



**HAL**  
open science

## Palettisation et contrôle robotisés

Ali Yasar

► **To cite this version:**

| Ali Yasar. Palettisation et contrôle robotisés. Automatique / Robotique. 2010. dumas-00546109

**HAL Id: dumas-00546109**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00546109>**

Submitted on 13 Dec 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET  
METIERS**

**CENTRE REGIONAL ASSOCIE DE RHONE ALPES**

---

**MEMOIRE**

présenté en vue d'obtenir le

**DIPOME d'INGENIEUR CNAM**

**SPECIALITE : ELECTRONIQUE ET AUTOMATISME INDUSTRIEL**

**OPTION : AUTOMATISME INDUSTRIEL**

par

**Ali YASAR**

---

**Titre : Palettisation et contrôle robotisés**

Soutenu le 15 Septembre 2010

---

**JURY**

**PRESIDENT :** Monsieur Pierre CHANTRE

**MEMBRES :** Monsieur Jean ROZINOER  
Monsieur Bernard GARAUDEE  
Monsieur Grégory PAILLET  
Monsieur Gille LINET

## Remerciements

Ce travail a été effectué au sein de l'entreprise Florence et Peillon. Lorsque nous avons commencé ce projet, l'entreprise était en pleine activité. La crise économique qui nous touche depuis le premier semestre 2009 a entraîné un gel des projets en cours et un retard sur l'application industrielle que présente ce mémoire.

Je remercie tous ceux qui ont œuvré pour le maintien du projet de palettisation ainsi que toutes les personnes qui ont participé à l'étude :

- M. Pirio Antoine, Responsable de production.
- M. Peret Alain, Responsable du laboratoire de métrologie.
- M. Berque Didier, Responsable méthode et industrialisation
- Mlle Nuizière Mallorie, Responsable Qualité
- M. Pocheron Eric, Roboticien Fonderie
- M. Desousa Michel, Technicien Fonderie

Je remercie également mon professeur M. Rozinoer Jean pour son soutien et ces conseils.

Enfin je remercie tout particulièrement mon épouse de son soutien et de sa présence.

## Table des matières

<b>Introduction</b>	5
<b>Chapitre1. Définitions des Objectifs</b>	6
1.1. Présentation	7
1.1.1. Présentation de l'entreprise	7
1.1.2. Le produit	7
1.1.3. Cycle de fabrication	8
1.1.4. Présentation de l'îlot de moulage.	9
1.2. Objectifs du mémoire	9
1.2.1. Problématique	10
1.2.2. Elément de sortie du nouvel îlot	10
1.3. Analyses fonctionnelles	11
1.3.1. Analyse fonctionnelle de l'îlot	11
1.3.2. Analyse fonctionnelle du produit	11
1.4. Cahier des charges	13
<b>Chapitre2. Eléments de robotique</b>	14
2.1. Structure des robots	15
2.1.1. Les Articulations	16
2.1.2. Degrés de liberté d'un mécanisme	16
2.1.3. Système de coordonnées en robotique	17
2.2. Changement de coordonnées direct	19
2.2.1. Modèle géométrique direct	19
2.2.2. Modèle cinématique direct	21
2.3. Changement de coordonnées inverse	22
2.3.1. Modèle géométrique inverse	22
2.3.2. Modèle cinématique inverse	24
2.4. Modèles dynamiques	25
2.5. Commande des mouvements	26
2.5.1. La commande PID avec anticipation	26
2.5.2. Principe de la compliance	28
<b>Chapitre3. Présentation générale de l'îlot</b>	32
3.1. Structure et Implantation dans l'atelier	33
3.1.1. Nouvelle architecture de l'îlot	33
3.1.2. Intégration à l'îlot de moulage	35
3.2. Commande de la cellule de palettisation	36
3.2.1. Architecture générale	36
3.2.2. Structures de la commande	36
3.2.3. Rôle de chaque acteur	37
3.2.4. Programmes	38
3.2.5. Communication et réseaux	42

<b>Chapitre4. Etude et mise en œuvre des tâches spécifiques</b>	43
4.1. Réalisation de la palettisation	44
4.1.1. Situation actuelle	44
4.1.2. Gestion des entrées sorties grille	45
4.1.3. Gestion de la position des grilles	46
4.1.4. Dépose des pièces	48
4.1.5. Contrôle par le conducteur de l'installation	51
4.2. Réalisation du contrôle de planéité	52
4.2.1. Moyens de contrôle existants	52
4.2.2. Solution générale	52
4.2.3. Positionnement et maintien	53
4.2.4. Elément de mesure et contrôle de la force de poussée	56
4.2.5. Acquisitions et traitement	58
4.2.6. Etalonnage	60
4.2.7. Interface homme machine	60
4.2.8. Mémorisation	61
<b>Chapitre5. Résultats</b>	62
5.1. Résultats techniques	63
5.1.1. Intégration de toutes les tâches prévues dans le cycle de l'îlot.	63
5.1.2. Résultat sur la palettisation	64
5.1.3. Résultat du test planéité	65
5.2. Résultats financiers	66
5.2.1. Respect du budget fixé	66
5.2.2. Retombées économiques	67
<b>Conclusion</b>	69
<b>Annexes</b>	70
<b>Liste des figures</b>	94
<b>Bibliographie</b>	96
<b>Résumé</b>	97

## *Introduction*

L'industrie automobile est très dynamique et en perpétuelle évolution. Voilà 10 ans, l'utilisation des moteurs en aluminium s'est généralisée parmi les différents constructeurs européens. Ces moteurs ont le gros avantage d'être légers.

La fabrication des constituants moteurs représente l'ouverture d'un marché important pour les fabricants de pièces par injection sous pression. Ce processus très mécanisé est idéal pour réaliser les pièces de très grande série. Hormis l'automobile, peu de secteurs justifient l'utilisation d'un nombre de pièces aussi important. Florence et Peillon, fabriquant historique de pièces par injection d'aluminium, se spécialise dans les composants de moteur à explosion à partir des années 80. Cette activité a permis un développement progressif de l'entreprise et une automatisation continue du processus.

Un modèle d'organisation par îlot de production répond aux besoins de l'activité. Ces unités autonomes sont capables de transformer le métal liquide en pièces moulées avec des cadences de fonctionnement très élevées. Ces pièces sont ensuite conditionnées dans des grilles de transport.

L'évolution que l'on observe ces dernières années se focalise sur l'architecture des moteurs. On utilise des pièces de tailles plus importantes. Les avancées dans les techniques de métallurgie permettent de fabriquer des pièces de formes complexes avec une grande précision. Naturellement, l'apparition de nouvelles difficultés a accompagné l'évolution des produits. Très vite, on a ressenti le besoin de diminuer le nombre de manipulations des pièces par le personnel de fabrication, ainsi que d'augmenter la qualité générale du produit.

A partir de ce constat, ce mémoire vous présente l'étude que nous avons réalisée dans nos ateliers pour aboutir à une solution industrielle qui a pour but de faire évoluer le processus de fabrication.

La première partie sera consacrée à la présentation du milieu industriel où se déroule cette étude. Nous verrons ensuite quelle démarche a été utilisée pour définir les besoins et fixer les objectifs de l'étude. Cette partie doit aboutir à la rédaction du cahier des charges, qui stipule l'utilisation d'un îlot robotisé pour la palettisation et le contrôle de planéité des pièces.

La seconde partie apporte les éléments théoriques de robotique que nous utiliserons dans la recherche des solutions techniques. Après une brève présentation des robots industriels, nous présenterons les principes des calculs de transformation, ainsi que des lois de commande utilisées dans ce domaine. Pour plus d'information, nous invitons le lecteur à consulter des ouvrages spécialisés (voir la bibliographie).

Dans les troisième et quatrième parties, nous présentons la cellule de palettisation réalisée pour faire les essais et valider les solutions techniques. La quatrième partie détaille les solutions techniques et les moyens utilisés pour atteindre les objectifs fixés.

Enfin la cinquième partie vous donne quelques résultats techniques ainsi que les retombées économiques que l'on peut attendre de cette application industrielle.

## **Chapitre1. Définitions des Objectifs**

## 1.1. Présentation

### 1.1.1. Présentation de l'entreprise

Florence et Peillon est aujourd'hui l'un des leaders français dans le secteur de la fonderie sous pression. Elle a intégré dans ses différents processus le moulage, l'usinage, l'assemblage avec un haut niveau d'automatisation et de contrôle en ligne.

Experte depuis plus de 30 ans des métiers de la fonderie sous-pression, Florence et Peillon s'est spécialisée dans les produits très techniques. Elle conçoit et réalise des pièces de grande série telles que : corps de pompes à huile et à eau, pièces de turbo, pièces de boîtes de vitesse automatiques, composants moteurs, supports moteurs et accessoires.

### 1.1.2. Le produit

Le produit dont il sera question dans ce mémoire est un constituant de moteur à explosion : le carter chapeau 90080 constitué d'une référence principale 10844.

Les moteurs DV sont des 4 cylindres diesel common rail ; ils sont le premier fruit d'un accord entre le groupe PSA et le groupe FORD, PSA étant le concepteur et le fabricant du moteur. Ces moteurs de nouvelle génération sont particulièrement performants, compacts et légers (moins de 100 kg); ils sont constitués d'un bloc et d'une culasse en aluminium.

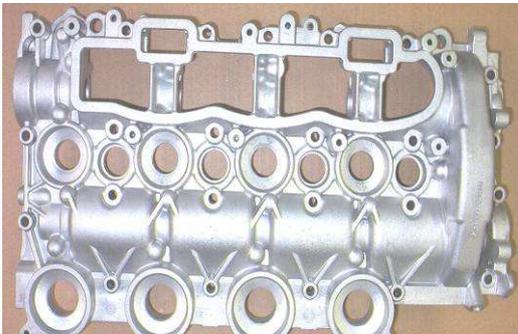


Figure 1: Carter chapeau palier 10 844



Figure 2: Moteur DV4

### 1.1.3. Cycle de fabrication

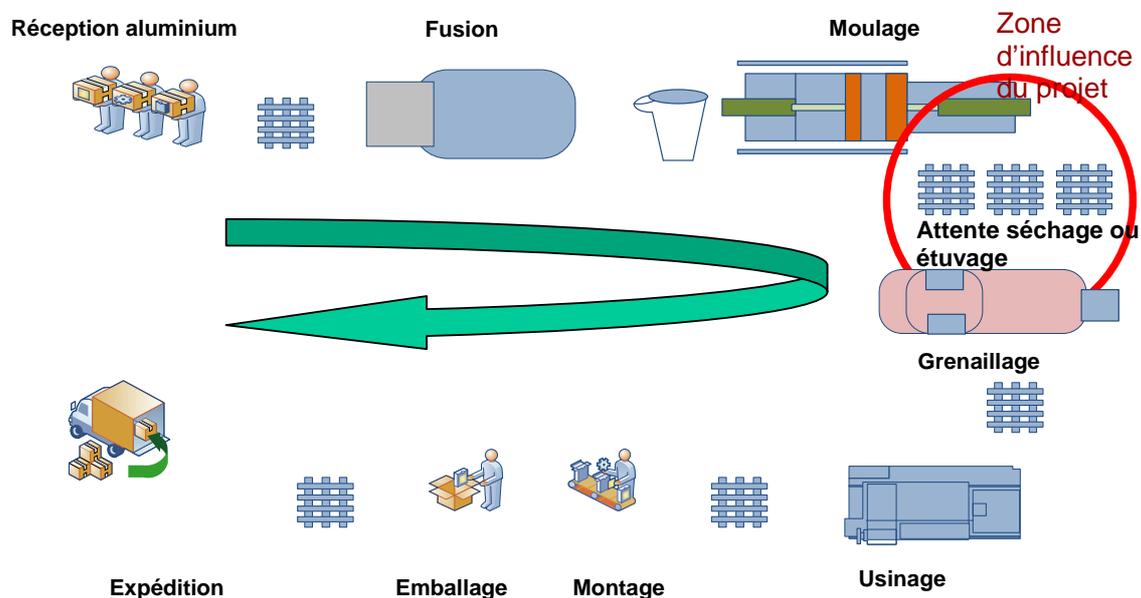
Les différentes opérations réalisées pour l'obtention d'un produit 90080 peuvent être schématisées de la manière suivante :

La matière première est chauffée dans les fours jusqu'à la fusion complète que l'on obtient à environ 600 degrés Celsius. Cet aluminium liquide est ensuite transféré à l'îlot de moulage par injection sous pression. C'est là que la pièce brute est réalisée : l'injection dans un moule donne la forme de la pièce. Après le démoulage, celle-ci est refroidie dans un bac à eau avant d'être détournée (opération de séparation des carottes et autres résidus de moulage : masselottes, bavures).

Le projet consiste à réaliser une extension de cet îlot de moulage. Cette extension doit être conçue pour réaliser : le déchargement du produit après le détournage, des contrôles et une palettisation en grille. Cette palettisation doit s'intégrer dans le flux de fabrication sans engendrer de contraintes pour les opérations qui sont en aval :

- Le séchage : les grilles sont stockées dans une zone en attendant le séchage des pièces. Lorsque les impératifs de livraison l'imposent, l'étuvage des pièces diminue le temps d'attente et accélère leur transit.
- Grenailage : après le séchage, les pièces sont dirigées vers l'installation de grenailage. Cette opération consiste à nettoyer la surface des pièces en projetant des microbilles métalliques. Ici le déchargement reste manuel.

Suite au grenailage, la pièce est livrée à un client interne "Service Usinage". Plusieurs opérations d'usinage seront effectuées sur cette pièce avant l'assemblage, puis l'emballage.



**Figure 3:** Cycle de fabrication de la pièce 90080

### 1.1.4. Présentation de l'îlot de moulage.

La transformation du métal liquide en pièces aluminium est le cœur du métier de l'entreprise. Le processus de transformation est très industrialisé et tout se passe à l'intérieur d'un îlot robotisé.

L'équipement principal de cette transformation est la presse à injection sous pression. Cette presse dispose d'une capacité de fermeture de 1000 tonnes et est capable de réaliser un moulage toutes les 58 secondes. Le produit qui en sort est une grappe en aluminium. Dans cette grappe on retrouve une pièce entourée de tous les déchets recyclables (carotte, masselottes, bavures...). En amont de la presse se trouvent le four de maintien et le chargeur de métal. Leur rôle est d'alimenter la presse en métal liquide. En aval, un bras robotisé exécute le déchargement, puis le refroidissement de la grappe avant de la déposer dans la machine de détourage.

La grappe sort à plus de 200°C. A cette température, la résistance mécanique de l'aluminium est faible et un détourage entraînerait des marques indésirables sur la pièce. Pour éviter cela, le robot refroidit la pièce dans un bac à eau pour faire chuter sa température en dessous de 40° Celsius. La pièce est ensuite séchée par un soufflage avec de l'air comprimé puis détournée.

Le détourage est l'opération qui sépare les éléments non désirés du produit final. La pièce est placée dans une matrice et l'on vient découper par cisaillement toutes les parties périphériques en une seule opération. Ces déchets tombent par gravité sur un tapis de transport. La pièce, débarrassée de tous les éléments indésirables, est ensuite déchargée vers une goulotte d'évacuation.

Le fonctionnement de ces îlots de fabrication n'a connu que peu d'évolutions dans les vingt dernières années. Malgré quelques propositions visant à intégrer des tests dans le cycle de production, aucune étude n'a vu le jour. Les principales raisons sont liées à l'environnement très pollué des îlots de moulage. Les vapeurs d'eau et de lubrifiant qui se dégagent du moule après chaque ouverture de presse ainsi que les chutes de particules en aluminium pendant le transport des pièces rendent l'environnement très difficile.



Figure 4: Îlot de moulage

## 1.2. Objectifs du mémoire

### 1.2.1. Problématique

Comme nous avons pu le voir, la production s'organise en différentes cellules de fabrication entièrement autonomes. Elles sont toutes structurées d'une manière identique. Les nombreux éléments d'entrée sont la matière première et les énergies nécessaires au processus. L'unique élément de sortie, la pièce brute est dégagée à l'aide d'une pelle mécanisée.

Cette fabrication a beaucoup évolué depuis les premiers jours de l'entreprise. Les plus anciens peuvent témoigner d'une époque où l'alimentation en métal liquide de la presse à injecter était réalisée manuellement. Il est aussi vrai, qu'à cette époque la taille et le poids des pièces fabriquées étaient sensiblement inférieurs à ce que l'on peut voir aujourd'hui dans nos ateliers. L'entreprise évoluant dans un secteur fortement concurrentiel a dû s'adapter au marché et faire évoluer son activité. En effet, la fabrication de pièces de grandes tailles dites "Techniques" exige une plus grande maîtrise du métier. Ces pièces sont, de ce fait, les moins touchées par la délocalisation. D'un point de vue commercial, elles offrent également des marges plus intéressantes. A titre d'exemple, nous pouvons citer la pièce de la figure 1 dont les dimensions sont 430 x 240 x 31 millimètres, avec un poids d'environ 3 kilogrammes.

Bien que très intéressante pour l'entreprise, cette évolution apporte aussi des difficultés non négligeables. Les procédés de manipulation et de transport utilisés avec les pièces de petit gabarit ne s'appliquent plus à ces nouveaux produits. Les principaux problèmes sont les suivants :

- Détérioration des pièces lors de la décharge avec pelle.
- Difficulté de manipulation due au poids important.
- Difficulté à répondre aux attentes "qualité" du client.

Cette étude propose une réponse à ces nouveaux besoins. L'objectif est d'équiper les îlots de moulage fabriquant des pièces d'un poids élevé afin de diminuer les opérations manuelles. Nous profiterons de ces modifications pour étudier la possibilité de réaliser des tests en ligne.

### 1.2.2. Élément de sortie du nouvel îlot

L'unique moyen de limiter les opérations manuelles est d'en automatiser une partie. La décharge de la presse à détourner et la palettisation seront robotisées. Après une étude menée sur les contrôles existants, le test de planéité sera également intégré dans la cellule robotisée.



Le produit en sortie d'îlot de moulage devient : une grille de pièces prête au transport avec chariot élévateur, pièces dont l'écart de planéité est garanti en-dessous d'un seuil.

**Figure 5:** Grille remplie de pièces dont la planéité est garantie

### 1.3. Analyses fonctionnelles

« Un projet a abouti lorsqu'il a généré un produit et lorsque ce produit s'intègre parfaitement dans son contexte. »<sup>1</sup>

Cette citation traduit parfaitement la difficulté de mener à bien un projet. Plus tôt l'environnement du produit sera pris en compte, meilleure sera l'intégration. Dans notre cas le produit sera la cellule de palettisation. La réalisation de cette cellule doit répondre aux besoins tout en s'intégrant à l'îlot existant. L'analyse fonctionnelle va nous permettre, en plaçant le produit au centre de son environnement, de déterminer les fonctions et les spécifications de base de l'installation à réaliser.

#### 1.3.1. Analyse fonctionnelle<sup>2</sup> de l'îlot

Cette approche doit mettre en lumière les spécifications et contraintes de l'installation du point de vue de l'exploitation et de l'implantation dans l'atelier de production. Elle prend en compte l'ajout de l'extension et définit les fonctions de ce nouvel îlot au sein de l'atelier. Réalisée par le personnel du pôle industrialisation, cette étude va assurer une cohérence et une standardisation à l'échelle de l'usine. Le résultat se présente sous la forme d'un tableau présenté dans l'annexe A1.

#### 1.3.2. Analyse fonctionnelle du produit

Cette démarche est indispensable pour évaluer les besoins et les attentes de toutes les personnes qui ont un lien avec la cellule de moulage. Pour notre cas, il ne faut pas négliger les besoins des services autres que la production. Pour garantir une approche la plus globale possible, nous avons constitué des groupes de travail multi-compétences : production, maintenance, méthode industrialisation, qualité et métrologie.

Afin d'exprimer le besoin d'une manière complète, nous utilisons une méthode analytique. Tout d'abord, les fonctions attendues seront identifiées à l'aide du diagramme fonctionnel. Ensuite les besoins seront listés par arborescence ; le résultat obtenu est l'arbre fonctionnel. Enfin, une matrice réalisera les liens entre les différentes fonctions et les organes chargés de les réaliser.

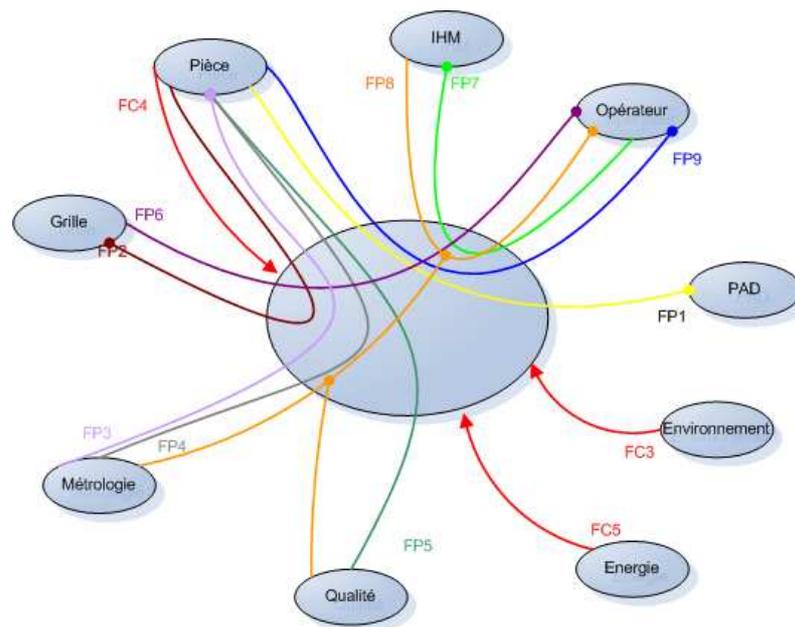
##### 1.3.2.a. Diagramme fonctionnel

Ce diagramme a pour but d'extraire de l'environnement dans lequel l'installation sera exploitée la liste des fonctions souhaitées. Pour appliquer cette méthode analytique il convient tout d'abord de lister les éléments qui interagissent autour de cette installation. Ces éléments constituent l'environnement direct de la cellule. Les interactions vont mettre en évidence les différentes tâches à réaliser.

---

<sup>1</sup> "Cahier des Charges fonctionnel" par Jean Pierre ZANIN (voir bibliographie).

<sup>2</sup> Analyse fonctionnelle : Méthode utilisée au début d'un projet visant à créer ou à améliorer un produit. Elle permet de définir les fonctions principales, les fonctions secondaires et les contraintes du produit.



**Figure 6:** Diagramme fonctionnel

L'étude menée avec le groupe de travail nous a permis de réaliser le diagramme de la figure 6. Ce diagramme se construit autour du noyau central "l'installation". Les éléments qui constituent l'environnement sont placés autour de ce noyau. Les liens traduisent les interactions entre les différents acteurs de cet environnement. Enfin, à partir de ces liens nous obtenons la liste des fonctions. Voici les principales fonctions qui ont été identifiées :

- FP1 - Décharger la pièce.
- FP2 - Palettiser de la pièce.
- FP3 - Graver la pièce.
- FP4 - Contrôler la planéité.
- FP5 - Ecarter les rebuts.
- FP6 – Charger, décharger les grilles.
- FP7 - Communiquer (opérateur).
- FP8 - Assurer le suivi des données.
- FP9 - Gérer les entrées-sorties des pièces "échantillons".

Avec cette méthode, on identifie également les différentes contraintes. Pour une question de lisibilité, seules les contraintes liées au produit apparaissent sur le schéma.

- FC1 - Légale : assurer la sécurité et la protection des personnes.
- FC2 – Budgétaire : respecter le budget accordé.
- FC3 - Environnement (présence d'eau, d'huile, de feuillard d'aluminium).
- FC4 - Humidité de la pièce.
- FC5 - Energies disponibles.

### **1.3.2.b. Arbre fonctionnel et matrice organe fonction**

Une fois listée, chaque fonction doit pouvoir être réalisée par des organes. Les organes sont des sous-ensembles de la cellule finale. La matrice organe-fonction liste les liens entre tous ces éléments. De cette manière, lors de la conception et de la recherche des solutions techniques, nous disposerons pour chaque équipement d'une liste de fonctions à remplir.

## **1.4. Cahier des charges**

La rédaction du cahier des charges se base sur le standard de Florence et Peillon. Il est fourni en annexe A2.

## **Chapitre2. Eléments de robotique**

## Introduction

Robotiser une palettisation ou des tests en ligne sont des opérations nouvelles pour les lignes de fabrication de Florence et Peillon. Dans la cellule que nous concevons, les tâches de manipulation pour déplacer des pièces ou pour exercer des efforts sur l'environnement seront réalisées par le robot. Quelques notions théoriques sont indispensables pour aborder cette étude. De cette manière, nous pourrons utiliser au mieux le robot industriel dont nous disposons et concevoir les solutions techniques les plus adaptées.

Après une brève description des robots industriels, nous aborderons les principaux modèles de transformation utilisés en robotique. Nous terminerons cette approche théorique par une présentation des commandes dites classiques.

Vous trouverez une présentation des outils mathématiques utilisés dans ce chapitre dans l'annexe A05.

## 2.1. Structure des robots

Au fil des années, des robots de différentes formes sont apparus. Tous sont constitués de deux sous-ensembles distincts : une structure mécanique articulée et au moins un organe terminal<sup>3</sup>. La structure mécanique est un assemblage de corps rigides liés par des articulations. Ces articulations peuvent être équipées d'actionneurs (moteur, vérins) ou non. Dans le second cas, elles seront considérées comme des articulations passives.

La base du robot est la partie ancrée au sol. On rencontre plusieurs schémas qui lient cette base à l'organe terminal.

- Les structures parallèles où plusieurs chaînes partent de la base vers la main du robot. Ces chaînes sont parallèles les unes aux autres. Cette architecture offre une meilleure rigidité et des performances en précision accrues.
- Les structures séries, pour lesquelles chaque corps possède au maximum deux articulations. Le montage en série de chacun des éléments affaiblit la rigidité du mécanisme mais offre la possibilité de travailler dans un espace plus important.
- Les robots de structure mixte dont le mécanisme est proche des robots série intègrent au moins une boucle cinématique dans leur chaîne de liaison (par exemple un parallélogramme). Ces boucles sont utilisées pour augmenter la rigidité de l'ensemble.



**Figure 8:** Robot structure mixte



**Figure 7:** Robot structure parallèle

---

<sup>3</sup> Dans la suite du document l'organe terminal pourra également être appelé « Main » ou « Effecteur ».

Dans la suite du document nous n'aborderons pas le cas des robots parallèles. Les principes présentés concernent surtout les robots série. Les méthodes utilisées peuvent être généralisés pour des mécanismes plus complexes.

### 2.1.1. Les Articulations

L'articulation est utilisée pour lier deux corps successifs. Cette liaison comporte un ou plusieurs degrés de liberté. Les deux principaux types d'articulation que l'on retrouve sur la quasi-totalité des robots de l'industrie offrent chacun un degré de liberté élémentaire. Un robot non redondant dispose de six degrés de liberté pour positionner et orienter l'outil placé en bout de bras.

- Articulation rotoïde :

Cette articulation est une liaison mécanique de type pivot. Le seul degré de liberté offert est une rotation autour d'un axe commun aux deux corps qu'elle lie.

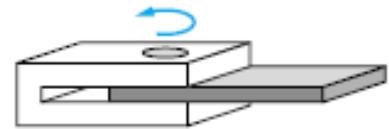


Figure 9: Pivot

- Articulation prismatique :

C'est une articulation de type glissière. Comme la précédente, elle ne possède qu'un degré de liberté ; une translation le long d'un axe commun.



Figure 10: Glissière

### 2.1.2. Degrés de liberté d'un mécanisme

Pour atteindre toutes les positions souhaitées, un mécanisme doit être muni d'un nombre de degrés de liberté suffisant. Pour chacune de ces libertés, un actionneur fournira l'énergie nécessaire au mouvement. Le robot que nous utiliserons possède six degrés de liberté. Dans le jargon de la robotique on parle d'un robot 6 axes.

