour des distances pas trop élevées (niveau 1). Pour les plus grandes distances, typiquement une chaîne de production, on utilise du Modbus + ou du Profibus FMS ou alors Ethernet.

La majorité des automates Siemens dispose d'une interface Profibus-DP pour le dialogue avec le PC de programmation, supportant aussi le protocole MPI. Certains modèles proposent même une deuxième interface Profibus-DP.

Dans notre système, il est employé pour la communication entre les cartes d'axes et l'automate.

### 4.2 MPI

MPI (Message Passing Interface) permet d'exploiter des ordinateurs distants ou API par passage de messages. Il est grandement disponible sur de très nombreux matériels et systèmes d'exploitation. On peut le connecter au PC grâce à une interface série ou USB. Sa vitesse de transmission est de 1.5 Mbits.


Dans notre système, il est employé pour la communication entre l'automate et l'ordinateur de programmation.

### 4.3 TCP/IP

IP (Internet Protocole) permet à des stations raccordées à un réseau d'échanger des informations. Les stations peuvent être des PC, des téléphones mobiles, des automates...

Chaque station possède une adresse unique sur le réseau. Chaque utilisateur envoie sur le réseau des ensembles de bits appelés paquets.

TCP (Transport control protocole) est un protocole permettant de transférer les données en flux. Cela permet de gérer la vitesse de transmission et la gestion des erreurs.

	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 5 Environnement Software

### 5.1 Programmes utilisés

#### 5.1.1 *Introduction*

Les programmes utilisés dans mon environnement software sont divisés en trois groupes :

- Conception mécanique
- Configuration et programmation de l'automate
- Commande et visualisation avec ordinateur

#### 5.1.2 *Conception mécanique*

- Inventor professional 10

#### 5.1.3 *Configuration et Programmation*

- Simatic Manager
- Hw Config
- S7T Config
- Step 7 V5.4

#### 5.1.4 *Commande et visualisation*

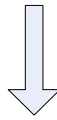
- Intouch 9.0
- SMC



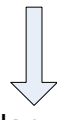
## 5.2 Inventor

Inventor est un logiciel de conception mécanique. Il permet de dessiner, puis d'assembler de manière tridimensionnelle les pièces et de créer les plans bidimensionnels de chaque pièce afin les réaliser.

### Conception de la pièce



### Assemblage de la pièce



### Mise en plan de la pièce

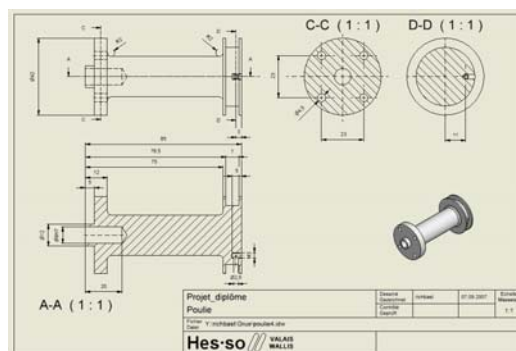


Figure 15 : Conception d'une pièce

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

### 5.3 Simatic Manager

Le gestionnaire de projets SIMATIC Manager, sert d'interface graphique à toutes les applications de configuration et programmation d'automate. C'est lui qui organise la mise en commun dans un projet de toutes les données et de tous les paramètres requis pour réaliser une tâche d'automatisation. Les données y sont structurées thématiquement et représentées sous forme d'objets.

### 5.4 Hw config

Hw config permet d'effectuer une configuration hardware de notre système. La configuration consiste à disposer des profilés support, des modules, des appareils décentralisés. Les profilés support ou châssis sont représentés par une table de configuration, dans laquelle on peut enficher un nombre défini de modules.

On peut y régler les paramètres des modules, la définition des paramètres de bus, des maîtres et d'esclaves pour un réseau maître (PROFIBUS) ou d'autres définitions pour l'échange de données entre des composants.

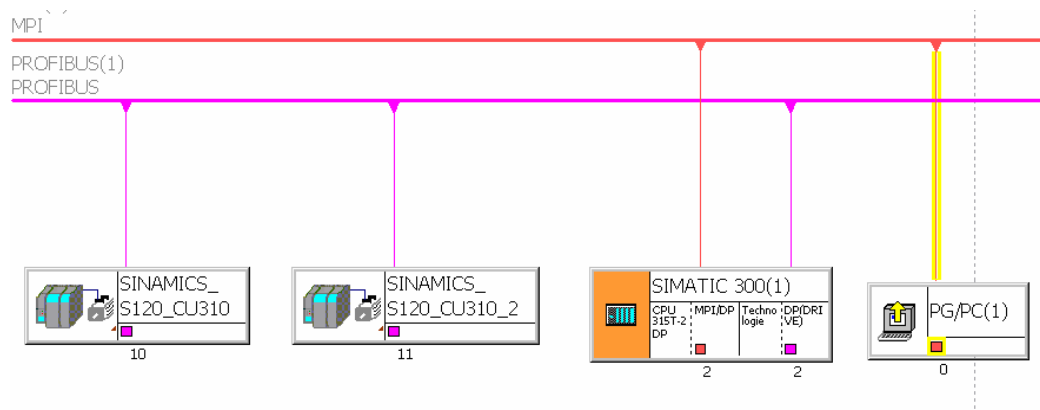



Figure 16 : Configuration hardware de notre système

### 5.5 S7T config

S7T config permet de paramétrer et de charger la configuration des axes dans les systèmes correspondants. Le paramétrage de la régulation de l'axe en position se trouve dans la CPU technologique de l'automate tandis que la régulation de vitesse et courant dans la carte d'axe.

Ce programme permet également de simuler et mesurer la vitesse, la position des axes, les courants, le couple, etc.

	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 5.6 STEP 7

### 5.6.1 Introduction

STEP 7 est le logiciel de base pour la programmation dans SIMATIC Manager. La structure de programmation se fait à l'aide de blocs.

Un bloc est une partie indépendante du programme qui a une fonction spéciale. On distingue les blocs de codes (OB, FB, SFB, FC et SFC) contenant des instructions de traitement de signaux et les blocs de données (DB et DI) qui servent à sauvegarder des données.

### 5.6.2 Blocs de code

Les blocs de code sont utilisés comme modules de logiciel pour les programmes et les sous-programmes. Lorsqu'un bloc est appelé depuis un autre bloc, ils peuvent échanger des paramètres par l'intermédiaire de leur table de déclaration de variables.

Les blocs d'organisation OB sont les blocs de base des programmes. Ils sont lancés par le système d'exploitation, soit périodiquement, soit en cas d'alarmes ou d'erreurs.

Les blocs FB et FC sont des blocs insérés dans un OB qui permettent de structurer le programme en une multitude de tâches. Ils nous permettent de clarifier le programme. Les FB contrairement au FC, possède une mémoire. Un bloc de données locales lui est affecté. Les données du FC sont par contre accessibles par tous les autres blocs.


### 5.6.3 Blocs technologiques

Les blocs de données technologiques sont des blocs de DB globaux qui permettent de stocker des informations pour la commande du système (position, vitesse, accélération). A chaque actualisation de ce bloc le bloc OB 65 est activé.

L'OB 65 appelé 'alarme de synchronisme de technologie' offre la possibilité de démarrer un programme de manière synchrone, avec l'actualisation des blocs de données technologiques.

### 5.6.4 Mémento

Le mémento est une zone mémoire mise à disposition pour les résultats intermédiaires calculés dans le programme. Il est possible de préciser le format souhaité.

	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

### **5.6.5 Langage**

Il existe différents langages de programmation définis par la CEI 61131-3 :


- IL (Instruction List) : le langage List est très proche du langage assembleur.
- ST (Structured Text) : Ce langage structuré ressemble au langage C.
- LD (Ladder Diagram) : le langage Ladder ressemble aux schémas électriques
- FBD (Function Block Diagram) : le FBD se présente sous forme diagramme de blocs
- SFC : Ce langage est très proche du grafcet

### **5.6.6 Table des variables**

La table des variables nous permet de visualiser et forcer des variables de notre programme. Cet outil est très utile pour tester notre programme.

### **5.6.7 Table des mnémoniques**

La table des mnémoniques permet de clarifier le programme, elle permet de donner un nom littéral à une adresse (moteur\_marche,...).

	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 5.7 Intouch

### 5.7.1 Introduction

Intouch est un logiciel employé pour la commande et la visualisation. Ce programme sert d'interface homme-machine puisque la réalisation et la régulation seront créées à l'intérieur de l'automate. Il suffit de lui envoyer à l'aide d'un logiciel de communication les valeurs à afficher et à commander. Il permet de réaliser de manière simple une interface homme-machine.

### 5.7.2 Fonctionnement

Ce logiciel fonctionne en deux modes.

- Mode de réalisation
- Mode de fonctionnement

Le mode de réalisation permet de créer différentes fenêtres, boutons, afficheur afin de concevoir au mieux l'interface homme-machine.

Le mode de fonctionnement est le mode de travail du programme. Les boutons, les afficheurs, les animations sont activées.

## 5.8 SMC

Ce programme sert d'interface entre le module de communication de l'automate et le programme Intouch. On doit y configurer :

- le type de réseau (TCP/IP, Profibus...)
- L'adresse du module de communication
- Les temps de chargements (Exemple : chaque x ms une valeur est actualisée).

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 6 Conception mécanique

### 6.1 Robot

#### 6.1.1 Introduction

La grue est un système de démonstration très conviviale. De plus le deuxième axe est facilement convertible en plusieurs applications (porter des pièces avec un électro-aimant, verser un liquide...)



Figure 17 : Robot assemblé

#### 6.1.2 Design

Les deux moteurs mis à disposition étant très lourds, le deuxième axe se devait d'être plus ou moins centrés sur le premier axe afin d'éviter d'avoir un effort trop important.

Le châssis a été réalisé à l'aide de plaques en aluminium. Elles sont légères et solides.

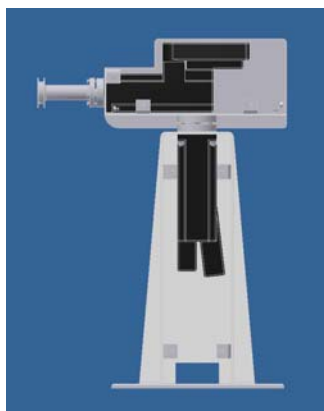


Figure 18 : Positionnement des moteurs

### 6.1.3 Accouplement

Les axes ont été accouplés sur le moteur à l'aide d'accouplement KTR. Ils se fixent sur l'axe lors du serrage des vis. Les accouplements KTR sont deux petits cônes qui se fixent sur l'axe lorsqu'on les serre l'un contre l'autre.



