

Dossier Industriel

# Robots industriels FANUC

BUIRE Jérôme

Agrégation externe de Sciences Industrielles de  
l'ingénieur et Ingénierie électrique



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>1 Présentation</b>	<b>3</b>
1.1 L'entreprise . . . . .	3
1.2 Les robots industriels . . . . .	4
1.3 Mise en situation . . . . .	6
<b>2 Etude Scientifique</b>	<b>7</b>
2.1 Présentation du robot utilisé et étude cinématique . . . . .	7
2.2 Modèle géométrique . . . . .	9
2.2.1 Coordonnées homogènes . . . . .	9
2.2.2 Réalisation d'un modèle direct du robot . . . . .	10
2.2.3 Programmation du modèle . . . . .	11
2.2.4 Modèle inverse . . . . .	15
2.2.5 Programmation du modèle . . . . .	16
2.2.6 Logiciel de simulation . . . . .	17
<b>3 Etude Pédagogique</b>	<b>20</b>
3.1 Présentation SysML . . . . .	20
3.2 Formations pédagogiques . . . . .	24
3.2.1 Séquence pédagogique . . . . .	25
3.3 Autres possibilités d'enseignement . . . . .	29
3.3.1 Ouverture en seconde . . . . .	29
3.3.2 Autres enseignements en STI2D et S SI . . . . .	30
3.3.3 Autres enseignements en BTS . . . . .	30
3.3.4 Exemple de travaux pratiques . . . . .	31

# Introduction

La compétitivité d'une entreprise est primordiale pour qu'elle puisse vivre face à ses concurrents. Dans leur travail certains salariés réalisent des tâches répétitives, pénibles. Afin de diminuer le coût de production et d'accroître l'aide au travail, les entreprises automatisent les lignes de production pour que ce soit les robots qui réalisent ces tâches. Cependant l'installation des robots peut être difficile à réaliser et nécessite des personnes compétentes.

On a choisi de travailler sur les robots industriels (figure 1) car les formations à la robotique sont rares en France. Peu d'entreprises françaises utilisent l'ensemble du potentiel des robots, peu de personnes savent l'utiliser (même pour de simples déplacement de mise en sécurité). De même, très peu d'applications robotisées réalisent des tâches complexes tel que la détection par vision ou le *tracking* (suiveur de pièces sur tapis roulant).

A titre de comparaison, pour un robot installé en France, il y en a trois en Italie et cinq en Allemagne. Ces chiffres montrent à la fois l'état de santé des entreprises mais aussi leurs retards qui s'accumulent. Pour palier à cela, la formation à la robotique est primordiale, elle doit se développer en France depuis le lycée aux formations en entreprise.



FIGURE 1 – Exemple de robot industriel Fanuc avec leur baie de commande

Pour m'avoir aidé à réaliser ce dossier, je tenais à remercier d'abord l'entreprise Fanuc France Robotics et ses employés, en particulier Florence Bertaux directrice marketing et business développement, Sébastien Evrat responsable support client et Eric Linard formateur.

# Chapitre 1

## Présentation

### 1.1 L'entreprise

L'entreprise avec laquelle j'ai travaillé est Fanuc France Robotics (figure 1.1), située à Evry dans l'Essonne. Celle-ci réalise l'installation des robots de la marque Fanuc, entreprise japonaise, spécialiste dans la conception de robots industriels.



FIGURE 1.1 – L'entreprise Fanuc France Robotics

La fonction principale de Fanuc France Robotics consiste à installer le robot, câbler ses entrées-sorties, concevoir ses outils, créer ses programmes de fonctionnement, réaliser sa maintenance. Fanuc est le leader mondial et français des robots industriels avec plus de 60% du marché.

## 1.2 Les robots industriels

Les robots industriels peuvent se présenter sous différentes configurations suivant leurs fonctions, voici les trois principales :

- Les robots cartésiens (figure 1.2) : formés d'axes linéaires (de 3 à 6 articulations), ils peuvent accepter des charges lourdes mais sont très imposants et tendent à se raréfier. Par exemple on trouve cette structure sur les tables traçantes, tables de découpe laser.



FIGURE 1.2 – Exemple de robot cartésien

- Les robots série (figure 1.3) : 6 axes composés d'articulations pivots successives. Ils sont les plus répandus, ils sont présents dans tout type d'industrie, notamment en agroalimentaire (grâce au respect d'Indices de Protection IP adaptés). Ils ont pour avantages d'être peu imposants et d'être disponible dans des gammes très importantes (de charge utile de 500g à 1500kg). Par contre, ils possèdent une inertie très importante et leur rigidité est limitée par la mise en série d'éléments élastiques.

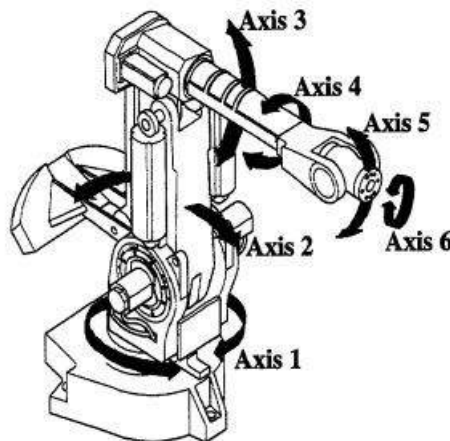


FIGURE 1.3 – Exemple de robot 6 axes Fanuc

- Les robots delta ou hexapode (figure 1.4) : les plus récents, nés d'un besoin industriel, ils permettent une cadence très élevée, une grande précision et une faible consommation. Ils sont composés de chaînes cinématiques fermées formant des polygones articulés. Grâce à cela leur rigidité est très importante. Les actionneurs sont localisés dans la base (partie supérieure fixe) ce qui limite les masses en mouvement. Le volume de travail est faible. Leur modèle géométrique est parfois difficile à déterminer ce qui implique que les équations de mouvements sont complexes et la dynamique peut créer des efforts très importants et difficilement prédictifs (surdimensionnement des actionneurs).



FIGURE 1.4 – Exemple de robot delta Fanuc

Ces trois types de robots ont chacun leurs particularités, on peut les comparer grâce à leur vitesse de travail et leur charge utile (figure 1.5). On peut voir que les robots séries (polyarticulés) ont une gamme très importante mais ils sont limités en vitesse. Par contre les robots delta sont beaucoup plus rapide.

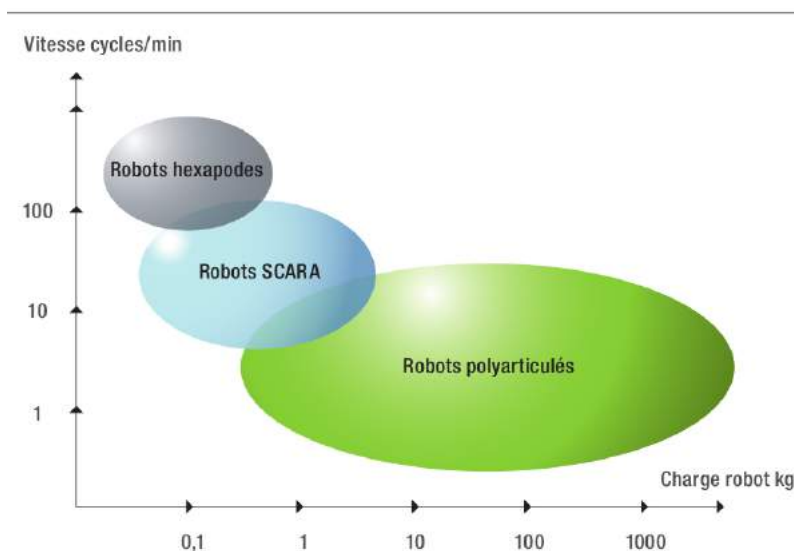


FIGURE 1.5 – Comparaison vitesse de travail et charge utile (document Robotisation)

### 1.3 Mise en situation

L'entreprise souhaite s'investir dans l'éducation et la formation à la robotique. Ainsi, le cahier des charges qui m'est donné, concerne le développement de systèmes robotiques permettant à la société de se positionner sur le marché de l'éducation. Il s'agit pour cela de proposer des applications pédagogiques aux robots FANUC.

De ce fait l'étude scientifique menée n'est pas dissocié d'une référence pédagogique, c'est à dire que pour chaque étude un outil pédagogique a été réalisé.

Grâce au robot et au logiciel de simulation de la marque, nous possédons le système réel et simulé (figure 1.6). L'étude scientifique sera donc la réalisation d'un modèle de connaissance pour vérifier les exigences du cahier des charges.

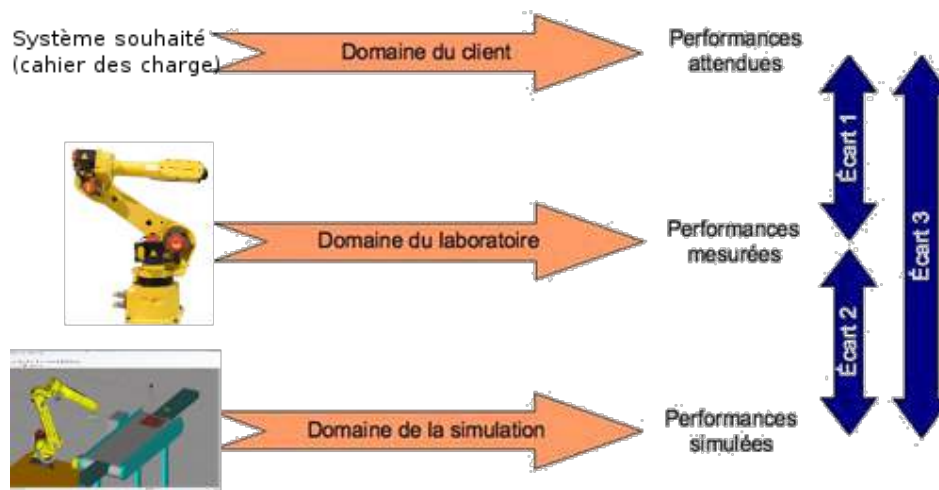


FIGURE 1.6 – Modélisation des écarts

L'étude se décompose en 2 grandes parties :

- la première consiste à réaliser un modèle de connaissance géométrique direct et inverse du robot, c'est à dire qu'à partir de l'information des six angles articulaires on souhaite obtenir la définition en coordonnées cartésiennes du repère défini par le flasque<sup>1</sup> (ou par l'outil), le modèle inverse comme son nom l'indique, consiste à remonter aux angles articulaires à partir de la définition du repère de l'outil en cartésien,
- la seconde partie traite de l'utilisation du logiciel de simulation d'applications robotisées. J'y explique les bases de son utilisation et les simulations réalisées.

Le public visé par la société Fanuc France Robotics est dans un premier temps le pré-baccalauréat, à travers le bac STI2D et le bac S SI. Pour cette étude, je me suis concentré sur un développement en BAC S SI. Pour cela une séquence pédagogique a été développée en détail. Dans le chapitre dédié aux apports pédagogiques je montre comment utiliser le robot pour d'autres points du programme de seconde, du bac STI2D, S SI et en BTS Electrotechnique.

---

1. Le flasque est l'extrémité du robot

## Chapitre 2

# Etude Scientifique

Tout d'abord voici en détail le plan de l'étude scientifique :

- présentation du robot dans son ensemble : ses particularités, caractéristiques, fonctionnalités,
- base d'un outil mathématique (les coordonnées homogènes),
- modèle de connaissance d'un modèle direct du robot par l'utilisation de cet outil, une programmation en C++ permettra de réaliser les calculs et de visualiser graphiquement l'état du robot,
- modèle de connaissance d'un modèle inverse du robot en utilisant la méthode de Paul. La précédente programmation sera complétée par celle-ci,
- travail sur le logiciel de simulation de la marque "roboguide".