Les trois premiers axes sont appelés porteurs du robot, car c'est le déplacement de ces axes qui détermine la position de l'effecteur final. Les trois axes restants activent le poignet, ils sont chargés de l'orientation de l'effecteur. Pour les robots six axes, voici les deux types de poignet que l'on peut rencontrer :

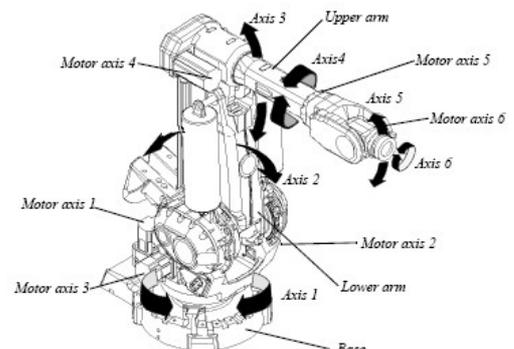


Figure 11: Robot industriel 6 axes

- Poignet (Pitch-Yaw-Roll XYZ) : poignet à l'image de la main humaine. On trouve trois rotoïdes dont les axes sont non concourants
- Poignet (Roll-Pitch-Roll ZYZ) ou poignet sphérique : dispose de trois articulations rotoïdes dont les axes sont concourants.

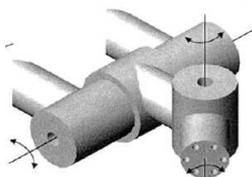


Figure 13: Poignet PYR

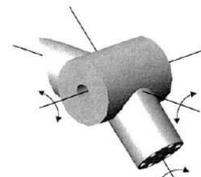


Figure 12: Poignet RPR

Sur tous les robots il existe des positions dites singulières. Ces singularités correspondent à des configurations où le nombre de degrés de liberté de l'organe final est inférieur au nombre de degrés de liberté de l'espace de travail.

En pratique, pour éviter ces singularités, il faudrait avoir en permanence six degrés de liberté sur l'outil. Dans le cas du robot ABB 6400, il existe une configuration où la singularité est évidente. Pour ce robot qui est équipé d'un poignet sphérique (ZYZ), lorsque tous les axes du poignet sont alignés, les degrés de liberté fournis par l'axe 4 et l'axe 6 sont confondus. On se retrouve donc avec un outil ne disposant plus que de 5 degrés de liberté dans un espace de travail qui en exige 6. Si les outils de programmation adaptés ne sont pas mis en œuvre, une erreur apparaît lorsque le robot passe par cette configuration.

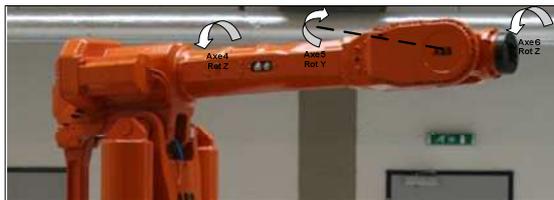


Figure 14: Exemple de position singulière de l'IRB6400

### 2.1.3. Système de coordonnées en robotique

Pour réaliser les tâches souhaitées, l'outil doit pouvoir être déplacé dans l'espace. Ce volume, borné par les limites physiques du mécanisme, est appelé l'espace de travail. Pour identifier les points dans cet espace on utilise des repères orthonormés directs appartenant à un système de coordonnées. Ces repères sont définis à la construction du robot, mais les langages de programmation actuels permettent l'ajout de repères utilisateurs.

Le repère lié au premier élément de la structure du robot est utilisé comme référence. Ce repère « base » est noté  $R_0\{X_0, Y_0, Z_0\}$ , occupe une position connue dans le repère atelier (si celui-ci est défini par l'utilisateur). Le repère lié à l'outil noté  $R_N\{X_N, Y_N, Z_N\}$  occupe tout naturellement une place particulière.

Chaque corps du mécanisme est activé par un actionneur. Pour un robot ne comportant que des articulations rotoïdes, on retrouvera un moteur pour chaque axe. C'est l'action de ces moteurs qui permet de situer l'outil dans l'espace de travail. On note  $q_1, q_2, \dots, q_N$  les variables de position angulaire (ou articulaire) des moteurs.

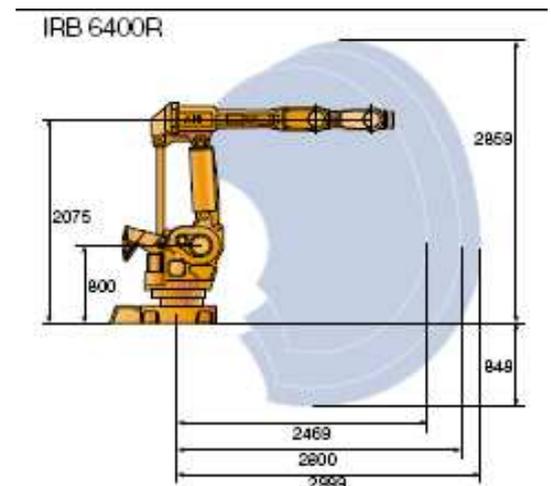


Figure 15: Espace de travail du robot ABB 6400 R

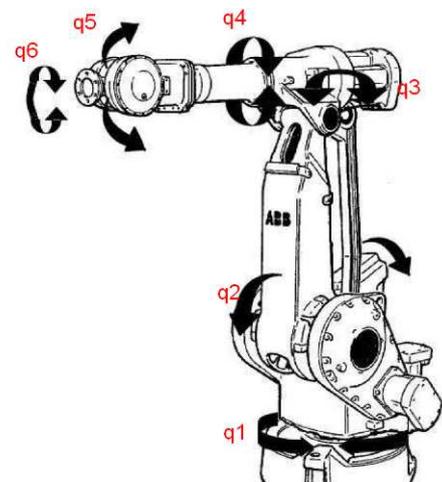
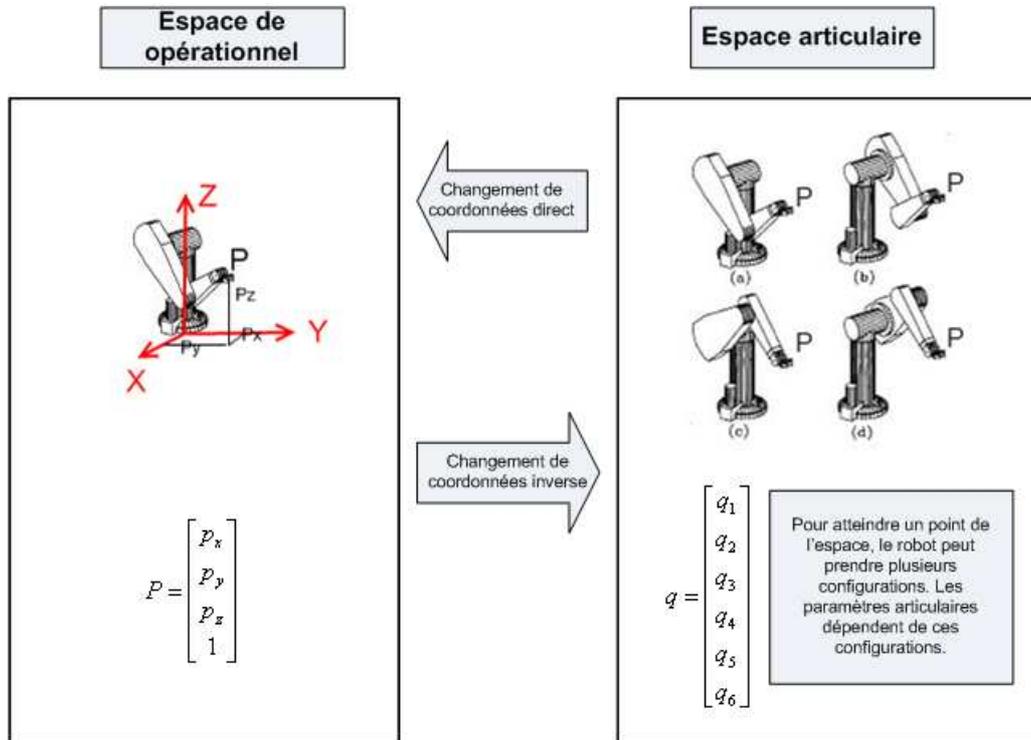


Figure 16: Données articulaires liées aux axes du robot

On appelle "configuration" le jeu de valeurs articulaires que le robot prend à un instant donné :  $q(q_1, q_2, \dots, q_N)$ . Ces paramètres sont définis dans l'espace articulaire du robot. Pour passer d'un système de coordonnées à l'autre, on utilise des modèles de transformation. Ces modèles dépendent de l'architecture du robot.



**Figure 17:** Changements de coordonnées en robotique

## 2.2. Changement de coordonnées direct

### 2.2.1. Modèle géométrique direct

Pour réaliser la commande du robot, on doit disposer d'un modèle de transformation entre l'espace opérationnel et l'espace articulaire. A partir de ce modèle, connaissant les données articulaires, il sera possible de connaître la position de l'outil dans le repère de base. La représentation géométrique est obtenue en attribuant un repère pour chaque corps. On note  $R_i$ , le repère d'origine  $O_i$ , lié au corps  $C_i$ .  $R_0$  désigne la base du robot.

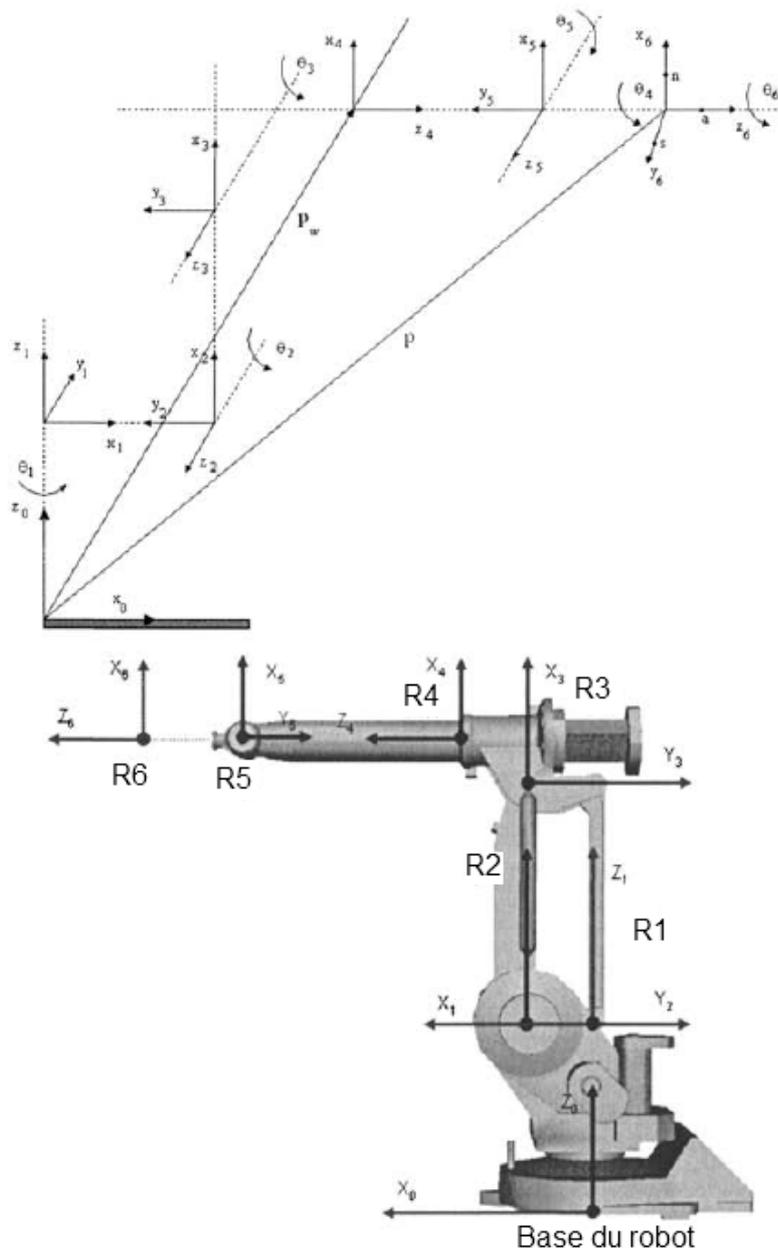


Figure 18: Représentation des repères liés aux corps du robot.

### 2.2.1.a. Formalisme de Denavit-Hartenberg

En théorie, les repères liés aux corps du robot pourraient être placés n'importe où dans l'espace, mais pour simplifier l'expression de changement de repère, on utilise le formalisme de Denavit-Hartenberg.

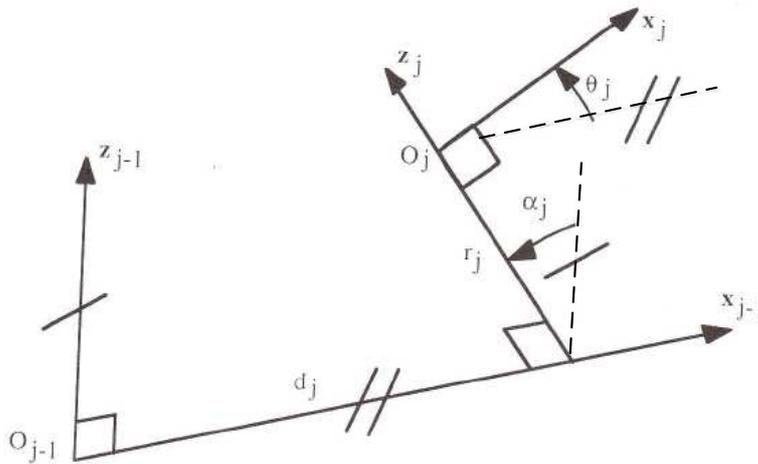


Figure 19: Paramètres de Denavit-Hartenberg

En respectant les contraintes imposées sur le positionnement et l'orientation des repères, on arrive à exprimer la position du corps  $C_j$  dans le repère lié au corps  $C_{j-1}$  au moyen de 4 paramètres :

- $\alpha_j$  : angle entre les axes  $z_{j-1}$  et  $z_j$  (rotation d'axe  $x_{j-1}$ )
- $d_j$  : distance entre les axes  $z_{j-1}$  et  $z_j$  le long de  $x_{j-1}$
- $\theta_j$  : angle entre les axes  $x_{j-1}$  et  $x_j$  (rotation d'axe  $z_j$ )
- $r_j$  : distance entre les axes  $x_{j-1}$  et  $x_j$  le long de  $z_j$

### 2.2.1.b. Utilisation du modèle géométrique

Un corps P appartenant au corps  $C_j$  a les coordonnées suivantes sur le repère  $R_j$  :

$$P_j = [Px_j \quad Py_j \quad Pz_j \quad 1]^T$$

Si l'on veut exprimer les coordonnées de P dans le repère  $C_{j-1}$ , en utilisant les paramètres qui lient les deux repères, on a :

$$P_{j-1} = {}^{j-1}T_j P_j$$

${}^{j-1}T_j$  est la matrice de transformation homogène entre les repères liés aux corps  $C_{j-1}$  et  $C_j$ . Cette matrice est calculée avec la formule suivante :

$${}^{j-1}T_j = Rot(x, \alpha_j) Trans(x, d_j) Rot(z, \theta_j) Trans(z, r_j)$$

En utilisant la définition des matrices de rotation pure  $Rot(x, \theta)$  et de translation pure  $Trans(a, b, c)$  présentées dans l'annexe A04, on obtient :

$${}_{j-1}T_j = \begin{bmatrix} C\theta_j & -S\theta_j & 0 & d_j \\ C\alpha_j S\theta_j & C\alpha_j C\theta_j & -S\alpha_j & -r_j S\alpha_j \\ S\alpha_j S\theta_j & S\alpha_j C\theta_j & C\alpha_j & r_j C\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ce modèle décrit l'ensemble des relations qui donnent les coordonnées de l'outil dans l'espace de travail. On présente ici le cas de robot série avec n liaisons successives. On a la relation suivante :

$$X = f(q)$$

$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_m]^T$  est le vecteur position de l'outil dans l'espace de travail

$q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_m]^T$  est le vecteur position de l'outil dans l'espace articulaire

La matrice de transformation s'écrit :

$${}^0T_N = {}^0T_1(q_1) {}^1T_2(q_2) \dots {}^{N-1}T_N(q_N)$$

### 2.2.2. Modèle cinématique direct

Les informations sur la vitesse de déplacement des organes du robot sont obtenues dans l'espace articulaire. Le modèle cinématique direct va nous permettre de calculer les vitesses dans les coordonnées opérationnelles en fonction des vitesses articulaires.

La vitesse de l'origine du repère outil  $R_N$ , par rapport à la base du robot, est entièrement déterminée par la relation :

$$V_N = \frac{d(\overline{O_0 O_N})}{dt}$$

Pour exprimer la vitesse de l'outil par rapport à la base du robot, on utilise le torseur cinétique. En plus du vecteur vitesse de l'origine du repère outil, on trouve le vecteur de rotation instantanée de l'outil par rapport à  $R_0$

$$V_n = [V_N^T \ \omega_N^T]^T = J_n \dot{q}$$

$J_n$  est la matrice Jacobienne du robot

$\dot{q}$  est le vecteur vitesse exprimé avec les paramètres articulaires

$V_N$  est la vitesse linéaire de l'outil

$\omega_N$  est la vitesse de changement d'orientation de l'outil

Le Jacobien est de dimension  $n \times m$  où  $n$  est le nombre de degrés de liberté du robot et  $m$  le nombre d'articulations. Si l'on prend le cas d'un robot série avec un poignet sphérique, le Jacobien sera une matrice  $6 \times 6$ . Il existe deux principales méthodes d'obtention de cette matrice Jacobienne.

- Méthode dérivation directe : on obtient cette matrice en dérivant le modèle géométrique direct  $X = f(Q)$  à partir de la relation suivante :

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i(q)}{\partial q_j} \text{ avec } i = 1, \dots, m \text{ et } j = 1, \dots, n$$

$J_{ij}$  est l'élément  $(i, j)$  de la matrice  $J$

Avec la dérivation directe, le Jacobien est facile à obtenir pour des robots à deux ou trois degrés de liberté. La seconde méthode est plus pratique pour les robots avec plus de 3 degrés de liberté.

- Méthode de base : cette méthode est fondée sur la relation entre les vecteurs vitesses (translation et orientation)  $V_N$  et  $\omega_N$  du repère  $R_N$  et les vitesses articulaires  $\dot{q}$  :

Les vitesses de l'outil sont obtenues par composition de la vitesse de chaque corps de la chaîne cinématique. Dans le cas des articulations rotoïdes, les vitesses du corps  $C_i$  sont données par :

$${}^0V_i = {}^0V_{i-1} + \left[ {}^0\omega_i \times (d_i {}^0s_{i-1} + r_i {}^0a_i) \right] \quad \text{Les paramètres } a_i \text{ et } s_i \text{ sont extraits de la}$$

$${}^0\omega_i = {}^0\omega_{i-1} + \dot{q}_i {}^0a_i \quad \text{matrice de transformation homogène (annexe A4)}$$

Ces équations appliquées successivement depuis la base jusqu'à l'élément final de la chaîne donnent l'expression des vitesses de l'outil en fonction des dérivées des variables articulaires. Ce résultat nous donne la matrice Jacobienne.

## 2.3. Changement de coordonnées inverse

Contrairement au précédent, ce changement est utilisé pour calculer les coordonnées articulaires correspondant à une position donnée de l'effecteur.

### 2.3.1. Modèle géométrique inverse

Dans cette partie nous allons tenter de répondre à la question : Quelle configuration du robot va nous permettre de placer l'outil dans une position de l'espace de travail ? La réponse à cette question n'est pas forcément unique. Il existe des formes explicites, donnant toutes les solutions, que l'on appelle modèle géométrique inverse. S'il n'est pas possible de trouver une forme explicite, on peut calculer une solution particulière par des procédures numériques.

$U_0$  la matrice de position et d'orientation de l'outil désirée :

$$U_0 = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 2.3.1.a. Méthode de résolution par identification

La plupart des robots industriels à six degrés de liberté disposent d'un poignet avec trois axes de rotation concourants. Pour ce type de robot il existe une méthode de résolution du problème par étapes successives.

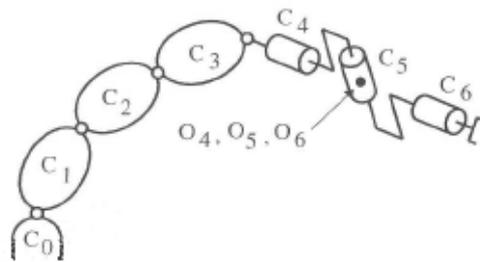


Figure 20: Représentation d'un robot 6 axes avec poignet sphérique

### 2.3.1.b. Equation de position

La position de l'organe terminal n'est liée qu'aux valeurs des 3 premiers axes; on peut obtenir les éléments de la quatrième colonne de  $U_0$  par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ P_1 \end{bmatrix} = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Les éléments du second membre sont supposés connus, car ils ont été calculés pour le modèle géométrique direct. On identifie les variables  $(q_0, q_1, q_3)$  en résolvant le système d'équation en pré-multipliant successivement les deux membres par  ${}^jT_0 (j = 1, 2)$

### 2.3.1.c. Equation d'orientation

Les éléments de  $U_0$  liés à l'orientation sont donnés par :

$$[s \quad n \quad a] = {}^0A_6(q)$$

En fragmentant  ${}^0A_6(q)$  en un produit de matrices de rotation puis en séparant les matrices dont les composantes restent inconnues, on a:

$${}^3A_0(q_1, q_2, q_3)[s \quad n \quad a] = {}^3A_6(\theta_4, \theta_5, \theta_6)$$

Comme les variables  $(q_1, q_2, q_3)$  ont été calculées grâce au premier système d'équations, on connaît  ${}^3A_0$ . Le terme de gauche étant connu,  $(\theta_4, \theta_5, \theta_6)$  peuvent être identifiés en pré-multipliant successivement les deux membres par  ${}^4A_3$ , puis par  ${}^5A_4$ .

### 2.3.2. Modèle cinématique inverse

Le but de ce modèle est de calculer les vitesses articulaires qui assurent à l'outil une certaine vitesse de déplacement dans la zone de travail. Pour obtenir ce modèle, on inverse le modèle cinématique direct. Les vitesses articulaires sont obtenues à partir de la formule :

$$\dot{q} = J^{-1} \dot{X}$$

Les singularités de la matrice Jacobienne ( $\det J = 0$ ) correspondent à des pertes de mobilité. Pour traiter ces singularités, la première approche consiste à éviter d'atteindre ces positions par butées mécaniques ou Soft. La seconde méthode utilise les possibilités des langages de programmation modernes pour spécifier, par l'intermédiaire de fonctions système, quelles sont les configurations attendues. Ces fonctions apportent des paramètres supplémentaires pour une commande bien précise.

## 2.4. Modèles dynamiques

La commande des robots doit générer les efforts nécessaires pour produire le mouvement désiré du bras. Si l'on veut maîtriser ces déplacements, les couples et forces mises en jeu doivent être connus. Le modèle dynamique donne la relation entre les forces et les positions, vitesses et accélérations.

Pour étudier la forme générale du modèle dynamique, nous utiliserons le formalisme de Lagrange. Nous considérerons que le robot est idéal, sans frottement sec, sans élasticité et ne subissant aucune force extérieure.

Comme le montre l'équation suivante, ce formalisme décrit les équations du mouvement en termes de travail et d'énergie du système.

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad \text{Avec } i = (1, 2, \dots, n) \quad \text{et} \quad L = E - U$$

$L$  : Le lagrangien du système.

$E$  : Energie cinétique totale du système.

$U$  : Energie potentielle totale du système.

$\tau_i$  : Couple moteur de l'articulation  $i$ .

$q_i$  : Variable articulaire  $i$ .

En utilisant ce formalisme, on décrit la dynamique du robot par l'équation :

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + B(q, \dot{q}) + G(q)$$

$\tau \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur  $n \times 1$  des couples fournis par les moteurs d'axes

$q \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur  $n \times 1$  des positions articulaires

$M \in \mathbb{R}^n$  la matrice  $n \times n$  d'inertie du robot est symétrique et définie positive. Ses éléments  $M_{ij}$  sont exprimés en fonction des variables articulaires  $q$ . On l'appelle également la matrice de l'énergie cinétique car elle vérifie la relation suivante :

$$E = \frac{1}{2} \dot{q}^T M \dot{q} \quad \text{avec } E, \text{ l'énergie cinétique du système.}$$

$C \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur  $n \times 1$  des forces de Coriolis et forces centrifuges. La matrice est donnée par la relation :  $C \dot{q} = \dot{A} \dot{q} - \frac{\partial E}{\partial q}$

$B \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur des force de frottement. Si l'on néglige le frottement sec,  $B$  a la forme :  $B = F_{vi} \dot{q}_i$  Les éléments  $F_{vi}$  de la matrice sont les paramètres de frottement visqueux de l'articulation  $i$ .

$G \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur  $n \times 1$  des forces de gravité. Ces éléments sont obtenus par :  $G_i = \frac{\partial U}{\partial q_i}$  avec  $U$ , l'énergie potentielle totale du système.

## 2.5. Commande des mouvements

La commande des robots fait l'objet de travaux depuis de nombreuses années. Bien que ces études aient apporté des solutions nouvelles, l'industrie utilise toujours de nombreux modèles de robot avec commande classique PID<sup>4</sup>.

Rappelons que le modèle dynamique donne un système de  $n$  équations différentielles du second ordre non linéaires et couplées. La commande classique considère le mécanisme comme un système linéaire et asservit les axes du robot par une commande de type PID à gain constant. Cette solution a l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et reste efficace lorsque les rapports de réduction entre le moteur et le corps sont importants. En effet l'inertie de la charge ramenée au moteur est divisée par le carré du rapport de réduction. En revanche, pour des motorisations dites "directe"<sup>5</sup> ces variations entraînent des dépassements de consigne et des écarts de poursuite importants.

### 2.5.1. La commande PID avec anticipation

Une des solutions de commande typique en robotique est la commande PID avec anticipation. La loi de commande correspondante est donnée par :

$$\tau = K_p(q_c - q) + K_v(\dot{q}_c - \dot{q}) + K_I \int_{t_0}^t (q_c - q) dt$$

$q$  est le vecteur de consigne en position dans l'espace articulaire.

$\dot{q}_c$  est le vecteur de consigne en vitesse dans l'espace articulaire.

$K_p$ ,  $K_v$  et  $K_I$  sont des matrices  $n \times n$  diagonales définies positives.

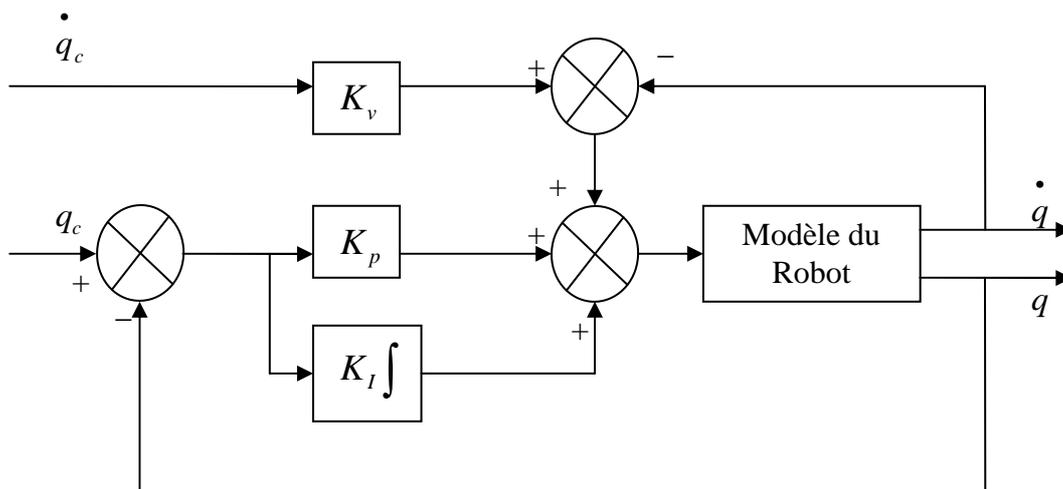


Figure 21: Diagramme bloc de la commande PID

<sup>4</sup> PID: Système de commande avec correcteur Proportionnel, Intégrale, Dérivé.

<sup>5</sup> Transmission direct: La chaîne de transmission ne comporte pas de réducteur.