Figure 19 : Accouplement KTR

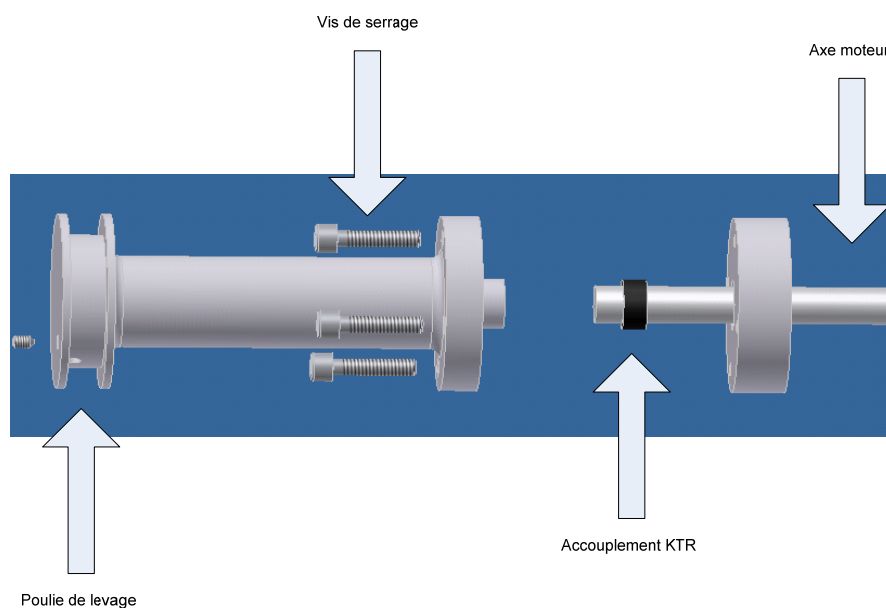


Figure 20 : Eclaté du montage des accouplements

#### 6.1.4 Dimensionnement de la charge

L'application choisie comme démonstration est de déverser de la poudre d'inox depuis un récipient, afin de sentir la variation de force.

Notre moteur a un couple nominal de 0.63 Nm et un couple à vide de 0.02 Nm. Pour pouvoir ressentir la variation de couple dynamiquement il faut s'éloigner du couple à vide.

Le récipient est entraîné par deux câbles enroulés à deux poulies de diamètres différents qui permettent également de varier le couple.

Je décide d'avoir un pot de remplissage d'environ 600g et de pouvoir y mettre environ 400g de poudre.

Le couple sera minimal lorsque le récipient est vide et que toute la force sera sur F1.

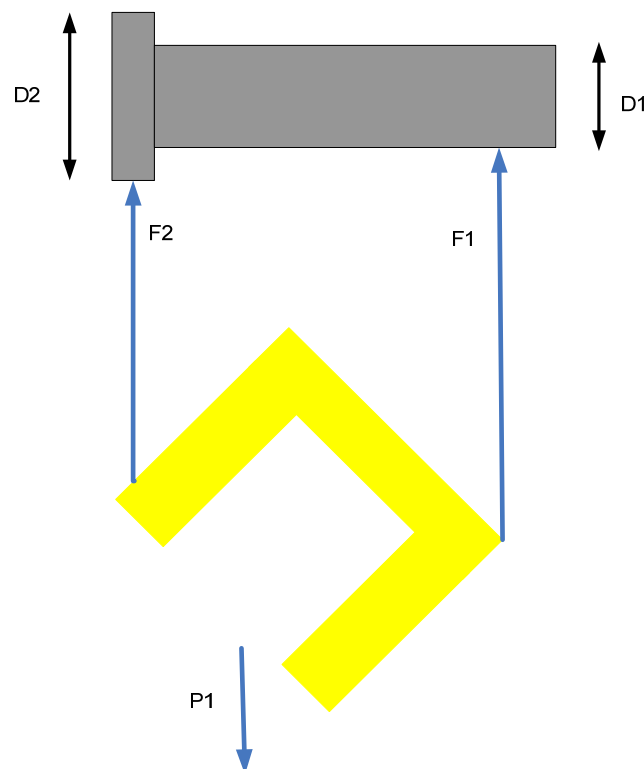


Figure 21 : Répartition des forces

$$D1 = 22mm$$

$$D2 = 32mm$$

$$P1 = g \cdot 0.6 = 5.88N$$

$$F1 = P1$$

$$M_{\min imal} = F1 \cdot R1 = 5.88 \cdot 0.011 = 0.064$$



<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

La géométrie du récipient est un cylindre dont on peut calculer les parois pour obtenir le poids désiré. La matière choisie est le laiton car il est relativement lourd et esthétique. Les dimensions extérieures ont été déterminées par expérimentation avec un récipient existant afin que le système se renverse sur la hauteur du trajet de descente.

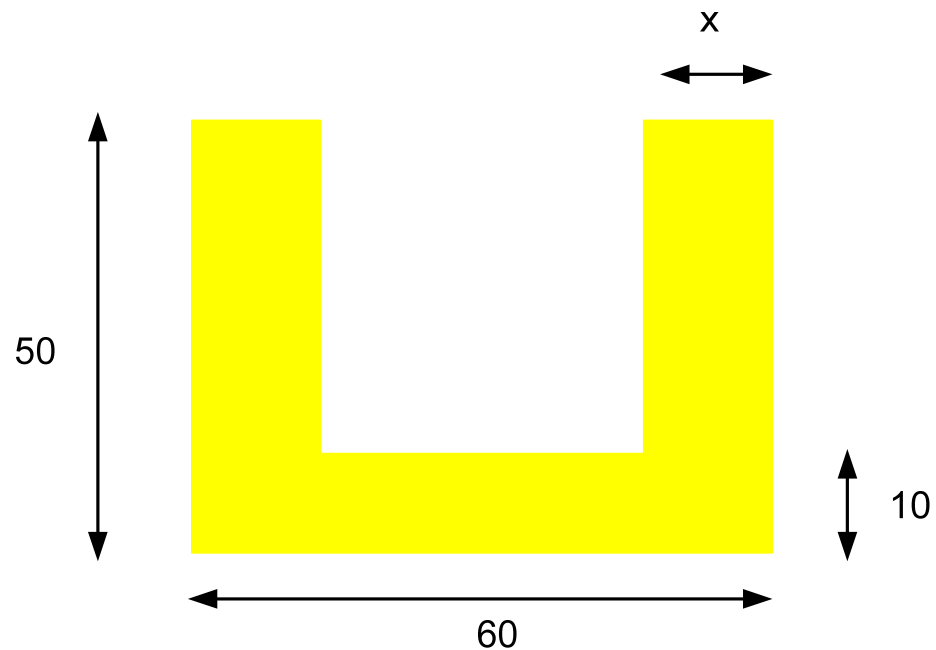


Figure 22 : Structure récipient

On peut calculer en premier lieu le volume souhaité du récipient :

$$\rho = 8400 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$V = 0.6 / 8400 = 71.42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Ensuite on calcule l'épaisseur des parois :

$$V = 0.04 \cdot \pi \cdot (0.03^2 - (0.03 - x)^2) + 0.03^2 \cdot \pi \cdot x = 71.42 \cdot 10^{-6}$$

On résout cette équation à deux inconnues et on trouve une épaisseur de parois de 6 mm.

On peut également contrôler la contenance du récipient :

$$m_{\text{poudre}} = V \cdot m_v = 0.024^2 \cdot \pi \cdot 0.04 \cdot 7800 = 564 \text{ g}$$

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 6.2 Joystick

### 6.2.1 Introduction

La commande devra se faire à l'aide d'un joystick à retour de force. Sur l'axe x la force ne varie que très peu donc le retour de force sera réalisé pour un seul axe.

### 6.2.2 Méthodes

Il existe une quantité de méthodes afin de réaliser un retour de force avec des avantages et inconvénients :

- Electromagnétique : Elle ne génère aucun mouvement et est complexe.
- Pneumatique : Elle possède une faible bande passante.
- Hydraulique : Elle est dangereuse dangereux et chère.
- Piézo-électrique : Cette méthode consiste en la déformation de cristaux lors de l'application d'une tension.
- Frottement : C'est une technique qui s'oppose au mouvement par des freins
- Moteurs courant continu : Elle est simple et facile à commander.
- Moteurs piézo-électriques : Elle peut fournir un couple important mais la commande est complexe.
- Fluide : C'est une technique basée sur la variation de la viscosité des fluides selon le champ électrique.

La méthode choisie a été le retour de force par moteurs à courant continu. Elle est simple et facile à commander. Il s'agit donc d'accoupler l'axe du joystick avec l'axe du moteur.

### 6.2.3 Accouplement

La poulie est reliée à une glissière par des câbles.

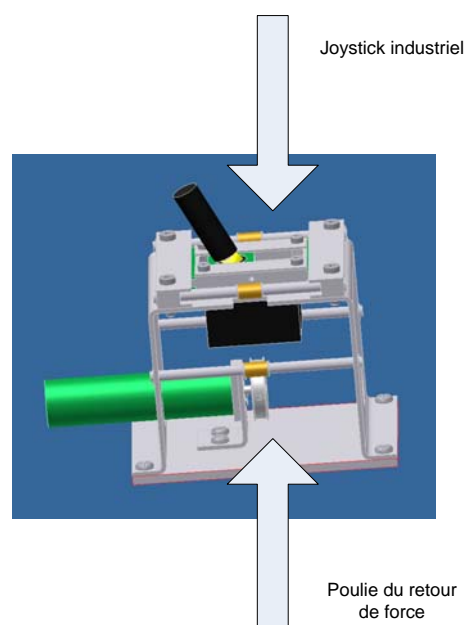


Figure 23 : Conception Inventor joystick

<b>Hes·so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

Cette glissière contient un coulisseau afin que le deuxième axe bouge sans aucune force. L'axe est ensuite tenu par une rotule de chez Igus qui permet de transmettre la force quelque soit son inclinaison.

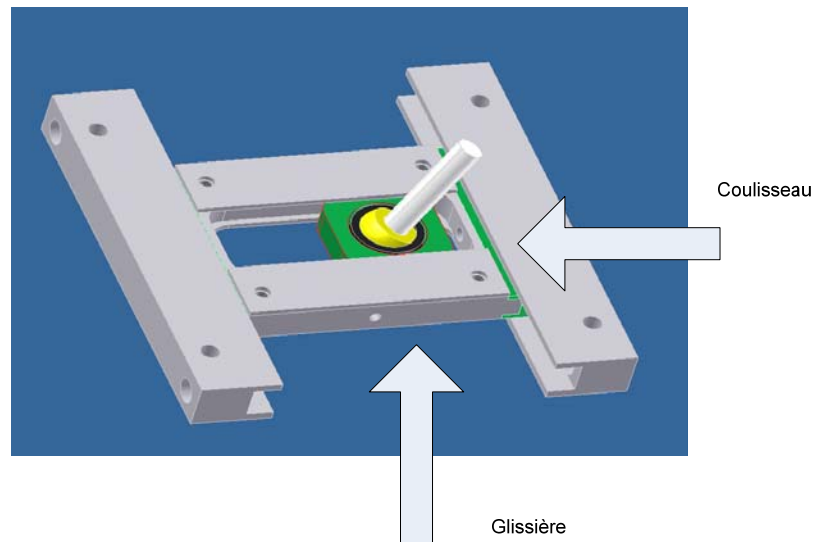


Figure 24 : Fonctionnement transmission de force à l'axe

#### 6.2.4 Dimensionnement

Le retour de force devait être réalisé à l'aide d'un moteur à courant continu existant. Il s'agit de connaître la tension d'alimentation du moteur à rotor bloqué afin d'avoir le couple constant maximal. Ensuite il s'agit de dimensionner la poulie du moteur pour déterminer le retour de force sur le joystick. Le moteur possède les caractéristiques suivantes :

$$U_{a\lim} = 18V$$

$$M_{const} = 13mNm$$

$$R = 14.1\Omega$$

$$k_n = 389 \frac{rpm}{V}$$

$$k_M = 24.6 \frac{mNm}{A}$$

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

Les équations caractéristiques du couple et de la vitesse sont :

$$n = k_n \cdot U_i$$

$$M = k_M \cdot I$$

On constate qu'à rotor bloqué le couple est proportionnel à la tension.