### 2.1 Présentation du robot utilisé et étude cinématique

Pour ce travail, j'ai utilisé un robot 6 axes, du fait de sa forte utilisation. La taille du robot n'est pas très importante car ils sont tous basés sur le même principe et s'utilisent de la même manière. La première partie concernant le modèle géométrique du robot est également généralisable à d'autres marques de robot tel que Staübli, ABB, Kuka... Avec l'entreprise j'ai travaillé le plus souvent avec un M-20 (figure 2.1) , il possède une charge utile de 20 kg.



FIGURE 2.1 – Robot Fanuc M-20



Ces robots sont actionnés par des moteurs synchrones à aimants permanents. Les réducteurs associés sont très spéciaux, ils sont du type *Harmonic Drive* (figure 2.2). Ces réducteurs ont l'avantage de posséder un jeu très réduit, le rapport de réduction peut être très important pour un mécanisme compact (jusqu'à 320 :1 tandis que pour le même encombrement, un train épicycloïdal aurait un rapport de 10 :1) et ils peuvent transmettre un couple très important.



FIGURE 2.2 – Réducteur *Harmonic Drive*

Le schéma cinématique 3D de ce robot que j'ai élaboré est présenté sur la figure 2.3 :

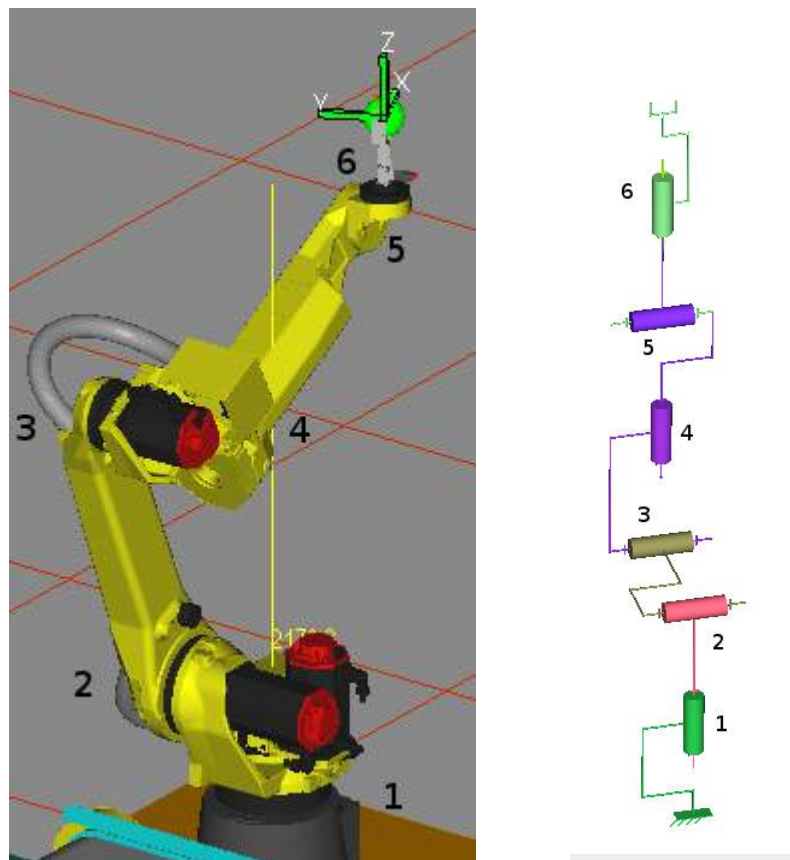


FIGURE 2.3 – Schéma cinématique 3D du robot

Ce schéma montre la complexité des modèles géométriques, dans la partie suivante les modèles géométriques directs et inverse sont détaillés.

## 2.2 Modèle géométrique

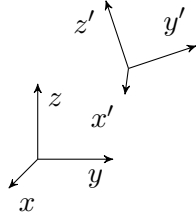
### 2.2.1 Coordonnées homogènes

Les coordonnées homogènes sont des outils mathématiques créés par Mobius, elles permettent de représenter sous forme matricielle un repère. Pour être totalement définies elles sont représentées par la position de leurs origines et par les trois vecteurs directeurs dans un autre repère.

Soit  $R$  le repère d'origine (géocentrique par exemple), représenté par son origine  $O$  et les trois vecteurs directeurs  $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ , ce repère est orthonormé direct. On souhaite représenter le repère  $R'$  dans le repère  $R$  :

Les coordonnées de l'origine  $O'$  sont dans  $R$  :  $(O'_x; O'_y; O'_z)^t$ .

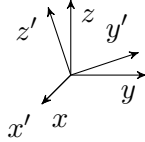
Les vecteurs directeurs sont dans  $R$  :  $\vec{x}' = (x'_1; x'_2; x'_3)^t$ ,  $\vec{y}' = (y'_1; y'_2; y'_3)^t$ ,  $\vec{z}' = (z'_1; z'_2; z'_3)^t$ .



$$R' = \begin{bmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 & O'_x \\ x'_2 & y'_2 & z'_2 & O'_y \\ x'_3 & y'_3 & z'_3 & O'_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

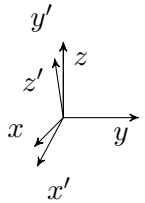
Grâce à cette représentation le déplacement d'un repère devient très simple, il suffit d'utiliser des multiplications matricielles :  $R' = H.R$  avec  $H$  la matrice de passage qui transforme  $R$  en  $R'$ . Voici les transformations utilisées pour mon étude :

— rotation de  $\theta$  autour de  $\vec{x}$  :



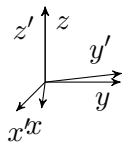
$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

— rotation de  $\theta$  autour de  $\vec{y}$  :



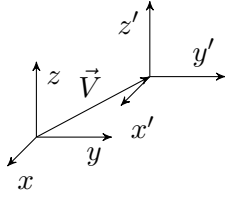
$$H = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

— rotation de  $\theta$  autour de  $\vec{z}$  :



$$H = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

— translation par le vecteur  $\vec{V}$  représenté dans R par :  $(V_x; V_y; V_z)^t$  :



$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & V_x \\ 0 & 1 & 0 & V_y \\ 0 & 0 & 1 & V_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Enfin à partir d'un vecteur  $\vec{V}$  connu dans le repère R', on peut obtenir sa représentation  $\vec{V}_0$  dans le repère R il suffit de le multiplier par la matrice de transformation H (figure 2.4) :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} V \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

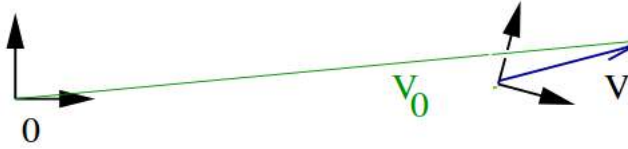


FIGURE 2.4 – déplacement de repère

### 2.2.2 Réalisation d'un modèle direct du robot

On souhaite pouvoir connaître la position dans le repère cartésien du flasque<sup>1</sup> du robot (afin de contextualiser le robot dans son environnement). Grâce aux coordonnées homogènes les déplacements successifs de repère deviennent très simples, il revient à de simple produit de matrice 4\*4. Le modèle direct du robot est obtenu par six déplacements successifs à partir du repère lié au bâti (figure 2.5),  $H_{ij}$  la matrice de passage qui transforme le repère i en repère j.

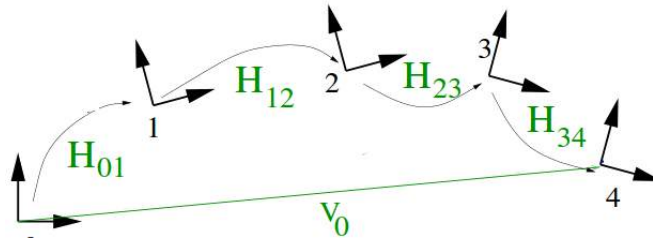


FIGURE 2.5 – Déplacements successifs de repères

On souhaite obtenir le vecteur  $V_0$  et les angles d'Euler définissant le repère lié à l'outil du robot.

---

1. Le flasque est l'extrémité du robot

L'angle de l'articulation  $i$  est noté  $\theta_i$ . Le modèle direct est déterminé par déplacements élémentaires successifs de repères liés au bâti.

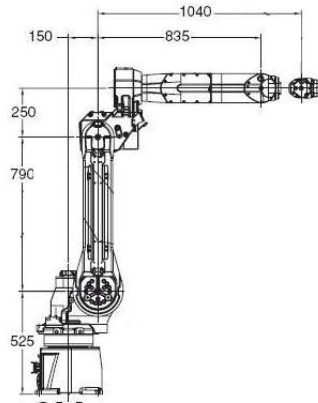


FIGURE 2.6 – Cotes du robot

Dans la configuration présentée sur la figure 2.6 tous les angles sont définis nuls. À partir du repère défini par le bâti il suffit de réaliser successivement un déplacement au centre de rotation puis une rotation d'angle  $\theta_i$ .

### 2.2.3 Programmation du modèle

Afin de rendre ce travail exploitable d'un point de vue pédagogique, j'ai réalisé la programmation. L'application est muni d'une interface graphique pour visualiser la position du robot.

La programmation est réalisé en C++ sous Linux, pour le calcul matriciel j'utilise la librairie OpenCV, et pour le graphique j'utilise OpenGL.



La librairie OpenCV est à la base dédiée de traitement d'image, je vais l'utiliser pour le calcul matriciel. La librairie OpenGL permet la réalisation d'interface graphique.

#### Utilisation de la librairie OpenCV

Dans une première approche le bras manipulateur a été simplifié : les articulations 1 et 2 sont géométriquement à la même position, les articulations 3 et 4 sont géométriquement à la même position et les différents membres sont simplifiés.

Tout d'abord je crée en global l'ensemble des objets utilisés : matrices de changement de repère, un vecteur J de 6 composantes contenant les valeurs des angles  $\theta_i$ .