Les paramètres  $K_{pi}$ ,  $K_{vi}$ ,  $K_{li}$ , éléments des matrices du même nom, sont propres à chaque articulation. Une méthode fréquemment utilisée en robotique est de calculer les paramètres de la commande en considérant le système linéaire du second ordre à coefficients constants. Le modèle utilisé pour chaque articulation  $i$  est le suivant :

$$\tau_i = M_i \ddot{q}_i + F_{vi} \dot{q}_i + G_{pi}$$

$M_i$  est égal à la valeur maximale de l'élément  $M_{ii}$  de la matrice d'inertie.

$F_{vi}$  est le paramètre de frottement visqueux de l'articulation

$G_{pi}$  est le couple résistant (perturbation)

Lorsque le couple résistant est égal à zéro, la fonction de transfert du système en boucle fermée est donnée par :

$$T(s) = \frac{q_i(s)}{q_{ci}(s)} = \frac{K_{vi}s^2 + K_{pi}s + K_{li}}{M_i s^3 + (K_{vi} + F_{vi})s^2 + K_{pi}s + K_{li}}$$

$T(s)$  est la fonction de transfert entre la consigne de position  $q_c$  et la position articulaire réelle  $q$ .

En choisissant les gains de façon à obtenir un pôle réel triple, on impose au système une constante de temps multiple. En choisissant des gains élevés, Cette solution limite les risques de dépassement et assure une rapidité satisfaisante sans oscillations.

L'équation caractéristique est :

$$M_i s^3 + (K_{vi} + F_{vi})s^2 + K_{pi}s + K_{li} = 0$$

La forme factorisée avec un pôle réel triple est :

$$M_i (s + \omega_i)^3 = 0 \quad \omega_i > 0 \text{ est le pôle triple de l'articulation } i.$$

Enfin on obtient par identification :

$$K_{pi} = 3M_i \omega_i^2$$

$$K_{vi} = 3M_i \omega_i - F_{vi}$$

$$K_{li} = M_i \omega_i^3$$

Lorsque le rapport de réduction de l'axe est important, les termes  $M_{ii}$  de la matrice d'inertie varient peu. Le modèle précédent sera d'autant plus proche de la réalité. Pour augmenter la rapidité du système, on choisira une pulsation élevée mais suffisamment éloignée de la pulsation de résonance mécanique du bras.

### 2.5.2. Principe de la compliance

L'utilisation des robots pour la manipulation de pièces, la peinture ou la soudure est aujourd'hui très répandue. Mais ces dernières années, les besoins de l'industrie ont évolué et les applications se sont multipliées en nombre et en variété.

Dans de nombreux cas, on utilise le robot pour réaliser des tâches qui nécessitent un contact avec des éléments rigides. Nous avons vu qu'il est possible d'obtenir un asservissement en position très précis lorsque le gain de boucle est élevé. Cependant, avec un tel réglage, le moindre écart de position entraîne une réaction violente de la commande. En cas de contact, les forces augmentent rapidement et il devient très difficile d'utiliser un robot dans ces conditions.

Pour parvenir à exécuter ces tâches (poussée, ébavurage, ébarbage) on utilise la compliance<sup>6</sup>. Deux formes de compliance existent : la compliance passive et la compliance active. La première utilise un mécanisme passif installé en bout de bras pour donner de la souplesse à l'effecteur. La seconde, réduit la rigidité du bras en utilisant une commande spécifique "commande avec compliance"<sup>7</sup>.

On définit la compliance dans un repère  $R_c$  appelé repère de compliance. Suivant l'application, ce repère peut être associé à l'outil, à un élément de l'environnement ou à l'objet transporté.

#### 2.5.2.a. Compliance passive

La compliance passive est une solution mécanique conçue pour amortir les efforts et corriger les erreurs de position du bras robotisé. Le principe est d'interposer un élément déformable entre l'outil et le bras. De cette manière, l'outil ajuste sa position suivant les efforts qu'il rencontre. Lorsqu' aucune force ne le contraint, l'outil reprend sa position d'origine.

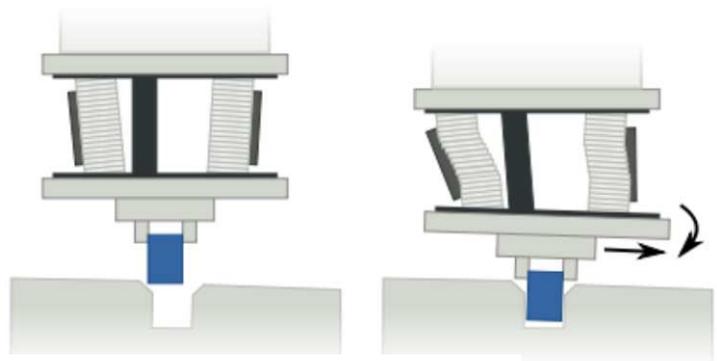


Figure 22: Mécanisme de compliance

On exprime la relation entre l'effort et la déformation par l'équation :

$$dX = CT$$

$dX$  est le vecteur des déplacements différentiels en position  $d$  et en orientation  $\delta$ . On a  $dX = \begin{bmatrix} d^T & \delta^T \end{bmatrix}^T$

$T$  est le torseur des efforts qui a comme résultante une force  $f$  et un moment  $m$ . On a  $T = \begin{bmatrix} f^T & m^T \end{bmatrix}^T$ .

$C$  est la matrice de compliance ( $6 \times 6$ ).

<sup>6</sup> Compliance: anglicisme qui prend le sens de souplesse mécanique (inverse de la raideur)

<sup>7</sup> Commande avec compliance: vient de l'anglais "compliant control"

### 2.5.2.b. Compliance active

La compliance active est obtenue en agissant sur les actionneurs. Une commande spécifique adapte le comportement du robot aux tâches faisant intervenir des efforts. L'ajustement des couples moteurs suivant la direction et la quantité des forces en jeu procure plus ou moins de souplesse au bras. Le comportement du robot peut être comparé à un bras équipé de ressorts à raideur programmable. Ce résultat est obtenu en limitant les gains de boucle des asservissements de position.

Pour assurer une commande en effort sur une direction définie et maintenir une commande en position sur les autres directions, on doit calculer la matrice de raideur :

$$T_C = K_C dX_C$$

$T_C$  est le torseur des efforts exprimé dans le repère  $R_C$ .

$K_C$  est la matrice de compliance désirée. Elle est diagonale par rapport au repère  $R_C$ .

$dX_C$  est le vecteur des déplacements différentiels. Ces déplacements sont exprimés dans le repère  $R_C$ .

Pour chaque articulation, des actionneurs fournissent les efforts nécessaires pour créer le mouvement du bras robotisé. La relation qui lie les forces exercées sur l'outil aux couples fournis par ces actionneurs est notée :

$$\tau = J^T T_C$$

$\tau$  est le vecteur associé aux couples des actionneurs.

$J$  est la matrice Jacobienne du robot.

La matrice Jacobienne permet aussi d'exprimer les déplacements différentiels dans l'espace articulaire. La relation est notée :

$$dX = J dq$$

$dq$  est la différentielle des variables articulaires.

Des trois relations précédentes on obtient :

$$\tau = J^T K_C J dq = K_q dq$$

$K_q$  est la matrice de compliance correspondant à la matrice  $K_C$ , dans l'espace articulaire. Elle est symétrique.

La matrice  $K_q$  détermine les gains proportionnels des asservissements. La figure 23 présente le diagramme bloc de la commande avec compliance. Dans le langage de la robotique cette commande est appelé "Soft-servo".

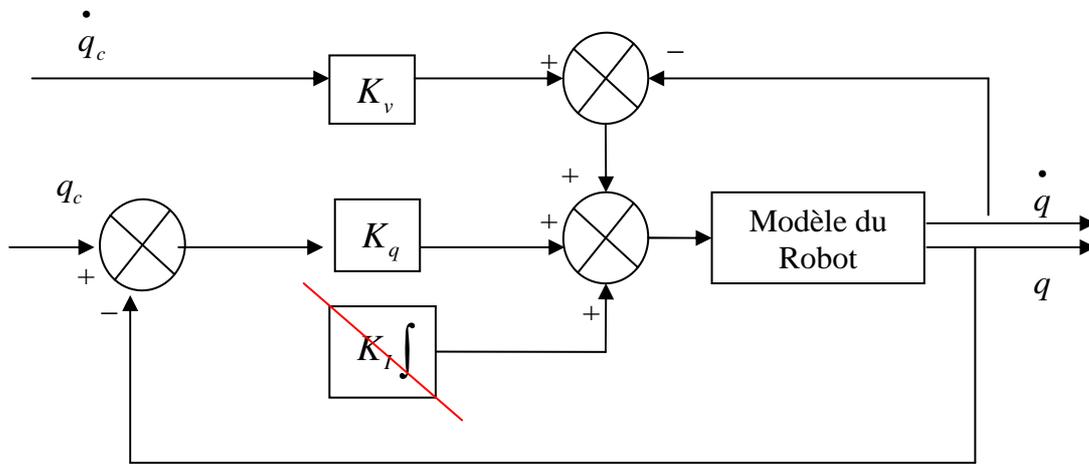


Figure 23: Diagramme bloc de la commande avec compliance

La souplesse du bras est obtenue par le maintien d'une erreur de position. On voit sur la figure 23 que pour parvenir à ce résultat le terme intégral n'est plus utilisé. En effet, la présence de ce terme éliminerait l'erreur de position. Après avoir supprimé l'intégrale, nous obtenons une commande PD avec anticipation.

### 2.5.2.c. Commande d'effort en utilisant la compliance active.

Pour comprendre le fonctionnement de cette commande nous allons utiliser les modèles présentés dans les chapitres précédents.

Le modèle dynamique du système nous donne l'équation :

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + B(q, \dot{q}) + G(q) \quad (\text{voir chapitre 2.4.})$$

Lorsqu'une force extérieure s'applique sur l'outil, le modèle dynamique devient :

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + B(q, \dot{q}) + G(q) + \tau_e$$

Avec  $\tau_e \in \mathbb{R}^n$  vecteur couple exprimé dans l'espace articulaire. Il représente les forces extérieures exercées par le robot sur son environnement.

En reprenant l'estimation précédente du système, dans le cas d'une commande avec compliance le couple est donné par la relation :

$$\tau_i = M_i \ddot{q}_i + F_{vi} \dot{q}_i + G_{pi} + K_{qi} e_{qi} + K_{vi} \dot{e}_{qi}$$

Avec  $e_q$ , et  $\dot{e}_q \in \mathbb{R}^n$  vecteurs d'erreur de position et de vitesse exprimés dans l'espace articulaire.

En comparant les deux derniers résultats on a :

$\tau_{ei} = K_{qi}e_{qi} + K_{vi}\dot{e}_{qi} + \Delta\tau_i$  avec  $\Delta\tau_i \in \mathbb{R}^n$  vecteur des couples dus aux erreurs d'estimation du modèle.

Si l'on considère que l'erreur  $\Delta\tau_i$  est faible on obtient :

$$\tau_{ei} = K_{qi}e_{qi} + K_{vi}\dot{e}_{qi}$$

En considérant  $\Delta\tau_i$  très petit, on observe que les erreurs de position et de vitesse contre agissent face aux forces extérieures. Toutefois, en diminuant le gain proportionnel ( $K_{qi}$ ), l'erreur de position du robot augmente et rend le robot plus souple. Comme les gains proportionnels sont définis individuellement par les éléments de la matrice  $K_q$ , il est possible d'introduire une souplesse différente pour chaque axe du robot.

Certaines tâches exigent une commande en force. On peut prendre l'exemple que nous verrons dans la suite du document qui est "maintenir la pièce transportée sur un support rigide". Le travail du robot consiste à exercer une poussée le long d'une direction donnée. Pour y parvenir nous devons maintenir constante l'erreur observée le long de cette direction. Du point de vue de chaque axe, lorsque la robot travail en force sur un environnement rigide, en régime établi on a  $\dot{e}_{qi} = 0$ . L'expression de la force de poussée devient alors :

$$\tau_{ei} = K_{qi}e_{qi} \quad \text{avec } K_{qi} \text{ le gain proportionnel}$$

Si l'on exprime cette relation pour une direction U dans le repère  $R_C$  on obtient :

$$\tau_{eU} = K_{qU}e_U$$

$\tau_{eU}$  est la matrice des couples liés aux contraintes extérieures le long de U

$K_{qU}$  la matrice de compliance le long de U

$e_U$  la matrice des écarts de position.

En ajustant correctement les deux variables  $K_{qU}$  et  $e_U$  il est possible de modifier la force de poussée le long de cette axe. La matrice  $K_{qU}$  est calculée directement à partir des paramètres de souplesse programmés mais la matrice d'erreur  $e_U$  n'est obtenue que lorsque l'équilibre des forces est établi. Une manière simple de jouer sur l'écart de position est de modifier la consigne de position finale.

## **Chapitre3. Présentation générale de l'îlot**

## Introduction

L'extension qui réalisera les nouvelles tâches doit complètement s'intégrer à l'îlot existant. Cela est valable autant pour l'aménagement de l'espace que pour la fonctionnalité. Maintenir une cohérence dans l'organisation des modes de marche ainsi que dans le fonctionnement des systèmes de sécurité reste une priorité. Nous verrons dans ce chapitre de quelle manière cette cellule de palettisation prendra sa place dans l'atelier. Après un bref aperçu de l'installation, nous présenterons la partie software.

### 3.1. Structure et Implantation dans l'atelier

La solution que nous avons développée répond aux exigences qualité fixées en respectant les contraintes budgétaire et environnementale. Avec un budget très serré, le premier objectif est de réutiliser un maximum de matériel pour limiter les coûts d'achat. Il faut aussi prendre en compte un autre élément qui a beaucoup pesé sur les décisions prises : la nécessité d'utiliser du matériel standard.

#### 3.1.1. Nouvelle architecture de l'îlot

Le nouvel îlot sera constitué de l'ensemble des parties existantes sur lequel on va greffer une cellule de palettisation. Les seules modifications apportées à l'existant concerneront le déchargement de la presse à détourer à l'aide de la nouvelle cellule. Il faudra également intégrer l'ensemble des équipements dans des modes de fonctionnement et de gestion des sécurités cohérents.

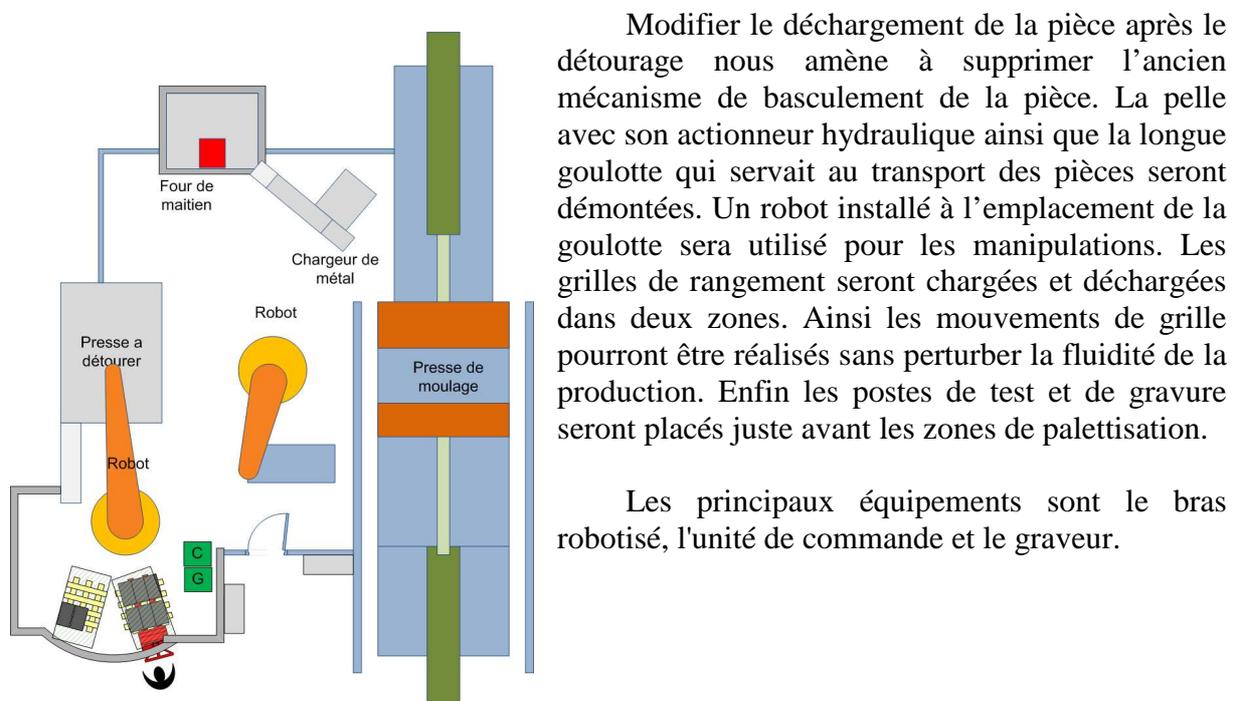


Figure 24: Future implantation de l'îlot

- **Bras robotisé**

L'ABB IRB6400R est un robot doté d'un poignet sphérique, le système de commande est le S4C+M2000. Ce système, bien que datant du début des années 2000, est très complet. Il offre des outils permettant de solutionner la quasi-totalité des problèmes posés dans l'industrie.

Les principaux inconvénients de ce robot sont ses dimensions et ses faibles performances en précision et en répétabilité (voir l'annexe A03). Ce modèle de robot est à l'origine prévu pour manipuler des charges lourdes (jusqu'à 120 KG). Nous verrons dans la suite du document de quelle manière ces faiblesses peuvent être compensées.

- **Unité de commande de la cellule**



Figure 25: Automate S7 300

Cette unité de commande est constituée d'un automate Siemens relié à un IHM<sup>8</sup>. L'utilisation de cette unité, en plus des possibilités de commande qui existent de manière native sur les robots, est justifiée par le besoin de convivialité pour l'utilisateur.

L'automate Siemens sera utilisé pour gérer le fonctionnement de l'ensemble de l'îlot sans alourdir le programme du robot. Ainsi on exploitera les capacités de traitement d'événements temps réel de cet automate. De plus, les outils de diagnostic offerts par le logiciel "Step7" sont connus du personnel technique.

Avec la plate forme de programmation "GP-Pro EX", l'écran tactile Proface va nous offrir la possibilité de créer une interface homme machine. Spécialement conçue pour des applications industrielles, cette plate forme intègre une grande bibliothèque de fonctions et d'icônes. Doté de ces outils, nous allons créer une interface complète offrant de nombreux échanges entre l'opérateur et l'îlot.

- **Graveur à percussions**



Figure 26: Graveur SIC Marking I52

Le graveur de marque « SIC Marking » est un ensemble spécifique composé d'un module de percussion et d'un contrôleur. Il servira à inscrire la date, l'heure et si besoin des informations de traçabilité sur la pièce. Une simple configuration et une programmation de pistes de marquage suffisent à la mise en œuvre de cet ensemble.

- **Banc de test planéité**

Le banc en question doit être développé de manière à définir si une pièce est conforme aux exigences qualité. Nous consacrerons toute une partie sur ce sujet dans la suite du document.

---

<sup>8</sup> IHM: Interface Homme Machine

### 3.1.2. Intégration à l'îlot de moulage

Chaque presse à injecter entourée de ses équipements périphériques constitue un sous-ensemble de l'atelier fonderie aluminium. Le fonctionnement de ce bloc de production est totalement autonome. Ceci est rendu possible par une communication assurant la synchronisation des tâches entre tous les participants. Cette unité de production doit pouvoir être commandée comme s'il s'agissait d'une seule machine.

Suivant le mode de fonctionnement de l'îlot, les fonctionnalités ne vont pas être les mêmes. Nous pouvons noter les principaux modes suivants : arrêt, production, réglage, maintenance...

Si l'on prend les machines de manière individuelle, elles offrent chacune plus ou moins de possibilités de fonctionnement. Le tableau 1 nous montre quels sont les modes disponibles sur les différentes machines de notre îlot. L'intégration de la cellule de palettisation doit être réalisée de manière à exploiter au mieux le fonctionnement que ces partenaires lui offrent. A titre d'exemple, nous pouvons noter que le passage en production se fait via un mode de préparation appelé "START". En Start, les pièces produites sont rebutées car le processus ne permet pas de garantir leur qualité. En conséquence, le temps disponible à ce moment pourra être utilisé pour réaliser des tâches non cycliques que nous évoquerons dans la suite du document.

Mode de Marche	Machine de l'îlot						
	Four	Chargeur	Presse à injecter	Poteyeur	Robot de déchargement	Presse à detourer	Cellule pelettisation
Hors tension							
Arrêt							
Marche manuelle							
Marche cycle à cycle							
Marche automatique	Start						
	Production						
	Cycle d'arrêt						

Mode présent sur l'équipement
  Mode absent sur l'équipement

**Tableau 1:** Modes de marche des équipements de l'îlot

Un des aspects majeurs de l'îlot est aussi la gestion de la sécurité. En résumé, une bonne gestion des sécurités doit permettre le passage d'un mode à l'autre en écartant tout risque pour le matériel et les utilisateurs. Les deux points les plus importants sont la mise sous tension de la machine conditionnée par la gestion des arrêts d'urgence, et le passage en automatique.

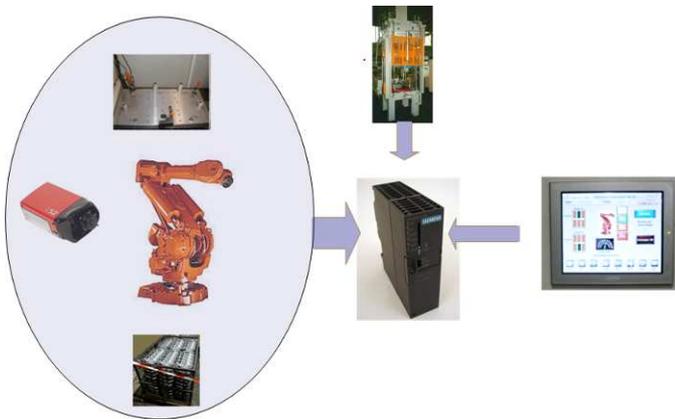
Le chargement et l'évacuation des grilles vont imposer des modifications dans la gestion des accès. Ce point sera traité en détail dans le quatrième chapitre.

## 3.2. Commande de la cellule de palettisation

Après avoir traité l'intégration de la nouvelle cellule dans son environnement de travail, nous allons nous intéresser au cœur même de cet ensemble. Pour comprendre le rôle de chaque appareil, on commencera par un aperçu de l'architecture de commande. Ensuite nous aborderons l'explication des programmes avant de passer aux réseaux de terrain. Enfin une place particulière sera donnée à la communication homme machine.

### 3.2.1. Architecture générale

La cellule de palettisation a une structure de type étoile : chaque poste, placé autour du bras robotisé, est destiné à réaliser une tâche particulière. L'automate, maître de cellule, orchestre le fonctionnement de l'ensemble des équipements et assure les échanges avec le reste de l'îlot. L'armoire de commande, équipée d'un écran tactile, est utilisée par le personnel pour envoyer des commandes, mais aussi visualiser et interpréter les données machines.



Parmi les postes, certains sont équipés de systèmes programmables et peuvent avoir un fonctionnement autonome. Toutefois la synchronisation des tâches nécessite l'échange des données de contrôle commande. Cet échange est réalisé par les bus de terrain disponibles sur les équipements ou par une interface TOR<sup>9</sup>.

Figure 27: Architecture de la commande

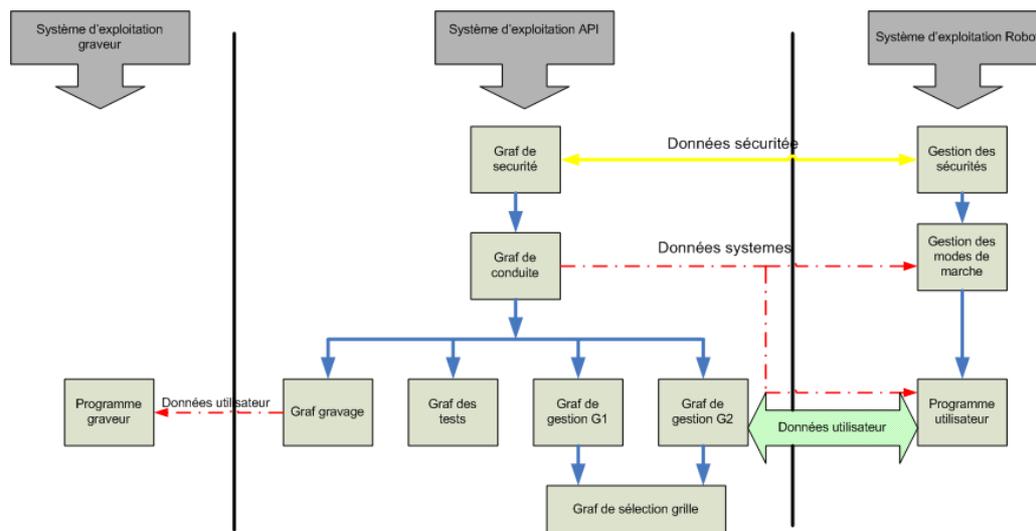
### 3.2.2. Structures de la commande

Pendant la phase de conception il est absolument indispensable de préciser les conditions d'exploitation, de mise au point ou de maintenance de la cellule. Nous avons vu que ces besoins se traduisaient par divers modes de fonctionnement. Un outil, le Gemma, nous aidera à réaliser un système donnant les garanties de sûreté de fonctionnement dans toutes les phases d'utilisation.

Le Gemma se présente sous la forme d'une grille que l'on utilise dans un esprit « Check-list ». Elle permet, dans un premier temps, de lister les différents modes de fonctionnement utilisables dans la cellule, puis de définir les liaisons entre ces modes. Avec cette analyse, nous allons développer une méthode d'exploitation par boucles fonctionnelles séparées. Ces boucles définissent les modes de marche et d'arrêt par un ensemble de grafjets<sup>10</sup> spécialisés et hiérarchisés.

<sup>9</sup> TOR: Signal Tout Ou Rien ou encore signal binaire.

<sup>10</sup> GRAPhe Fonctionnel de Commande des Etapes et Transitions



**Figure 28:** Construction arborescente de la commande

Pour résumer, le système d'exploitation de l'API<sup>11</sup> gère l'appel des blocs de programme utilisateur, des fonctions systèmes et les diverses interruptions possibles. Le grafctet de conduite définit le mode de fonctionnement de la cellule en fonction des demandes utilisateurs et des informations fournies par le grafctet de sécurité. Enfin suivant le mode actif, l'exécution des grafctets spécifiques aux tâches sera ou ne sera pas autorisée.

### 3.2.3. Rôle de chaque acteur

Voici une liste des équipements programmables avec une brève description de leurs rôles.

- **L'automate**

L'automate programmable permet de réaliser des traitements de cycle en temps réel. Avec cet outil, l'évolution des grafctets peut se faire de manière parallèle et plusieurs tâches pourront être traitées simultanément. De plus, la plateforme logiciel "STEP 7" offre des outils de visualisation et de diagnostic.

Les grafctets sont programmés et gérés dans l'API. C'est l'évolution de ces boucles qui orchestre le fonctionnement de la cellule. Les données systèmes du robot permettent d'établir un contrôle complet du bras (changement de mode, acquittement d'alarme...). Les données utilisateur permettront de réaliser la synchronisation des tâches et l'échange des valeurs de processus ou de communication. Enfin, L'API assure le contrôle du graveur par liaison TOR et prend en charge la gestion des postes qui ne possèdent pas de commande autonome.

- **Le bras robotisé**

L'armoire de commande S4C+ d'ABB autorise le lancement de programmes utilisateur uniquement en mode automatique du robot. Lorsque, pour des raisons de sécurité ou autre, le

<sup>11</sup> API: Automate Programmable Industriel.

mode de fonctionnement passera en manuel, tous les traitements seront interrompus. L'utilisation en commun avec l'API permet de contourner ces limites.

Un point très important pour notre application est que le robot est la seule machine dotée de moyens d'actions. En effet, les différents postes seront équipés de capteurs, d'éléments de signalisation, mais aucun actionneur n'est utile pour la réalisation des tâches. Définissant toutes les actions à réaliser, le programme "user" représente donc une partie dominante de la commande.