$$U = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + k\omega$$

$$\omega = 0$$

$$L \frac{di}{dt} \approx 0$$

$$U \propto i \propto M$$

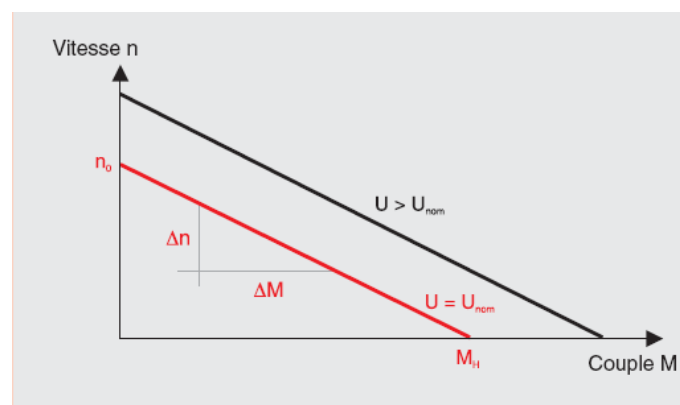


Figure 25 : Courbe caractéristique d'un moteur DC

$$U = \frac{30000}{\pi} \cdot \frac{R}{k_M^2 \cdot k_n} \cdot M$$

On trouve cette relation en partant des puissances :

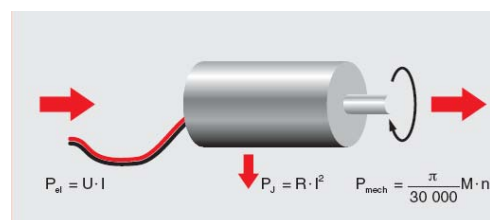



Figure 26 : Répartition des puissances

$$P_{el} = P_{mech} + P_J$$

 Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

$$U \cdot I = \frac{M \cdot n}{k_n \cdot k_M} + R \cdot I^2$$

On remplace le courant I par le couple M :

$$U \cdot \frac{M}{k_M} = \frac{M \cdot n}{k_n \cdot k_M} + R \cdot \left( \frac{M}{k_M} \right)^2$$

Les constantes de vitesses et couples dépendent l'une de l'autre :

$$k_n \cdot k_M = \frac{30000}{\pi}$$

On trouve finalement la vitesse :

$$n = k_n \cdot U - \frac{30000}{\pi} \cdot \frac{R}{k_M^2} \cdot M$$

On peut donc calculer la tension maximale en fonction du couple maximal lorsque la vitesse est nulle :

$$U = \frac{30000}{\pi} \cdot \frac{R}{k_M^2 \cdot k_n} \cdot M$$

$$\frac{30000}{\pi} \cdot \frac{14.1}{24.6^2 \cdot 389} \cdot 13 = 7.43V$$

On règle l'amplificateur pour une tension maximale de 7.43V correspondant à 10 V de consigne.

Il s'agit ensuite de dimensionner la poulie du moteur du retour de force pour déterminer le retour de force sur le joystick. En consultant des types de joysticks existants (Immersion, DLR), j'ai pu constater que les forces maximales variaient de 8 à 10 N. Notre joystick étant plus petit, je désire avoir une force de 5N sur le manche.



Figure 27 : Joystick à retour de force existant

On peut ensuite calculer la force sur l'axe du joystick, donc du moteur, vu qu'ils sont reliés par des câbles. Par une somme des moments on trouve une force de 15N sur le moteur.

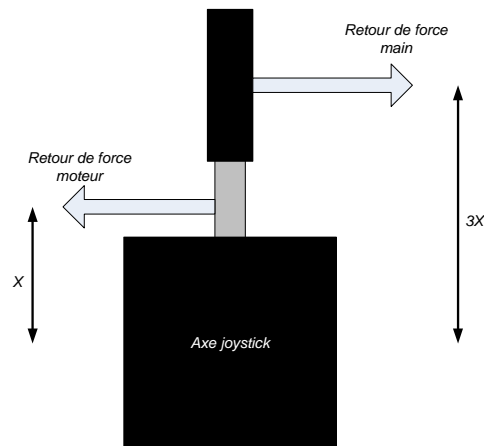


Figure 28 : Répartition des forces du manche du joystick

On peut enfin calculer le diamètre de la poulie en tenant compte du réducteur ( $i=19$ ) :

$$M_{red} = 19 \cdot M_{max} = 19 \cdot 13 = 247 mNm$$

$$R_{poulie} = \frac{M}{F} = \frac{0.247}{15} = 16.5 mm$$

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 7 Câblage

### 7.1 Introduction

Les composants électriques seront disposés dans un coffret électrique. Avant d'effectuer le câblage d'une installation ou d'un coffret il est important de réaliser les schémas et tableaux suivants :

- Schéma d'encombrement
- Schéma de puissance
- Schéma de commande
- Code couleur et section

### 7.2 Schéma d'encombrement

#### 7.2.1 Introduction

Le schéma d'encombrement nous permet de dimensionner au mieux le coffret à utiliser. Les points suivants sont à considérer :

- Les bornes de connections doivent être situées près de l'ouverture du coffret.
- Il faut garder une certaine réserve au cas où on ajouterait des composants.
- Il faut disposer des canaux afin de pouvoir passer les fils et câbles de manière propre.

#### 7.2.2 Schéma

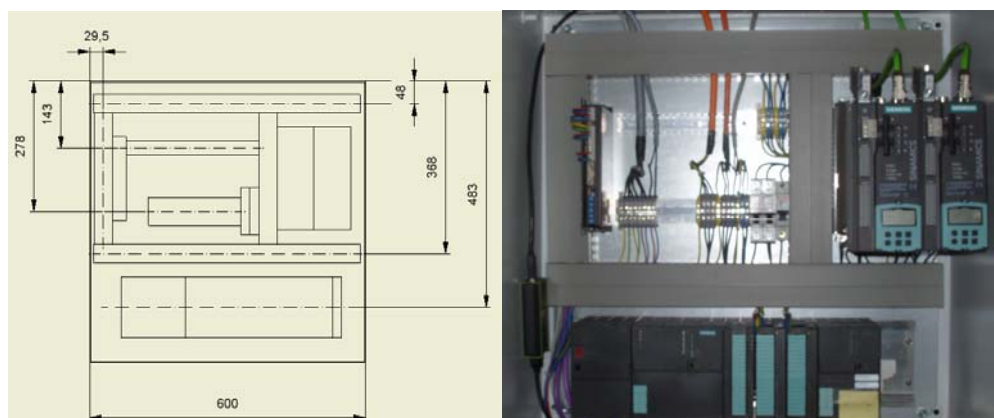


Figure 29 : Schéma d'emcombrement

## 7.3 Schéma de puissance

### 7.3.1 Introduction

Le schéma de puissance regroupe comme son nom l'indique la partie puissance de l'installation c'est-à-dire l'alimentation des actionneurs (moteurs, vérin,...)

### 7.3.2 Schéma

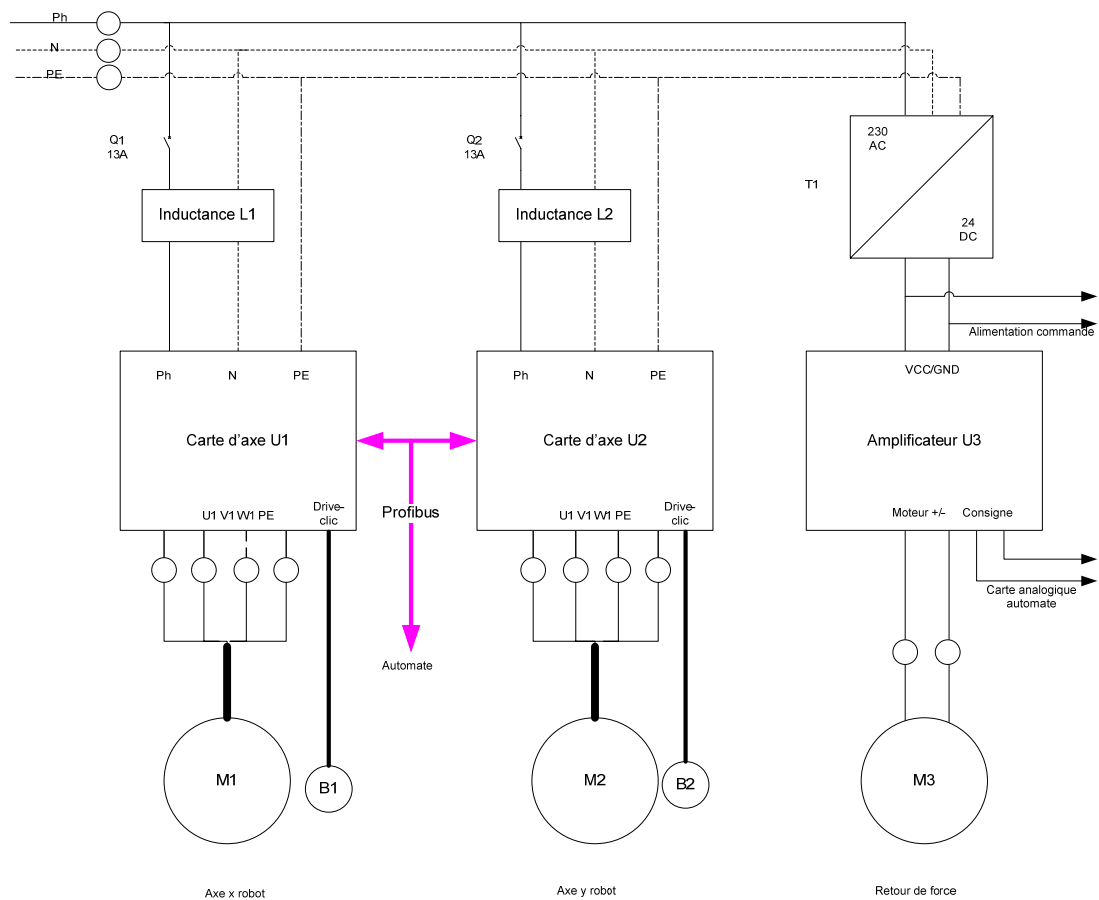


Figure 30 : Schéma de puissance



<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 7.4 Schéma de commande

### 7.4.1 Introduction

Ce schéma commande le schéma de puissance par l'intermédiaire d'un contacteur ou d'un amplificateur. La commande se fait à des courants et tensions bien plus faibles que la puissance.