J'instaure des fonctions de création de matrices pour la rotation et la translation de repère. Voici la liste des fonctions et un exemple créant la matrice de rotation autour de  $\vec{x}$  :

```

1  Mat MatRotX(double angle) {
2      Mat M(4, 4, CV_64F, Scalar(0, 0, 255)); //creation de la matrice M
3
4      //definition de la 1ere ligne
5      M.row(0).col(0) = 1.0;
6      M.row(0).col(1) = 0.0;
7      M.row(0).col(2) = 0.0;
8      M.row(0).col(3) = 0.0;
9
10     //definition de la 2eme ligne
11     M.row(1).col(0) = 0.0;
12     M.row(1).col(1) = cos(angle);
13     M.row(1).col(2) = -sin(angle);
14     M.row(1).col(3) = 0.0;
15
16     //definition de la 3eme ligne
17     M.row(2).col(0) = 0.0;
18     M.row(2).col(1) = sin(angle);
19     M.row(2).col(2) = cos(angle);
20     M.row(2).col(3) = 0.0;
21
22     //definition de la 4eme ligne
23     M.row(3).col(0) = 0.0;
24     M.row(3).col(1) = 0.0;
25     M.row(3).col(2) = 0.0;
26     M.row(3).col(3) = 1.0;
27
28     return M;
29 }
```

Ensuite dans une fonction init(), je crée l'ensemble des matrices de changement de repère.

```

1  void init() {
2      //longueur des membres//
3      a = 1000.0;
4      b = 1000.0;
5      c = 100.0;
6      d = 100.0;
7
8      //definition des matrices de changement de repere//
9      H01 = MatRotZ(J.at<double>(0, 0)); //joint1
10     H12 = MatRotY(J.at<double>(1, 0)); //joint2
11     H12bis = MatTrans(0, 0, a); //bras1
12     H23 = MatRotY(J.at<double>(2, 0) + M_PI / 2.0); //joint3
13     H34 = MatRotZ(J.at<double>(3, 0)); //joint4
14     H34bis = MatTrans(0, 0, b); //avant bras
15     H45 = MatRotY(J.at<double>(4, 0)); //joint5
16     H45bis = MatTrans(0, 0, c); //poignet
17     H56 = MatRotZ(J.at<double>(5, 0));
18     H56bis = MatTrans(0, 0, d); //doigt
19 }
```

Enfin le repère lié au flasque est calculé par multiplications successives des matrices de changement de repère.

```

1 void jointToSpace(Mat J) {
2     init(); //definition des matrice de changement de repere
3     J1 = H01; // centre de l'articulation 1
4     J2 = J1 * H12 * H12bis; // centre de l'articulation 2
5     J3 = J2 * H23; // centre de l'articulation 3
6     J4 = J3 * H34bis * H34; // centre de l'articulation 4
7     J5 = J4 * H45 * H45bis; // centre de l'articulation 5
8     J6 = J5 * H56 * H56bis; // centre de l'articulation 6 (flasque)
9 }

```

Désormais j'ai la définition au sens des coordonnées homogènes du repère lié au flasque. Les robots industriels utilisent une définition du repère par 3 angles d'Euler  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ . Voici leur définition à partir d'une matrice de repère M défini dans l'équation (2.1) ( $M_{i,j}$  est le terme de la ligne i et la colonne j) :

$$R_x = \arctan \left( \frac{M_{3,2}M_{1,1} - M_{3,1}M_{1,2}}{M_{1,1}M_{2,2} - M_{1,2}M_{2,1}} \right) \quad (2.7)$$

$$R_y = \arctan \left( \frac{M_{1,3}}{\sqrt{M_{1,1}^2 + M_{1,2}^2 + M_{2,3}^2 + M_{3,3}^2}} \right) \quad (2.8)$$

$$R_z = \arctan \left( \frac{M_{2,3}M_{3,1} - M_{2,1}M_{3,3}}{M_{2,3}M_{3,2} - M_{2,2}M_{3,3}} \right) \quad (2.9)$$

Ces trois angles sont ceux visibles sur le *teach pendant* comme sur la figure 2.7, ils sont nommés w, p et r .

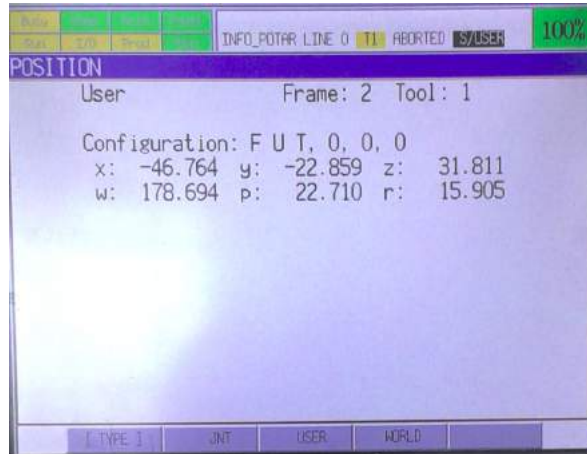


FIGURE 2.7 – *Teach pendant* donnant la position dans l'espace du robot

## Utilisation de la librairie OpenGL

A partir des calculs précédents, je souhaite représenter graphiquement le bras manipulateur. Pour cela j'utilise la librairie graphique OpenGL dédié à la création d'interface graphique. Chaque membre du robot est représenté par une ligne de couleur (figure 2.8), son codage est classique je ne le détaillerai pas.

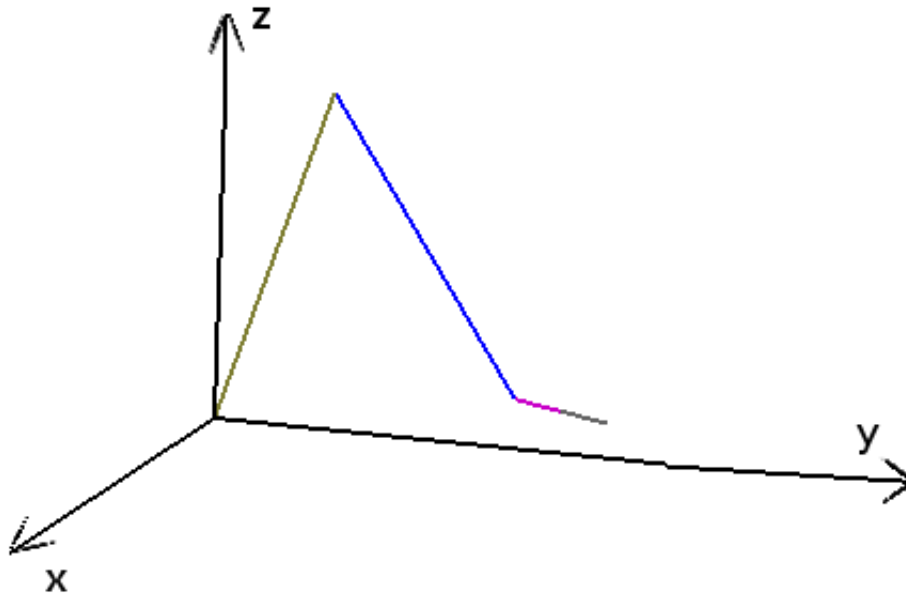


FIGURE 2.8 – Représentation graphique du robot

## 2.2.4 Modèle inverse

### Mise en évidence du problème

Le modèle géométrique inverse est quant à lui beaucoup plus complexe, il consiste à déterminer les angles des articulations à partir de la position du flasque<sup>2</sup>. L'inversion classique du modèle précédent est impossible, il existe plusieurs solutions (figure 2.9).

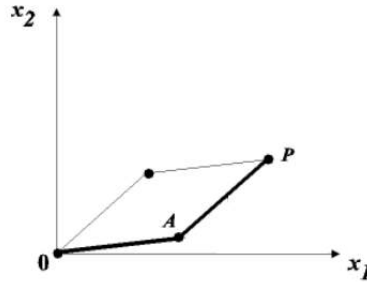


FIGURE 2.9 – Problème d'inversion de modèle : deux solutions possibles

### Réalisation d'un modèle inverse du robot

Pour résoudre ce problème j'utilise la méthode de Paul, elle consiste à traiter séparément chaque cas particulier, elle convient à la plupart des robots industriels. Plus d'info dans la bibliographie : document de Jean-Louis BOIMOND intitulé Robotique.

Voici les grandes lignes de la résolution :

Le modèle peut être traité en deux grandes parties : les trois premières articulations puis les trois suivantes.

Soit P le point au centre de l'articulation 5 : sa position est définie à partir du repère lié au flasque et des dimensions des membres du robot (figure 2.10).

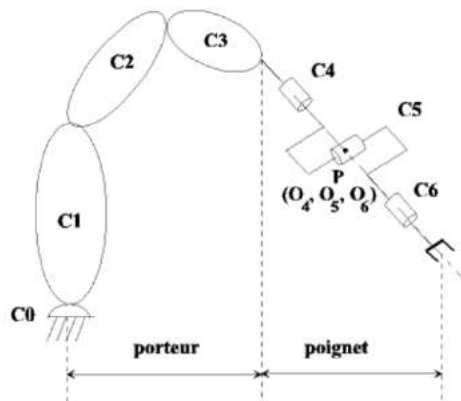


FIGURE 2.10 – Décomposition du problème en deux parties

---

2. Le flasque est l'extrémité du robot



Ce point est uniquement défini par les trois premières articulations. La position de ce point est définie suffisamment simplement pour inverser le système. Grâce à cela on peut déterminer les angles des trois premières articulations. Ce premier système possède plusieurs solutions : l'angle  $\theta_1$  est défini à  $\pi$  près<sup>3</sup> ; il y a deux solutions pour  $\theta_2$ <sup>4</sup>.

Ensuite pour les trois autres angles j'ai utilisé l'orientation du repère du flasque. L'angle  $\theta_4$  est défini à  $\pi$  près<sup>5</sup>. On peut aussi remarquer que si le poignet est aligné avec l'avant-bras, les articulations 4 et 6 sont alignées. C'est une position singulière, c'est-à-dire que le système possède une infinité de solutions, il faut définir arbitrairement l'un des angles pour calculer le second.

Avec cette résolution on a vu que les angles  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_4$  possèdent deux solutions chacun. Il y a donc possiblement 8 solutions distinctes ( $2^3$ ).

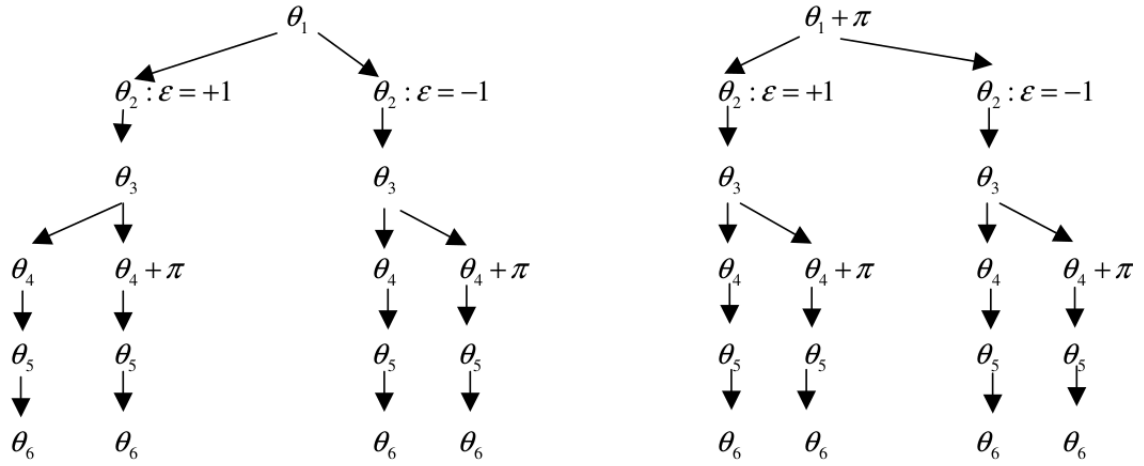


FIGURE 2.11 – Ensemble des solutions

### 2.2.5 Programmation du modèle

Ce modèle inverse a été intégré dans la programmation comme nouvelle fonction. Il est possible d'obtenir les 8 solutions par configuration.

Dans ma programmation, les informations de position des articulations ou de position du flasque sont écrites dans le code, il sera possible de réaliser une interface graphique complète où le code sera caché, les informations de position seront données dans des cellules.

---

3. L'angle est défini par un arc tangente  
 4. Solution d'une équation du second degré  
 5. L'angle est défini par un arc tangente

## 2.2.6 Logiciel de simulation

Fanuc a créé un logiciel de simulation de cellule robotisée Roboguide. Il permet la conception et le développement de cellules robotisées. Il existe des licences classiques, professionnelles et académiques. Beaucoup d'outils sont disponibles pour des utilisations spécifiques telles que les process de soudage, peinture... La version académique que j'ai exploité permet la représentation de la figure 2.12.