- **Le graveur**

Le graveur dispose d'une commande très simple. Une simple interface câblée autorise le contrôle à distance par l'automate. Les paramètres d'inscription ainsi que toute la gestion des défauts sont traités de manière complètement autonome par le contrôleur.

### 3.2.4. Programmes

Structurer et réaliser les programmes dans des appareils aussi différents les uns des autres demande une bonne connaissance du matériel ainsi que des logiciels de l'installation. Les langages et les environnements système sont très différents mais offrent des possibilités qui ont permis d'aboutir à un bon résultat. Un aperçu des programmes machine et du pupitre de commande sont présentés dans les pages qui suivent.

#### 3.2.4.a. Programme automate

Les automates Siemens de la gamme S7 300 sont programmés avec le logiciel Step7. Les applications sont gérées sous forme de projet où l'on retrouve une partie "matériel" et une partie "programme". La partie "matériel" héberge la configuration de l'installation ainsi que du réseau dépendant de l'automate, tandis que le dossier programme regroupe l'ensemble des blocs et sources du programme utilisateur.

La structure du programme peut se définir par une liste de blocs d'organisation appelés par le système d'exploitation. Parmi eux l'OB1 tient une place particulière. Ce bloc est activé cycliquement et c'est à partir de lui que sont appelés les autres éléments du programme utilisateur.

Parmi ces éléments on retrouve les blocks suivant :

- **Les fonctions "FC"** : La fonction est un bloc de code sans mémoire. Les données temporaires sont sauvegardées dans une pile locale qui sera perdue lorsque le traitement sera terminé. Ce bloc convient pour coder des commandes individuelles avec combinaison binaire.
- **Les blocs fonctionnels "FB"** : Le bloc de code est associé à un DB d'instance<sup>12</sup>. Cette DB sauvegarde les paramètres transmis au FB ainsi que les variables de types statiques (DB d'instance = mémoire du FB)
- **Les blocs de données "DB"** : Contrairement aux blocs de code les DB ne contiennent pas d'instructions. Ils servent à l'enregistrement des données. On distinguera deux types de DB : la DB globale utilisable par tous les blocs de code, et la DB d'instance qui est liée à un FB.

---

<sup>12</sup> Zone mémoire utilisée pour mémoriser des variables locales d'un bloc fonctionnelle "FB".

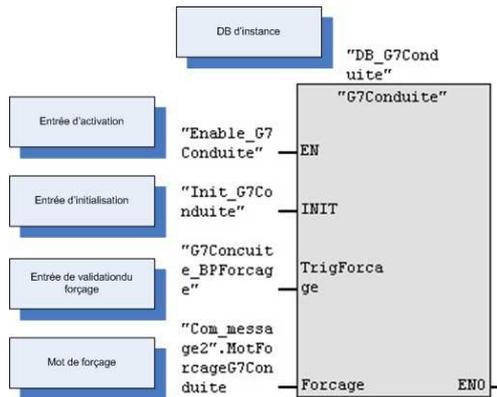


Figure 29: Exemple d'un FB de grafcet

Dans notre application, le programme API traite principalement les grafjets et les actions qui leur sont associés. Les différentes parties seront codées de la manière suivante :

- Une FC opération combinatoire sur les données utilisées dans les transitions.
- Une FB où est codé le corps du grafjet.
- Une FC qui permettra de lier les étapes du grafjet aux actions associées.

Les paramètres de commande transmis au FB permettent d'activer les fonctionnalités particulières comme le gel, l'initialisation ou le forçage du graphe dans un état voulu.

### 3.2.4.b. Programme robot

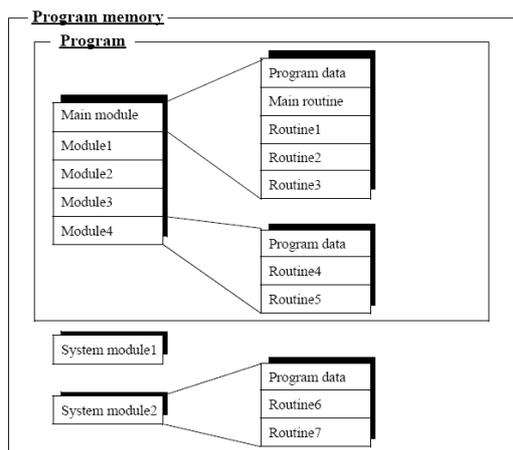


Figure 30: Structure programme robot en module.

Le système d'exploitation du robot "BaseWare OS" contrôle chaque aspect du robot : les mouvements, l'exécution des programmes d'application, et la communication. Il existe de nombreuses options qui permettent une meilleure exploitation. La commande du l'IRB6400 possède les options "I/Oplus" et "Advanced features". Le premier multiplie les possibilités de choix des esclaves Devicenet tandis que le second donne accès à des fonctions système avancé.

Le programme utilisateur peut être divisé en plusieurs "Modules", dans lesquels on trouve toutes les données et les routines locales. Les "modules Système" hébergent tous les éléments génériques, utilisés par tous les programmes utilisateurs.

Les routines sont des sous-programmes écrits dans le langage "RAPID" dont la syntaxe s'apparente à celle du langage informatique Pascal. Il existe trois types de routines :

- Les Procédures sont des sous-programmes qui ne renvoient aucune valeur.
- Les Fonctions retournent une variable et sont utilisées dans des instructions.
- Les Traps permettent de gérer des interruptions et sont très utiles lorsque l'on souhaite réagir à l'apparition d'évènements asynchrones. Ce type de sous-programme n'est jamais appelé par une instruction.

Comme pour toute application, l'organisation du programme commence par l'identification des tâches primaires. La majorité de ces tâches est programmée dans des procédures. Nous utiliserons également des traps pour gérer les horloges, indispensables à l'ordonnancement. Enfin, des séquences de tâche correspondant à différents cycles de fonctionnement seront construites dans le "Main".

En mode automatique le robot lance l'exécution de la routine principale Main. Les appels de routine et les autres instructions sont traités de manière séquentielle.

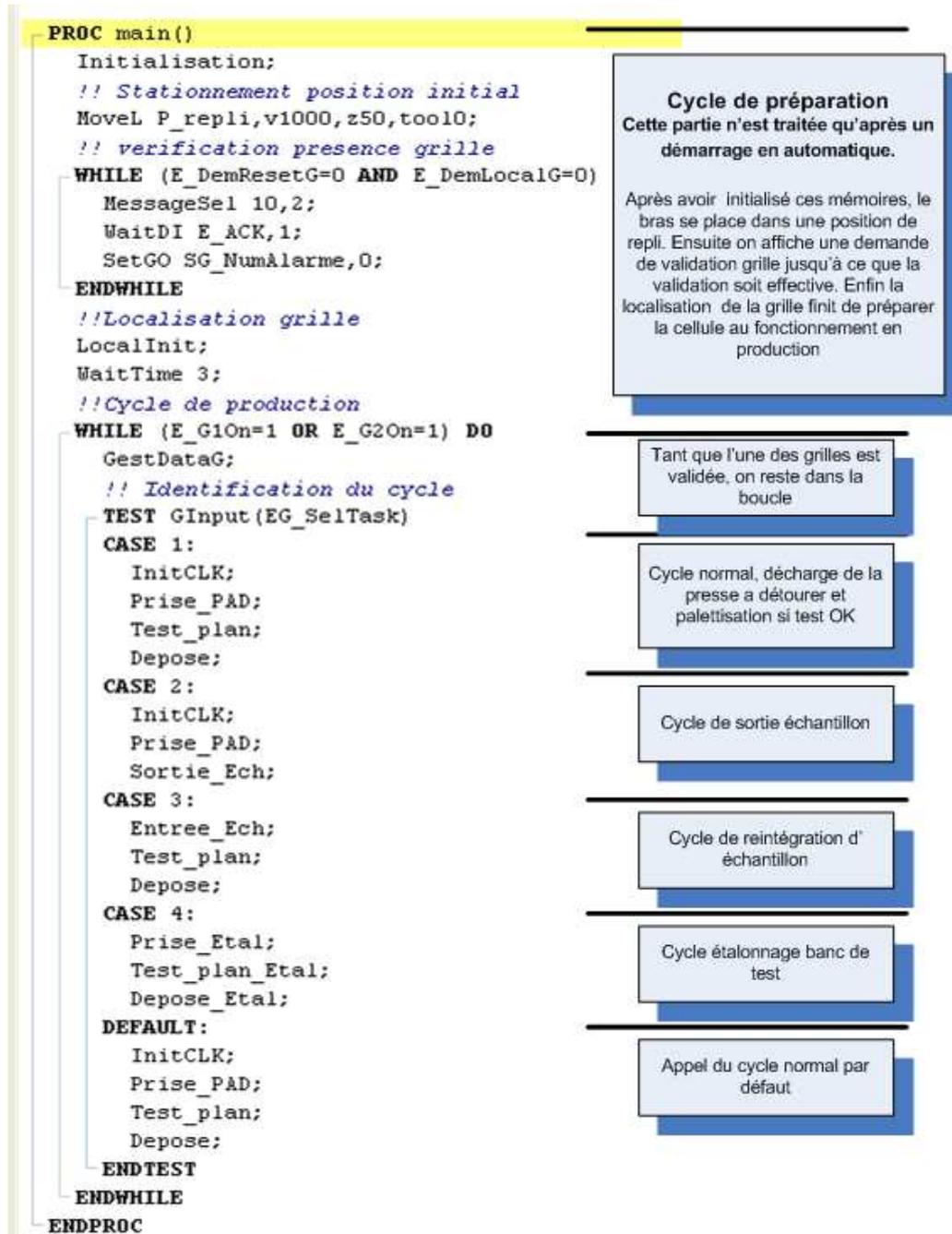


Figure 31: Routine principale "Main" du programme robot

### 3.2.4.c. Programme afficheur

Muni d'un écran 10 pouces, le moniteur tactile est destiné à améliorer la convivialité et le contrôle de la cellule. De nombreuses informations sont présentées sous forme graphique et facilitent l'échange entre le système et le conducteur de l'îlot. Le moniteur est également équipé de nombreux ports d'entrées-sorties : ports série RS232 /RS482/RS485, Ethernet, USB, CF Card.

L'atelier logiciel « GP-Pro EX » donne la possibilité de programmer des pages de communication. Cette programmation est orientée objet et le logiciel dispose d'une bibliothèque d'outils qui répond en grande majorité aux besoins courants. De plus, des scripts utilisateurs permettent de répondre aux besoins particuliers. Il existe trois types de scripts :

- Les « D-scripts » sont liés aux pages utilisateur et sont actifs uniquement lorsque la page est affichée.
- Les « Global D-scripts » peuvent être appelés à tout moment quelle que soit la page affichée.
- Les Scripts Etendus qui vont nous permettre de programmer une communication via le port RS232.

Toutes les pages sont construites à partir d'un modèle. Ce modèle définit trois zones ayant chacune leurs fonctions.

- **La zone d'en-tête** est utilisée pour faire apparaître les informations d'ordre général. On y retrouve des informations sur les cellules, le mode de fonctionnement du robot ainsi que de la presse à détourer.
- **Le corps de la page** se trouve dans la seconde zone. C'est là que sont situés les outils d'échange liés à la page. On retrouve principalement des boutons poussoirs, des zones d'affichage et de saisie de valeurs numériques. Enfin, des objets graphiques améliorent la lisibilité et facilitent l'utilisation.
- **La navigation** entre les pages se fait via la dernière zone. L'accès aux différentes pages est organisé par arborescence.

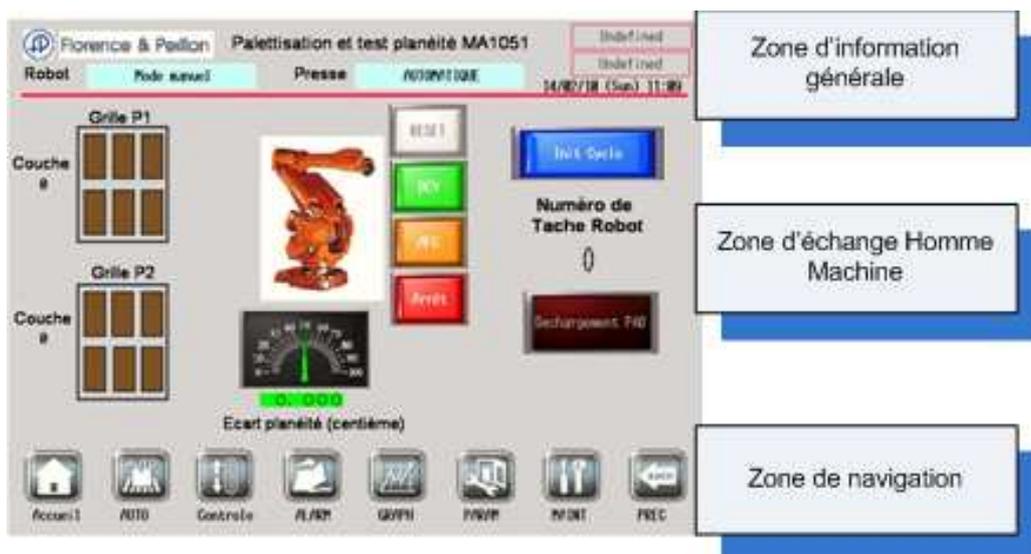


Figure 32: Structure d'une page IHM

3.2.5. Communication et réseaux

Il existe de nombreuses façons de réaliser la communication entre machines. Deux facteurs principaux vont guider notre choix : le nombre de données à échanger et les différentes solutions offertes par les équipements. Dans notre cas, l'architecture de la cellule nous impose de centraliser les informations dans l'API.

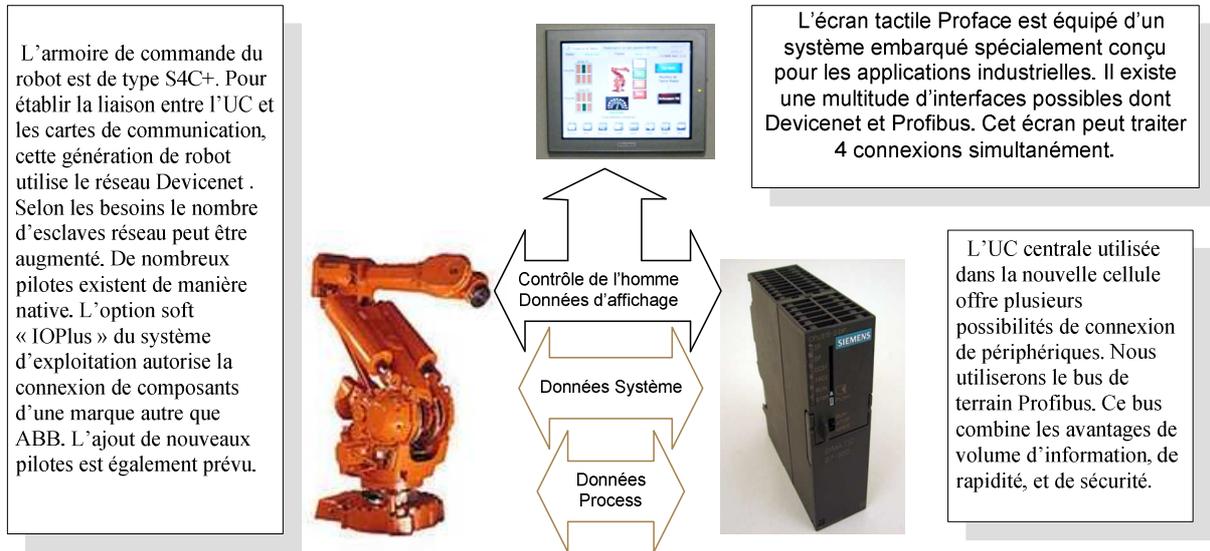


Figure 33: Vue d'ensemble de la communication

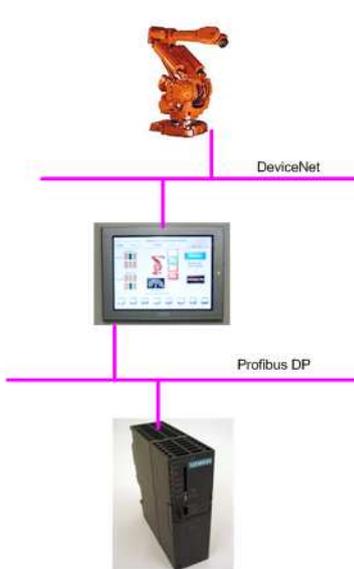


Figure 34: Architecture réseau

L'écran tactile "Proface" va s'avérer très utile, car il va servir de passerelle entre les deux bus. Une liaison MPI via le port série RS485 établit la communication avec l'automate. En ce qui concerne la liaison Devicenet une carte optionnelle doit être connectée à l'arrière de l'écran. Les drivers sont déjà intégrés au système.

Pour ces deux bus de terrain, le moniteur ne peut être configuré que comme esclave. Le fichier ESD<sup>13</sup> renseigne le maître du réseau Devicenet. Il est utilisé pour créer un driver dans le système du robot.

<sup>13</sup> ESD : Fichier qui contient les informations nécessaires au maître du réseau Devicenet.

## **Chapitre4. Etude et mise en œuvre des tâches spécifiques**

### ***Introduction***

Le précédent chapitre nous permet d'avoir un aperçu sur le fonctionnement, la coordination et la communication entre les différents équipements.

Pour garantir la qualité des tâches accomplies et valider la faisabilité dans un environnement réel, la mise en place d'une cellule prototype s'imposait comme la meilleure solution. Cette cellule reprend tous les équipements de la future installation, et son implantation est réalisée de manière à se rapprocher le plus fidèlement possible de la forme finale. Après avoir vu les solutions techniques pour ranger les pièces dans les grilles, nous verrons comment les tests de planéité peuvent être réalisés avec un robot.

## **4.1. Réalisation de la palettisation**

A la sortie de chaque îlot de moulage, les conducteurs de ligne sont chargés de mettre les pièces en grille. Nous avons vu qu'en plus des problèmes liés à la décharge avec une pelle mécanisée, le rangement manuel est pénible et ne permet pas de réaliser des tests en continu. En partant de la situation actuelle où nous fixerons les objectifs, nous verrons de quelle manière le robot palettise les pièces.

### **4.1.1. Situation actuelle**

Comme nous l'avons vu dans la présentation de l'îlot le rangement des pièces est une opération effectuée entièrement à la main. Les pièces sont disposées pour que les couches s'emboîtent les unes dans les autres. C'est de cette manière que l'on obtient un empilage uniforme dans la grille sans utiliser d'intercalaire. Non seulement la contenance de chaque grille est augmentée mais le transport est aussi facilité. Ce mode de rangement implique la gestion de deux types de couches différentes.



**Figure 35:** Grille de 10844

### 4.1.2. Gestion des entrées sorties grille

Avec l'extension de l'îlot de moulage, la grille de rangement devient un élément d'entrée de cet îlot. Le déchargement des grilles pleines et leur remplacement doivent être réalisés par l'opérateur ; la sécurité reste une priorité dans le choix des solutions.

Les emplacements de grille sont accessibles à l'opérateur ainsi qu'au robot. Pour assurer la continuité de la production pendant le remplacement des grilles, un minimum de deux zones est nécessaire. Chaque zone fonctionne comme un sas sécurisé. Ces sas comportent chacun deux accès condamnables. La voie d'accès principale, une porte coulissante verticale, est équipée d'un interrupteur de sécurité verrouillable, contrôlé par l'automate programmable. Cette voie permet l'introduction des grilles. La seconde voie, l'aire située juste au-dessus de la grille, est protégée par une barrière immatérielle. Le robot doit pouvoir pénétrer cette partie de l'installation pour réaliser les opérations de palettisation.

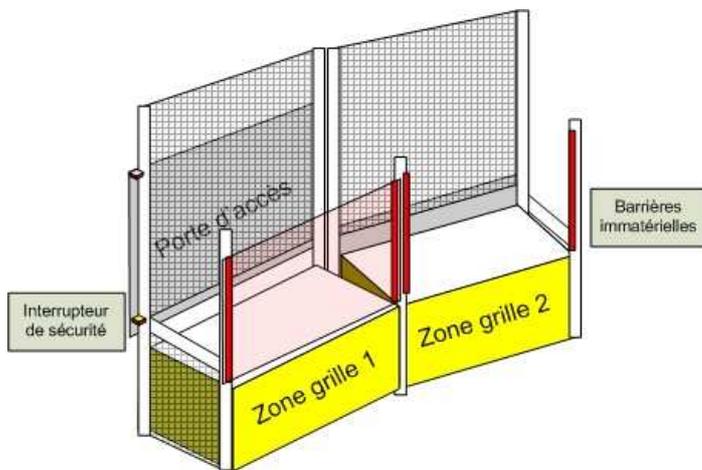


Figure 36: Protection des zones grille

Pour garantir la sûreté de fonctionnement de la cellule, ces deux accès ne doivent en aucun cas être franchissables simultanément. Une solution simple est d'activer la surveillance de la barrière immatérielle seulement lorsque la porte est déverrouillée. Une interdiction d'accès dans cette zone sera également envoyée au robot. L'autorisation d'accès et le déverrouillage ne se feront que lorsque toutes les conditions de sécurité seront respectées.

La figure 36 montre le schéma de principe de l'installation<sup>14</sup>. La zone un est prête à être chargée. La partie colorée en rouge montre la surface contrôlée par les barrières optiques. La zone deux est en cours de palettisation, la porte est fermée et verrouillée.

Sur ce type d'installation, il est essentiel de prévoir tous types d'accident, y compris ceux issues d'un comportement dangereux. Ce système ne permet pas à lui seul de vérifier si une personne s'est introduite dans la zone avant de fermer la porte par l'intérieur. Afin d'éviter la mise en production dans ce genre de situation et également d'assurer que la grille chargée est bien vide, un message "Popup" apparaît après la fermeture de la porte de protection. Ce message oblige l'utilisateur à valider le chargement de la grille par un appui sur un bouton poussoir de l'écran tactile. Ce n'est qu'après cette validation que la zone sera mise en production, et la barrière optique désactivée.

<sup>14</sup> Zones grille : Dans le souci de préserver un schéma simple, les carters et grillages de séparation n'ont volontairement pas tous été représentés.



Figure 37: Demande de confirmation par "Popup"

En cas de détection de défaut (perte du signal de verrouillage de la porte ou coupure de la barrière pendant qu'elle est active) sur ce système de sécurité, l'îlot sera mis en arrêt d'urgence. Ce dispositif assure une protection de classe quatre et répond aux exigences de la norme DIN EN 954-1.

#### 4.1.3. Gestion de la position des grilles

Malgré la simplicité apparente, réaliser la palettisation des pièces nous a posé quelques difficultés majeures : la position de la grille, et la hauteur de la pile de pièces dans la grille. Ces difficultés viennent principalement des contraintes liées à l'exploitation de ce système dans des conditions de production industrielle. La cellule doit combiner les caractéristiques suivantes : simplicité d'utilisation, flexibilité et robustesse.

##### 4.1.3.a. Position des grilles

Le rangement dans les grilles reste délicat car les pièces doivent être déposées à des positions très précises. La disposition des pièces qui est définie dans le cahier des charges, n'admet que quelques millimètres de décalage (environ 5 mm).

Les coordonnées de ces points de dépose ne sont pas constantes. Elles dépendent de la position de la grille. Les grilles seront déplacées pendant les opérations de chargement et de déchargement. Malgré la présence d'un support de grille, l'emplacement de la grille nouvellement chargée sera décalé de plus ou moins quelques centimètres par rapport à l'emplacement de celle qui vient d'être déchargée.

Pour venir à bout de cette difficulté deux solutions se présentaient à nous:

- la première, la plus évidente, consiste à utiliser un moyen mécanique pour amener la grille en position voulue. Cette technique est simple et peut fournir une précision suffisante. Elle présente également des inconvénients : hormis les augmentations de coût et les difficultés d'implantation du mécanisme dans la zone grille, cette solution manque de robustesse et de répétabilité : l'usure des pièces mécaniques et la présence de corps étrangers sont des paramètres non maîtrisés.
- La seconde solution est l'inverse de la première. Plutôt que d'amener la grille sur une position prédéfinie, il est tout à fait envisageable de faire coïncider les positions de dépose à l'emplacement de la nouvelle grille.

Nous choisirons la seconde solution principalement pour sa robustesse.

Pour réaliser une telle tâche, nous allons utiliser les repères objets " Wobjdata": un type de données proposé par le langage robot. Un repère sera affecté pour chaque zone de chargement. Les coordonnées des points de dépose pièces seront exprimées dans ces repères. Après chaque remplacement de grille, cette méthode va nous permettre d'ajuster les points de dépose en effectuant un simple déplacement de repère objet.

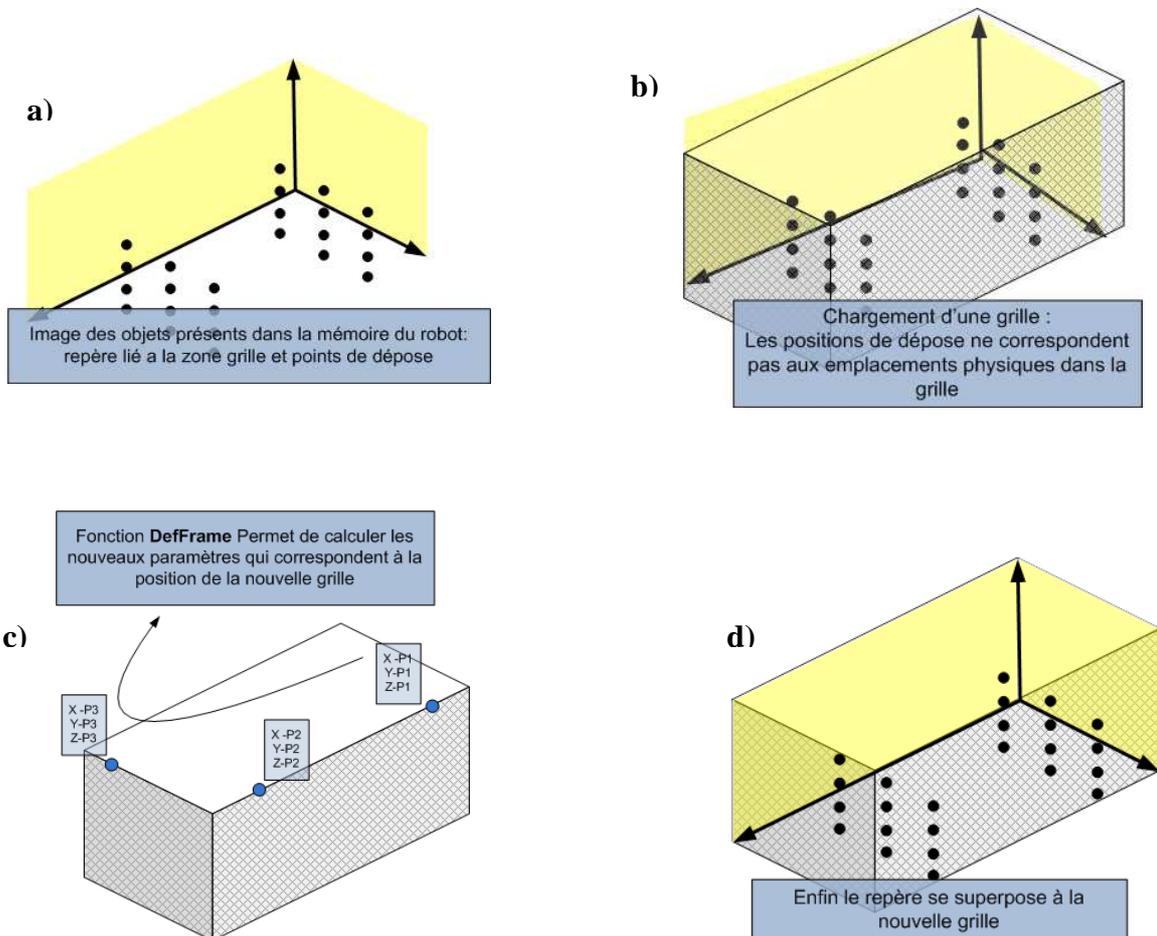
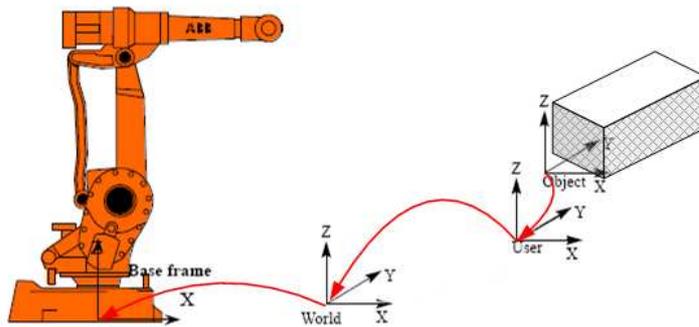


Figure 38: Phases de localisation d'une grille

#### 4.1.3.b. Réalisation de la localisation



**Figure 39:** Dépendance des repères objet dans le système de coordonnées

Les repères objets sont utilisés pour effectuer des déplacements sur des ensembles de points qui se répètent. Ces ensembles sont identiques les uns aux autres, mais occupent différentes positions dans l'espace de travail du robot. La figure 39 montre les dépendances entre des repères dans le système de coordonnées du robot.