### 7.4.2 Schéma

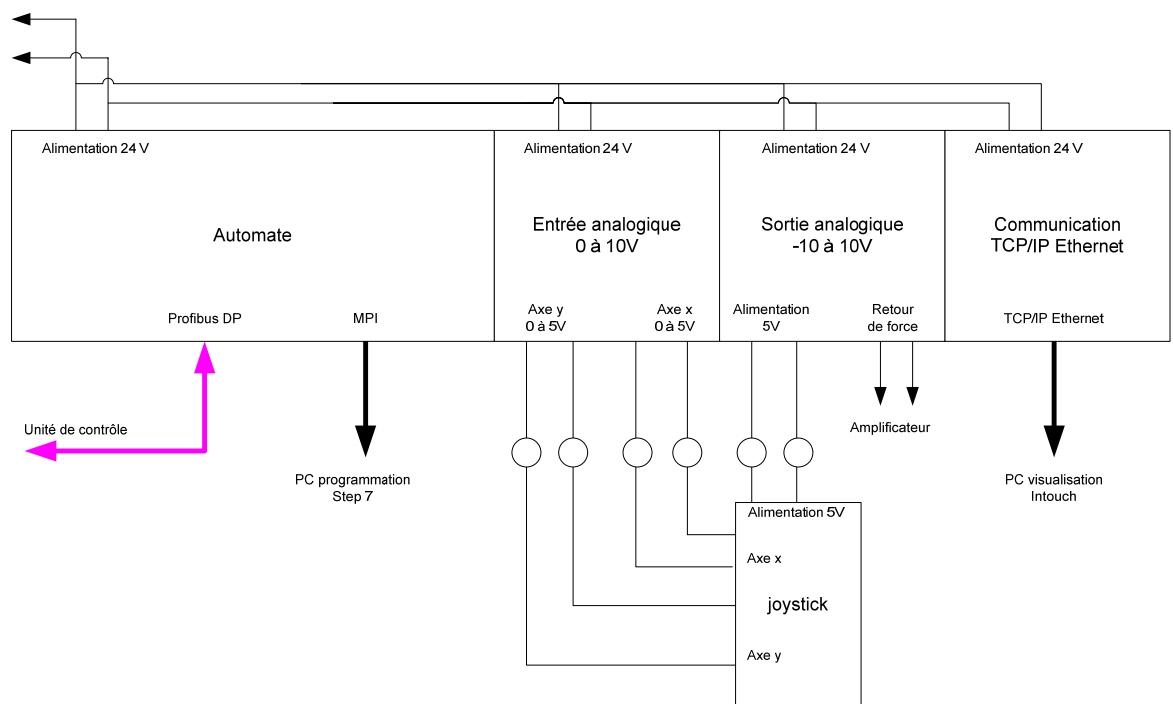


Figure 31 : Schéma de commande

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération


## 7.5 Code couleur

### 7.5.1 Introduction

Chaque installation ou réseaux électriques ont des codes couleurs bien définis. Ces codes rendent le dépannage bien plus facile. Les sections sont définies par des normes NIBT en fonction des disjoncteurs ou fusible de protection (13A 1.5mm<sup>2</sup>, 16A 2.5 mm<sup>2</sup>...).

### 7.5.2 Tableau

Genre	Raccordements	Couleur
Alimentation 230 VAC	Fil toron 1.5 mm <sup>2</sup>	L1 : noir N : bleu PE : jaune-vert
Alimentation moteur	Câble 4x1.5 mm <sup>2</sup>	Orange
Joystick	Câble 8x1 mm <sup>2</sup>	Noir numéroté 1-8
Alimentation 5VDC	Fil toron 1 mm <sup>2</sup>	5V : rouge 0V : bleu
Alimentation 24 VDC	Fil toron 1 mm <sup>2</sup>	24V : rouge 0V : bleu
Codeur résolveur	Câble drive-clic	vert
Signaux analogiques	Fil toron 1 mm <sup>2</sup>	+ : jaune - : vert
Profibus	Câble 2x1 mm <sup>2</sup>	violet
Ethernet	Câble RJ-45	gris

	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 8 Programmation

### 8.1 Structure du code

Le code est contenu dans un bloc d'organisation OB65 qui est activé de manière synchrone après l'actualisation des DB technologiques (position, vitesse). Le code est ensuite divisé en trois sections contenues dans des blocs FB:

- Régulation de position axe x
- Régulation de position/vitesse y
- Retour de force

Chaque étape ou partie du code est contenue dans un réseau. Elles sont décrites dans le code en annexe.

### 8.2 Régulation de position axe x

#### 8.2.1 *Fonctionnement*

L'axe x se régule en position en fonction de la position du joystick. Il varie de -25 à 25° et l'axe x de 0 à 180°. Le joystick fournit un signal en tension de 0 à 5V qui est raccordé à une carte analogique d'entrée. Ce signal est traité dans l'automate comme une valeur entière de 0 à 27648. Cette valeur d'entrée est convertie en consigne de position de 0 à 180° et est transmise à un bloc de positionnement absolu.

#### 8.2.2 *Code*

Le code contient les étapes suivantes :

- Quittance de l'axe (reset)
- Activation de l'axe
- Remise à zéro de l'axe
- Régulation positionnement

### 8.3 Régulation de position/vitesse axe y

#### 8.3.1 *Fonctionnement*

L'axe y se régule en position ou en vitesse en fonction de la position du joystick. Il varie de -25 à 25° et l'axe y de 0 à 1100°. Le joystick fournit un signal en tension de 0 à 5V qui est raccordé à une carte analogique d'entrée. Ce signal est traité dans l'automate comme une valeur entière de 0 à 27648. Pour la régulation de position cette valeur d'entrée est convertie en consigne de position de 0 à 1100° et est transmise à un bloc de positionnement absolu.

<b>Hes-so</b> <small>Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz</small>	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

Pour la régulation de vitesse cette valeur est convertit en consigne de - 150°/s à 150°/s. La vitesse augmente progressivement de 0°/s à 150°/s et possède un point mort à 0.

### **8.3.2 Code**

Le code contient les étapes suivantes :

- Quittance de l'axe (reset)
- Activation de l'axe
- Remise à zéro de l'axe
- Régulation de vitesse
- Régulation positionnement

## **8.4 Retour de force**

### **8.4.1 Fonctionnement**

On fournit un retour de force sur l'axe du joystick en fonction du couple mesuré. Un bloc nous permet de mesurer le couple et de le retourner dans le programme. Ce couple est ensuite convertit en signal +/- 10 V comme consigne à l'amplificateur qui commande le moteur. On peut également régler la plage du retour de force.

### **8.4.2 Code**

Le code contient les étapes suivantes :

- Mesure du couple
- Consigne de retour de force +/- 10V

### **8.4.3 Dimensionnement retour de force**

Afin de pouvoir programmer la gamme de couple dans lequel le retour de force va fonctionner, il est important de faire un calcul statique qui pourra être comparé au résultat réel mesuré. Le système est relativement complexe dynamiquement, c'est pourquoi, j'ai fait tout au long de mes calculs des simplifications.

Le couple varie pour deux raisons :

- Différence des diamètres des deux poulies
- Déversement de la poudre

L'orientation de la charge varie de 0° à 135°. Au départ toute la force est sur la première poulie et au final elle sera sur la deuxième. Afin de faciliter les calculs, on ne tient pas compte de l'épaisseur des parois. On divise notre récipient en trois forces situées chaque fois au centre de gravité des parois.

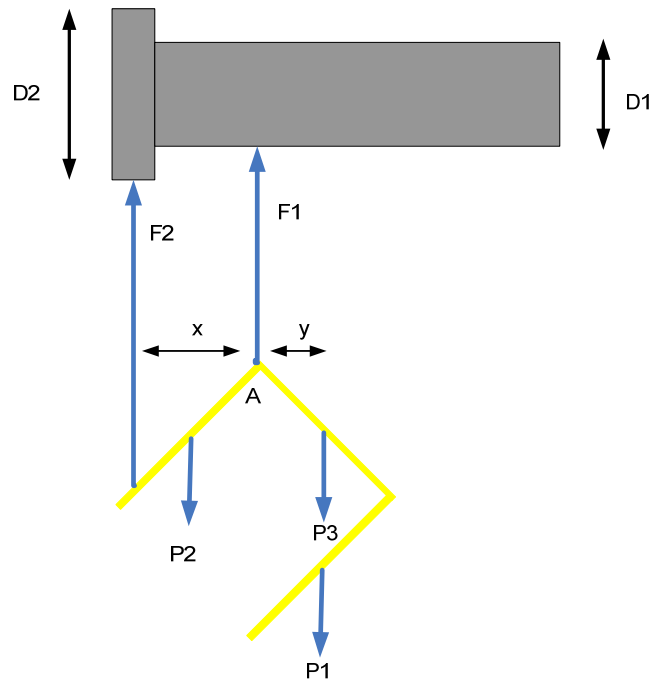


Figure 32 : Répartition des forces lors de l'inclinaison de la charge

$$M_{initial} = F2 \cdot R2 = (P1 + P2 + P3) \cdot R2 = 5.88 \cdot 0.016 = 0.094 Nm$$

Lorsque la charge est à  $45^\circ$  par rapport au sol, les forces P1 et P2 s'annulent dans notre somme des moments au point A. Seul la force P3 qui correspond au fond du récipient joue un rôle :

$$P3 = V \cdot g = 0.03^2 \cdot \pi \cdot 0.01 \cdot 8400 \cdot 9.81 = 2.35 N$$

Par trigonométrie on trouve les distances des forces par rapport à F1 :

$$x = 50 \cdot \cos(45^\circ) = 35 mm$$

$$y = 60 \cdot \cos(45^\circ) / 2 = 21 mm$$

$$\sum M = F2 \cdot x + P3 \cdot y = F2 \cdot 35 + 2.35 \cdot 21 = 0$$

$$F2 = -1.41 N$$

On constate que la force est négative et cela est impossible sur un câble qui doit être en traction. Donc la charge aura tendance à remonter et toute la force sera sur F1.

$$M_{final} = F1 \cdot R1 = 5.88 \cdot 0.011 = 0.064 Nm$$

On calcule ensuite la variation de couple lors du déversement de la poudre uniquement. C'est-à-dire qu'on ne tient pas compte de la variation due au récipient calculé précédemment. On suppose qu'elle commence à se déverser à 45° jusqu'à 135°. On suppose également que le déversement est constant et que le centre de gravité de la poudre ne change pas et qu'au départ toute la force est sur F2.

Dans un premier temps, le récipient est à moitié plein.

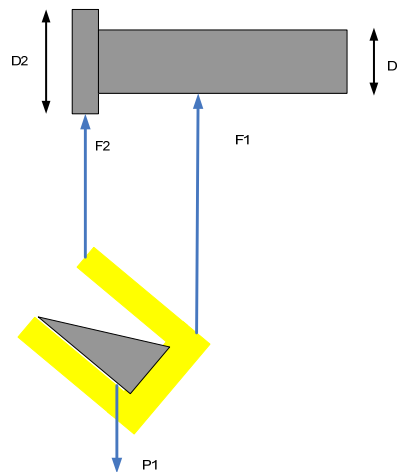


Figure 33 : Répartition des forces lors du déversement de la poudre

$$P1 = 0.024^2 \cdot \pi \cdot 0.02 \cdot 7800 \cdot 9.81 = 2.76N = F2$$

$$M = F2 \cdot R2 = 2.76 \cdot 0.016 = 0.044Nm$$

On suppose que lorsque le récipient est à 90° la moitié de la poudre a été déversée et que les deux force F1 et F2 sont égales.

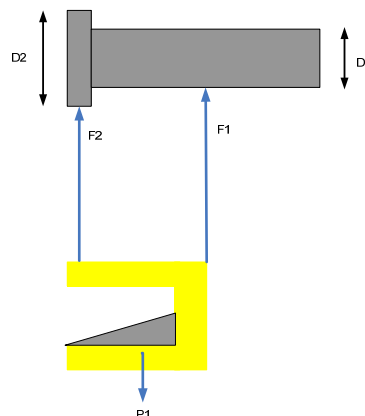


Figure 34 : Répartition des forces lors du déversement de la poudre

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

$$P1 = 2.76 / 2 = 1.38N$$

$$F1 = F2 = 0.69N$$

$$M = 0.69 \cdot (0.011 + 0.016) = 0.018Nm$$

On peut ensuite superposer les deux variations de couples et déterminer une caractéristique approximative lorsque l'on déverse la poudre.