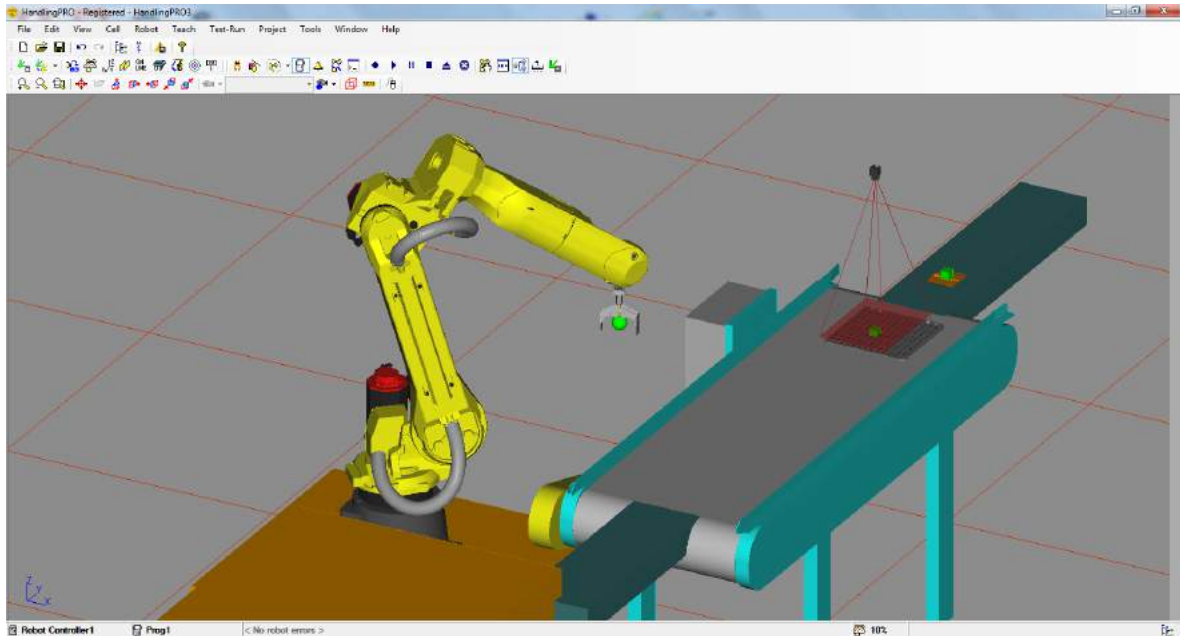


FIGURE 2.12 – Exemple de cellule robotisée

Cette cellule contient un robot M-20, un convoyeur par lequel des pièces arrivent en vrac et une camera.

Ce logiciel est très complet, ses fonctionnalités sont très nombreuses, parmi elles il est possible d'importer des modèles CAO (Solidworks, Catia...). On peut utiliser le robot comme sur la cellule réelle avec le *Teach pendant*, interface de commande (figure 2.13). Cette interface est pour moi très importante car le logiciel est assez compliqué à prendre en main cependant après qu'une cellule robotisée est créée, le robot se contrôle grâce au *Teach pendant*, c'est à dire comme sur un vrai robot. Un même travail de contrôle du robot peut ainsi être réel ou virtuel avec le même résultat.

Le logiciel permet de réaliser des programmations, ainsi le temps de développement est considérablement réduit et le travail est sécurisé.



Le langage de programmation des robots est spécifique à la marque, c'est le langage TP (*Teach pendant*) (figure 2.15).

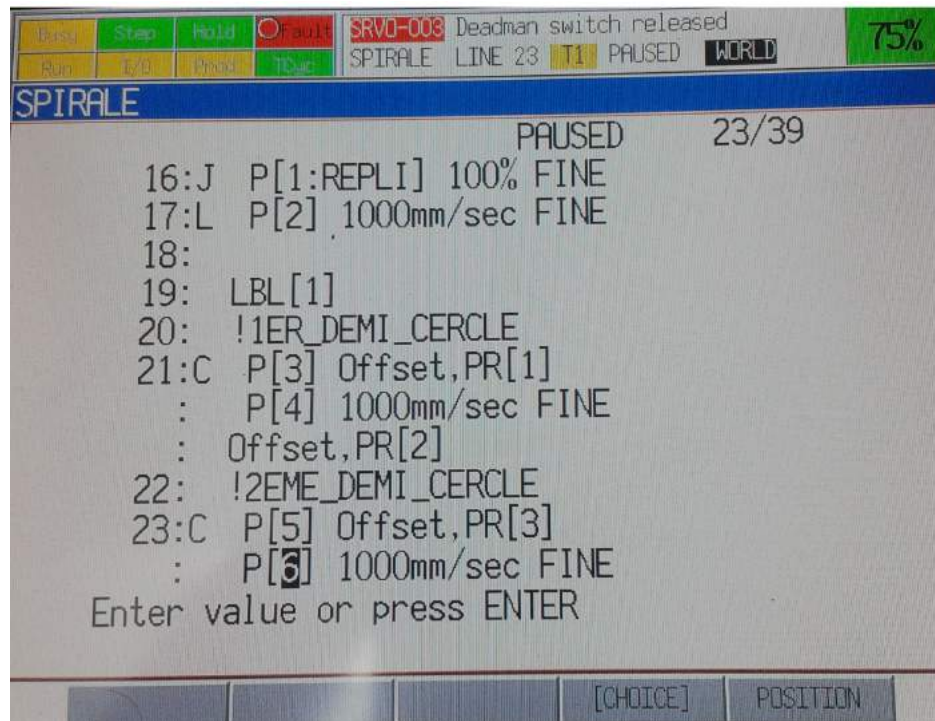


FIGURE 2.15 – Simulation d'une application robotisée utilisant la vision et le tracking

Par exemple les 2 première lignes correspondent à :

- (ligne 16) déplacement articulaire à la vitesse maximum (100% du potentiel articulaire) jusqu'au point P1 (point de repli),
- (ligne 17) déplacement linéaire à 1m/sec jusqu'au point P2

## Chapitre 3

# Etude Pédagogique

Ce chapitre présente l'étude pédagogique menée, avec tout d'abord la séquence pédagogique réalisée dans le cadre du bac Scientifique option Science de l'ingénieur, puis les thématiques possibles à étudier avec des apprenants du bac S SI et STI2D, enfin j'introduirai les possibilités d'enseignement dans d'autres filières telles que le BTS électrotechnique.

### 3.1 Présentation SysML

Les robots industriels sont nés d'un besoin industriel. Un diagramme des cas d'utilisation (use case diagram figure 3.1) représente ce besoin.

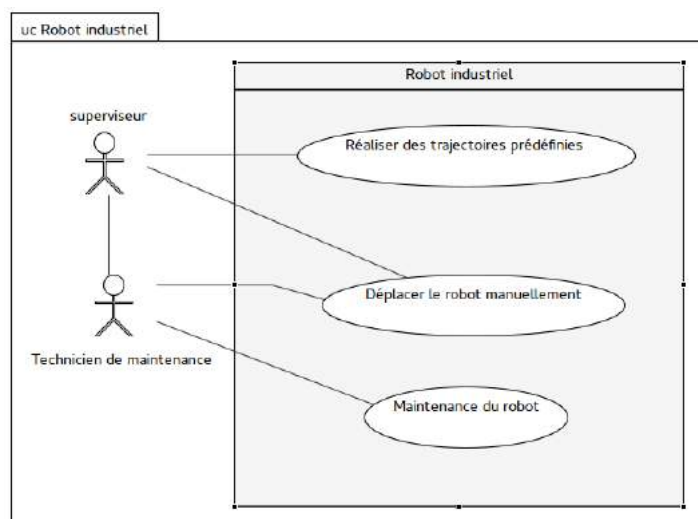


FIGURE 3.1 – Use case du robot industriel

On peut voir deux principales utilisations :

- Toute personne doit pouvoir réaliser des mouvements prédéfinis ou manuels (ils permettent la mise en sécurité, la maintenance du robot, le développement d'application...),
- dans son utilisation automatique un superviseur doit pouvoir démarrer et arrêter le travail automatique.

La réalisation de cellule robotisée répond à un cahier des charges du client. Les exigences du robot industriel peuvent être représentées par le diagramme des exigences (Requirement diagram figure 3.2).

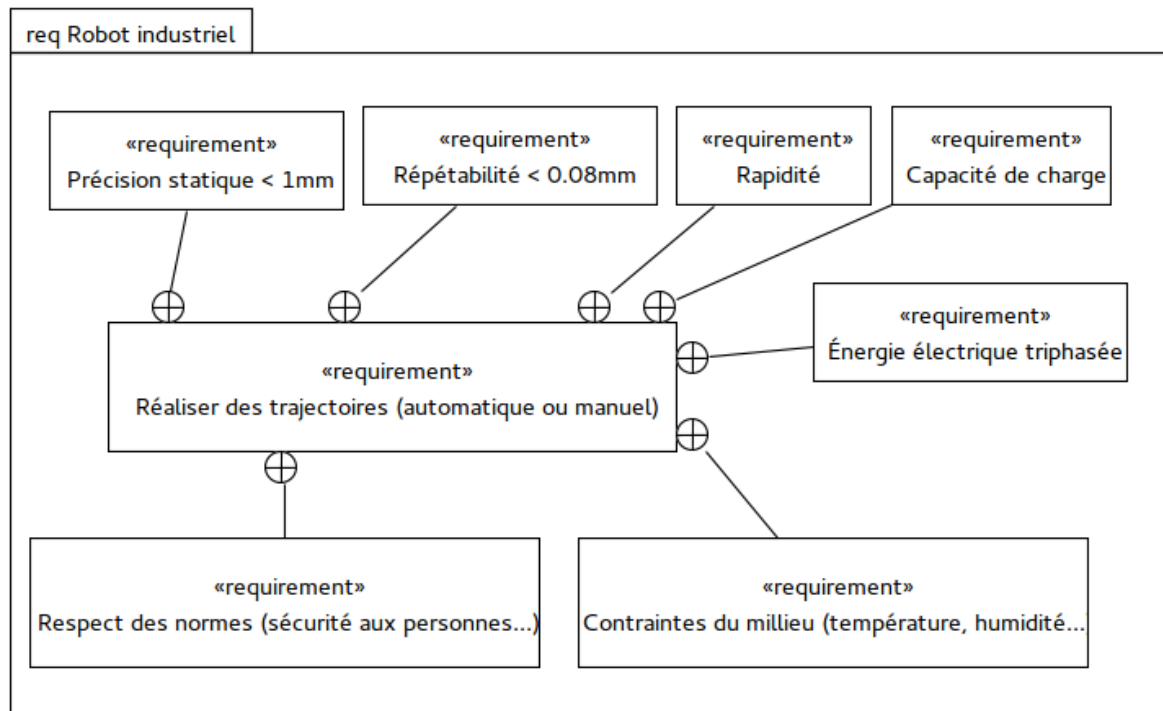


FIGURE 3.2 – Diagramme des exigences

Dans ce diagramme on peut voir qu'on exige du robot une utilisation du réseau triphasé et des conditions de travail de l'atelier (poussière, chaleur, humidité...), certains possèdent des indices de protection élevés (IP54 ou 69). On exige aussi une grande précision et répétabilité, elles sont nécessaires pour beaucoup d'applications telles que du soudage, de la prise de pièce fragile...