Le déplacement ne peut être réalisé qu'après avoir localisé la nouvelle grille. Il existe de nombreuses possibilités pour réaliser cette opération :

- Localisation après analyse d'image fournie par un capteur de vision
- Mesure de distance avec détecteur optique (ou ultrason).
- Utilisation d'un capteur tout-ou-rien, embarqué sur la main du robot.

Cette dernière solution alourdit le programme robot, puisqu'elle impose un cycle de reconnaissance de la position grille avec le bras robotisé, mais nous la choisirons pour ces nombreux avantages : insensible aux variations de lumière, ne nécessite aucun étalonnage, résistance aux chocs mécaniques du capteur, et enfin coût réduit.

Muni du capteur, le robot va balayer une aire prédéfinie jusqu'à détecter le rebord de la grille. Le signal sera exploité par l'instruction « SearchL » pour mémoriser la position atteinte à cet instant. Trois points sont nécessaires pour créer une image de la position de la grille. Ces points seront définis dans le repère de base du robot.

#### 4.1.4. Dépose des pièces

Comme nous venons de le voir, l'emplacement des pièces est défini dans un repère objet. Les positions sont fixes et ne sont pas appelées à évoluer. Comme le cahier des charges l'indique, une grille doit contenir 19 couches de 6 pièces, soit un total de 114 pièces. De plus les couches paires et impaires présentent des caractéristiques différentes (voir annexe A2).

#### 4.1.4.a. Points de rangement

Il est évident que créer un point robot pour chaque emplacement serait une solution très lourde et très compliquée à gérer au quotidien. Il ne faut pas oublier que pendant la période d'exploitation, les opérations de maintenance ou les évolutions apportées au robot peuvent entraîner des décalages sur les points mémorisés. Lorsque cela se produit, la seule solution est d'effectuer un apprentissage<sup>15</sup>.

Une solution plus souple est d'utiliser un algorithme de calcul pour retrouver les points à partir d'une position de référence. Cette position « P\_RefGrille » sera enregistrée dans le repère lié à la zone grille. Ensuite toutes les autres positions seront calculées en fonction des paramètres de décalage et des compteurs de remplissage grille.

La fonction « Reltool », très pratique, permet de commander un déplacement en spécifiant un point d'origine et les paramètres d'offset : translation et rotation suivant les axes X, Y et Z du repère outil. Nous l'utilisons pour gérer les différences entre les couches.

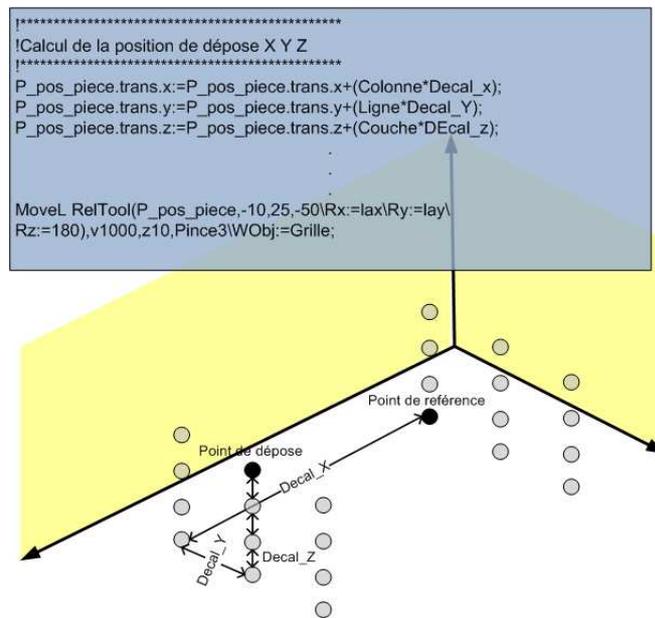


Figure 40: Exemple de calcul de la position de rangement.

#### 4.1.4.b. Hauteur de remplissage de la grille

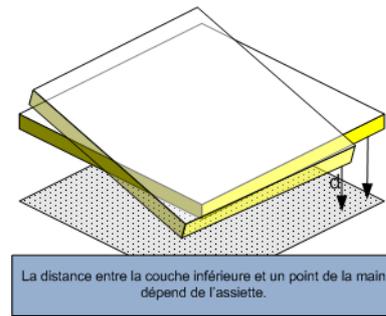
Dès les premiers essais, nous avons rapidement vu les limites de cette solution. La superposition des dix neuf couches entraîne une différence de hauteur qui va en grandissant au fur et à mesure que le remplissage avance. Ce phénomène engendre beaucoup de défauts car la dépose de pièces moulées les unes sur les autres nécessite un positionnement très précis en hauteur. Lors du lâché de la pièce, si cet écart est supérieur à quelques millimètres, nous observons des rebonds, et un déplacement de la pièce par rapport à sa position finale théorique. Le positionnement, juste au-dessus de la couche supérieure, ne peut se faire sans système de détection adapté. De plus, cette détection permettra de combler les aléas qui peuvent faire varier la hauteur des couches : présence de pastilles<sup>16</sup>, variation de hauteur du fond de grille...

<sup>15</sup> Opération qui consiste à positionner le robot sur un point physique et à commander une mémorisation de ce point.

<sup>16</sup> Pastilles : partie de la pièce moulée que l'on détache au détourage.



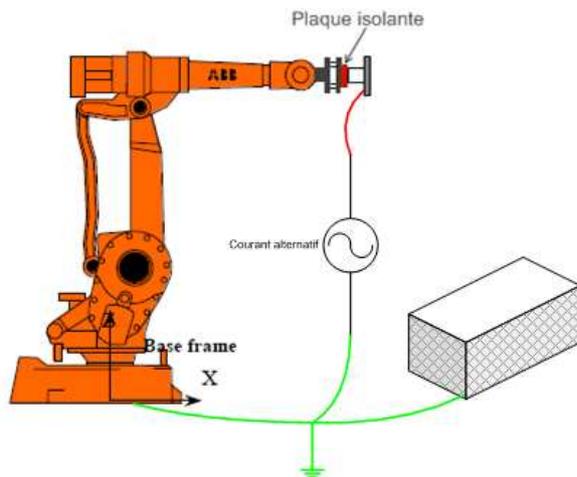
**Figure 41:** Dégagement du bras pendant la dépose



**Figure 42:** Assiette et distance d'approche

La principale difficulté réside dans le choix du système de détection. Nous pourrions une fois de plus, utiliser un capteur embarqué sur la main, mais cela remettrait en cause la technique que nous avons utilisée pour dégager le volumineux poignet du robot (Figure 41). En effet, en jouant sur l'orientation de la main, nous ajustons la position du poignet, pour permettre au bras de pénétrer dans la grille sans percuter les faces. Dans une même couche, en fonction de la position de dépose, l'assiette de la main est modifiée (Figure 42). Cette variation rend l'utilisation d'un capteur TOR très délicat.

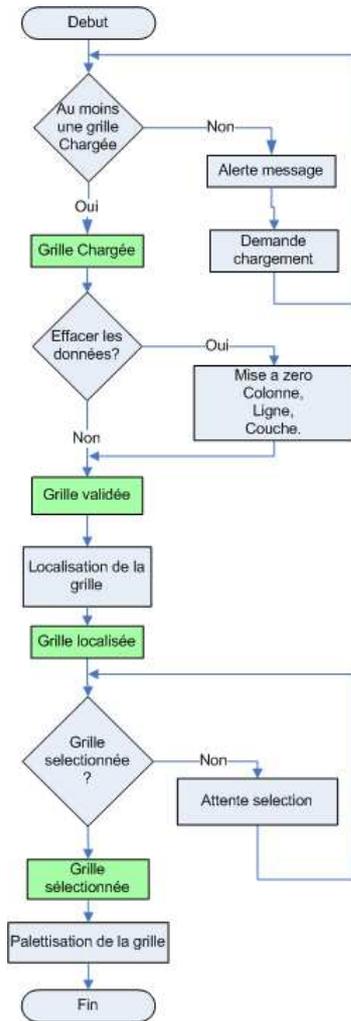
Pour venir à bout de ce casse-tête, nous nous sommes inspirés du système de détection de niveau métal utilisé dans les fours de maintien. La hauteur du liquide en fusion varie en fonction des remplissages et des prélèvements. Le chargeur de métal qui vient puiser une quantité précise de métal connaît sa position d'arrêt grâce à une électrode et un capteur de niveau. Nous utiliserons une solution équivalente pour déterminer avec précision la hauteur de remplissage de la grille.



**Figure 43:** Boucle de détection de la hauteur des pièces

Un capteur de niveau placé dans l'armoire S4C+, fournit une tension alternative de 8 volts. L'une des bornes de cette source de tension est connectée à la main. Celle-ci est isolée de la masse grâce à une pièce en nylon placée sous la pince. La cathode est connectée à la masse. Pendant la phase d'approche, dès que la pièce se trouvant dans la main du robot rentre en contact avec la dernière couche de la grille, le circuit de détection du capteur est bouclé. Ceci n'est possible que par l'absence de matière isolante. Des essais avec des grilles présentant une surface rouillée ont également été concluants. Enfin le capteur de niveau transmet l'information au robot par le biais d'une entrée automate.

4.1.5. Contrôle par le conducteur de l'installation



La cellule de palettisation doit avoir un fonctionnement flexible et permettre l'intervention des personnes formées lorsque cela est nécessaire. De plus, l'état et le niveau de remplissage de chaque grille doivent être consultables.

Le logigramme 1 nous montre les quatre états qu'une grille peut prendre.

- Grille chargée : la porte de la zone grille concernée est fermée et la présence de la grille est détectée.
- Grille validée : l'opérateur a indiqué par appui sur l'écran tactile que la grille est vide.
- Grille localisée : la position de la grille est mémorisée dans le robot.
- Grille sélectionnée : Dans le cas où les deux grilles sont validées et localisées, seule l'une d'entre elles sera sélectionnée pour le remplissage. La seconde est prête et reste disponible. Lorsque deux grilles sont à l'état localisées, l'automate donnera la priorité à la grille située dans la zone un ou à celle qui contient le plus grand nombre de pièces.

Une demande d'accès sur la grille en cours de palettisation entraîne l'initialisation de son état. Le remplissage ne pourra reprendre qu'après avoir validé séquentiellement tous les états.

Un maximum d'information est aussi apporté au conducteur de l'installation grâce à l'écran tactile.

Logigramme 1: Logigramme de gestion des grilles

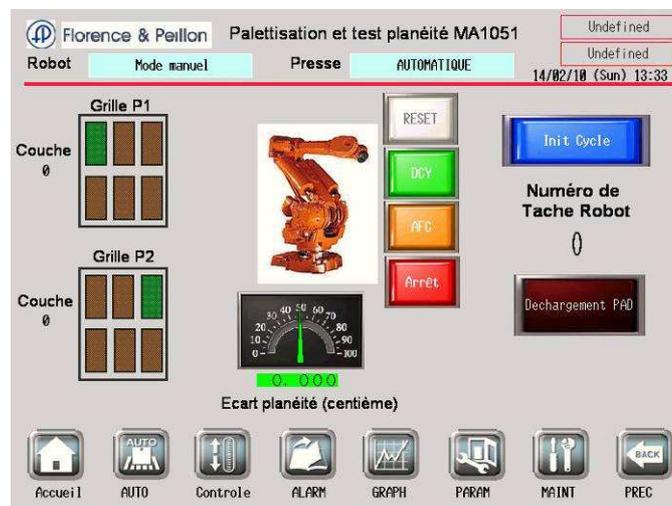


Figure 44: La page de garde dispose de nombreuses animations.

## 4.2. Réalisation du contrôle de planéité

La maîtrise de la pièce brute et la détection des défauts de moulage représentent un enjeu important pour l'entreprise. Un bref aperçu sur le cycle de production du carter chapeau, nous montre qu'après le moulage cette pièce subit de nombreuses opérations avant d'être livrée chez le client final. On comprend aisément que plus les défauts seront détectés en amont de cette ligne de production, moins les coûts de non qualité seront importants.

L'implantation de la cellule robotisée représente l'occasion idéale de réaliser un test en ligne sur les pièces. Les nombreux contrôles sont effectués sur des échantillons de pièces prélevées en fin de grille : contrôle de la santé matière, contrôle de la présence des broches, contrôle de la géométrie, contrôle de la planéité...

Suite aux études menées par un groupe de travail multi-compétences, le contrôle à généraliser à 100% des pièces s'avère être le test de planéité. Ce choix s'explique, d'une part, par l'apparition de manière complètement aléatoire<sup>17</sup> du défaut de planéité et, d'autre part, par les pertes importantes qui y sont liées.

Dans cette partie nous allons voir comment nous sommes passés d'un moyen de mesure manuel à une solution de test automatisé en examinant les deux points cruciaux qui sont le positionnement de la pièce et l'acquisition des données.

### 4.2.1. Moyens de contrôle existants



Figure 45: Moyens de contrôle planéité manuel

Le banc de test planéité manuel est équipé de 10 palpeurs haute précision noyés dans une plaque en aluminium. Le résultat du test est obtenu en calculant l'écart maximum entre deux mesures.

Des butées mécaniques sont placées de manière à imposer un sens de positionnement à la pièce. Trois pinces réalisent l'appui nécessaire à la mesure.

### 4.2.2. Solution générale

Réaliser un test de planéité dans un environnement de production industrielle présente de nombreuses contraintes. Le principal obstacle est d'assurer des résultats fiables. Ceci n'est possible qu'en écartant les nombreuses sources de pollutions. En effet, le moulage, le détournage ainsi que la manipulation des pièces entraînent la présence de paillettes et de masselottes dans toute la cellule robotisée. L'utilisation d'un simple banc posé sur un support n'est donc pas envisageable.

Pour écarter tous ces éléments nuisibles, la première idée fut d'équiper la cellule d'un moyen de mesure autonome complètement fermé. Les écrans de protection devant empêcher

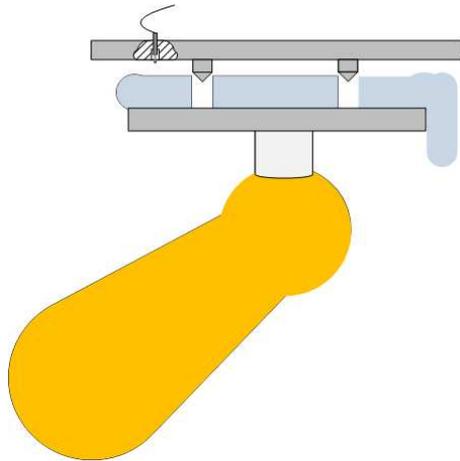
---

<sup>17</sup> Les pièces produites après l'apparition d'une pièce voilée peuvent tout à fait être bonnes. D'où la difficulté d'écarter toutes ces pièces avec un test réalisé sur des échantillons.

les paillettes de pénétrer dans les zones de contrôle. Cette solution simple et fiable présente deux inconvénients majeurs qui sont la durée du test et surtout les coûts de fabrication.

Les différentes recherches effectuées pour minimiser les coûts et les temps nous ont amenées à reconsidérer la totalité de la procédure de test. Elles ont abouti à une solution complètement innovante.

Le banc, simplifié au maximum, ne se compose plus que d'une plaque (à l'image du banc manuel) installé à l'envers. Cette configuration limite les dépôts par gravité sur la face utile du banc. De plus, l'ajout de carters de protection sur les côtés et l'implantation de ce banc dans un secteur peu touché par les projections empêchent tous types de dépôts.



Avec un tel banc, le positionnement et le maintien de la pièce à tester peuvent être réalisés soit avec le robot soit par un actionneur annexe : vérin pneumatique, pince...

L'utilisation du robot assure plus de mobilité.

Nous verrons dans la suite que de nombreuses modifications seront apportées à la main du robot afin de rendre cette opération possible.

**Figure 46:** Principe de positionnement de la pièce

La mesure proprement dite commence à partir du moment où la pièce est positionnée correctement. Selon les termes du cahier des charges, nous utiliserons dix palpeurs solidement ancrés, dans la plaque principale du banc. L'appui du robot plaque la pièce en appui sur les trois plots prévus à cet effet. Dans cette position, les tiges des palpeurs sont en contact avec la pièce. Les signaux délivrés expriment la distance entre le bâti et la pièce. Ces résultats permettent de calculer l'écart de planéité donné par la formule min-max<sup>18</sup>.

### 4.2.3. Positionnement et maintien

Comme nous venons de le voir, la fiabilité du résultat dépend énormément du positionnement. Pour valider la méthode utilisée, le procédé doit afficher un R&R<sup>19</sup> qui satisfait les exigences du cahier des charges.

L'annexe A05 détaille la procédure de validation R&R.

#### 4.2.3.a. Caractéristique du robot 6400R

L'approche et le maintien de la pièce doivent être réalisés par le bras robotisé. Il est donc utile de vérifier quelles performances notre robot affiche en asservissement de position et en suivi de trajectoire. L'annexe A03 présente un extrait de la documentation constructeur.

<sup>18</sup> Le résultat est égal à la mesure maximum moins la mesure minimum.

<sup>19</sup> Répétabilité et Reproductibilité

Les données fournies par le constructeur sont des moyennes de résultats obtenus sur plusieurs robots. Il est clair qu'un positionnement se basant uniquement sur ces performances ne serait pas satisfaisant. Ces valeurs s'expliquent principalement par le fait que le 6400R est un poids lourd de la robotique. Il est conçu pour transporter des charges allant jusqu'à 120 Kg.

#### **4.2.3.b. Solution assurant un bon positionnement**

Pour réaliser le test avec le robot, le positionnement sera assuré par centrage mécanique. Tout en conservant la mobilité offerte par le bras, un système mécanique va nous aider à placer la pièce d'une manière très précise sur le banc de contrôle.

Le but du centrage est de corriger l'écart de position. Tant que la pièce sera liée à la main du robot de manière rigide, toute correction entraînera une réaction du robot. Le système d'exploitation générera des alarmes d'excès du couple résistant ou « surcouple ».

Pour éviter de telles réactions l'unique solution est d'apporter de la souplesse. Cette souplesse peut être obtenue de deux manières différentes :

- **Compliance active** : consiste à utiliser la compliance de l'actionneur. En mettant en œuvre des fonctions système du robot, une correction apportée sur le gain de boucle de chaque axe rotatif permet de limiter la réaction du robot à l'apparition d'une erreur de position.
- **Compliance passive** : Cette méthode aussi appelé RCC<sup>20</sup> consiste à ajouter une compliance sur l'outil du robot. Dans ce cas la souplesse est apportée par un mécanisme passif de l'outil.

Dans le but d'assurer les meilleurs résultats possibles, un maximum de degrés de liberté va être donné à la pièce. Afin d'apporter les réponses les plus adaptées, nous allons séparer les 6 mouvements en 2 groupes :

- Groupe 1 Tx, Ty, Rz : ces trois mouvements sont rendus possibles par un simple desserrage de la pince. En commandant le desserrage juste avant d'approcher le banc de contrôle, la pièce est comme posée sur un support et bénéficie d'un jeu important dans ses mouvements.
- Groupe 2 Rx, Ry, Tz : le mouvement d'approche et de plaquage de la pièce est une combinaison de rotation des axes 2 et 3 du robot. Sur le plan lié au banc de contrôle cette combinaison de rotation se traduit par un mouvement linéaire en Z. La position en Z (donc Tz) reste liée au robot. Pour plaquer la pièce sur les trois points d'appuis du banc et ainsi obtenir deux plans qui se superposent, on doit introduire une rotation en X et en Y. Toute la difficulté est d'obtenir une compliance sur ces deux rotations.

#### **4.2.3.c. Compliance en Rx, Ry et Tz.**

Obtenir les rotations avec la stratégie « Soft servo » ne nécessite aucune étude mécanique et présente un coût réduit. Par contre la mise en œuvre reste complexe et la nature même de cette souplesse pose de grosses difficultés d'application.

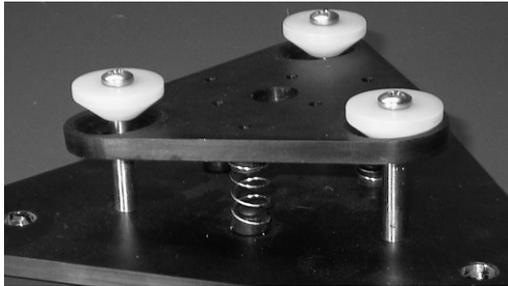
En effet, notre problème revient à ajuster l'assiette de la main au plan donné par le banc. L'orientation de l'outil est donnée par la position des trois axes du poignet (axes 4, 5 et 6). Utiliser la compliance active revient à limiter le couple des moteurs électriques pour permettre un positionnement. Avec cette méthode, c'est la position des trois axes qui doit être modifiée

---

<sup>20</sup> Abréviation du terme anglais Remote Center of Compliance.

pour venir caler le plan de la pièce sur le plan de contrôle. Nous avons donc à provoquer un léger mouvement sur l'ensemble de la chaîne cinématique de ces axes pour corriger l'assiette de la main.

N'oublions pas que ces mouvements vont être réalisés en prenant appui sur la pièce, qui elle-même, est en appui sur les plots de centrage. Ces plots sont ajustés afin de garantir un plan de contrôle fiable. Malheureusement, compte tenu du poids des membres du robot et des nombreux jeux d'engrenage dans les mécanismes, les forces d'appuis engendrées sur la pièce sont importantes. Les risques de marquer la pièce et d'abîmer les plots de centrage sont trop élevés.



**Figure 47:** Mécanisme donnant une compliance en rotation sur deux axes

Concernant la compliance passive, elle est plus simple à mettre en œuvre et donne de meilleurs résultats. Le seul inconvénient est le manque de flexibilité. Un outil présentant des degrés de liberté spécifiques à une application ne sera sûrement pas réutilisable dans un contexte différent.

La cellule robotisée n'est appelée à traiter que les carters chapeaux. La compliance passive s'impose comme la solution adéquate. De plus, la solution retenue assure également une compliance en  $T_z$ .

Nous nous sommes inspirés de l'exemple de montage mécanique de la figure 47 pour réaliser les modifications de la main du robot. Des ressorts maintiennent une plaque en appui sur trois cônes. Cette forme conique assure un positionnement précis lorsque la plaque revient en place.



**Figure 48:** Adaptation du mécanisme sur l'outil

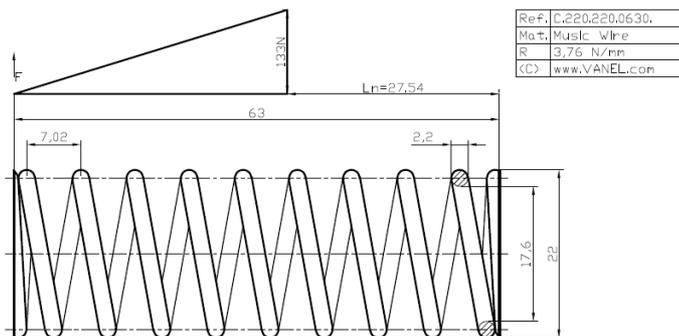
#### 4.2.4. Élément de mesure et contrôle de la force de poussée



**Figure 49:** Plaquage et appui de la pièce avec le bras robotisé

Outre l'ajustement de la pièce sur le plan du banc de contrôle, l'utilisation du mécanisme de la figure 48 permet de réaliser une poussée sur la pièce et enfin de plaquer celle-ci. La valeur de la force de poussée va dépendre de la compression des ressorts, ou plus simplement de la position en Z du poignet robot. Comme nous l'avons déjà vu, cette position fait intervenir les axes 2 et 3 du robot. Pour respecter le cahier des charges, un appui suffisant doit être exercé sur la pièce.

Avec une telle poussée, la résistance que rencontrent les axes 2 et 3 pendant la compression dépasse les limites admissibles par le robot et génère des alarmes de surcouple.



**Figure 50:** Caractéristique des ressorts utilisés

On peut dans ce cas réaliser le contrôle de force avec la stratégie « Soft servo ». Cette solution ne nécessite aucun capteur. De plus, en l'utilisant de manière appropriée, nous pouvons contrôler la force d'appui de façon suffisamment précise.



**Figure 51:** Phase d'appui, les ressorts sont comprimés sur plusieurs millimètres

Les ressorts montés sur la main présentent des caractéristiques linéaires. Suivant la compression, la plage de poussée possible va de 0 à 133 N. Comme les forces exercées sont coplanaires, la résultante a la direction de l'axe Z et peut prendre des valeurs comprises entre 0 et 400 N.

L'instruction « SoftAct » active le mode d'asservissement avec compliance. Les paramètres qui lui sont affectés indiquent l'unité mécanique, l'axe et enfin le coefficient de souplesse exprimé en pourcentage. Suivant l'inclinaison du plan du banc de contrôle, les composantes de force qui réalisent le mouvement linéaire en Z sont modifiées.

Une fois ces paramètres validés, la valeur de la force d'appui sera définie en fonction de la distance entre le point de destination programmé et la butée mécanique matérialisée par les plots de centrage. En utilisant l'instruction « MoveLOffs », il est possible d'inclure comme paramètre un offset en Z.

```
!! Mouvement d'approche
MoveL P_deb_plan,v50,fine,Pince3\WObj:=Banc_planeite;
!! Ouverture de la pince (compliance Tx, Ty, Rz)
Reset S_pince_3;
!! Passage en mode asservissement de position avec compliance sur les
!! axes 2 et 3
SoftAct\MechUnit:=IRB,3,30;
SoftAct\MechUnit:=IRB,2,10;
!! Commande d'avance le long de l'axe Z, L'offset en Z va déterminer
!! la compression des ressorts
MoveL Offs(P_deb_plan,0,0,22),v10,fine,Pince3\WObj:=Banc_planeite;
!! Commande de lancement du test de planéité
PulseDO\PLength:=1,S_DCYTest;
```

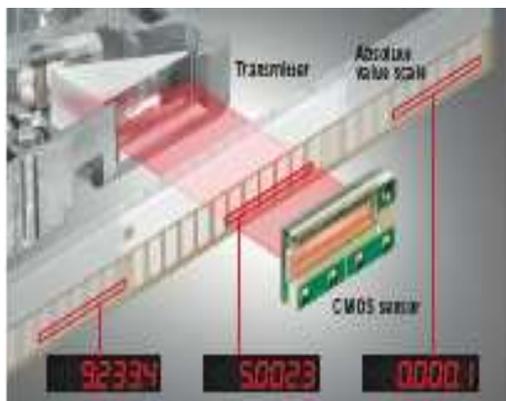
**Figure 52:** Instructions RAPID pour activer la commande avec compliance

### 4.2.5. Acquisitions et traitement

Le contrôle des 10844 doit garantir que toutes les pièces livrées au client interne (service usinage), présentent un écart de planéité inférieur à 0,5 mm sur toute leur surface. Le cahier des charges prévoit un test sur 10 points de mesure repartis sur toute la surface. Ce procédé, déjà utilisé sur les bancs de contrôle manuels, donne une mesure satisfaisante.

#### 4.2.5.a. Choix du matériel

L'ensemble du banc de mesure sera très similaire à ceux existants dans nos laboratoires de métrologie. Cela dit, le matériel que l'on retrouve sur ces bancs manuels n'est pas conçu pour fonctionner dans un environnement difficile. Même si les capteurs de distance seront protégés des projections et des chocs mécaniques, l'utilisation de matériel pour milieu industriel semble s'imposer. La présence de nombreux liquides (eau, brouillard d'huile de poteyage, huile hydraulique) nous a poussé à opter pour du matériel avec un indice de protection IP68.