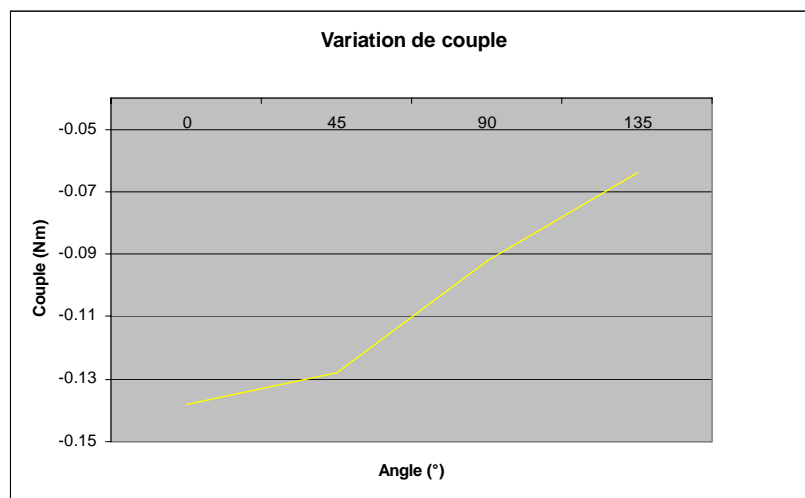


Figure 35 : Courbe théorique de la variation du couple

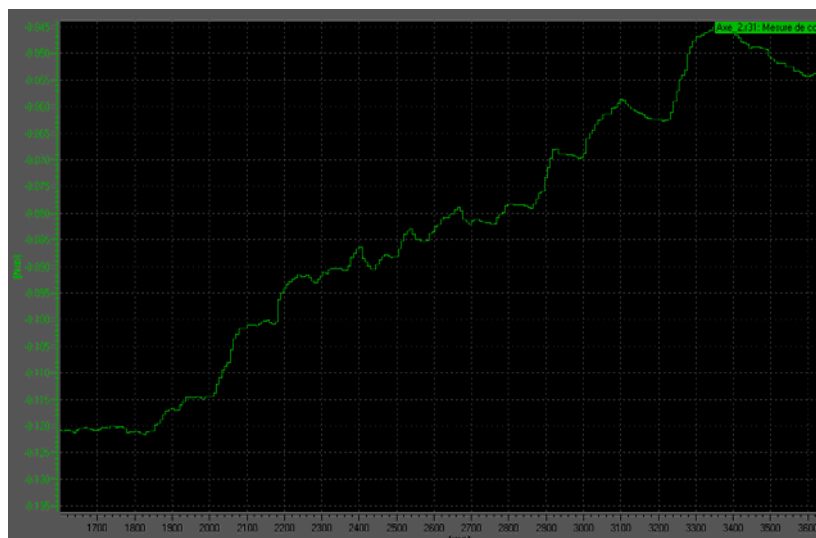


Figure 36 : courbe réelle de la variation de couple

Les 2 courbes sont approchés il y a une légère différence due au poids du récipient (560g), au couple de frottement et aux simplifications dans les calculs.

Le mouvement de l'opérateur n'étant pas linéaire le couple oscille quelque peu.

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 9 Dimensionnement régulateur

### 9.1 Introduction

Nos régulateurs sont cascades. Lorsqu'on doit dimensionner des régulateurs de ce type, on règle tout d'abord le régulateur interne puis les régulateurs externes. Il faudrait donc commencer par le régulateur de courant, puis de vitesse, et enfin de position. Depuis notre automate nous pouvons donner une consigne de position, tandis que depuis le programme de configuration S7T config, nous pouvons donner une consigne de vitesse.

Par contre il n'est pas possible de donner une consigne de courant. Donc nous ne pouvons pas le dimensionner idéalement. En laissant les paramètres initiaux des régulateurs, nos axes sont oscillants et également bruyants.

J'ai tout d'abord baissé le gain du régulateur de courant pour diminuer le bruit, tout en vérifiant son bon fonctionnement. On ne peut pas donner de consigne de courant mais on peut le visualiser. J'ai visualisé le courant générateur de couple en faisant osciller le système en mettant une constante d'intégration très petite dans le régulateur de vitesse.

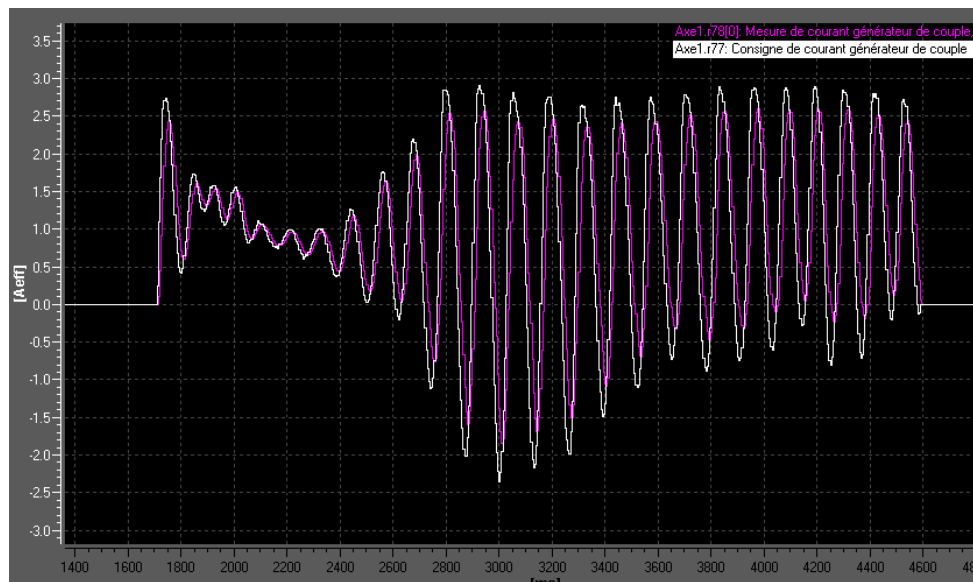


Figure 37 : Consigne et mesure du courant générateur de couple

Ensuite j'ai dimensionné les régulateurs de vitesse selon la méthode Ziegler-Nichols. Pour dimensionner les régulateurs de position, il faut tenir compte de l'application. Pour certaines applications, le système doit être plus nerveux que pour d'autres.



## 9.2 Dimensionnement par Ziegler-Nichols

### 9.2.1 Introduction

La méthode choisie pour le dimensionnement des régulateurs est 'Ziegler-Nichols à gain critique'. C'est une méthode empirique très souvent utilisée en pratique pour dimensionner un régulateur. Elle fournit un bon résultat pour un dimensionnement rapide.

Il existe également d'autres méthodes par réponse indicielle sur le système. Dans notre cas le moteur est directement relié au régulateur et il est difficile de les séparer pour faire une réponse indicielle.

### 9.2.2 Marche à suivre

Les points à suivre pour dimensionner un régulateur par Ziegler-Nichols à gain critique sont les suivants :

- Travailler avec un régulateur P
- Augmenter P jusqu'à ce que le système soit en régime d'oscillation entretenue
- Relever le gain critique  $K_c$
- Relever la période d'oscillation  $T_c$

Lorsque l'on a relevé la période d'oscillation et le gain critique on peut dimensionner notre régulateur suivant son type grâce à un tableau.

Type de régulateur	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5 K_c$		
PI	$0.45 K_c$	$0.85 T_c$	
PID	$0.6 K_c$	$0.5 T_c$	$0.125 T_c$

## 9.3 Axe x

### 9.3.1 Régulateur de vitesse

Les gains du régulateur de vitesse ont été fixés à 0.35 (Kp) et 50 ms (Ti). Ils ont été dimensionnés par Ziegler-Nichols et ensuite adaptés légèrement. Dans un premier temps on a fait osciller le système à un gain critique Kc de 0.7. La période d'oscillation est de 50 ms.

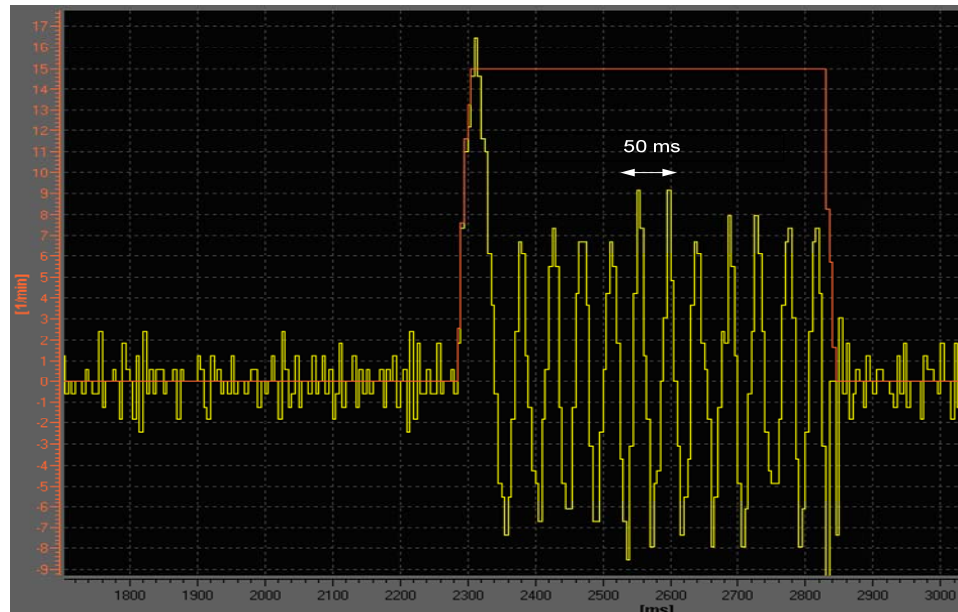


Figure 38 : Oscillation de la vitesse permettant de dimensionner le régulateur

Les gains calculés par Ziegler-Nichols sont donc de 0.25 (Kp) et de 40ms (Ti). La réponse indicielle avec les gains choisis est la suivante :

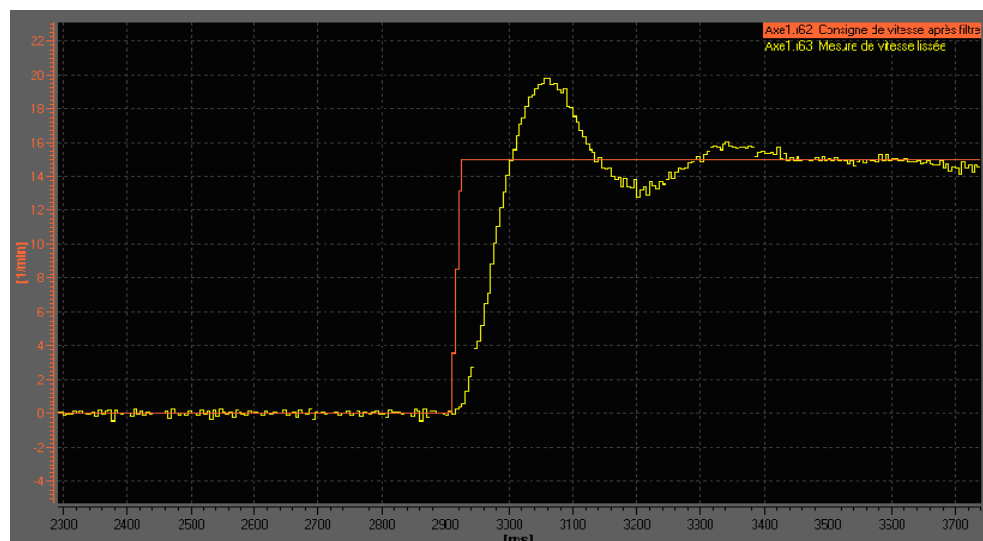


Figure 39 : Résultat de la régulation de vitesse à l'aide d'un saut indiciel

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

### 9.3.2 Régulateur de position

Le gain du régulateur de position a été fixé à 2. Cette valeur a été choisie afin d'éviter les sauts de la consigne de vitesse. Le système ne doit pas être nerveux au démarrage vu qu'il devra transporter des charges.