Les principaux constituants du robot industriel peuvent être représentés par le diagramme de définition de bloc (Block definition diagram figure 3.3) :

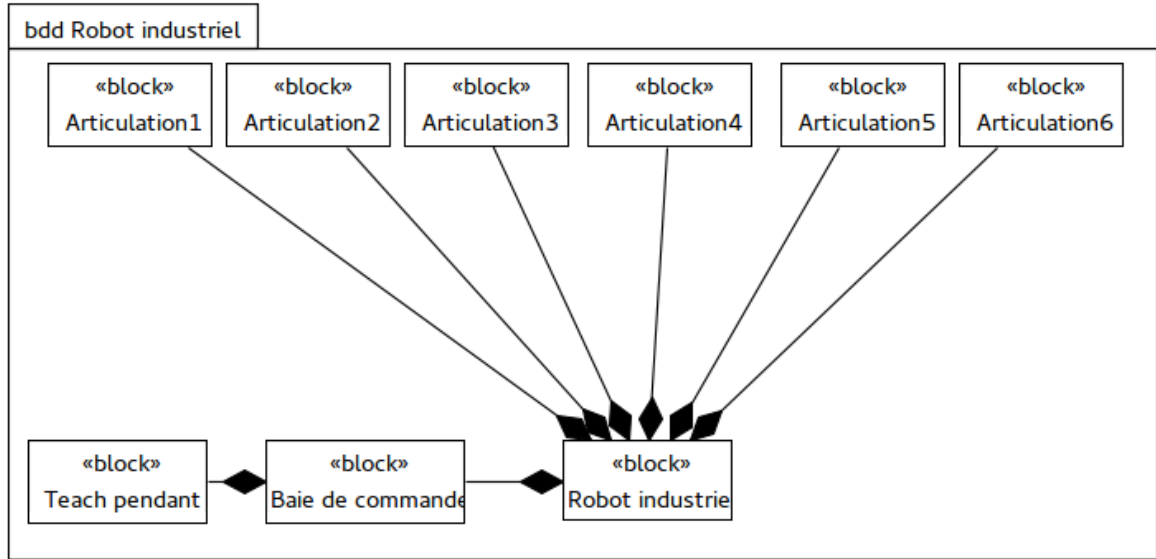


FIGURE 3.3 – Diagramme de définition de bloc

Ici on peut voir les différents constituants du robot : les 6 articulations, la baie de commande et son *Teach pendant* (interface homme-machine).

Enfin on peut s'intéresser aux constituants des articulations, en particulier voici le diagramme de blocs internes de la première articulation (Internal block diagram figure 3.4) :

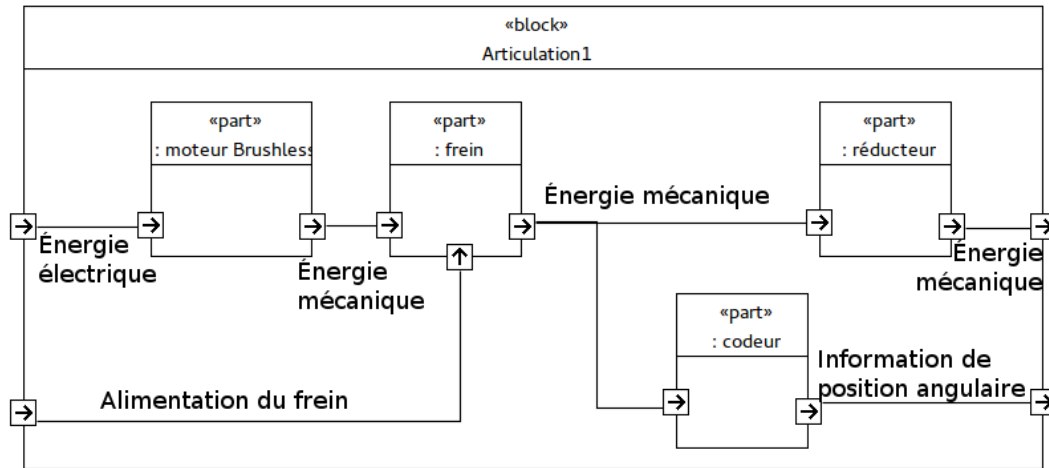


FIGURE 3.4 – Diagramme de bloc interne de la première articulation

Dans l'articulation on retrouve la chaîne de transmission de puissance : le moteur synchrone à aimants permanents (brushless) et le réducteur harmonique drive. Le codeur absolu permet le retour d'information angulaire de l'articulation. Le frein permet l'arrêt d'urgence du robot.



## 3.2 Formations pédagogiques

En France, la robotique industrielle est en retard. En 2009, notre pays comptait 34 000 robots, contre 62 000 chez nos voisins italiens et 144 000 en Allemagne (source IFR). Les responsables politiques ont conscience de ces problèmes, François Hollande, Président de la république française et Arnaud Montebourg, Ministre du redressement productif ont lancés en septembre 2013 les 34 plans pour relancer l'industrie, la robotique en fait partie. Le syndicat des machines et technologie de production (SYMOP) a créé le terme "robotcaliser", robotiser pour ne pas délocaliser. La formation est primordiale : « il faut promouvoir la robotique dans les filières techniques grâce à l'intégration de travaux pratiques. Assurer un lien entre système éducatif et entreprise est essentiel ».

Cette partie présente les points des programmes où je pense pouvoir utiliser les robots industriels. Je détaillerai une séquence pédagogique pour le bac scientifique (S) option Sciences de l'Ingénieur (SI). Puis je présenterai plusieurs points du programme où les robots industriels sont utilisables, particulièrement en seconde, bac sciences et technologies de l'industrie et du développement durable (STI2D) et en brevet de technicien supérieur (BTS).

Pour travailler avec les apprenants, le robot industriel devra être installé en salle de manipulation. Je propose de contextualiser le problème par une installation d'une petite chaîne de production industrielle très simple et très commune au PME/PMI. Par exemple on peut associer le robot avec un convoyeur où arrivent des pièces et un lieu de stockage, cette cellule représenterait une cellule de palettisation (figure 3.5).



FIGURE 3.5 – Cellule de palettisation

### 3.2.1 Séquence pédagogique

Avec les apprenants du bac S SI, il est possible d'utiliser les robots industriels dans diverses séquences pédagogiques. Je vais détailler la séquence pédagogique "Analyser la structure et le comportement de la chaîne d'information" (figure 3.6). Cette séquence permettra de clôturer l'étude de la chaîne d'information par une étude de ses éléments constitutants.

Fiche séquence : Analyser la structure et le comportement de la chaîne d'information		Sciences de l'ingénieur
Objectifs de Formation : Connaissances traitées		
<b>ANALYSER</b> <b>Chapitre A210 bis</b> : Justifier la solution choisie (chaîne d'information) <b>Chapitre A3</b> : Traiter des données de mesures (valeur moyenne, médiane, caractéristique, etc.) Identifier des valeurs erronées Quantifier des écarts entre des valeurs attendues et des valeurs mesurées <b>Chapitre A3</b> : Rechercher et proposer des causes aux écarts constatés	<b>MODELISER</b> <b>Chapitre B15</b> : Identifier la nature de l'information et la nature du signal <b>Chapitre B21</b> : Associer un modèle à une source d'énergie <b>Chapitre B22</b> : Associer un modèle aux composants d'une chaîne d'information <b>Chapitre B41</b> : Comparer les résultats obtenus (amplitudes et variations) avec les données du cahier des charges fonctionnel	<b>EXPERIMENTER</b> <b>Chapitre C11</b> : Qualifier les caractéristiques d'entrée - sortie d'un capteur Justifier le choix d'un capteur ou d'un appareil de mesure vis-à-vis de la grandeur physique à mesurer Justifier les caractéristiques (calibre, position, etc.) d'un appareil de mesure <b>Chapitre C12</b> : Identifier le comportement des composants du système Prévoir l'ordre de grandeur de la mesure <b>Chapitre C13</b> : Identifier la nature et les caractéristiques des grandeurs en divers points de la chaîne d'information Maîtriser les fonctions des appareils de mesures et leurs mises en œuvre <b>Chapitre C21</b> : Mettre en œuvre un appareil de mesure Paramétrer une chaîne d'acquisition <b>Chapitre C24</b> : Générer un programme et l'implanter dans le système cible (Routines, procédures, etc.) Systèmes logiciels à événements discrets) <b>Chapitre C25</b> : Analyser les résultats expérimentaux Traiter les résultats expérimentaux, et extraire la ou les grandeurs désirées
<b>COMMUNIQUER</b> <b>Chapitre D11</b> : Rechercher une information dans un dossier technique Effectuer la synthèse des informations disponibles dans un dossier technique		Niveau de compétences à atteindre (rappel) <b>A210 : B (B en T)</b> <b>A3 : C (C en T)</b> <b>B15 : C (C en T)</b> <b>B22 : C (C en T)</b> <b>B41 : C (C en T)</b> <b>C11 : C12 ; C13 : C (C en T)</b> <b>C21 : C24 : C (C en T)</b> <b>D11 : C (C en T)</b>
<b>C11 : Analyser un système fonctionnellement et structurellement</b> <b>C13 : Analyser des constituants d'un système réel d'un point de vue structurel et comportemental</b>		
Thème sociétale :	l'information	
Problématiques :	Se localiser angulairement	
Prérequis :	Séquences d'analyse et de modélisation du comportement de la chaîne d'information	

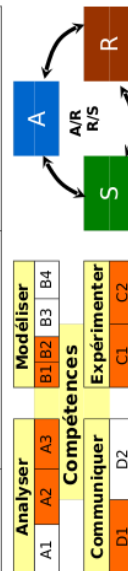


FIGURE 3.6 – fiche pédagogique

En particulier les apprenants étudieront la structure de la fonction acquérir de la chaîne d'information (figure 3.7). Elle se déroulera en classe de terminale, en milieu d'année. Son thème sociétal est l'information. Sa problématique est : se localiser angulairement. Cette séquence permettrait de travailler sur plusieurs centres d'intérêt, en particulier :

- CI1 : Analyser un système fonctionnellement et structurellement
- CI3 : Analyser des constituants d'un système réel d'un point de vue structurel et comportemental

Les objectifs de la séquence sont très diverses et font partie des quatre objectifs de formation analyser, modéliser, expérimenter et communiquer. Pour bien réussir cette séquence, les apprenants devront avoir suivi des séquences d'analyse et de modélisation du comportement de la chaîne d'information. Ces séquences se déroulent généralement en classe de première.

Tout d'abord je réaliserai une évaluation diagnostique d'une heure afin de vérifier les prérequis et elle ouvrira vers des questions sur la structure de la chaîne d'information. Cette séquence sera dirigée par les séances de travaux pratiques (TP), c'est pourquoi je prévois en une rotation de quatre séances de TP. Une séance de deux heures d'apport de connaissance viendra compléter les manques de l'évaluation diagnostique et asseoir les objectifs des TP. Une séance de deux heures de travaux dirigés complètera les acquis. Enfin, je terminerai par une séance d'évaluation sommative.

- Séance 1 (1h) : évaluation diagnostique  
Vérification des prérequis et ouverture vers la structure de l'acquisition
- Séance 2 (2h) : Travaux pratiques : Connaître sa position simplement  
Potentiomètre, codeur incrémental, capteur fin de course
- Séance 3 (2h) : Travaux pratiques : Connaître sa position précisément  
Codeur absolu
- Séance 5 (2h) : Travaux pratiques : Convertir les informations numériques en signal réel  
Convertisseur CNA
- Séance 6 (2h) : Travaux pratiques : Acquérir une information analogique  
Convertisseur CAN
- Séance 7 (2h) : Apport de connaissances : cette séance reprendra les points non réussis de l'évaluation diagnostique et validera les objectifs des TP
- Séance 8 (2h) : Travaux dirigés : mise en pratique des connaissances par des illustrations pratiques au travers d'exercice
- Séance 9 (1h) : Évaluation sommative.