Après la consultation de différents fournisseurs d'équipements de mesure de distance, le choix s'est porté sur un palpeur numérique (GT2 de Keyence). En plus de garantir une protection efficace contre les fluides et les solides, ces capteurs présentent l'avantage de fournir une mesure numérique. Le procédé utilisé est la lecture de position sur une règle numérique optique. Contrairement au capteur analogique, ce modèle numérique ne présente pas de défaut de linéarité.

Figure 53: Principe de la mesure avec règle optique

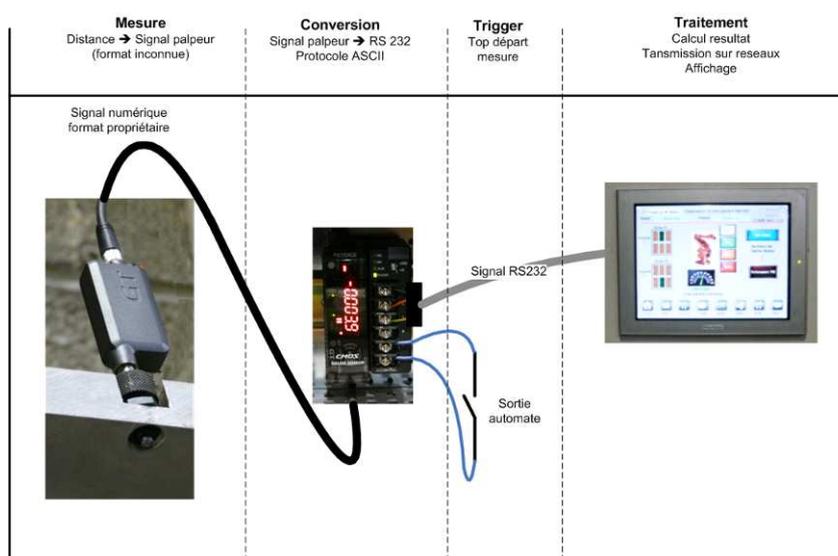
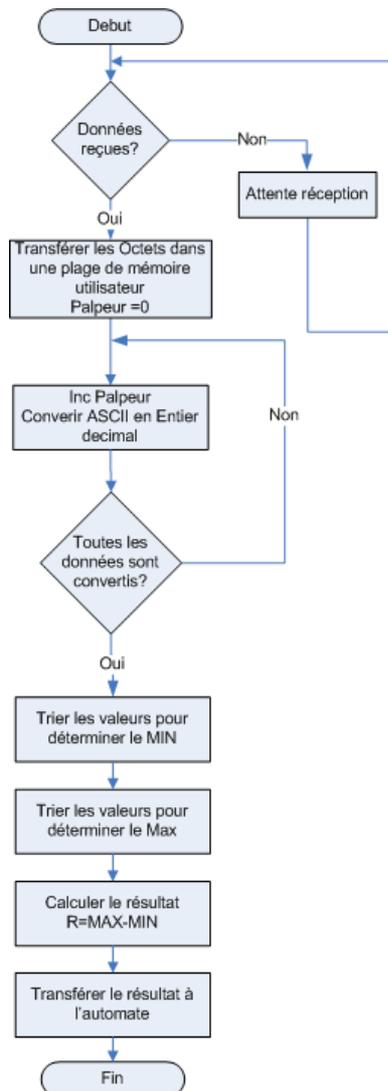


Figure 54: Chaîne d'acquisition des données de mesure de distance.

#### 4.2.5.b. Solution de communication



**Logigramme 2:** Script de traitement des données ASCII.

Les palpeurs offrent trois types de sortie : analogique, BCD, ou RS 232. Suivant le choix, des modules complémentaires viennent s'ajouter au terminal du capteur.

Compte tenu du nombre de capteurs et dans le but de réduire la chaîne de mesure, c'est la solution RS232 qui a été retenue. Une fois le module additionnel DRL09 ajouté, une liaison RS 232 transmettra les données vers le terminal Proface. Le port COM1 du terminal sera paramétré pour le traitement des octets de donnée reçus. La communication ne sera établie qu'après avoir configuré les paramètres de transfert des données.

Un Script étendu nous donne la possibilité de programmer le traitement des données reçues par le terminal. Lorsque celui-ci reçoit un paquet de données, les informations sont stockées dans une zone de mémoire tampon, puis le script qui est lié au port de communication sera exécuté. Ce script commence par traduire les données ASCII en variables entiers. Ensuite les calculs sont exécutés sur ces entiers pour obtenir le résultat final du test.

#### 4.2.5.c. Gestion des rebuts

Les pièces voilées qui présentent des valeurs de planéité en dehors des tolérances seront écartées. Il est possible de les intégrer dans le circuit de recyclage de l'aluminium en les déposant simplement sur le tapis placé sous la presse à détourer. Ce tapis est justement prévu pour collecter les déchets en aluminium qui tombent après le cycle de détourage. L'ensemble des déchets est ensuite transporté dans un container de récupération. Enfin, ces containers seront vidés dans les fours de fusion.

### 4.2.6. Etalonnage

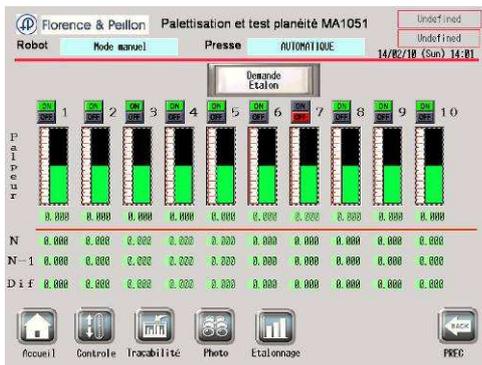


Figure 55: Page destinée à l'étalonnage et à la vérification des palpeurs.

La présence de nombreux éléments polluants et les dérives constatées après un grand nombre de cycles, nous oblige à réaliser un étalonnage très régulièrement sur la machine.

Cet étalonnage consiste à tester une matrice étalon. Cette mesure est réalisée de manière robotisée et les valeurs sont ensuite enregistrées. Après avoir comparé ces données avec celles de la précédente mesure, deux situations sont prévues : si des différences importantes apparaissent, le système est programmé pour alerter le conducteur de ligne, sinon ces données sont utilisées pour calculer un offset et corriger la mesure.

Le cycle d'étalonnage sera automatiquement réalisé à chaque relance de la machine. Le robot aura le temps de réaliser ce cycle pendant le fonctionnement en Start de la presse à injecter.

### 4.2.7. Interface homme machine

Les tests en ligne sur la totalité de la production ont pour objectif majeur d'assurer l'absence de produit voilé dans toute la partie aval de la ligne de fabrication. Un avantage supplémentaire sera qu'en plus de la maîtrise du produit, les nouveaux moyens vont améliorer le contrôle de l'installation.

L'interface homme machine tient une place particulière dans le contrôle de ce nouveau système. Le but est de prendre les bonnes mesures pour assurer une bonne réactivité de l'installation et des hommes dans le cas où des dérives seraient constatées. Un bon échange avec les conducteurs d'installation passe par des outils de visualisation et de commande simples et rapides.

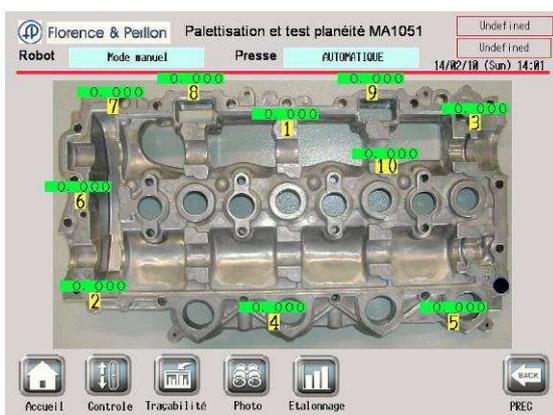


Figure 56: Page d'aide au diagnostic

Avec l'aide de personnes chargées des fonctions techniques dans le secteur de la fonderie sous pression, plusieurs pages ont été spécifiquement conçues pour aider à diagnostiquer les causes des défauts de planéité. De plus l'intégration de différents seuils permettent de programmer un comportement graduel : suivant la situation et l'amplitude des dérives, on passe d'un simple message d'alerte à une alarme sonore ou à l'arrêt de l'installation.

#### 4.2.8. Mémorisation

Les éléments de mesure permettent de décider à un instant donné si la pièce est conforme ou non. Mémoriser ces données représente un intérêt pour deux raisons.

La première est de tracer des courbes représentant l'évolution des mesures sur l'écran tactile. Nous attendons que ces courbes mettent en évidence deux types de phénomènes :

- Les tendances de fond qui peuvent être analysées pour prévoir les remplacements des pièces d'usure sur le moule ou la matrice.
- Les phénomènes cycliques que l'on pourra observer nous donneront de précieuses indications pour diagnostiquer les causes de déformation des pièces.



La seconde raison est plus liée à l'image de la société vis-à-vis du client final. Dans le cas où des pièces sont livrées avec défaut, des réclamations sont effectuées par le client. Nos procédures qualité et nos méthodes de management de l'amélioration continue nous imposent de mettre en œuvre des actions correctives. Malheureusement, lorsque cela se produit, nous manquons souvent d'informations pour effectuer des analyses pertinentes et décider des mesures efficaces. Ces données peuvent être des sources d'information très utiles.

**Figure 57:** Visualisation des mesures avec possibilité de navigation.

## **Chapitre5. Résultats**

## *Introduction*

L'étude et la réalisation de la cellule prototype nous ont permis de tester des applications innovantes et prometteuses. De réelles évolutions dans nos méthodes de production sont maintenant envisageables. Tout au long de cette étude, nous avons mené des essais dans des conditions d'utilisation réelle. Les résultats utilisés, pour faire le choix le plus adapté parmi les différentes solutions techniques qui s'offraient à nous, sont présentés dans ce chapitre.

## **5.1. Résultats techniques**

Parmi les objectifs fixés, le premier était de respecter les engagements pris dans le cahier des charges. Rappelons que l'installation est prévue pour tester et palettiser des pièces en continu, mais on attend également que la cellule puisse sortir ou réintégrer des pièces à la demande. Après avoir vu quelques résultats sur la coordination des tâches dans l'îlot de fabrication, nous nous intéresserons aux données sur les tâches spécifiques : la palettisation et le test planéité.

### **5.1.1. Intégration de toutes les tâches prévues dans le cycle de l'îlot.**

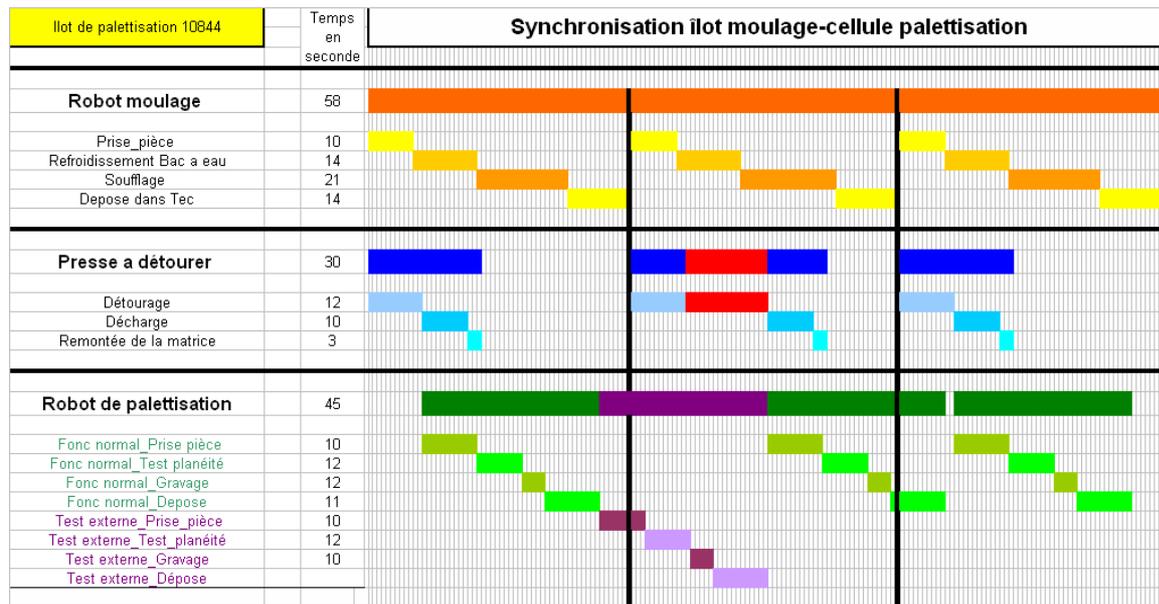
L'îlot de moulage fonctionne selon un rythme de production qui est imposé par la presse à injecter. La période de cette presse est de 58 secondes. L'enchaînement des tâches faites par les autres équipements de l'îlot doit être coordonné de manière à ne pas perturber le cycle de production de l'ensemble.

En production normale, le temps qu'il faut pour réaliser un cycle (décharge, test, gravure, palettisation) est de 35 secondes, le robot aura même un temps d'attente. Les choses se compliquent un peu lorsque d'autres tâches sont programmées :

- Cas 1, demande de sortie pièces : le temps nécessaire pour cette tâche est inférieur à 35 secondes. Le robot n'a qu'à décharger la presse à détourer et à placer la pièce dans la goulotte prévue à cet effet.
- Cas 2, demande de réintégration : le cycle de réintégration devra suivre le cycle de production normale. Pour ces deux opérations les temps s'additionnent et on atteint un total supérieur à 58 secondes.
- Cas 3, demande de localisation palette : comme précédemment, le cycle de localisation suit le cycle de déchargement normal. Mais, cette fois-ci, le total reste inférieur au temps critique.

La difficulté qui se présente est de parvenir à réaliser la réintégration sans perturber le fonctionnement de l'ensemble. Une analyse des cycles de chaque élément de l'îlot montre que la presse à détourer passe une grande partie de son temps dans l'attente de chargement. Le tableau 2 montre qu'en utilisant ce temps comme variable d'ajustement, nous arrivons à allonger (temporairement) le temps critique. Si pendant la réintégration, la presse à détourer est mise en attente, le robot disposera de 30 secondes supplémentaires. Cet enchaînement des tâches passe le temps critique de 58 secondes à 88 secondes. Bien entendu ce maximum reste purement théorique car le synoptique ne prend pas en compte les tâches non cycliques (exemple : la gestion des exceptions)

Pour éviter le dépassement du temps critique, certaines règles simples seront acceptées : priorité à la localisation de palette, contrôle des temps avant validation du cycle de réintégration.



**Tableau 2:** Synoptique de fonctionnement de l'îlot robotisé

Compte tenu des conditions de fonctionnement en continu de l'îlot, on se trouve confronté à la gestion des tâches avec des contraintes temps réel. Nous pouvons voir sur le tableau 2 qu'après un cycle de réintégration, il faudra 3 cycles à la cellule pour revenir dans les conditions initiales. Avec une telle gestion on ne pourra évidemment pas réintégrer successivement les 4 pièces échantillons qui reviennent après la batterie de tests. Une goulotte d'une contenance suffisante permettra d'accueillir toutes les pièces. De cette manière, la gestion des temps et des cycles de réintégration sera transparente pour l'utilisateur.

### 5.1.2. Résultat sur la palettisation

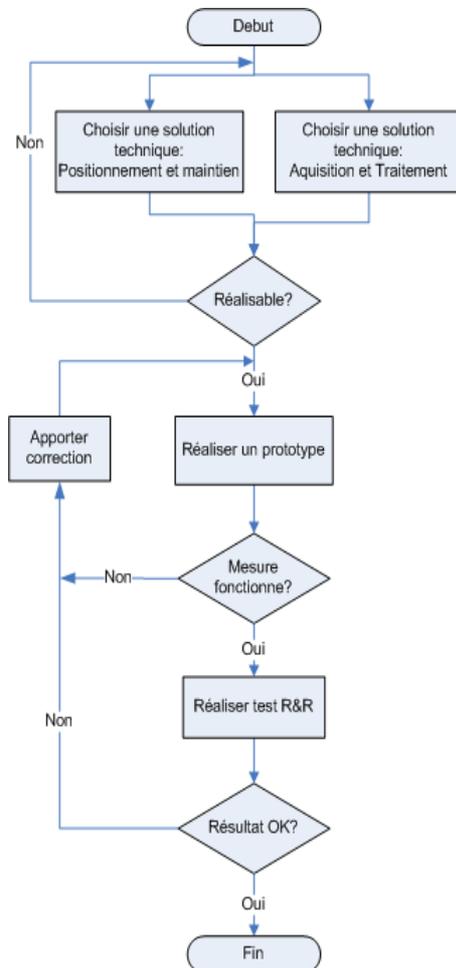
Le remplissage des grilles doit répondre à de nombreuses exigences. Contrairement à la majorité des applications où l'on retrouve des intercalaires entre les couches, nous avons opté pour la dépose sans support. Ce choix est lié à l'utilisation qui sera faite des grilles dans le reste du cycle de fabrication.

Après une étude approfondie, toutes les difficultés ont pu être surmontées. L'utilisation du capteur de niveau par contact et l'ajout d'une compliance sur la main du robot se sont révélés être des solutions très robustes. Les déformations mineures ou la présence de rouille sur les grilles ne gênent en rien la palettisation des pièces.

De nombreux cycles de palettisation ont montré que la qualité avec laquelle cette tâche était accomplie, la maîtrise des temps et la robustesse du processus rendaient cette méthode industrialisable.

### 5.1.3. Résultat du test planéité

Cette tâche était de loin la partie la moins maîtrisée de l'installation. A première vue, compte tenu du budget accordé au projet, les objectifs de test à 100% paraissaient bien peu atteignables. De plus, de gros doutes planaient sur la faisabilité d'une telle tâche.



**Logigramme 3:** Méthode de recherche et validation d'une solution

Dans les cas d'une opération réalisée avec un robot, la notion de reproductibilité ne rentre bien sûr plus en compte. Rappelons seulement que toutes les pièces sont testées avec le même robot. Pour ce qui concerne la répétabilité, nous avons utilisé la procédure de validation standard de l'entreprise.

Après avoir pris 3 pièces au hasard, on effectue 10 mesures successives sur chacune d'elles. Nous avons créé un programme robot spécifique avec le cycle suivant : prise\_piece, test\_planéité, Dépose\_piece.

Dans un premier temps, ces mesures ont été réalisées en utilisant des éléments du matériel de mesure et d'acquisition de laboratoire de métrologie. Ceci nous a permis de vérifier la répétitivité mécanique de la procédure de test. Ensuite nous sommes passés à la validation de la chaîne de mesure complète.

Pour avancer lors de nos recherches, nous avons choisi de vérifier chaque étape de la réalisation et de la validation technique.

Au finale, la solution doit satisfaire les deux exigences suivantes :

- Positionnement et maintien : sans une maîtrise de ces tâches la mesure n'est pas possible
- Acquisitions et traitement : les solutions pour cette partie sont plus nombreuses, mais le choix doit être fait afin de limiter le budget en pièces et assurer un fonctionnement robuste et durable.

La procédure de validation du test est appelée le R&R (répétabilité et reproductibilité).

- Répétabilité

L'erreur de répétabilité est la dispersion observée sur la mesure, répétée dans les mêmes conditions sur une courte période

- Reproductibilité

L'erreur de reproductibilité est la dispersion de mesure observée, lorsque le test est effectué par plusieurs personnes.

## 5.2. Résultats financiers

Après avoir dressé un bilan des coûts de mise en place de la cellule robotisée, nous verrons quelles retombées économiques nous pouvons attendre de l'évolution que ce projet peut apporter.

### 5.2.1. Respect du budget fixé

Le budget accordé au départ de l'action était de 40.000 euros pour l'achat des pièces et la sous-traitance. Ce budget ne prend en compte que les coûts qui ont un impact direct sur la trésorerie de l'entreprise. Les coûts de main d'œuvre ainsi que la valeur des biens récupérés ne sont pas évalués.

Pendant la période de développement, la société traversait de grosses difficultés financières, et le maintien du projet ne pouvait se faire qu'au prix de gros efforts destinés à réduire les dépenses. Les difficultés de trésorerie ont également conduit les dirigeants à geler tous les achats non liés aux impératifs de production. Cette mesure a entraîné un retard de quatre mois sur le projet.

Durant la même période, les pertes de marché subies par la société et la chute de l'activité globale de la société à hauteur de 40% se sont soldées par l'abandon de plusieurs unités de production quasi-neuves. Cette situation nous a conduit à revaloriser les composants de ces îlots de fabrication. Cette chute s'est également traduite par une meilleure disponibilité des compétences internes. L'utilisation de ces compétences a permis une réduction des coûts de sous-traitance et le maintien d'une charge de travail pour le personnel de Florence et Peillon.

Coût des pièces ilot de palettisation			
Banc	Graveur	3750	Validé
	Planéité	9000	Réalisé en partie
Enceinte	Chaudronerie	5000	Estimation
	Barrière immatérielle	4800	Validé
Automatisme	Afficheur	300	Récupéré
	Carte supplémentaires	0	Annulé
	Divers cablage	1000	Réalisé
Robotique	Module profibus	500	Réalisé
	Carte E/S	0	Annulé
	Main	500	Réalisé
TOTAL		24350	

Les nombreuses dispositions prises pour réduire les coûts ont donné des résultats qui nous ont permis deux choses : premièrement l'étude a pu être menée jusqu'au bout, ensuite une innovation dans l'utilisation des moyens robotisés a vu le jour.

Le Tableau 3 montre les coûts engendrés par la réalisation et la mise en place de la cellule de palettisation. On observe une diminution de 38% par rapport au budget initial.

**Tableau 3:** Consommation du budget d'achat d'équipements.

### 5.2.2. Retombées économiques

Cerner toutes les retombées économiques d'une telle modification du processus de fabrication n'est pas facile. Rappelons que la principale motivation touchait divers domaines : pénibilité du travail, réduction des coûts de non qualité, meilleure maîtrise du produit. Parmi les éléments difficilement chiffrables, voici quelques uns non négligeables :

- Accidents du travail
- Maladies qui entraînent des incapacités au travail.
- Satisfaction du client
- Amélioration du produit

Des indicateurs utilisés par la production vont nous permettre de calculer les réductions de pertes possibles. Ces indicateurs nous ont permis de calculer les pertes liées aux défauts de planéité ainsi que les coûts d'arrêt machine imputables aux opérations de changement de dateur.

#### 5.2.2.a. Perte pour non qualité

La quantité de pièces rebutées après assemblage apparaît dans la troisième colonne du tableau. Les contrôles et l'organisation actuelle de la production ne permettent de détecter les pièces avec défaut qu'en fin de ligne de production. Le contrôle final est réalisé par un opérateur.

REBUTS FONDERIE A L'USINAGE						
	10844B001		10844B001		90080B001/002	
	Machine à laver		Assemblage		Hors Fréquentielle	
	Nombre de pièces rebutées	Nombre de pièces produites	Nombre de pièces rejetées	Nombre de pièces produites	Nombre de pièces rebutées	Nombre de pièces produites
Janvier	631	47309	272	47798	245	44531
Février	485	49078	575	48739	342	46634
Mars	213	50520	542	44829	340	40265
Avril	118	40136	150	44736	500	43614
Mai	444	49758	41	43281	396	42276
Juin	299	51356	53	39245	811	39414
Juillet	521	56082	147	50994	383	49545
Août	403	11985	26	12944	200	13033
Septembre	823	35346	265	31501	683	39092
Octobre	229	48051	272	34069	856	43445
Novembre	2067	41979	348	32156	241	31871
Décembre	100	16225	316	20378	29	20314
Somme	6333	497825	3007	450670	5026	454034
Coûts (euros)	53813				50913	

Les rejets à l'assemblage ne sont pas des rebuts car ils sont retouchés ( grenaille )

**Tableau 4:** Pertes observées au service usinage liées à des défauts fonderie. Les sommes concernent les pertes sur trois îlots de moulage.

Les coûts de non qualité s'élèvent à 50 913 euros pour l'année 2008. Le contrôle s'effectue sur des critères visuels. Une étude des causes de défauts menée par le service qualité a permis d'estimer que les coûts liés aux défauts de planéité s'élèvent à 50% du total. Parmi les autres causes on retrouve principalement les déformations causées par des chocs : déchargement avec pelle ou au transport. La mise en place de la cellule de palettisation sur un îlot robotisé permettrait de réduire ce chiffre de un tiers (les coûts apparaissant sur le tableau 4 sont calculés pour la totalité de la production ; 3 îlots fabriquent le 10844)

## 5.2.2.b. Perte pour remplacement dateur



**Figure 58:** Dateur pour moule de fonderie

Les dateurs sont des parties rapportées sur un moule. La face qui se trouve sur la surface moulée permet l'inscription de la date sur les pièces.

Le remplacement des dateurs est un exercice quotidien pour le personnel qui travaille en fonderie sous pression. Cette opération peut devenir très pénible lorsque ces dateurs grippent dans le moule. Ceci arrive en moyenne une fois par mois.

Origine de coût	Unité	Nombre	Temps total par an	Valeur ajoutée Euro/heure	Pertes par an en Euro
Temps moyen de changement dateur	0.375 H/jour	260 (jour ouvré/an)	97,5 H	30	2925
Temps moyen de de maintenance pour dateur grippé	4 H/mois	12 Mois	48 H	30	1440
Pertes VA			145,5 H	360	52380
Total					56745

**Tableau 5:** Pertes de production et coûts de main d'œuvre liés au remplacement des dateurs

Les relevés de suivi de production nous ont permis de dresser le tableau 5. L'opération de remplacement des dateurs coûte environ 4500 euros de main d'œuvre et 52400 euros de perte de production.

La mise en place du graveur doit permettre l'inscription de la date de fabrication de chaque pièce. Cette méthode d'identification ne nécessite aucune intervention particulière. De plus, la qualité de l'inscription est bien meilleure qu'avec un dateur. Les chiffres montrent que le potentiel de gain est non négligeable.

## *Conclusion*

Le processus de fabrication actuel n'a pas évolué depuis de nombreuses années. L'étude que nous venons de vous présenter donne une alternative et ouvre de nouvelles perspectives. Les résultats techniques et les procédés utilisés peuvent être adaptés sur de nombreuses applications industrielles.

Le rangement des pièces par des personnes reste un travail ingrat et très répétitif. Palettiser avec un robot diminue sensiblement la pénibilité du travail. De plus aucune diminution d'effectif ne devrait accompagner l'ajout des cellules robotisées. Afin d'augmenter la qualité des pièces, une nouvelle organisation du poste de travail sera mise en place. Le travail du personnel de l'îlot évoluera vers plus de contrôle et de suivi de production.

L'exploitation et la maintenance de tels outils de production exigent une période de formation et une prise en main progressive. Le personnel devra changer ces habitudes et apprendre à utiliser ces nouveaux outils. Pour les aider une notice d'utilisation de l'îlot leur sera fournie. Ce document servira également de support écrit pour une formation qui aura lieu sur le terrain au démarrage de l'unité de production.

Cette cellule met en avant la possibilité de réaliser des tests en ligne et ainsi d'augmenter de manière significative la qualité et la maîtrise des pièces produites. La diminution des rebuts liés aux défauts de planéité représente des économies non négligeables. De plus, dans ce secteur où la concurrence est féroce, garantir la livraison de pièces non voilées peut être un argument de taille pour défendre le savoir faire de l'entreprise.

D'un point de vue personnel, cette application industrielle m'a donné l'occasion d'explorer de nombreux domaines techniques et relationnels. La période de crise profonde et la multiplication des difficultés d'ordre économique m'ont contraint à défendre l'utilité de cette étude auprès des nombreux intervenants. Cette situation nous a aussi poussés à trouver des solutions innovantes pour diminuer les coûts de développement et de réalisation.

Finalement, les réponses apportées au cahier des charges et les résultats observés ont donné une satisfaction unanime.