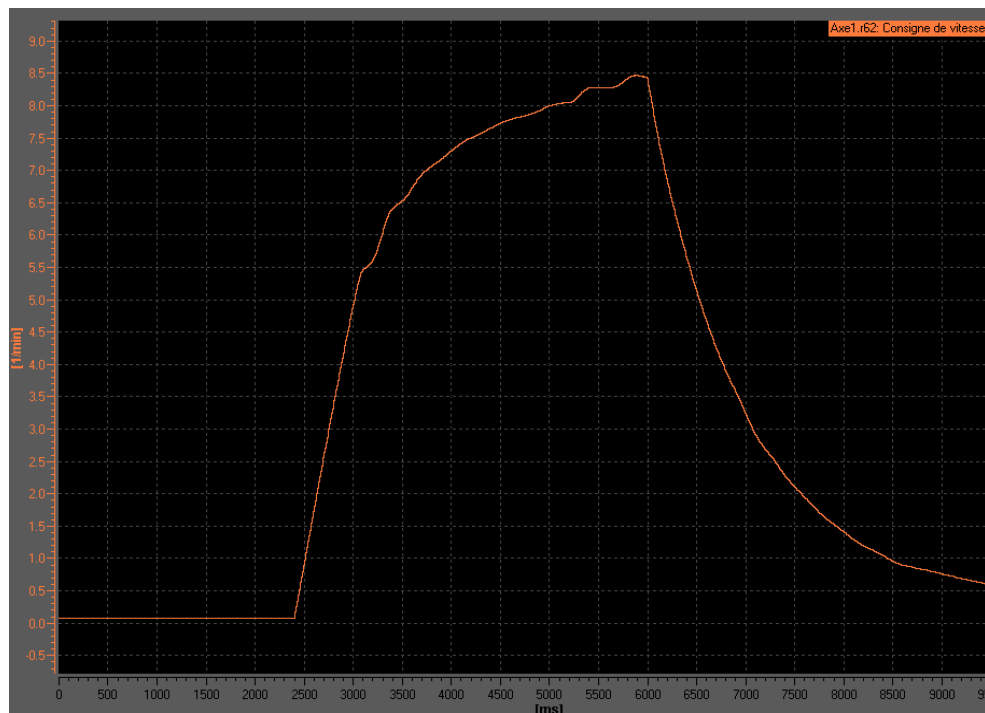


Figure 40 : Consigne et mesure de vitesse donné par le régulateur de position

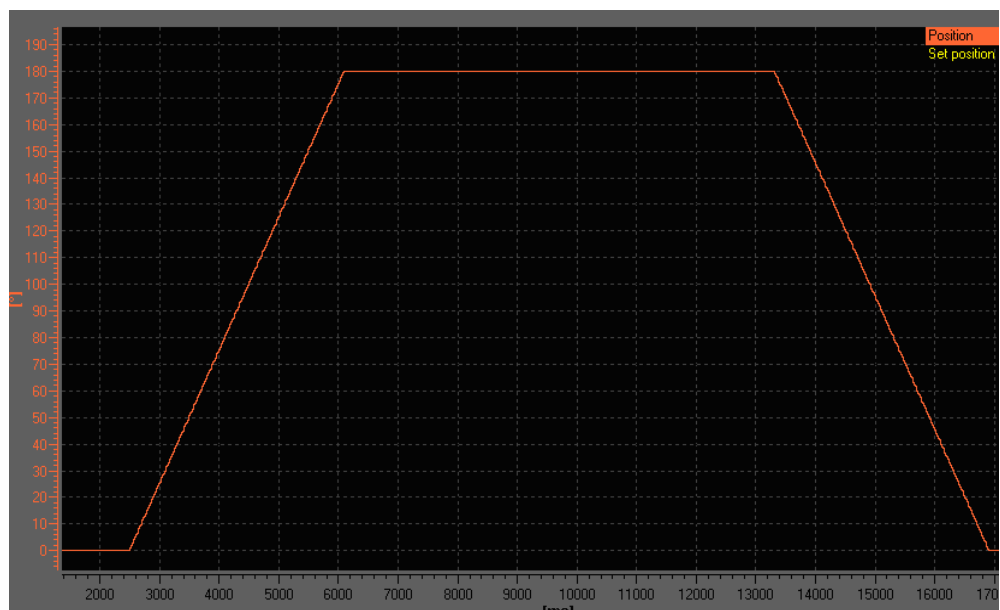


Figure 41 : Consigne et mesure de position superposés

## Axe y

### 9.3.3 Régulateur de vitesse

Les gains du régulateur de vitesse ont été fixés à 0.18 (Kp) et 68 ms (Ti). Dans un premier temps on a fait osciller le système à un gain critique Kc de 0.4. La période des oscillations est de 80 ms.

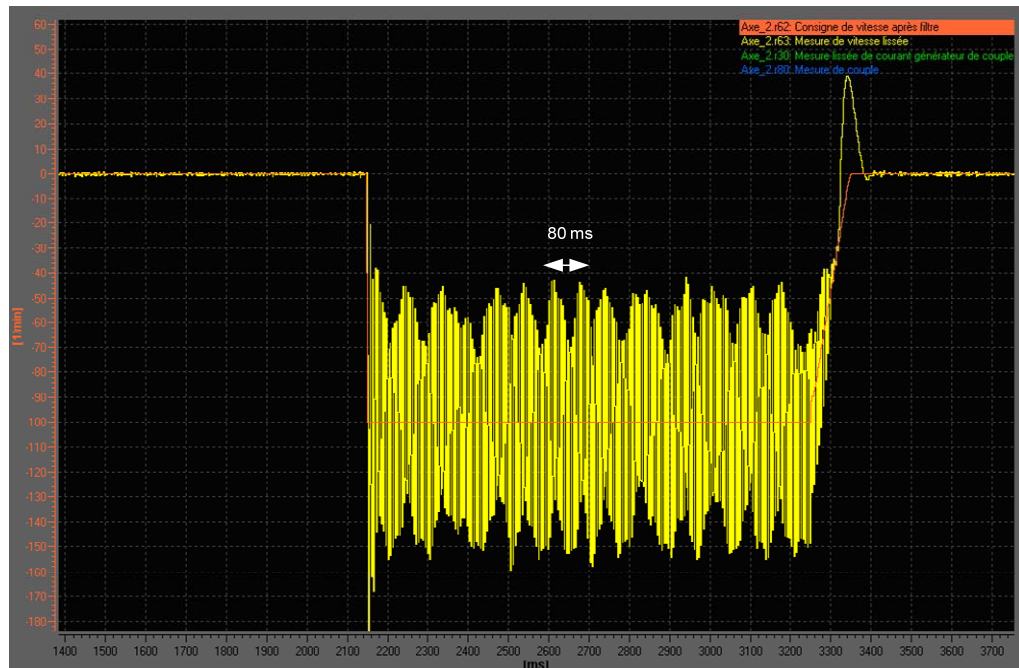


Figure 42 : Oscillation de la vitesse permettant de dimensionner le régulateur

Les gains calculés par Ziegler-nichols sont donc de 0.18 (Kp) et de 68ms (Ti). La réponse indicielle avec les gains choisie est la suivante :

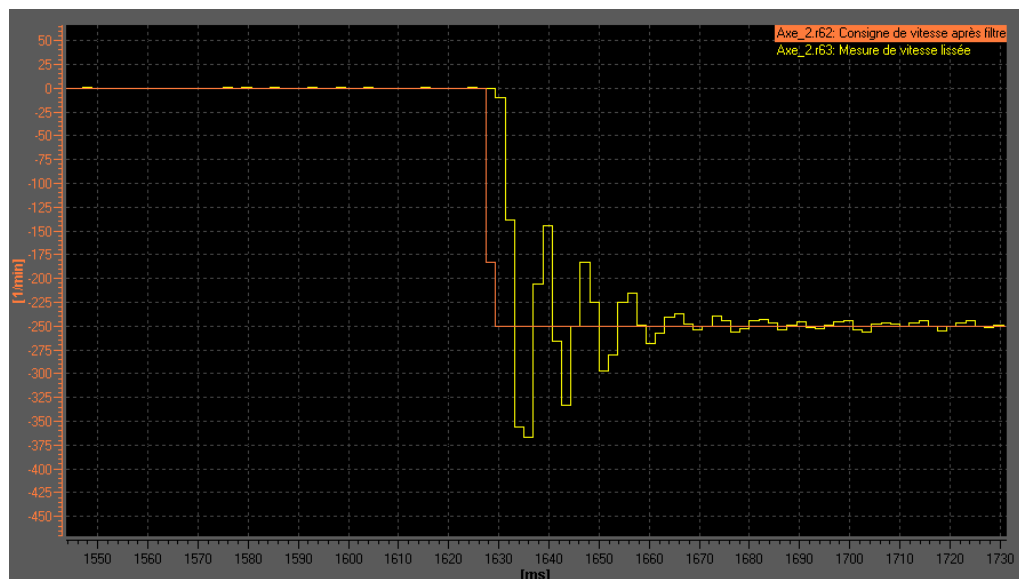


Figure 43 : Resultat de la régulation de vitesse à l'aide d'un saut indiciel

### 9.3.4 Régulateur de position

Le gain du régulateur de position a été fixé à 5. Cette valeur a été choisie afin d'éviter les sauts de la consigne de vitesse. Le système peut être plus nerveux au démarrage que l'axe x.