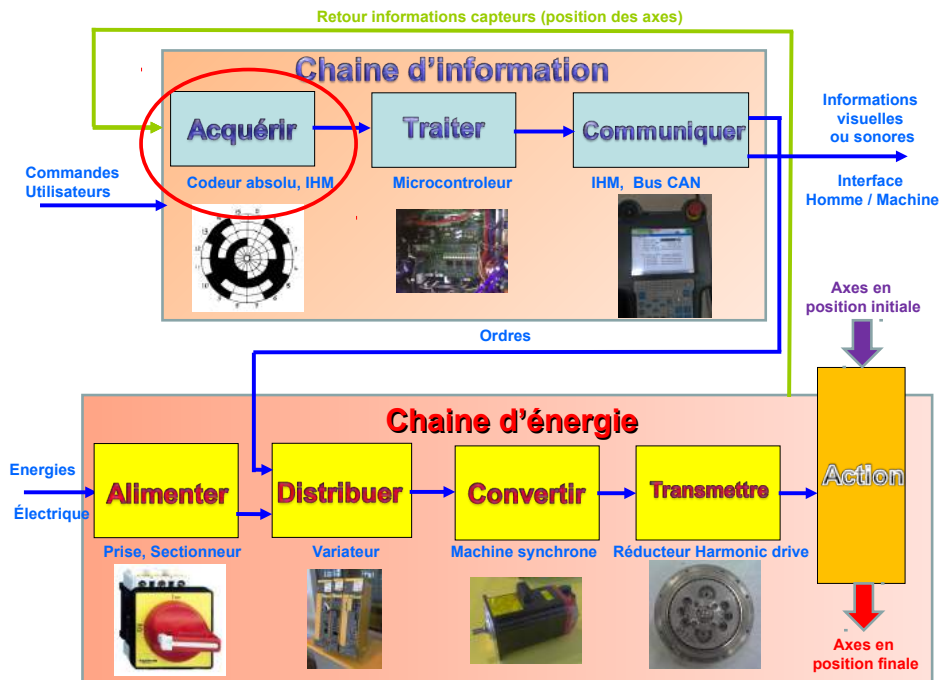


FIGURE 3.7 – Chaine d'énergie et d'information

### Connaître sa position simplement

Sur ce TP les apprenants travailleront sur un codeur incrémental, un potentiomètre et un capteur fin de course. Sur le codeur incrémental (figure 3.8) ils pourront par exemple déterminer la résolution du capteur, les technologies des capteurs de présence (diode et photo-diode), l'intérêt de mettre deux pistes, un top zero...

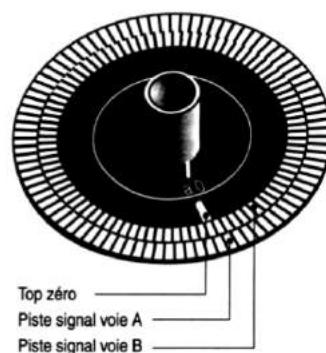


FIGURE 3.8 – Disque de codeur incrémental

Avec le potentiomètre, les apprenants étudieront les montages du type pont diviseur de tension.

Enfin, le capteur fin de course sera étudié pour ses utilisations en initialisation, sécurité...

### Connaître sa position précisément

Sur ce thème je pourrais utiliser un bras du robot Fanuc composé d'un moteur et d'un codeur Fanuc (figure 3.10). Ce codeur est composé de 256 positions codé en code gray. Je voudrais qu'ils découvrent le principe du codage de position. Je leur fournirai un disque de codage en code binaire naturel et en code binaire gray (figure 3.9).

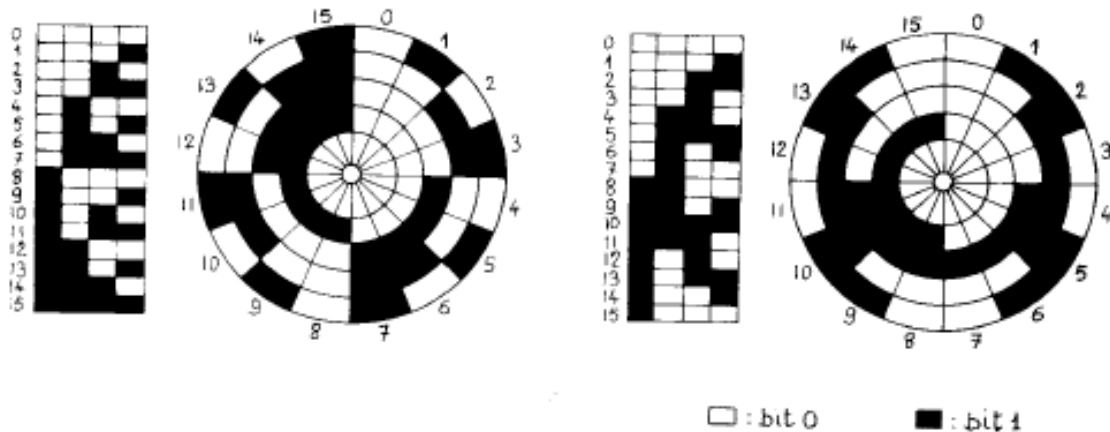


FIGURE 3.9 – Disque de codage en binaire naturel (à gauche) et en code binaire gray (à droite)

Grâce à cela ils découvriront l'intérêt du code gray par rapport au naturel (synchronisation). Ensuite ils pourront visualiser les signaux en sortie du capteur (figure 3.10).

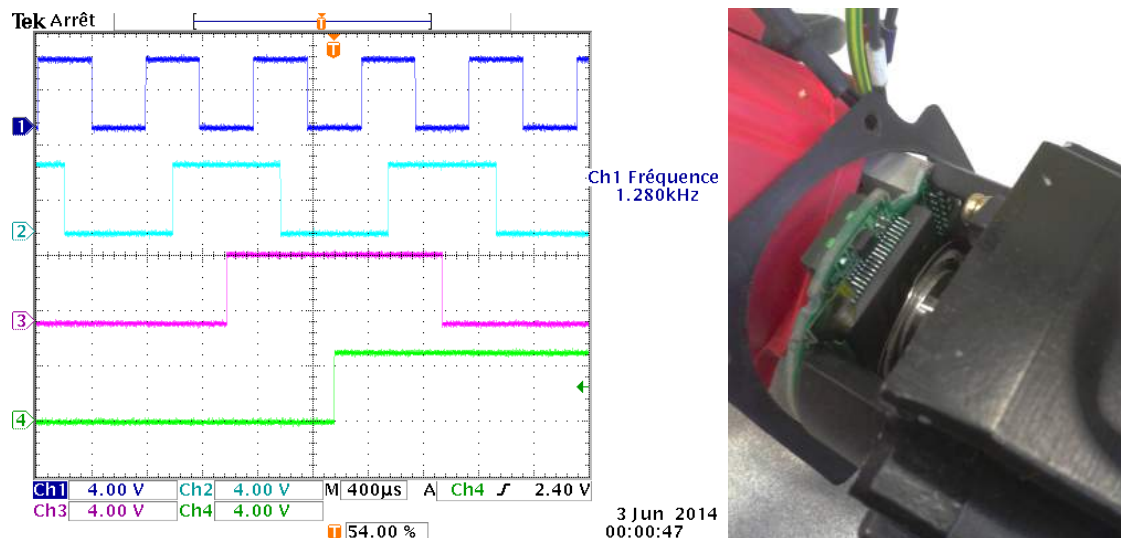


FIGURE 3.10 – Relevé de 4 voies du codeur et un le codeur absolu Fanuc

Ensuite grâce au nombre de fils ou de bande de codage ils détermineront le nombre de position (8 fils  $\rightarrow 2^8 = 256$  positions), la précision angulaire de l'articulation (au travers du réducteur), la précision obtenue au travers d'un bras de deux mètres.

## Convertir les informations numériques en signal réel et inversement

Au travers de ce TP je voudrais que les apprenants prennent conscience de la différence entre les signaux réels et les signaux numériques uniquement codés par des 0 et des 1. Je leur fournirais des schémas de montages de convertisseurs simples (R-2R figure 3.11 et montage à AOP). Ils détermineront le quantum, les erreurs de quantification, d'offset, de linéarité et de gain.

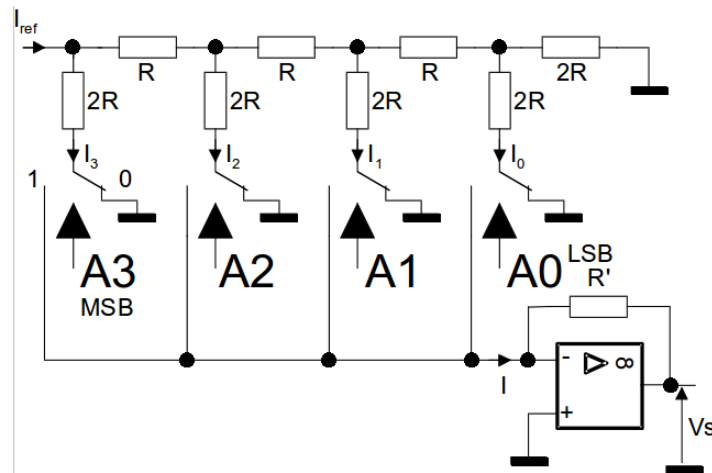


FIGURE 3.11 – CNA montage R-2R

## 3.3 Autres possibilités d'enseignement

Les robots industriels sont utilisables dans de nombreuses formations, je vais tout d'abord parler des possibilités en seconde, en particulier pour un projet de création et innovation technologiques (CIT). Ensuite les points du programme du bac STI2D et S SI seront évoqués. Enfin j'annoncerai des ouvertures possibles en BTS.

### 3.3.1 Ouverture en seconde

Avec des apprenants en seconde, il est possible d'utiliser le thème de la robotique pour un projet en création et innovation technologique (CIT). L'historique de la robotique serait le cœur du projet : Le premier robot manipulateur industriel, appelé Unimate, était un descendant direct des télémanipulateurs développés pour les besoins du nucléaire. Créé par George Devol dans les années 1950, il fut utilisé pour travailler sur les chaînes d'assemblage de General Motors à partir de 1961. Parmi les robots industriels, le Kuka Famulus, qui date de 1973, fut le premier robot à 6 axes entraînés de façon électromécanique. Le Robot Delta, imaginé en 1985 par Reymond Clavel, professeur à l'École Polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), possède un bras de manipulation formé de 3 parallélogrammes. Son brevet tombe dans le domaine public en 2007 et différents constructeurs devraient alors sortir leur propre robot delta. Le Jet Propulsion Laboratory (JPL) développe un robot industriel hexapode (à 6 pattes) du nom de Lemur. Lemur aura pour mission de monter, assembler et réparer des installations spatiales. Pesant moins de 5 kg, il offre la possibilité innovante d'adapter différents outils sur chacun de ses membres.

Avec cela les apprenants pourront compléter cette étude par la comparaisons des différents types de robots industriels, leurs intérêts, particularités, avantages, inconvénients...

### **3.3.2 Autres enseignements en STI2D et S SI**

En première et terminale, que ça soit en STI2D ou S SI les robots industriels sont utilisables dans diverses compétences.

Voici une liste des principales compétences (référence du programme de STI2D) pouvant être étudié :

- étude de la chaîne d'énergie (compétence 2.1.1)
- étude de la chaîne d'information (compétence 2.1.2)
- représentation symbolique SysML, diagramme des flux d'énergie, schéma cinématique (compétence 2.2.2)
- étude des matériaux, théorie des poutres travail par éléments finis sous solidworks (compétence 2.3.2, 2.3.3 et 3.1.1 en tronc commun et 2.2 en spécialité éco-conception)
- communication via la bus CAN, codage de l'information (compétence 3.1.4)
- moteur électrique, réducteur, frein (compétence 3.2.1)
- capteur de position : codeur absolu à nombre de tour incrémentale (compétence 3.2.3)
- communication Ethernet (compétence 3.2.4 en tronc commun et 2.2 en spécialité éco-conception)
- résistance des matériaux (théorie et solidworks) (cf sujet 0 STI2D)
- cinématique 2D/3D
- représentation CAO (sous Solidworks)
- utilisation du logiciel de simulation de cellules robotisées Roboguide (pour les projets)

### **3.3.3 Autres enseignements en BTS**

Dans les formations en BTS, les apprenants doivent réaliser un projet. Cette épreuve permet d'évaluer la capacité du candidat à conduire une démarche de projet en relation avec le développement, la pérennisation de la PME et la gestion des risques. Ils impliquent l'utilisation courante et efficace d'outils informatiques adaptés. Elle permet également d'apprécier les capacités du candidat à exercer les responsabilités caractéristiques d'un assistant de gestion de PME.