## **Annexes**

**Annexe A01 : Analyse fonctionnelle de l'îlot**

<b>Aspect du projet</b>	<b>Spécification</b>	<b>Contraintes</b>
-------------------------	----------------------	--------------------

<b>Produit</b>		
1- Élément de sortie	1- Une grille FP 3 patins	1.1.1- Utiliser des grilles en bon état général
	2- Rangée de 6 pièces sur 19 niveaux, un total de 114 pièces	1.2.1- s'assurer que les grilles sont vides au chargement
	3- Rangement des pièces en tête-bêche	1.3.1- Ne pas marquer les pièces
2- Produit à la sortie	Une grille pleine de pièces testées (présence broche et planéité) avec la date, l'heure et la minute gravés sur le côté extérieur passage de chaîne.	

<b>Production</b>		
1- Cadences horaires	1.1- Une grille produite toutes les 1.83 heures	1.1.1- Fabriquer en continu

<b>Partie opérative</b>		
1- Composants	1.1- Récupération de certains composants en bon état de systèmes obsolètes	1.1.1- Robot IRB 6400 R
		1.1.2- Élément d'armoire électrique
		1.1.3- Automates S7 300
		1.1.4- Composants pneumatiques
	1.2- Utilisation de l'énergie existante	

<b>Exploitation</b>		
1- Modes de marche	1.1- Mode automatique	1.1.1- Possibilité de prélèvement 1.1.2- Possibilité de mode pièce type 1.1.3- Possibilité pièce sortie pièce pour test échantillonné (pièce à réintégrer) 1.2.1- Prendre en compte la sécurité matérielle
	1.2- Mode manuel asservi	
	1.3- Mode étalonnage réglage	
	1.4- Mode dégradé	1.4.1- Prévoir des modes dégradés cumulables
2- Organisation des commandes	2.1- Pupitre de commande tactile	2.1.1 Mode d'affichage à valider
	2.2- Modification pupitre TEC	2.2.1- Intégrer la décharge avec robot au programme existant
3- Visualisation	3.1- Présence d'une vérine	
	3.2- Affichage sur l'écran	
4- Ergonomie du poste de travail	4.1- Conforme au standard FP	
5- personnel de conduite	5.1- Bonne condition physique	5.1.1- Voir limite de compétence et protection à apporter.
6- Suivi de la vie de l'îlot	6.1- Mettre en place des compteurs	

<b>Réalisation</b>		
1- Investissement	1.1- Budget prévu de 35000 euro révisable (avec 10% de provision, révisable)	1.1.1- À ne pas dépasser
2- Prévision de livraison de îlot	1.2- Date de livraison îlot à la production : fin août 2009	2.1.1- À ne pas dépasser
3- Encombrement	1.3- emplacement prévu en lieu et place de la pelle de décharge (possibilité d'empiéter sur îlot)	3.1.1- Ne pas condamner l'allée
4- Confort	4.1- Limitation du bruit	4.1.1- limiter a 90DB
5- Présentation	5.1- Esthétique conforme à îlot de moulage	
6- Éclairage du poste	6.1- Zone de chargement palette visible	6.1.1- Vérifier la nécessité d'un éclairage

<b>Maintenance</b>		
1- Mise en œuvre	1.1- Par l'opérateur  1.2- Par une équipe de technicien	1.1.1- Formation maintenance premier niveau 1.2.1- Formation techniciens de maintenance 1.2.2- rédaction des procédures spécifiques
2- Outillage	2.1- Identifier et approvisionner les outils spécifiques	2.1.1- Utiliser un maximum de standard
3- Composants	3.1- Identifier les pièces spécifiques	3.1.1- Utiliser un maximum de standard

<b>Sûreté de fonctionnement</b>		
1- Sécurité	1.1- Protection des éléments mobiles et dangereux  1.2- Arrêt d'urgence	1.1.1- Objectif zéro accident corporel. 1.1.2- Rendre inaccessibles les zones dangereuses 1.1.2 Accès indépendant de flot moulage 1.2.1- Arrêt d'urgence lié a flot de moulage
2- Disponibilité	2.1- Maximale pendant les jours de production	2.1.1- Prévoir reprise rapide après AU (point de vue partie commande) 2.1.2- Prévoir affichage explicite des messages. 2.1.3- Prévoir des interfaces de visualisation pour diagnostic rapide.

**Florence & Peillon**68 av de Bolhen  
69120 Vaulx en Velin

tel : 04 78 41 24 89

fax : 04 78 41 24 00

**Annexe A02****Cellule de palettisation et test en ligne MA 1051****Ref : 10844**

<b>CDCv01</b>	<b>Rev : A</b> <b>du :</b> <b>06/02/2009</b>	<b>Emetteur : A.YASAR</b>

**Îlot de moulage 1051**



## Données d'entrées

### Objectif de production :

- Travail en 3X8 soit 24 heures effectives/ jour.
- Cadence horaire mini demandée = 65 pièces / heure à TRS 100%
- L'ergonomie du poste de travail devra satisfaire les exigences ergonomiques AFPI.

### Détections & sécurités :

- Préserver le niveau de sécurité de l'îlot existant et intégrer les nouvelles fonctionnalités avec une interface respectant les règles de sécurité (synchronisation des tâches avec presse à détourer)
- Validation autorisation du départ cycle par bouton poussoir local (physique ou écran tactile), ou par commande déportée (maître de l'îlot)
- Assurer la sécurité des personnes et des biens pendant les mouvements de grille
- Autorisation de départ cycle après validation de la présence d'au moins une grille
- Autorisation de départ cycle après validation de la position initiale du graveur
- Autorisation de départ cycle après vérification des données du banc de contrôle.
- La machine devra être évolutive et modifiable facilement (programme robot, graveur, programme automate...).

## Spécifications techniques

### Séquences machine

La cellule doit exécuter les cycles en respectant les contraintes de temps liées au fonctionnement de l'îlot de production. En aucun cas la cellule ne devra entraîner de retard dans le déchargement de la presse à injecter.

Cycle 1 : Séquences des tâches réalisées en fonctionnement normal

N°	Cycle de production normale
1	Décharge de la presse à détourer
2	Test planéité
3	Gravure de pièces bonnes (sinon rebut)
4	Palettisation

Cycle 2 : Séquences des tâches après une demande de sortie échantillon pour test externe.

N°	Cycle de sortie échantillon
1	Décharge de la presse à détourer
2	Dépose dans goulotte de sortie

Cycle 3 : Séquences des tâches après une demande de réintégration des échantillons.

N°	Cycle de réintégration
1	Prise de goulotte de réintégration
2	Test planéité
3	Gravure de pièces bonnes (sinon rebut)
4	Palettisation

Cycle 4 : Séquences des tâches pour étalonnage du moyen de mesure

N°	Cycle d'étalonnage
1	Prise pièce étalon
2	Test planéité
3	Enregistrement des valeurs étalons Dépose pièce étalon

### **Environnement machine et arrivée des énergies**

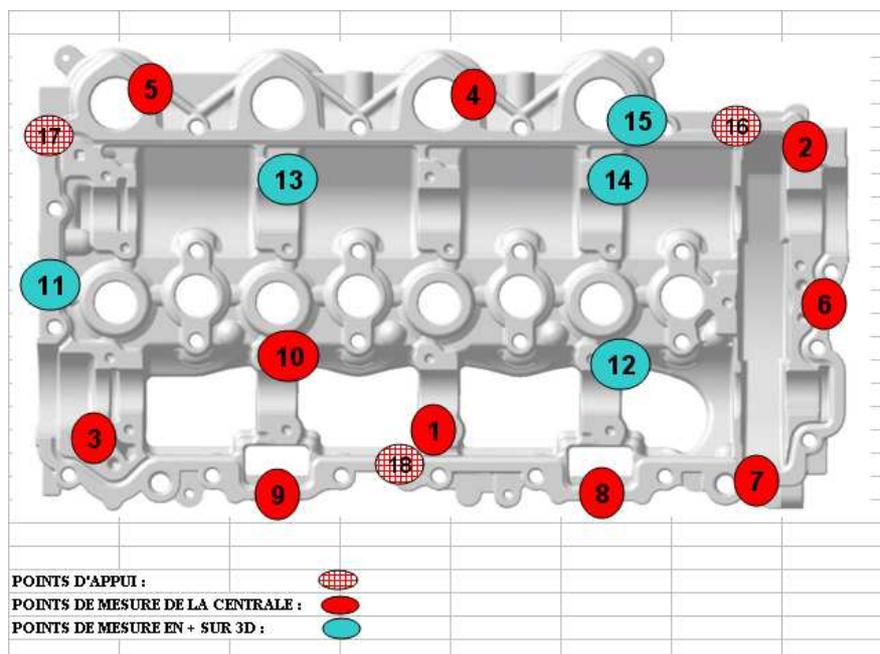
- La machine de vissage sera installée dans un îlot de production. Alimentation électrique : 400 V triphasé. Alimentation en air : réseau 6 bars
- Le pupitre d'exploitation des données de maintenance de l'automate devra au minimum présenter les mêmes possibilités que les unités robotisées standards.

### **Mode de décharge**

- Le robot doit décharger la pièce posée sur la matrice inférieure de la presse à détourer seulement lorsqu'il en a l'autorisation.
- Le moyen de préhension ne doit pas laisser de marque sur la pièce
- Le soufflage ne sera pas réalisé par le robot

## Test des pièces

- Le test doit respecter les contraintes du banc manuel existant (se référer à la documentation)
- Pendant le test la pièce doit être posée sur les 3 points d'appui. Une force d'environ 200N doit la maintenir en place.
- Les pièces devront être testées pour assurer que l'écart de planéité ne dépasse pas une limite de 0.5 millimètre.
- Ce seuil doit pouvoir être modifiable via l'IHM.
- Le résultat, calculé avec la formule du Min-Max, doit être affiché et facilement visualisable
- Le test est basé sur 10 points de mesure avec des palpeurs d'une précision minimum de 5 microns.



### Localisation des points de test

- En cas de dysfonctionnement d'un palpeur, celui-ci doit pouvoir être désactivé sans arrêt de la production.
- Les valeurs des palpeurs désactivés ne seront plus prises en compte dans le calcul du résultat.
- Le test doit présenter des valeurs de R&R conformes.

## Étalonnage des palpeurs

- Un mode d'étalonnage doit permettre de corriger les dérives et de détecter les dysfonctionnements des capteurs de distance.
- Une page de visualisation et de diagnostic doit apparaître sur l'IHM.
- Les valeurs de dérive avec l'étalonnage précédent doivent être consultables
- Les palpeurs désactivés ne seront pas étalonnés

## **Sauvegarde des données**

- Les données de test planéité devront être sauvegardées et facilement récupérables via une mémoire flash (clé USB) dans un fichier de type .csv.
- Les informations suivantes devront apparaître.
  - Date heure minute et seconde
  - Numéro de l'empreinte de moulage
  - Numéro de la matrice de détourage
  - Valeur du résultat du test
  - Valeur des résultats de mesure des 10 palpeurs.
- Toutes mesures de distance seront exprimées en micron
- Les palpeurs désactivés devront apparaître clairement.

## **Pièce conforme**

Toute pièce conforme est palettisée.

## **Pièce non-conforme**

- La pièce ne sera pas gravée
- La pièce sera évacuée dans le tapis de transport situé sous la presse à détourer.

## **Pièces échantillon sorties**

- Un compteur doit incrémenter pour chaque pièce sortie
- Ce même compteur sera décrémente lorsque la pièce sera réintégrée
- En fin d'équipe le conducteur de ligne doit valider ses compteurs. Les pièces non réintégrées seront comptabilisées comme détruites.

## **Marquage des pièces**

- La date JJ/MM/AAAA et l'heure HH/MM/SS seront inscrites par un graveur à percussion sur le côté du passage de chaîne

## Palettisation

- Le chargement et le déchargement des grilles ne doit pas ajouter de la pénibilité au travail du personnel de production
- Les grilles FP 3 patins seront les seules à être utilisées.
- Les pièces bonnes devront être rangées comme indiqué sur les photos "Palettisation a, b, c". Les pièces devront être rangées de manière à libérer le passage de chaîne.
- Chaque grille doit comporter 19 couches de 6 pièces soit 114 pièces.



**Palettisation a**



**Palettisation b**



**Palettisation c**

## Compteur

Prévoir les compteurs suivants sur l'interface homme machine:

- Pièce bonne
- Pièce mauvaise
- Grille réalisée
- Pièce sortie pour échantillon
- Pièce détruite

## Evolution de la partie automatisme

En vue de futures évolutions, prévoir 25% de place en plus dans l'armoire de commande.

## Identification

Chaque zone devra être clairement identifiée

## Liste des pièces d'usure (À chiffrer en option)

Une liste de pièces d'usure devra être remise à la fin de l'étude

## Conditions de réception

### Revue de conception

Elle aura lieu sur le site de Florence & Peillon à Vaulx-en-Velin.

### Réception provisoire

Lieu : Chez Florence & Peillon.

But :

- Vérification de tous les items du cahier des charges fonctionnel et de leurs réserves.
- Vérification de tous les items du cahier des charges générique et de leurs réserves.
- Vérification de la bonne réalisation du dispositif par rapport aux plans d'étude.
- Vérification de la mise en position des pièces et du bon fonctionnement général.
- Vérification de l'aspect sécurité (Norme DIN EN 954-1)
- Valider les temps de cycle.

### Réception définitive

Lieu : Chez Florence & Peillon

Elle permettra de valider le bon fonctionnement de la machine en condition série, sur la ligne de production.

## R&R (Répétabilité & Reproductibilité)

Etude R&R aux attributs :

- Trois différentes pièces seront passées 10 fois chacune.
- Enregistrement des valeurs de mesure
- Calcul de l'homogénéité, de la répétabilité et de la reproductibilité.  
% R&R sur ce critère = 100 %
- La validation

## Validation documentaire (nouveaux aménagements ou ré étude du moyen)

- 2 dossiers plans papier actualisés (nomenclature, plans d'ensemble & de détails, etc...)
- 1 CD. Rom non réinscriptible dont la session est fermée.
- Fichier CAO :

2D : natif Catia (V4 ou V5) ou natif ProEngineer Wildfire ou DXF (AUTOCAD LT 2000i) ou DWG (AUTOCAD LT 2000i).

3D : natif Catia (V4 ou V5) ou natif ProEngineer Wildfire ou STEP ou IGES.

- Documents bureautiques : PDF uniquement (TIFF & Jpeg interdits)
- Documents de maintenance :

Graficets : Visio

Schémas électriques : Visio ou PDF

- Documents bureautiques : Word ou Excel uniquement (PDF & Jpeg interdits.)
- Tous les plans seront réalisés avec le cartouche ZEN.

## **Identification & plaquage : (éléments communiqués après la commande)**

Sur la machine devront être fixées :

- la raison sociale du fournisseur
- une plaque avec des renseignements liés à la commande
- une plaque « propriété Florence & Peillon »

## **Certification CE :**

Le moyen sera certifié CE (auto certification ou certification réalisée par un organisme extérieur) & répondra aux exigences de sécurité & d'environnement en vigueur.

## **Offre :**

En interne

## **Délai :**

fin 2009

## **Transport**

En interne

## **Confidentialité**

Le concepteur s'engage à respecter les termes de confidentialité indiqués sur notre document référence FOR S2 1 "Clause de confidentialité", document retourné signé par vos soins à FLORENCE & PEILLON.

## **Garantie & Règlement**

En interne

## **Réserve de Propriété**

- Propriété :

Le moyen et les études associés seront la propriété de Florence & Peillon à la date du jour du paiement intégral de la prestation.

- Brevet d'invention :
  - Si tout ou partie du moyen est issu d'un brevet d'invention, le concepteur doit signaler sur son offre le numéro du brevet ainsi que la date à laquelle le brevet tombe dans le domaine public.
  - Si le concepteur décide de déposer un brevet d'invention sur tout ou partie du moyen pendant la prestation, il s'engage à en informer par écrit Florence et Peillon une semaine avant la dépose du brevet et à communiquer l'intégralité des plans et

études des éléments du brevet lors de la validation documentaire. Le concepteur peut proposer un accord de confidentialité.

### **Pièces d'usure issues d'un outillage spécifique.**

- Si une pièce d'usure ou un élément de la machine nécessite la création d'un moule ou d'un outillage spécifique lié à la commande en cours, l'outillage ou le moule deviendra la propriété de Florence & Peillon à la date du paiement intégral de la prestation.

Etapas du traitement du dossier (Validation des étapes au travers du FOR 3.1.4)

- Envoi du CDC aux prestataires pour l'élaboration de l'offre technique & budgétaire.
- Réception des offres et analyses techniques (pertinence et robustesse des solutions proposées).
- Sélection des fournisseurs retenus (choix : fonctionnel/technique/budgétaire)
- Sélection finale du concepteur par le service achat.
- Création de la commande.
- Revue de conception chez Florence et Peillon
- Livraison
- Réception définitive chez Florence et Peillon
- Mise en service

### **Conditions d'achats & Pénalités**

Les conditions de règlement et les pénalités de retard seront définies avec le service achat de Florence & Peillon au moment de la négociation.

## Annexe 03 : Caractéristiques Produit IRB 6400

### Performances conformément à la norme ISO 9283

Avec la charge nominale et à la vitesse de 1m/s sur le plan de test incliné ISO, les six axes du robot étant en mouvement.

Répétabilité de pose unidirectionnelle :

RP = 0,1 mm (IRB 6400/2.4-120)

RP = 0,15 mm (IRB 6400/2.4-150 et IRB 6400/2.4-200)

RP = 0,2 mm (Autres modèles)

Précision de la trajectoire linéaire :

AT = 2,1 - 2,5 mm (IRB 6400/2.4-120)

AT = 2,5 - 3,0 mm (Autres modèles)

Répétabilité de la trajectoire linéaire :

RT = 0,5 - 0,8 mm (IRB 6400/2.4-120)

RT = 0,8 - 1,4 mm (Autres modèles)

Temps de positionnement minimum, à 0,5 mm de la position :

0,2 - 0,3 s (IRB 6400/2.4-120, sur trajectoire linéaire de 35 mm)

0,6 - 0,8 s (IRB 6400/2.4-120, sur trajectoire linéaire de 350 mm)

0,3 - 0,7 s (Autres modèles, sur trajectoire linéaire de 35 mm)

0,7 - 0,9 s (Autres modèles, sur trajectoire linéaire de 350 mm)

Les valeurs ci-dessus reflètent la plage des résultats moyens de test de plusieurs robots. Si vous avez besoin de valeurs garanties, veuillez contacter votre centre ABB Flexible Automation le plus proche.

**Vitesse Modèles de l'IRB 6400 :**

2.4-120	2.4-150	2.8-120	3.0-75	S/2.9-120	PE/2.25-75
	2.4-200				
	C/ B-150				
	FHD				

Axe n°

1	100°/s	90°/s	100°/s	100°/s	100°/s	70°/s
2	100°/s	90°/s	100°/s	100°/s	100°/s	70°/s
3	100°/s	90°/s	100°/s	100°/s	100°/s	70°/s
4	210°/s	120°/s	210°/s	210°/s	210°/s	210°/s
5	150°/s	120°/s	150°/s	150°/s	150°/s	150°/s
6	210°/s	190°/s	210°/s	210°/s	210°/s	210°/s

Un contrôle est effectué pour prévenir toute surchauffe au cours des applications nécessitant des mouvements fréquents et intensifs.

### Résolution

Environ 0,01° pour chaque axe.

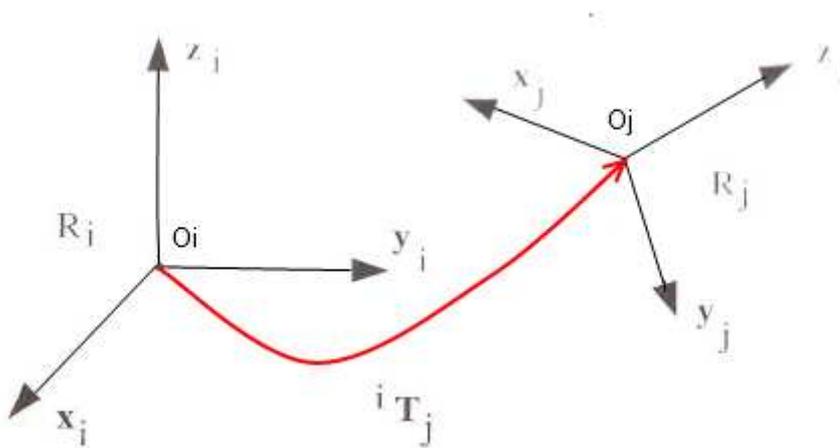
## Annexe A04 : Eléments mathématiques

### I. Matrice de transformation homogène

La position du corps  $C_j$  est fixe dans le repère  $R_j$ . Pour connaître la position et l'orientation (la pose) du repère  $R_j$  dans le repère  $R_i$ , on passe par une matrice de transformation de la forme :

$${}^i T_j = \begin{bmatrix} {}^i s_j & {}^i n_j & {}^i a_j & {}^i P_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On dit également que  ${}^i T_j$  définit le repère  $R_j$  dans  $R_i$ .



Dans cette matrice on distingue :

- La quatrième colonne qui donne les éléments de translation entre les deux repères :

$$\begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [P_x \quad P_y \quad P_z \quad 1]^T \text{ sont les coordonnées homogènes de } O_j \text{ dans } R_i$$

- La matrice de rotation 3x3 entre les repères  $R_i$ ,  $R_j$ .

$$\begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Les éléments sont les cosinus directeurs ; cosinus des angles entre les} \\ \text{vecteurs unitaires des deux repères.}$$

## II. Matrice de translation pure

Matrice qui permet de réaliser une translation du repère  $R_j$  par rapport au repère  $R_i$ .

$${}^i T_j = \text{Trans}(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{a, b, c désigne les composantes des axes x, y, et z}$$

respectivement.

Une seconde notation peut être utilisée :

$\text{Trans}(u, d)$  : Désigne une translation le long de l'axe u et de valeur d.

## III. Matrice de rotation pure autour d'un axe

Cette matrice décrit la rotation autour de l'axe indiqué : Voici un exemple de rotation suivant l'axe x.

$$\begin{aligned} {}^i s_j &= [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ {}^i n_j &= [0 \ C\theta \ -S\theta \ 0]^T \\ {}^i a_j &= [0 \ S\theta \ C\theta \ 0]^T \end{aligned}$$

Et on obtient

$${}^i T_j = \text{Rot}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & -S\theta & 0 \\ 0 & S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

#### IV. Principales propriétés des matrices de transformation homogènes

##### Inverse de la matrice de transformation

Pour faire apparaître les paramètres de rotation et de translation on peut écrire la matrice sous forme partitionnée :

$${}^i T_j = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A étant une matrice de rotation, elle est orthogonale, c'est-à-dire  $A^{-1} = A^T$

L'inverse de la matrice de transformation se met sous la forme

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} A^T & -A^T P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

##### Multiplication entre deux matrices de transformation

La multiplication de deux matrices de transformation donne une matrice de transformation

$$T_1 T_2 = \begin{bmatrix} A_1 & P_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & P_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_1 T_2 = \begin{bmatrix} A_1 A_2 & A_1 P_2 + P_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Si un repère  $R_0$  subit  $k$  déplacements successifs, l'expression qui décrit le déplacement total s'écrit :

$${}^0 T_k = {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 \dots {}^{k-1} T_k$$

Annexe A5 : Test R&R

ETUDE DE CAPABILITE GRR	
<b>Equipement de mesure :</b>	ROBOT ALI
<b>désignation</b>	
<b>Client :</b>	
<b>Référence :</b>	
<b>Date :</b>	20/07/09
<b>N°outillage :</b>	
<b>Critère :</b>	PLANEITE 0,500
<b>Tolérance à vérifier</b>	0,5

planeite

RESULTATS				
par rapport à l'IT		par rapport à TV		
Répétabilité EV	0,00321011	K1	Répétabilité : EV	0,00321011
Variation répétabilité	3,85		Variation répétabilité	2,35
X Diff : AV	0,00486667	K2	X Diff : AV	0,00486667
Reproductibilité	0,00247755		Reproductibilité	0,00247755
Variation reproductibilité	2,97		Variation reproductibilité	1,81
Variation totale GRR	0,00405500		Variation totale GRR	0,00405500
Variation totale %	4,87		Variation totale % GRR	2,96
			PV :	0,13678109
			Variation pièces : % PV	99,96
			TV :	0,13684118
			ndc : (>5)	47,561

**RELEVES POUR LES CALCULS**

Opérateur A					
0					
	Série 1	Série 2	Série 3	moyenne	Etendue
N° 1	0,415	0,404	0,405	0,408	0,011
N° 2	0,276	0,241	0,249	0,255	0,035
N° 3	0,21	0,201	0,202	0,204	0,009
N° 4	0,64	0,645	0,64	0,642	0,005
N° 5	0,22	0,225	0,223	0,223	0,005
N° 6	0,432	0,441	0,441	0,438	0,009
N° 7	0,584	0,586	0,582	0,584	0,004
N° 8	0,405	0,414	0,412	0,410	0,009
N° 9	0,416	0,422	0,423	0,420	0,007
N° 10	0,22	0,224	0,223	0,222	0,004
Moy	0,3818	0,3803	0,38	0,381	
Moyenne des moyennes					0,3807
Etendue moyenne					0,0098

Opérateur B					
0					
	Série 1	Série 2	Série 3	moyenne	Etendue
N° 1	0,408	0,41	0,411	0,410	0,003
N° 2	0,256	0,261	0,265	0,261	0,009
N° 3	0,205	0,208	0,208	0,207	0,003
N° 4	0,643	0,643	0,641	0,642	0,002
N° 5	0,223	0,222	0,221	0,222	0,002
N° 6	0,437	0,437	0,435	0,436	0,002
N° 7	0,59	0,589	0,589	0,589	0,001
N° 8	0,42	0,422	0,424	0,422	0,004
N° 9	0,425	0,427	0,429	0,427	0,004
N° 10	0,219	0,217	0,216	0,217	0,003
Moy	0,3826	0,3836	0,3839	0,383	
Moyenne des moyennes					0,3834
Etendue moyenne					0,0033

Opérateur C					
0					
	Série 1	Série 2	Série 3	moyenne	Etendue
N° 1	0,413	0,415	0,417	0,415	0,004
N° 2	0,269	0,272	0,276	0,272	0,007
N° 3	0,208	0,21	0,21	0,209	0,002
N° 4	0,641	0,641	0,641	0,641	0
N° 5	0,22	0,22	0,221	0,220	0,001
N° 6	0,433	0,433	0,432	0,433	0,001
N° 7	0,591	0,592	0,593	0,592	0,002
N° 8	0,426	0,428	0,431	0,428	0,005
N° 9	0,433	0,434	0,437	0,435	0,004
N° 10	0,213	0,21	0,207	0,210	0,006
Moye	0,3847	0,3855	0,3865	0,386	
Moyenne des moyennes					0,3856
Etendue moyenne					0,0032

Reproductibilité	
Par pièce	
Moy des moy	Etendue des moy
0,411	0,007
0,263	0,017
0,207	0,005
0,642	0,001
0,222	0,002
0,436	0,005
0,588	0,008
0,420	0,018
0,427	0,014
0,217	0,012
Rp (ecart)	
0,435	
Ecart :	
▶ 0,0049	

Moyenne des étendues moyennes de chaque opérateur \*2.58 :  
 UCLr = 0,0140



MODE OPERATOIRE

OBJET	Capabilité des moyens de contrôle		
Date de Création :	13/06/2002	Date de Modification :	25/06/2007
Processus :	S1	Service Emetteur :	LABO METROLOGIE
MO N° :	MO_S1_GMM GENE_003	Service concerné :	
		Indice :	G

I) INCERTITUDE A L'UTILISATION DES INSTRUMENTS DE CONTROLE

1°) METHODE GRR (R&R)

Extrait de la norme ISO TS 16 949 - 2ème édition - juin 2 002

ANALYSE DU SYSTEME DE MESURE

Des études statistiques doivent être menées pour analyser les dispersions de résultats de chaque système de mesure et d'essais. Cette exigence s'applique aux systèmes de mesurage référencés dans le plan de surveillance

APPROCHE MSA - 3ème édition :

Les facteurs : **justesse, répétabilité, reproductibilité, stabilité et linéarité** combinés ensemble, affectent la performance de l'équipement de mesure ainsi que le couple produit / moyen

1°) Répétabilité

C'est la variation de mesure obtenue par un opérateur mesurant plusieurs fois la même caractéristique d'une même pièce sur le même appareil , dans les mêmes conditions d'environnement

Etude GRR suivant MSA :

Répétabilité calculée avec étendue moyenne et K1

(K1 = constante suivant nbre de séries)