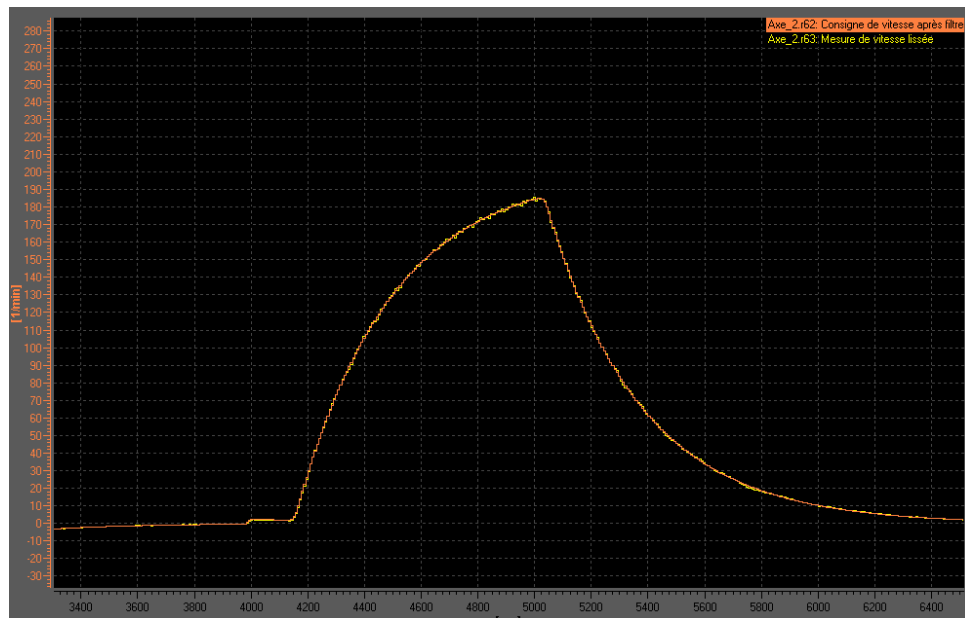


Figure 44 : Consigne et mesure de vitesse donné par le régulateur de position

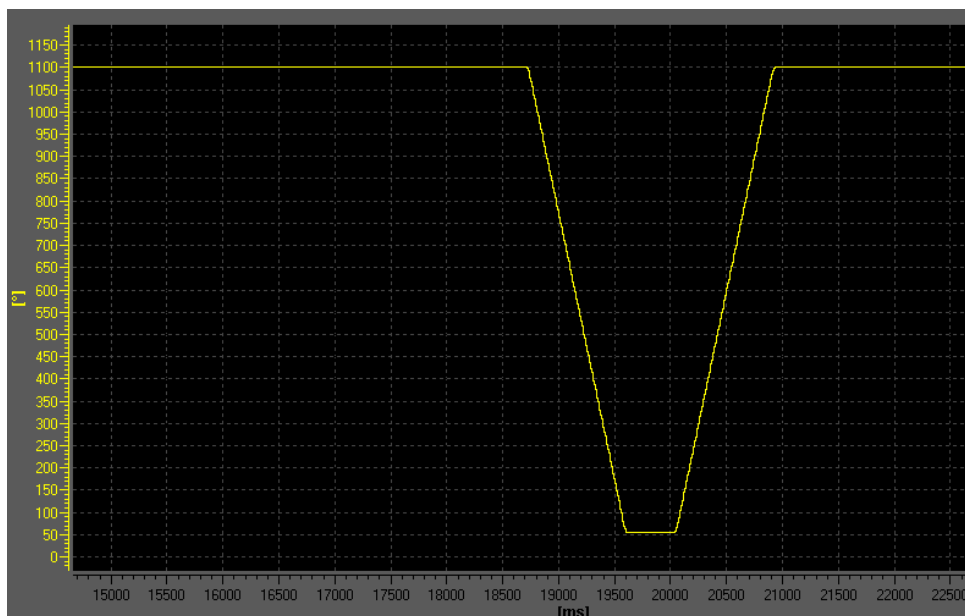


Figure 45 : Consigne et mesure de position superposés

<b>Hes-so</b> <small>Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz</small>	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 10 Visualisation et commande

### 10.1 Structure

Mon programme de visualisation et commande est divisé en plusieurs fenêtres :

- Commande générale
- Visualisation axe x
- Visualisation axe y

Une fenêtre de titre reste toujours affichée ainsi qu'une fenêtre de navigation. Cette fenêtre est une sorte de menu qui permet de passer d'une fenêtre à l'autre.



Figure 46 : Fenêtre de titre

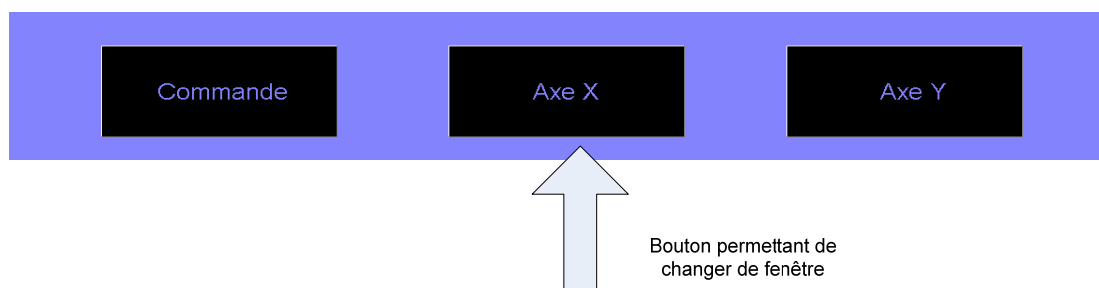


Figure 47 : Fenêtre navigateur

## 10.2 Commande

La fenêtre commande comprend deux zones possédant trois boutons de base pour chaque axe :

- Activation de l'axe
- Reset
- Initialisation

L'activation de l'axe permet de libérer l'axe afin qu'il soit prêt à fonctionner. Lors de son activation la carte d'axe passe à l'état 'RUN'.

Le reset permet d'acquitter l'axe en cas de défaut survenu pendant le fonctionnement.

L'initialisation permet d'initialiser la position de l'axe, donc des codeurs. L'axe ne bouge pas pendant l'initialisation.

Elle comprend une troisième zone permettant d'activer les régulations en position ou en vitesse et le retour de force.

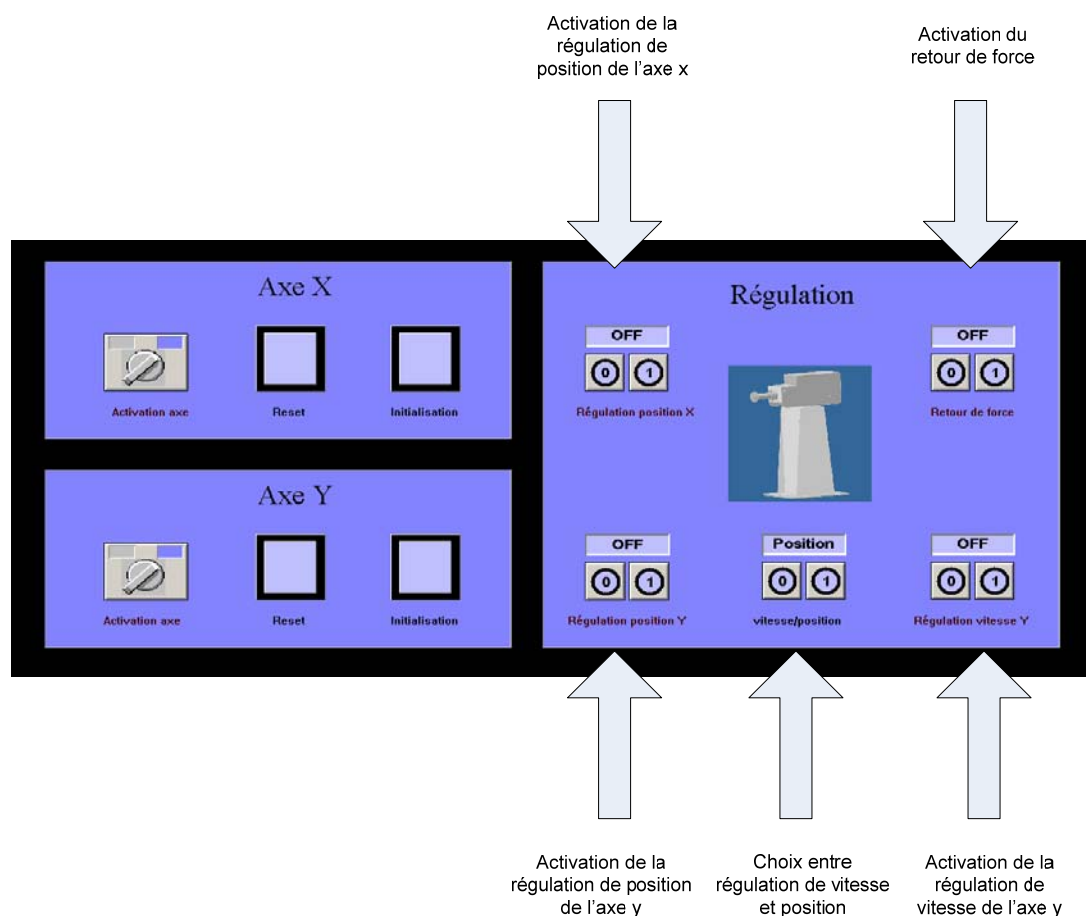


Figure 48 : Fenêtre de commande

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

### 10.3 Visualisation axe X

La fenêtre 'Axe x' permet de visualiser l'axe à l'aide d'un afficheur analogique et d'une animation.

On peut y voir la position du joystick variant de  $-25^{\circ}$  à  $25^{\circ}$ , la position de l'axe variant de  $0^{\circ}$  à  $180^{\circ}$  et la vitesse de déplacement de l'axe.

Une animation composée de la conception sur le logiciel Inventor permet de voir bouger l'axe en temps réel.

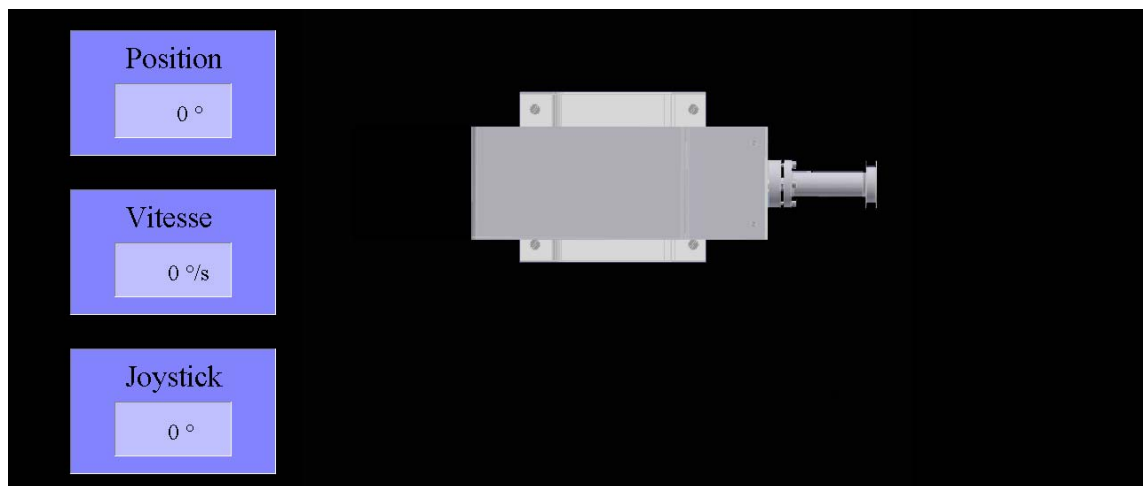


Figure 49 : Fenêtre de visualisation axe x



<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 10.4 Visualisation axe Y

La fenêtre 'axe y' permet également de visualiser l'axe à l'aide d'afficheur analogique et d'une animation.

On peut y voir en plus de la fenêtre de l'axe x, le couple mesuré.

Une animation composée de la conception sur le logiciel Inventor permet de voir bouger l'axe en temps réel. L'animation permet de voir le robot déverser du sable dans un camion.