Les apprenants pourront travailler sur une installation de robots industriels, en particulier ils pourront par exemple mettre en sécurité une cellule robotisée. Dans ce projet ils devront étudier les normes de sécurité en vigueur, réaliser l'installation d'arrêts d'urgence et verrous électromagnétiques.

### 3.3.4 Exemple de travaux pratiques

Dans cette partie je vais parler du travail pouvant être réalisé par les apprenants. En particulier je vais montrer quelques activités sous Solidworks (résistance des matériaux et étude environnementale avec Sustainability), étude cinématique et utilisation de la connexion Ethernet.

#### Cinématique et résistance des matériaux

Les robots industriels sont une montagne de ressources pour réaliser de la RDM. Je vais me limiter à quelques exemples d'utilisations sous solidworks.

Une telle étude est utilisable en STI2D et en S SI, une fiche séquence (figure 3.12) pour S SI apporte ses principales informations. Cette séquence permettra de travailler sur les particularités de ces robots industriels : l'association série de ses articulations et la précision statique limitée.

Cette séquence permettra de travailler sur plusieurs centres d'intérêt, en particulier :

- Expérimenter et mesurer sur un système réel pour évaluer ses performances
- Analyser des constituants d'un système réel d'un point de vue structurel et comportemental
- Concevoir et utiliser un modèle relatif à un système en vue d'évaluer les performances de la chaîne d'énergie

Les objectifs de la séquence sont très diverses et font partie des quatre domaines Analyser, modéliser, expérimenter et communiquer. Certains doivent être travaillés en première mais cette séquence est destinée à un début de terminale et a pour objectif de finaliser les acquis de première et commencer ceux de terminale.

Les prérequis de cette séquence sont (référence S SI) :

- Définir un système et ses frontières d'étude (compétence A21),
- traiter des données de mesures (compétence A3),
- isolation d'un système pour une étude statique (compétence B11),
- construire un schéma cinématique (compétence B25),
- qualifier les caractéristiques entrée sortie d'un capteur (compétence C11),
- analyser des résultats expérimentaux (compétence C25)
- rechercher une information dans un dossier technique (compétence D11).



Fiche séquence : Expérimenter, modéliser et simuler le comportement dynamiques d'un système	Sciences de l'ingénieur			
Objectifs de Formation : Connaissances traitées				
<b>ANALYSER</b> <b>Chapitre A21 :</b> Définir le système et sa frontière d'étude <b>Chapitre A22 :</b> Analyser l'environnement d'un système, ses contraintes <b>Chapitre A23 :</b> Décrire le fonctionnement d'un système <b>Chapitre A24 :</b> Identifier les évolutions possibles d'un système <b>Chapitre A25 :</b> Identifier la famille d'un matériau <b>Chapitre A26 :</b> Mettre en relation les propriétés du matériau avec les performances du système <b>Chapitre A27 :</b> Analyser les sollicitations dans les composants <b>Chapitre A28 :</b> Analyser les déformations des composants <b>Chapitre A29 :</b> Analyser les contraintes mécaniques dans un composant <b>Chapitre A30 :</b> Traiter des données de mesures (valeur moyenne, médiane, caractéristique, etc.) <b>Chapitre A31 :</b> Identifier des valeurs erronées	<b>MODELISER</b> <b>Chapitre B11 :</b> Isoler un système et justifier l'isolement <b>Chapitre B12 :</b> Identifier les grandeurs traversant la frontière d'étude <b>Chapitre B25 :</b> Construire un modèle et le représenter à l'aide de schémas <b>Chapitre B26 :</b> Préciser les paramètres géométriques <b>Chapitre B27 :</b> Etablir la réciprocity mouvement relatif/actions mécaniques associées <b>Chapitre B28 :</b> Choisir le modèle de solide, déformable ou indéformable selon le point de vue <b>Chapitre B29 :</b> Modéliser le réel <b>Chapitre B30 :</b> Modéliser les actions mécaniques de contact ou à distance <b>Chapitre B31 :</b> Caractériser les sollicitations dans les composants <b>Chapitre B32 :</b> Caractériser les déformations des composants <b>Chapitre B33 :</b> Caractériser les contraintes mécaniques dans un composant <b>Chapitre B34 :</b> Déterminer les parties les plus sollicitées dans un composant <b>Chapitre B35 :</b> Déterminer les valeurs extrêmes des déformations <b>Chapitre B36 :</b> Déterminer des concentrations de contraintes dans un composant <b>Chapitre B43 :</b> Valider l'influence de la structure sur les performances du système <b>Chapitre B44 :</b> Proposer des modifications structurelles pour améliorer les performances du système	<b>EXPERIMENTER</b> <b>Chapitre C11 :</b> Qualifier les caractéristiques d'entrée - sortie d'un capteur <b>Chapitre C12 :</b> Justifier le choix d'un capteur ou d'un appareil de mesure vis-à-vis de la grandeur physique à mesurer <b>Chapitre C13 :</b> Justifier les caractéristiques (calibre, position, etc.) d'un appareil de mesure <b>Chapitre C14 :</b> Identifier le comportement des composants du système <b>Chapitre C15 :</b> Prévoir l'ordre de grandeur de la mesure <b>Chapitre C16 :</b> Identifier la nature et les caractéristiques des grandeurs en divers points de la chaîne d'information <b>Chapitre C17 :</b> Maîtriser les fonctions des appareils de mesures et leurs mises en œuvre <b>Chapitre C21 :</b> Mettre en oeuvre un appareil de mesure <b>Chapitre C22 :</b> Paramétrer une chaîne d'acquisition <b>Chapitre C23 :</b> Analyser les résultats expérimentaux <b>Chapitre C24 :</b> Traiter les résultats expérimentaux, et extraire la ou les grandeurs désirées	<b>COMMUNIQUER</b> <b>Chapitre D11 :</b> Rechercher une information dans un dossier technique <b>Chapitre D12 :</b> Effectuer la synthèse des informations disponibles dans un dossier technique	Niveau de compétences à atteindre (rappel) <b>A21 : B (C en 1ère)</b> <b>A216 : A (C en 1ère)</b> <b>A217 : B (C en T)</b> <b>A3 : A (C en 1ère)</b> <b>B11 : B (C en 1ère)</b> <b>B12 : B (C en T)</b> <b>B25 : C (C en 1ère)</b> <b>B27 B28 : A (C en T)</b> <b>B210 : A (B en T)</b> <b>B34 : B (C en T)</b> <b>B43 : B (C en T)</b> <b>C11;C12;C13 : A (C en T)</b> <b>C21 : A (C en T)</b> <b>C25 : B (C en T)</b> <b>D11 : C (C en T)</b>
<div>C12 : Expérimenter et mesurer sur un système réel pour évaluer ses performances</div> <div>C13 : Analyser des constituants d'un système réel d'un point de vue structurel et comportemental</div> <div>C15 : Concevoir et utiliser un modèle relatif à un système en vue d'évaluer les performances de la chaîne d'énergie</div>				
<div><div><div>Analyser</div><div>A1A2A3</div></div><div><div>Modéliser</div><div>B1B2B3B4</div></div><div><div>Expérimenter</div><div>C1C2</div></div><div><div>Compétences</div><div>CommuniquerD1D2</div></div></div>				
<div><div><div>A</div><div>S</div><div>R/S</div></div><div>R</div></div>				
Thème sociétale : Structure et construction				
Problématiques : Vérifier qu'une structure résiste aux efforts extérieurs				
Prérequis : Schéma cinématique, théorie sur la RDM				

Les apprenants pourront étudier théoriquement la résistance des matériaux d'une poutre pour ensuite l'appliquer à un bras du robot. Ensuite l'étude complète sera réalisée à l'aide de solidworks (figure 3.13). Ainsi il sera possible d'étudier une ou plusieurs pièces (voire le robot complet) en terme de contrainte et en terme de déplacement.

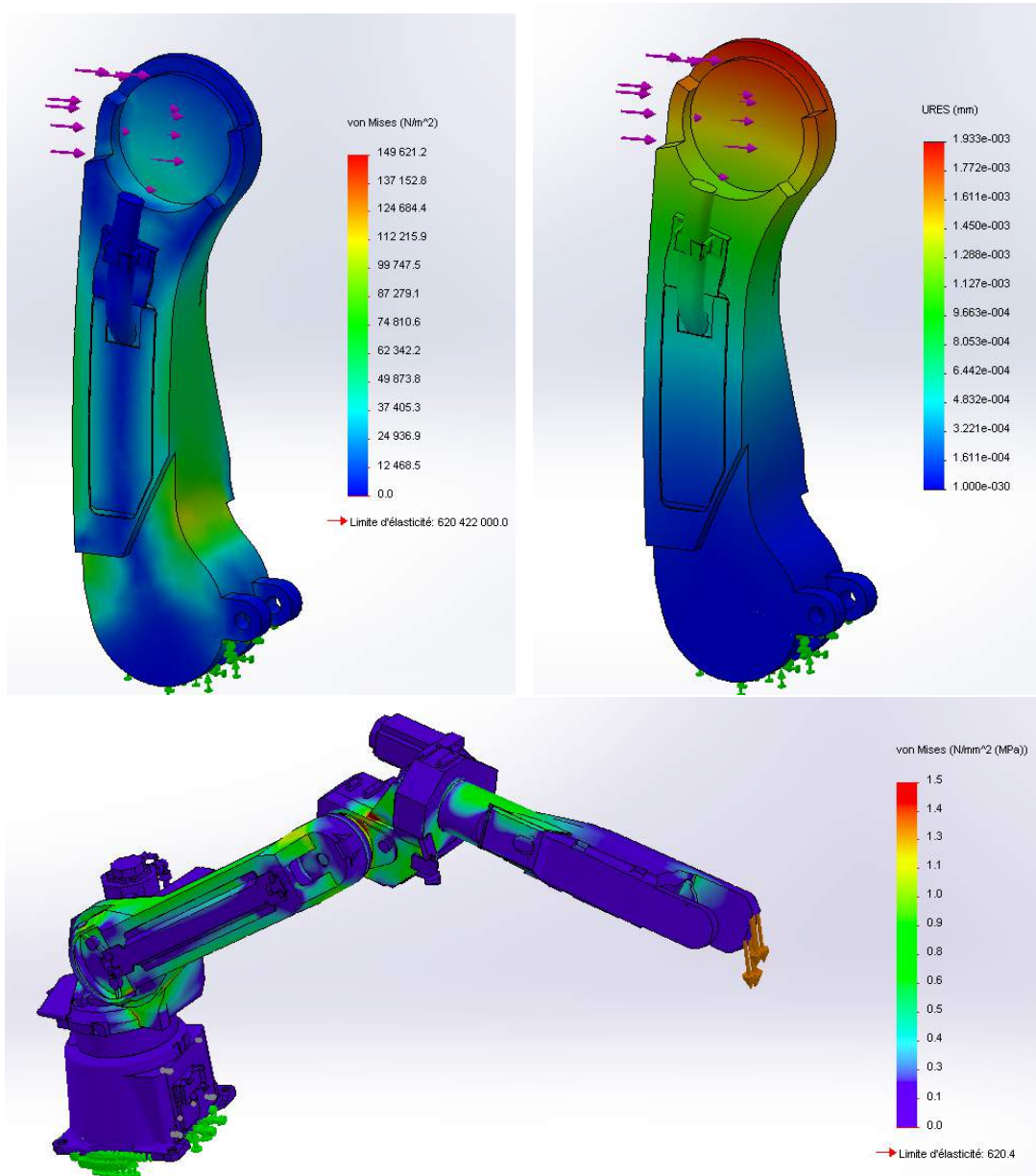


FIGURE 3.13 – Étude RDM d'un bras (contrainte et déplacement)

Un autre TP aura quant à lui but d'étudier les articulations du robot, de réaliser le schéma cinématique 3D du robot et d'étudier son espace accessible. Durant ce TP les apprenants utiliseront l'application développée dans la partie scientifique (figure 3.14). Ce TP permettra aux apprenants de développer leur vision dans l'espace.