2°) Reproductibilité

C'est une variation de moyennes de mesures obtenue sur un même appareil utilisé par différents opérateurs ayant mesuré une même caractéristique sur des mêmes pièces

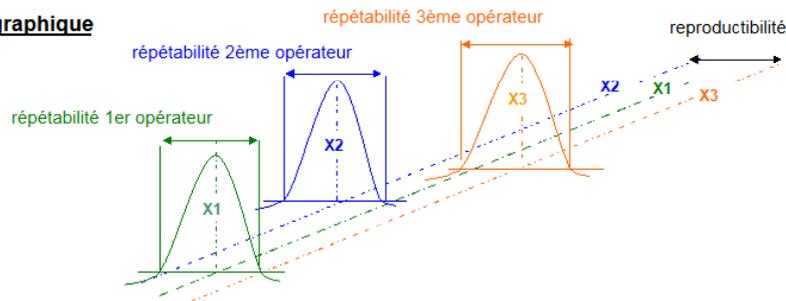
Etude GRR suivant MSA :

Reproductibilité calculée avec différence des moyennes et K2

(K2 = constante suivant nbre d'opérateur)

représentation graphique

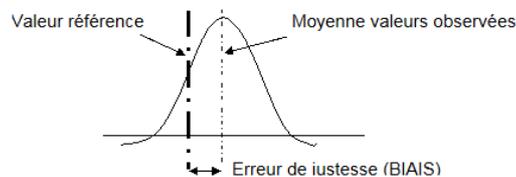
(Ex : 3 opérateurs)



3°) Justesse / Biais

C'est la différence entre une moyenne de valeurs observées et la valeur " conventionnellement vraie " ( valeur de référence )

représentation graphique



4°) Linéarité

C'est la différence entre 2 études de justesse réalisées sur la plage de tolérance spécifiée ou plage d'utilisation du moyen de mesure . La linéarité étant égale à : J1 - J2

5°) Stabilité

C'est la différence entre 2 moyennes de valeurs provenant d'un même ensemble de pièces mesurées à des moments différents avec le même appareil de contrôle

$$Stabilité = \frac{\sum \text{différence entre calibrations}}{\text{Nombre d'essais par calibration}}$$



MODE OPERATOIRE

OBJET	Capabilité des moyens de contrôle			
Date de Création :	13/06/2002	Date de Modification :	25/06/2007	Indice : G
Processus :	S1	Service Emetteur :	LABO METROLOGIE	
MO N° :	MO_S1_GMM_GENE_003	Service concerné :		

Méthodes appliquées :

**R&R aux mesures :**

1°) Calcul de Cg et Cgk. :  
 Mesurer 30 fois l'étalon

Dispersion maximale autorisée = 15% de l'IT

$$Cg = \frac{15\%IT}{6 \text{ écart-types}}$$

--> Répétabilité

ou

$$Cgk = \frac{\text{Moyenne} - (15\% IT/2 - \text{cote étalon})}{3 \text{ écart-types}}$$

--> Répétabilité et exactitude (Biais)

$$Cgk = \frac{(15\% IT/2 + \text{cote étalon}) - \text{Moyenne}}{3 \text{ écart-types}}$$

==> Cg et Cgk > ou = 1 : Apte  
Cg et Cgk < 1 : Inapte

2°) Calcul du GRR selon l'IT :  
 Prélèvement de 10 pièces / 3 opérateurs  
 Chaque opérateur mesure 3 fois la série de 10 pièces (= 30 mesures)

Répétabilité = (Moyenne des étendues x K1) / IT  
 Reproductibilité = ( √ (Différence des moyennes x K2)<sup>2</sup> - (Répé<sup>2</sup> / nbre de pièces) ) / IT

$$GRR \% = 100 ( \sqrt{\text{Répétabilité}^2 + \text{Reproductibilité}^2} / IT$$

0% < GRR % ≤ 10 % : Apte  
 10% < GRR % ≤ 30% .. : Utilisable  
 GRR % > 30% : Inapte

**Tableau de décision en fonction du résultat d'une étude GRR**

Valeur GRR inf à 10%

10% < Valeur GRR < 30%

Valeur GRR sup à 30%

**ACCEPTABLE**

Capabilité  
 Loi normale : Cpk > 1,67  
 Loi défaut forme  
 Cam > 1,1  
 Cpm > 1,3

NON

**INACCEPTABLE**

- \* Remplacer l'appareil de mesure
- \* Revoir la conception de l'appareil
- \* Revoir la méthode de mesure
- \* Refaire l'étude GRR
- \* Revoir la formation des opérateurs
- \* Redéfinir les tolérances du paramètre
- \* Redéfinir le plan de surveillance
- \* Faire une demande de dérogation

$$ndc = 1,41 ( PV / GRR)$$



MODE OPERATOIRE

OBJET		Capabilité des moyens de contrôle																																																																																
Date de Création :	13/06/2002	Date de Modification :	25/06/2007	Indice : G																																																																														
Processus :	S1	Service Emetteur :	LABO METROLOGIE																																																																															
MO N° :	MO_S1_GMM_GENE_003	Service concerné :																																																																																
<b>2°) CALCUL DES INCERTITUDES TYPES</b>																																																																																		
<p><b>A - Quantifier chaque erreur définie pour une famille d'instruments puis la rattacher à une loi et à un écart-type</b> Lois utilisées : voir folio 3/5</p> <p><b>Méthode des 5 M : (Moyen, Méthode, Milieu, Matière, Main d'œuvre)</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Moyen (instrument de mesure)</th> <th>quantification</th> <th>loi</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>erreur de lecture</td> <td>En fonction du mode de lecture</td> <td>N ou U</td> </tr> <tr> <td>erreur de justesse ou d'indication</td> <td>Sur résultat du PV étalonnage</td> <td>N</td> </tr> <tr> <td>erreur liée à la technologie de l'instrument</td> <td>En fonction de l'instrument ( intégrée dans l'erreur d'indication )</td> <td>U</td> </tr> <tr> <td colspan="3"><b>Main d'œuvre (opérateur)</b></td> </tr> <tr> <td>erreur de répétabilité</td> <td>voir test de répétabilité</td> <td>non applicable</td> </tr> <tr> <td>erreur liée à la technologie de l'instrument ( ex: pression de mesure )</td> <td>voir test de reproductibilité</td> <td>N</td> </tr> <tr> <td colspan="3"><b>Méthode de mesure</b></td> </tr> <tr> <td>incertitudes d'étalonnage</td> <td>Sur PV étalonnage</td> <td>non applicable</td> </tr> <tr> <td>incertitudes des erreurs liées à la technologie de l'instrument</td> <td>En fonction de l'instrument ( intégrée dans l'erreur d'indication )</td> <td>non applicable</td> </tr> <tr> <td colspan="3"><b>Milieu - Matière</b></td> </tr> <tr> <td>différence de dilatation entre l'instrument et la pièce</td> <td>(1) <math>\Delta L</math> pièce - <math>\Delta L</math> instrument</td> <td>N</td> </tr> <tr> <td>écart de T° pièce / T° ambiante</td> <td>(2) <math>\Delta L</math> pièce - <math>\Delta L</math> ambiant</td> <td>N</td> </tr> </tbody> </table> <p>(1) <math>\Delta L</math> pièce = longueur mesurée x coefficient dilatation pièce ( T° ambiante maxi - T° référence )</p> <p><math>\Delta L</math> instrument = longueur mesurée x coefficient dilatation instrument ( T° ambiante maxi - T° référence )</p> <p>(2) Ecart de T° = longueur mesurée x coefficient dilatation pièce ( T° pièce - T° ambiante )</p> <p><b>B - Calculer l'incertitude globale ( avec probabilité à 95 %--&gt;coefficient =2)</b>  <b>Ecart- type composé Uc :</b>  <math display="block">U_c = \sqrt{((\text{erreur } n^{\circ}1)^2 + (\text{erreur } n^{\circ}2)^2 + \dots + (\text{erreur } n^{\circ}n)^2)}</math> <b>Incertitude globale ( avec probabilité à 95 %--&gt;coefficient K =2)</b>  <math display="block">U = K \times U_c \text{ --&gt; } U = 2 \times U_c</math></p> <p><b>C - Acceptation des processus de mesure</b>          Processus de mesure capable si : <math>11/U \geq 4</math> (préconisation norme NFX 07-010)          Si les incertitudes de mesures ne sont pas définies, appliquer la FI qualité P9.2</p> <p style="text-align: center;"><b>LOIS UTILISEES :</b> (Étendue=2a) (S=écart-type)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>LOI NORMALE :</th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>U = a / 3</math></td> <td></td> <td>1° pour tous types d'erreurs dépendantes d'un nombre important de paramètres, chacun étant de faible effet individuel</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>2° à utiliser en cas d'absence d'informations sur les phénomènes physiques engendrant ces erreurs</td> </tr> <tr> <td><b>LOI UNIFORME :</b></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>U = a / \sqrt{3}</math></td> <td></td> <td>1° Résolution d'un appareil numérique</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>2° Hystérésis</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>3° Conformité d'un appareil à une classe de précision</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>4° Géométrie d'une machine</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>5° Dérive d'un étalon</td> </tr> <tr> <td><b>LOI ARC SINUS :</b></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>U = a / \sqrt{2}</math></td> <td></td> <td>1° Erreur variant entre deux bornes de façon sensiblement sinusoïdale</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>2° Température d'un local</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>3° produit à faible inertie thermique</td> </tr> </tbody> </table>					Moyen (instrument de mesure)	quantification	loi	erreur de lecture	En fonction du mode de lecture	N ou U	erreur de justesse ou d'indication	Sur résultat du PV étalonnage	N	erreur liée à la technologie de l'instrument	En fonction de l'instrument ( intégrée dans l'erreur d'indication )	U	<b>Main d'œuvre (opérateur)</b>			erreur de répétabilité	voir test de répétabilité	non applicable	erreur liée à la technologie de l'instrument ( ex: pression de mesure )	voir test de reproductibilité	N	<b>Méthode de mesure</b>			incertitudes d'étalonnage	Sur PV étalonnage	non applicable	incertitudes des erreurs liées à la technologie de l'instrument	En fonction de l'instrument ( intégrée dans l'erreur d'indication )	non applicable	<b>Milieu - Matière</b>			différence de dilatation entre l'instrument et la pièce	(1) $\Delta L$ pièce - $\Delta L$ instrument	N	écart de T° pièce / T° ambiante	(2) $\Delta L$ pièce - $\Delta L$ ambiant	N	LOI NORMALE :			$U = a / 3$		1° pour tous types d'erreurs dépendantes d'un nombre important de paramètres, chacun étant de faible effet individuel			2° à utiliser en cas d'absence d'informations sur les phénomènes physiques engendrant ces erreurs	<b>LOI UNIFORME :</b>			$U = a / \sqrt{3}$		1° Résolution d'un appareil numérique			2° Hystérésis			3° Conformité d'un appareil à une classe de précision			4° Géométrie d'une machine			5° Dérive d'un étalon	<b>LOI ARC SINUS :</b>			$U = a / \sqrt{2}$		1° Erreur variant entre deux bornes de façon sensiblement sinusoïdale			2° Température d'un local			3° produit à faible inertie thermique
Moyen (instrument de mesure)	quantification	loi																																																																																
erreur de lecture	En fonction du mode de lecture	N ou U																																																																																
erreur de justesse ou d'indication	Sur résultat du PV étalonnage	N																																																																																
erreur liée à la technologie de l'instrument	En fonction de l'instrument ( intégrée dans l'erreur d'indication )	U																																																																																
<b>Main d'œuvre (opérateur)</b>																																																																																		
erreur de répétabilité	voir test de répétabilité	non applicable																																																																																
erreur liée à la technologie de l'instrument ( ex: pression de mesure )	voir test de reproductibilité	N																																																																																
<b>Méthode de mesure</b>																																																																																		
incertitudes d'étalonnage	Sur PV étalonnage	non applicable																																																																																
incertitudes des erreurs liées à la technologie de l'instrument	En fonction de l'instrument ( intégrée dans l'erreur d'indication )	non applicable																																																																																
<b>Milieu - Matière</b>																																																																																		
différence de dilatation entre l'instrument et la pièce	(1) $\Delta L$ pièce - $\Delta L$ instrument	N																																																																																
écart de T° pièce / T° ambiante	(2) $\Delta L$ pièce - $\Delta L$ ambiant	N																																																																																
LOI NORMALE :																																																																																		
$U = a / 3$		1° pour tous types d'erreurs dépendantes d'un nombre important de paramètres, chacun étant de faible effet individuel																																																																																
		2° à utiliser en cas d'absence d'informations sur les phénomènes physiques engendrant ces erreurs																																																																																
<b>LOI UNIFORME :</b>																																																																																		
$U = a / \sqrt{3}$		1° Résolution d'un appareil numérique																																																																																
		2° Hystérésis																																																																																
		3° Conformité d'un appareil à une classe de précision																																																																																
		4° Géométrie d'une machine																																																																																
		5° Dérive d'un étalon																																																																																
<b>LOI ARC SINUS :</b>																																																																																		
$U = a / \sqrt{2}$		1° Erreur variant entre deux bornes de façon sensiblement sinusoïdale																																																																																
		2° Température d'un local																																																																																
		3° produit à faible inertie thermique																																																																																



MODE OPERATOIRE

OBJET		Capabilité des moyens de contrôle		
Date de Création :	13/06/2002	Date de Modification :	25/06/2007	Indice : G
Processus :	S1	Service Emetteur :	LABO METROLOGIE	
MO N° :	MO_S1_GMM GENE_003	Service concerné :		

**II) INCERTITUDE A L'ETALONNAGE DES INSTRUMENT DE CONTROLE**

Etude faite par famille d'instrument --> mode opératoire MO-ET1, MO-ET2,...

Les éléments à prendre en compte pour caractériser le processus de mesure, peuvent être classés en 5 familles

- METHODE**

  - Nombre d'instruments à mesurer
  - Nombre d'opérateurs pour les mesures
  - Nombre de mesures à effectuer
  - Choix des étalons
- OPÉRATEUR**

  - Répétabilité --> écart type maxi (U<sub>i</sub>)
- RÉFÉRENCE DE CONTRÔLE**

  - Étalon de référence { --> Incertitude d'étalonnage du PV d'étalonnage (U...)  
--> Valeur nominale - valeur PV étalonnage (E<sub>j</sub>)
  - Appareil de mesure référence { --> Incertitude d'étalonnage du PV d'étalonnage (U...)  
--> Résolution (loi uniforme) (U...)  
--> Erreur d'indication du PV d'étalonnage (E<sub>j</sub>)
- MOYEN ÉTALONNE**

  - Résolution de l'appareil à étalonner (loi uniforme)
- ENVIRONNEMENT**

  - (Cd = Coefficients de dilatation : voir Norme NF E 10-100. Exemple : Aciers courants = 10 à 12.5.10<sup>-6</sup>)
  - Différence de température entre référence de contrôle et élément étalonné { --> Cd(moyen étalonné) x L x Delta T (loi normale) (U...)  
--> Cd(référence) x L x Delta T (U...)  
(Delta T = différence de température entre moyen étalonné et référence)
  - Méconnaissance des coeff. de dilatation { --> Delta C(Loi normale) (U...)  
--> Delta C(référence) x L x Delta T (U...)  
Delta Cd = valeur max. - valeur mini de la norme  
Delta T = différence entre 20° et température du local

**LOIS UTILISÉES :** Voir folio 3/5

**CALCULS**

**INCERTITUDE COMPOSÉE :**  $U_c = \sqrt{(U_i)^2 + \dots + (U_n)^2}$

**INCERTITUDE ÉLARGIE :** Avec coefficient d'élargissement : **K = 2 (niveau de confiance 95%)**

**U = (2 x U<sub>c</sub>) + E<sub>j</sub>**

En pratique la somme quadratique des divers composants U<sub>i</sub> à U<sub>n</sub> aboutit à une expression d'incertitude composée de la forme suivante :

$$U_c = \sqrt{A^2 + C.L + B^2 L^2}$$

où : A, B, C sont des termes constants  
L désigne la grandeur mesurée

La résolution d'une telle équation peut-être simplifiée en employant la méthode décrite folio 5/5 dite **"MÉTHODE DE LA CORDE"**



MODE OPERATOIRE

OBJET		Capabilité des moyens de contrôle		
Date de Création :	13/06/2002	Date de Modification :	25/06/2007	Indice : G
Processus :	S1	Service Emetteur :	LABO METROLOGIE	
MO N° :	MO_S1_GMM GENE_003	Service concerné :		

**METHODE DE LA CORDE**

Il est possible de linéariser l'expression de Uc en calculant l'équation de la droite passant par les deux points M1 et M2, ces points étant définis par les bornes L1 et L2 du domaine de mesure.

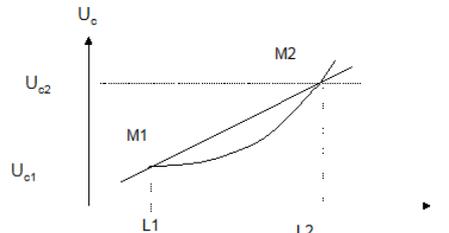
Cette droite représente une approximation par excès de la courbe réelle et a pour équation :

$$U_c = a + b.L \quad (4)$$

b et a (pente et l'ordonnée à l'origine de la droite M1M2) s'obtiennent à partir de l'équation (3) en substituant à la variable L les valeurs numériques L1 et L2 (bornes du domaine de mesure) :

$$b = (U_{c2} - U_{c1}) / (L2 - L1)$$

$$a = U_{c1} - L1(U_{c2} - U_{c1}) / (L2 - L1)$$



Une méthode pratique pour déterminer a et b de la droite de l'équation (4) consiste à remplacer L par les valeurs aux bornes L1 et L2 dans les expressions littérales ci-après :

$$b = \frac{(A^2 + C.L2 + B^2.L2^2)^{1/2} - (A^2 + C.L1 + B^2.L1^2)^{1/2}}{L2 - L1}$$

$$a = \frac{(A^2 + C.L1 + B^2.L1^2)^{1/2} - L1.(A^2 + C.L2 + B^2.L2^2)^{1/2} - (A^2 + C.L1 + B^2.L1^2)^{1/2}}{L2 - L1}$$

d'où :  $U_c = a + b.L$

**Équation simplifiée par laboratoire LEFÈVRE MESURE et validée par le COFRAC :**

$$a = y1 - (b.L1)$$

$$b = \frac{y2 - y1}{L2 - L1}$$

$$\left. \begin{aligned} y1 &= \sum A^2 + (\sum B^2.L1^2) + \sum x AB x L1 \\ y2 &= \sum A^2 + (\sum B^2.L2^2) + \sum x AB x L2 \end{aligned} \right\}$$

TABLEAU DE CALCUL :

	Facteur Fixe		Facteur en L <sup>2</sup>		Corrélation en L	
	Valeur A(μm)	Valeur A <sup>2</sup>	Valeur B	Valeur B <sup>2</sup>	Valeur 2AB	
Répétabilité		0,000000			0,000000	
B1		0,000000			0,000000	
B2		0,000000			0,000000	
B3		0,000000			0,000000	
B4		0,000000			0,000000	
B5		0,000000			0,000000	
B6		0,000000			0,000000	
B7		0,000000			0,000000	
B8		0,000000			0,000000	
somme A <sup>2</sup>		0,000000	somme B <sup>2</sup>	0,000000	0,000000	
L1(m)	<input type="text"/>		Y1	<input type="text" value="0,000000"/>		
L2(m)	<input type="text"/>		Y2	<input type="text" value="0,000000"/>		
			b	<input type="text"/>		
			a	<input type="text"/>		

**Suivi des modifications**

Principales modifications apportées : Mise en forme FI Qualité PM G6 en mode opératoire

Raison de la modification : Adéquation / SMQ

Emetteur :

Nom :

Visa :

Vérificateur/Approbateur :

Nom :

Visa :

## Liste des figures

<b>Figure 1:</b> Carter chapeau palier 10 844	07
<b>Figure 2:</b> Moteur DV4	07
<b>Figure 3:</b> Cycle de fabrication de la pièce 90080	08
<b>Figure 4:</b> Îlot de moulage	09
<b>Figure 5:</b> Grille remplie de pièces dont la planéité est garantie	10
<b>Figure 6:</b> Diagramme fonctionnel	12
<b>Figure 7:</b> Robot structure parallèle	15
<b>Figure 8:</b> Robot structure mixte	15
<b>Figure 9:</b> Pivot	16
<b>Figure 10:</b> Glissière	16
<b>Figure 11:</b> Robot industriel 6 axes	16
<b>Figure 12:</b> Poignet PYR	16
<b>Figure 13:</b> Poignet RPR	16
<b>Figure 14:</b> Exemple de position singulière de l'IRB6400	17
<b>Figure 15:</b> Espace de travail du robot ABB 6400 R	17
<b>Figure 16:</b> Données articulaires liées aux axes du robot	17
<b>Figure 17:</b> Changements de coordonnées en robotique	18
<b>Figure 18:</b> Représentation des repères liés aux corps du robot	19
<b>Figure 19:</b> Paramètres de Denavit-Hartenberg	20
<b>Figure 20:</b> Représentation d'un robot 6 axes avec poignet sphérique	23
<b>Figure 21:</b> Diagramme bloc de la commande PID	26
<b>Figure 22:</b> Mécanisme de compliance	28
<b>Figure 23:</b> Diagramme bloc de la commande avec compliance	30
<b>Figure 24:</b> Future implantation de l'îlot	33
<b>Figure 25:</b> Automate S7 300	34
<b>Figure 26:</b> Graveur Sic Marking I52	34
<b>Figure 27:</b> Architecture de la commande	36
<b>Figure 28:</b> Construction arborescente de la commande	37
<b>Figure 29:</b> Exemple d'un FB de grafcet	39
<b>Figure 30:</b> Structure programme robot en module.	39
<b>Figure 31:</b> Routine principale "Main" du programme robot	40
<b>Figure 32:</b> Structure d'une page IHM	41
<b>Figure 33:</b> Vue d'ensemble de la communication	42
<b>Figure 34:</b> Architecture réseau	42
<b>Figure 35:</b> Grille de 10844	44
<b>Figure 36:</b> Protection des zones grille	45
<b>Figure 37:</b> Demande de confirmation par "Popup"	46
<b>Figure 38:</b> Phases de localisation d'une grille	47
<b>Figure 39:</b> Dépendance des repères objet dans le système de coordonnées	48
<b>Figure 40:</b> Exemple de calcul de la position de rangement.	49
<b>Figure 41:</b> Dégagement du bras pendant la dépose	50
<b>Figure 42:</b> Assiette et distance d'approche	50
<b>Figure 43:</b> Boucle de détection de la hauteur des pièces	50
<b>Figure 44:</b> La page de garde dispose de nombreuses animations.	51
<b>Figure 45:</b> Moyens de contrôle planéité manuel	52
<b>Figure 46:</b> Principe de positionnement de la pièce	53

<b>Figure 47:</b> Mécanisme donnant une complianc	55
<b>Figure 48:</b> Adaptation du mécanisme sur l'outil	55
<b>Figure 49:</b> Plaquage et appui de la pièce avec le bras robotisé	56
<b>Figure 50:</b> Caractéristique des ressorts utilisés	56
<b>Figure 51:</b> Phase d'appui, les ressorts sont comprimés sur plusieurs millimètres	56
<b>Figure 52:</b> Instructions RAPID pour activer la commande avec complianc	57
<b>Figure 53:</b> Principe de la mesure avec règle optique	58
<b>Figure 54:</b> Chaîne d'acquisition des données de mesure de distance.	58
<b>Figure 55:</b> Page destinée à l'étalonnage et à la vérification des palpeurs.	60
<b>Figure 56:</b> Page d'aide au diagnostic	60
<b>Figure 57:</b> Visualisation des mesures avec possibilité de navigation.	61
<b>Figure 58:</b> Dateur pour moule de fonderie	68

### Liste des tableaux

<b>Tableau 1:</b> Modes de marche des équipements de l'îlot	35
<b>Tableau 2:</b> Synoptique de fonctionnement de l'îlot robotisé.	64
<b>Tableau 3:</b> Consommation du budget d'achat d'équipements.	66
<b>Tableau 4:</b> Pertes observées au service usinage liées à des défauts fonderie.	67
<b>Tableau 5:</b> Pertes de production et coûts de main d'œuvre liés au remplacement des dateurs	68

### Liste des logigrammes

<b>Logigramme 1:</b> Logigramme de gestion des grilles	51
<b>Logigramme 2:</b> Script de traitement des données ASCII	59
<b>Logigramme 3:</b> Méthode de recherche et validation d'une solution	65

## Bibliographie

### Ouvrages :

- MORENO S., PEULOT E., 2002. *Le GEMMA*. Casteilla, Paris, 255 p.
- CHAUVEAU J.-C., CHAUVEAU P., 1994. *Systèmes asservis linéaires*. Casteilla, Paris, 179 p.
- PROUVOST P., 2004. *Automatique contrôle et régulation*. Dunod, Paris, 315 p.
- GUININ D., JOPPIN B., 1999. *Algèbre et géométrie*. Breal, Rosny-sous-Bois, 415 p.
- WISAMA K., DOMBRE E., 1999. *Modélisation identification et commande des robots*. Hermès, Paris, 503 p.
- ANGELES J., 2007. *Fundamentals of robotic mechanical systems*. Springer, USA, 544 p.
- MING X., 2003. *Fundamentals of robotics*. World Scientific, USA, 718 p.
- NOBERTO P., 2007. *Industrial robots programming*. Springer, USA 289 p.
- KHATIB O., SICILIANO B., 2008. *Handbook of robotics*. Springer, USA, 1628 p.

### Techniques de l'ingénieur :

- DOMBRE E., 1998 . Programmation des robots. *R 7720, traité Informatique industrielle, Techniques de l'Ingénieur*. 14 p.
- LIÉGEOIS A., 1988. Modélisation et commande des robots manipulateurs. *R 7730, traité Informatique industrielle, Techniques de l'Ingénieur*, 16 p.
- JARGOT P., 1999. Langages de programmation pour API. *S8030 Traité Informatique industrielle, Techniques de l'Ingénieur*. 15 p
- ZANIN J.-P., 1997. Cahier des charges fonctionnel. *A 5090 Traité Génie Industriel, Techniques de l'Ingénieur*. 6 p.

### Documentation constructeur :

- ABB, 2004. RAPID reference manual 3HAC 7783-1 Revision C. Suède 1036 p.
- ABB, 2004 . User's guide 3HAC 7793-1 Revision C. Suède 630 p.
- SIEMENS, 2006. *Programmer avec STEP 7, 6ES7810-4CA08-8CW0*. Allemagne, 652p.

## **Palettisation et contrôle robotisé**

**Mémoire d'ingénieur C.N.A.M Lyon 2010**

---

### **Résumé**

L'évolution des pièces de moteur moulées dans un îlot d'injection sous pression entraîne le besoin de robotiser certaines tâches manuelles.

L'intégration d'une cellule de palettisation et de contrôle dans l'îlot de fabrication va permettre de diminuer la pénibilité du travail du personnel de production et d'améliorer la maîtrise du processus. Cette cellule doit répondre aux exigences d'un cahier des charges et respecter les normes qui encadrent la construction de machines (DIN EN 954-1).

L'ensemble, géré par un automate programmable, comporte un robot ainsi que des moyens de contrôle et de gravure. La communication homme-machine se fait via un écran tactile. Les principales tâches sont :

- Tester de planéité.
- Graver la date et l'heure.
- Palettiser les pièces.

Ces applications nécessitent l'utilisation du contrôle de force avec un robot industriel.

Mots clés : Robot, automate, programmation, IHM, compliance, asservissement, planéité.

---

### **Summary**

The evolution of engine parts cast in a machining cell leads to the need of automating some manual tasks.

The integration of palletizing and control in the manufacturing cell will reduce the arduous work of production staff and improve the mastery of process. This cell must meet the requirements of specifications and comply with security standards who supervise the machine-manufacturing field (DIN EN 954-1).

The cell, managed by a PLC, has a robot that works with engraving and control means. The human-machine interface is a touch screen. The main tasks are:

- Control the flatness
- Engrave the date and the hour.
- Palletize the parts.

These tasks require the use of force control with an industrial robot.

Key words: Robot, PLC, programming, HMI, compliant, control, flatness.

---