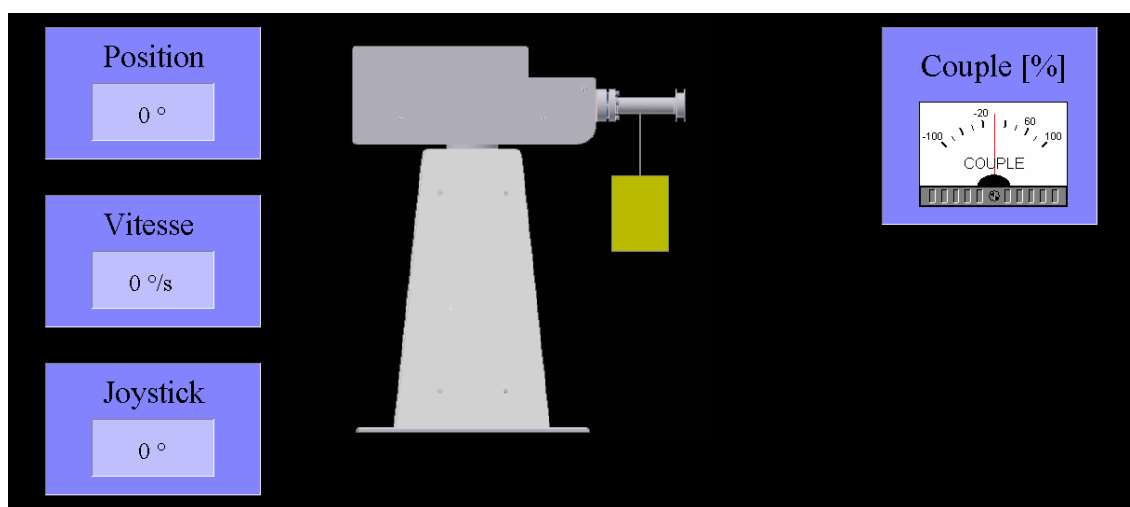


Figure 50 : Fenêtre de visualisation axe y

<b>Hes·so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 11 Analyse des résultats

### 11.1 Conception robot

#### 11.1.1 *Objectif à atteindre*

L'objectif était de réaliser un robot de téléopération à l'aide de 2 moteurs fournis.

#### 11.1.2 *Analyse*

- La principale difficulté pour la conception du robot était due à la grandeur des moteurs. Avec des moteurs plus petits, principalement celui de l'axe de la poulie de levage, le design aurait pu être amélioré.
- Les plaques d'aluminium ont été un bon choix dans l'aspect esthétique mais présentent le désavantage, contrairement au plastique par exemple, d'être bruyant lors de vibrations du moteur.
- Le pliage était assez compliqué et n'a pas été réalisé très précisément.
- Le système d'accouplement KTR choisit est très bon marché et fonctionne très bien.
- Malgré les quelques améliorations esthétiques que l'on pourrait apporter le système fonctionne très bien.



Figure 51 : Robot réalisé

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 11.2 Conception joystick

### 11.2.1 Objectif à atteindre

Il existe sur le marché des joysticks avec retour de force. Les prix ne sont pas abordables pour une maquette de démonstration (~4000\$). Possédant suffisamment de temps j'ai décidé de concevoir le retour de force sur un joystick industriel n'en possédant pas.

### 11.2.2 Analyse

- La méthode choisie (moteur DC) a été bon marché et simple.
- Le dimensionnement du retour de force, c'est-à-dire la tension d'alimentation du moteur DC ainsi que la poulie de transmission de la force, a été relativement simple.
- La conception mécanique comprenant l'assemblage de l'axe du joystick et du moteur s'est avéré assez complexe.
- Le système fonctionne bien pour notre application mais possède quand même des limites de vitesse de réactions dues à la mesure du couple.

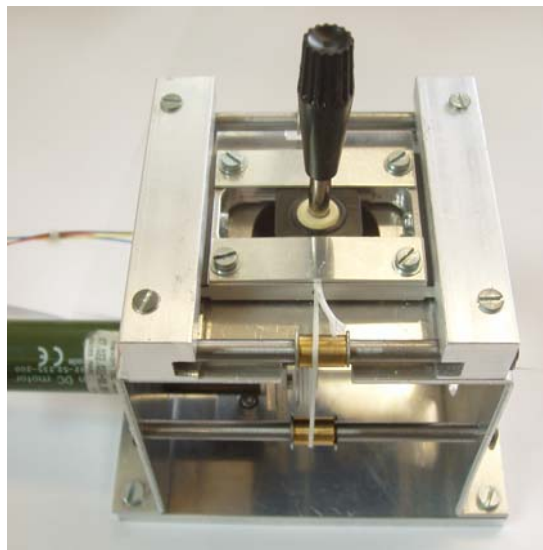


Figure 52 : joystick à retour de force réalisé

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 11.3 Programmation

### 11.3.1 Objectif à atteindre

L'objectif était de programmer l'automate afin de réguler les 2 axes en position en fonction du joystick et mesurer le couple employé afin d'établir un retour de force.

### 11.3.2 Analyse

- Les problèmes rencontrés ont été liés à la syntaxe de mon code plutôt qu'à sa logique.
- Ayant travaillé déjà sur cette partie durant mon projet de semestre elle a été réalisée bien plus rapidement que prévu.

## 11.4 Câblage

### 11.4.1 Objectif à atteindre

Afin que l'installation soit propre, il était impératif de grouper tout le matériel dans un coffret.

### 11.4.2 Analyse

- Aucun problème n'est survenu lors de la remise sous tension après le démontage et le remontage dans le coffret.
- La grandeur du coffret a été bien dimensionnée et possède très peu de place perdue.



Figure 53 : coffret électrique réalisé

<b>Hes-so</b> Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale Fachhochschule Westschweiz	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 11.5 Régulation

### 11.5.1 Objectif à atteindre

Le but était d'adapter les gains des régulateurs cascades de courant, vitesse et position afin d'avoir une régulation de position idéale.

### 11.5.2 Analyse

- Le fait de ne pas pouvoir régler au mieux le régulateur de courant a été l'inconvénient principal et ne m'a pas permis d'avoir une régulation optimale et structurée.
- Au final la régulation est très bonne mais m'a pris beaucoup de temps.

## 11.6 Commande et visualisation

### 11.6.1 Objectif à atteindre

Ayant plus de temps que prévu j'ai pu compléter mon installation d'une visualisation et commande par ordinateur.

### 11.6.2 Analyse

- Ce travail supplémentaire m'a permis de me former avec un logiciel très employé dans l'industrie.
- La réalisation a été simple et très intéressante.

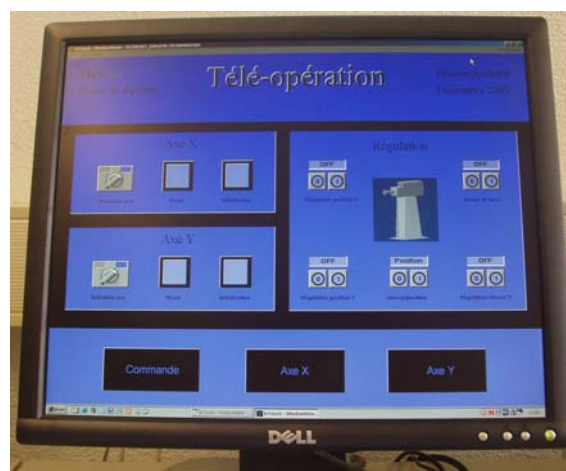


Figure 54 : Visualisation depuis l'ordinateur avec Intouch

## 11.7 Répartition du temps

Pour chaque partie de mon travail j'ai noté les heures approximatives réalisées.

Travail	Description
Conception robot	Esquisse, Conception Inventor et montage
Conception joystick	Dimensionnement, Conception Inventor et montage
Programmation	Programmation régulation de position et retour de force
Régulation	Dimensionnement des régulateurs de chaque axe
Câblage	Réalisation schéma, commande et câblage coffret
Commande et Visualisation	Commande et animation pour chaque axe.
Optimisation	Le système réalisé chaque étape à été optimisé.
Rapport	Rédaction du rapport tout au long du travail

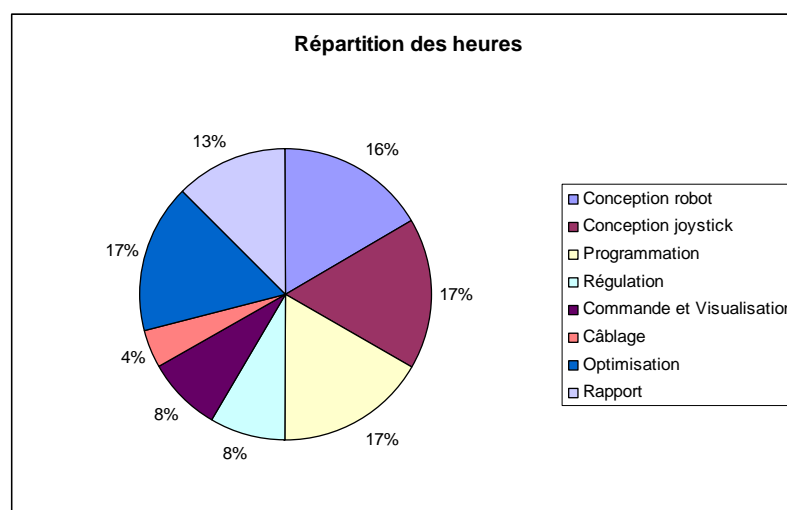



Figure 55 : Graphique de répartition des heures

	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## **12 Conclusion**

Etant très intéressé par la programmation d'automate j'étais très motivé à l'approche de mon travail de diplôme. Le fait de réaliser une maquette et non un projet pour l'industrie m'a laissé une grande liberté d'action dans mon projet. Cela m'a permis de réaliser un travail intéressant mais aussi de me former dans la programmation d'automate avec Step 7 et le programme de visualisation Intouch que je serai amené à utiliser dans l'avenir en temps qu'ingénieur. Cette expérience acquise dans ces domaines durant mon projet de diplôme m'a aidé à trouver une place dans le monde du travail. Malgré les quelques petits problèmes rencontrés, le travail s'est très bien déroulé et je suis satisfait du résultat obtenu.


## **13 Remerciements**

Pour clore ce travail, je tiens à remercier les quelques personnes qui m'ont apportés leur aide durant ces 12 semaines, Monsieur Amandus Steiner et l'atelier pour la conception mécanique, Monsieur Christophe Truffer pour la programmation et tout particulièrement Madame Fariba Bützberger pour sa disponibilité tout au long du projet.

## **14 Bibliographie**

Les sites ou rapports consultés lors du travail sont les suivants :

- [www.siemens.ch](http://www.siemens.ch)
- [www.maxonmotor.com](http://www.maxonmotor.com)
- [www.megatron.fr](http://www.megatron.fr)
- [www.wikipédia.org](http://www.wikipédia.org)
- Cours retour haptique, Géri Casiez, Octobre 2005
- Cours MCR 2 HES SO, Fariba Bützberger et Jean-Daniel Marcuard Septembre 2007

	Bastien Richard	Décembre 2007
	Projet de diplôme	Téléopération

## 15 [Annexes](#)

Annexe 1 : Code de programmation Step 7

Annexe 2 : Mise en plan Inventor des pièces mécanique du robot

Annexe 3 : Mise en plan Inventor des pièces mécanique du joystick