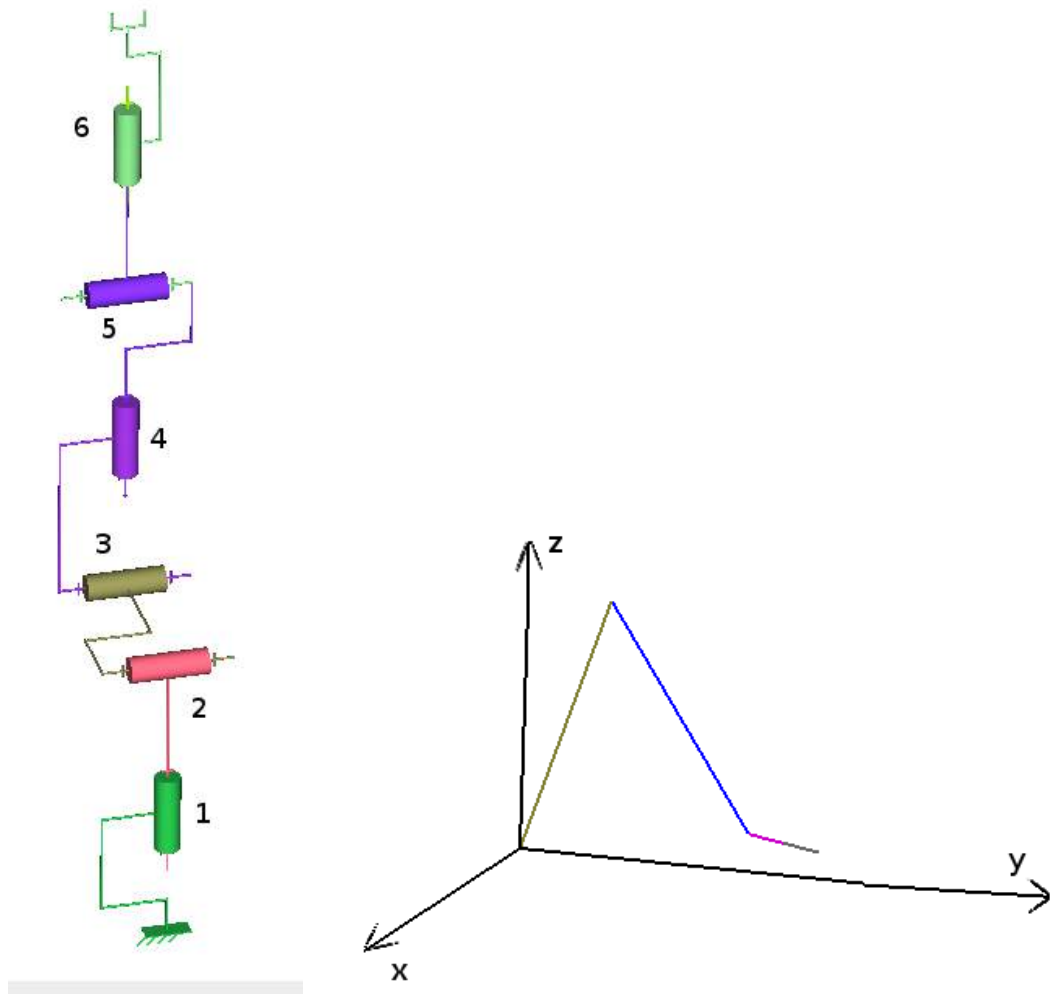


FIGURE 3.14 – Étude cinématique du robot (schéma cinématique et modèle géométrique)

## Étude environnementale

Une étude environnementale du robot est aussi réalisable. L'analyse du cycle de vie (ACV) sera assisté par le module sustainability de solidworks (3.15). Ainsi les apprenants étudieront les impacts lors de la fabrication, distribution, utilisation et fin de vie des produits. On pourra mettre en évidence plusieurs critères d'éco-conception tels que les matériaux, la conception, les procédés d'obtention, les transports, les emballages, les consommations et la recyclabilité. Plusieurs robots pourront être comparés.

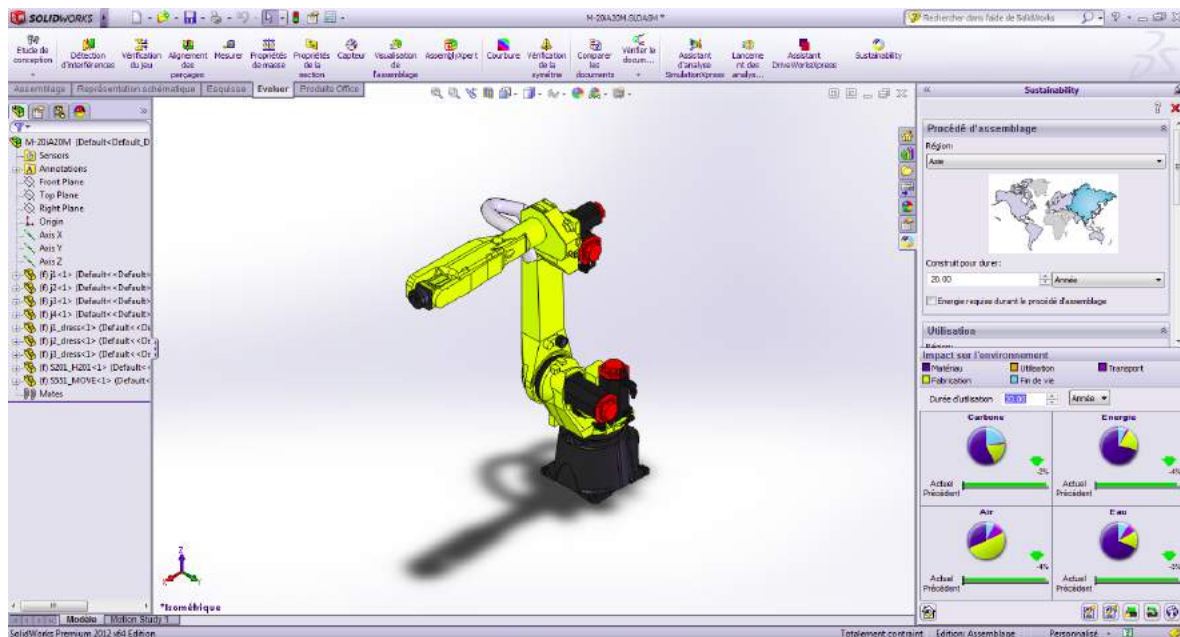


FIGURE 3.15 – Analyse du cycle de vie par solidworks sustainability

## Communication Ethernet

Enfin, les robots industriels peuvent être supervisés à distance à travers une communication Ethernet (figure 3.16).

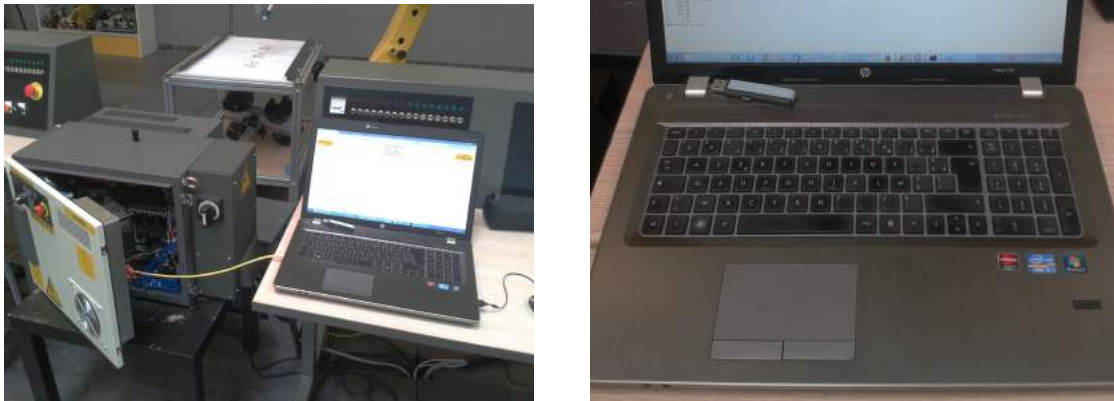


FIGURE 3.16 – Communication

Cette communication requiert un paramétrage du robot et des organismes reliés. Ce travail peut être intégré dans une séquence de protocole de communication.

# Conclusion

Dans la robotique industrielle, la France est en retard sur ses voisins. Les politiques en ont conscience, plusieurs associations sont nées de ce manque, elles souhaitent supprimer les idées reçues, aider les entreprises à investir dans la robotique et valorisent les formations.

Ce travail contient dans une première partie scientifique un modèle de connaissance, afin de compléter le triptyque réel, simulé, attendu. La seconde partie traite des utilisations des robots industriels dans la pédagogie, ce sont des systèmes mécatroniques. Cette partie met en avant la pluralité des enseignements possibles.

Ce dossier industriel m'a tout d'abord permis de rencontrer une entreprise. J'ai travaillé avec leurs employés sur leurs produits. Ce travail est un échange j'ai aidé l'entreprise à combler un manque et ils m'ont permis d'utiliser leurs matériels à des fins pédagogiques. Ce dossier industriel m'a donc permis de faire évoluer autant mon expérience industrielle que mon expérience pédagogique.

# Référence

La documentation FANUC est disponible en partie sur leur site : <http://www.fanucrobotics.fr/>, le reste m'a été fourni directement par l'entreprise.

Le document de Jean-Louis BOIMOND intitulé Robotique, le document est disponible : [http://laris.univ-angers.fr/\\_attachments/jean-louis-article-2/Cours\\_robotique.pdf](http://laris.univ-angers.fr/_attachments/jean-louis-article-2/Cours_robotique.pdf)

Documentation de la librairie OpenGL : <http://www.opengl.org/>

Documentation de la librairie OpenCV : <http://opencv.org/>

Le site du SYMOP : <http://www.symop.com/fr/>

Document « Robotisation mode d'emploi, réussir son projet de robotisation » : [http://www.robotcaliser.com/config/includes/common/dw.asp?PF=Publications&NF=guide-robotisation\\_0001.pdf](http://www.robotcaliser.com/config/includes/common/dw.asp?PF=Publications&NF=guide-robotisation_0001.pdf)

Le site de robocaliser : <http://www.robotcaliser.com/>

Le site de l'IFR (International Federation of Robotics) : <http://www.ifr.org/>

Articles utilisés :

<http://www.gralon.net/articles/materiel-et-consommables/materiels-industriels/article-les-robots-industriels-285.htm>  
<https://sites.google.com/site/gpa141ginfberm/home>  
<http://www.robots.com/education>