



Projet Olympiades 2017

Karoline CARVALHO
BÜRGER
Tiago DE JESUS RODRIGUES
Rafael ELLER CRUZ
Rafael Accácio NOGUEIRA

Conseillés par
Prof. Maria MAKAROV



CentraleSupélec

3 mars 2017

Table des matières

1	Introduction	3
2	Cadre du Projet : Description du problème et Contraintes	4
3	Méthodologie	5
4	Description de la solution	6
4.1	Choix du robot	6
4.2	Placement du robot et des <i>fixtures</i>	8
4.3	Trajectoire du robot	10
4.4	Considérations relatives à la sécurité opérationnelle	13
4.5	Entrées et sorties du robot	17
4.6	Programmation du robot	18
5	Évaluation : Résultats et Performance	19
5.1	Surface de l'îlot	19
5.2	Cadence de production	20
5.3	Sécurité	21
5.4	Prévision Budgétaire	21
6	Conclusion	22

1 Introduction

Le présent document est un dossier technique composé par l'équipe de l'école CentraleSupélec en réponse à l'avant-projet des Olympiades de Robotique Industrielle FANUC, précisant les principales caractéristiques de la solution proposée et justifiant les choix retenus. Le projet a pour objectif proposer une solution robotisée à l'étape de palettisation de la chaîne de production d'une usine de pièces mécaniques. Ce document est divisé en cinq parties, qui sont brièvement décrites ci-dessous :

- **Cadre du Projet :**
Description du problème à résoudre et des contraintes qui doivent être respectées.
- **Méthodologie :**
La méthodologie utilisée dans le développement de notre solution.
- **Description de la solution :**
Choix du robot, placement du robot et des *fixtures*, trajectoire du robot, éléments de sécurité opérationnelle, entrées/sorties et du programme du robot.
- **Évaluation : Résultats et performance :**
L'évaluation des résultats obtenus.
- **Conclusion :**
L'appréciation global du projet et de la solution proposée.

2 Cadre du Projet : Description du problème et Contraintes

Ce projet a pour but d'étudier la robotisation d'une usine française afin d'optimiser la surface utilisée pour la palettisation des produits finis, tout en réduisant par deux la zone précédemment occupée. Les produits finis sont emballés dans des cartons et arrivent dans la zone de palettisation sur un convoyeur à accumulation. Ils doivent être déposés sur des palettes qui arrivent sur des convoyeurs. Les palettes arrivent vides et sont remplies de six couches de deux cartons avant d'être acheminées à l'extérieur de la zone pour le même convoyeur.

Ce projet a pour but d'étudier la robotisation d'une usine française afin d'optimiser la surface utilisée pour la palettisation des produits finis, tout en réduisant par deux la zone précédemment occupée.

Les produits finis sont emballés dans des cartons et arrivent dans la zone de palettisation sur un convoyeur à accumulation. Ils doivent être déposés sur des palettes qui arrivent sur des convoyeurs. Les palettes arrivent vides et sont remplies de six couches de deux cartons avant d'être acheminées à l'extérieur de la zone pour le même convoyeur.

Les cartons ont des dimensions $780 \times 540 \times 350 \text{ mm}$ ($L \times l \times h$), une masse de 50 kg et suivent une cadence de 411 produits/heure. Les palettes ont des dimensions $1200 \times 800 \text{ mm}$. Le convoyeur de carton et les convoyeurs de palettes ont une longueur de 3050 mm et une hauteur de 1100 mm . L'îlot de sécurité, qui doit être réduite, a des dimensions $3600 \times 3600 \text{ mm}$. Pour le préhenseur, la masse à vide est 20 kg . La position du centre de gravité en millimètres est $(X, Y, Z) = (0, 0, 60)$ et les inerties du préhenseur à vide sont $L_{xx} = 8.54 \times 10^{-1} \text{ kg.m}^2$, $L_{yy} = 3.04 \times 10^{-1} \text{ kg.m}^2$ et $L_{zz} = 1.083 \text{ kg.m}^2$. Le temps de prise des cartons est de 1 seconde et le temps de dépose, 0.5 seconde.

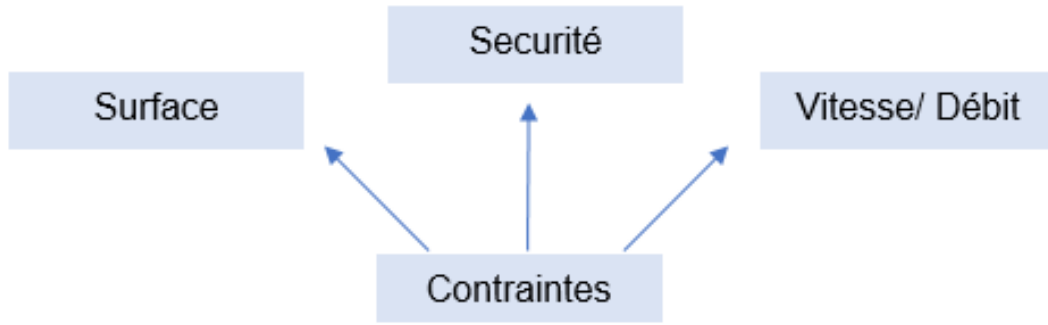


Figure 1 – Contraintes Principales

La solution doit aussi respecter des normes internationales de sécurité, particulièrement la ISO 13849-1, qui définit le concept de *Performance Level* auquel l'architecture de contrôle *Dual Check Safety* a été conçu pour suivre. Les cartons, palettes et préhenseur ont des dimensions déterminées, par contre les dimensions des convoyeurs peuvent être redimensionnés afin d'obtenir une meilleure solution.

Ayant ceci en tête, les trois contraintes principales sont la surface de l'îlot de sécurité, la vitesse de palettisation/débit de la cellule et la performance de sécurité. Il est évident qu'on peut réduire la surface si on rapproche la barrière de sécurité près du robot, mais cela rapproche aussi les ouvriers du robot, ce qui peut les mettre en danger.

De façon similaire, si on réduit la vitesse du robot, afin de réduire le risque de chute d'objets, on peut compromettre le flux de production.

En somme, toute solution proposé doit impérativement :

- Avoir une surface totale maximum de $6,48 \text{ m}^2$;
- Être capable de palletiser et rendre disponibles dans le local approprié 411 cartons/heure ;
- Être en accord avec la norme de sécurité ISO 13849-1.

En respectant tous ces critères, nous chercherons minimiser la surface totale, le budget prévu, minimiser les risques de sécurité et maximiser la durée de vie du robot, tout en cherchant une solution réaliste. Il est très importante d'observer que, basé sur l'avant-projet, nous allons considérer la surface de l'îlot comme la région qui comprend la partie externe de la barrière de sécurité, tandis que l'emplacement où les cartons arrivent sur la cellule et l'emplacement d'où les palettes sont enlevées n'en font pas partie.

3 Méthodologie

Compte tenu du problème et de ses contraintes, il faut préciser une méthodologie pour les aborder efficacement. La méthodologie proposée est composée de 5 étapes, comme indiqué dans le schéma de la figure 2.

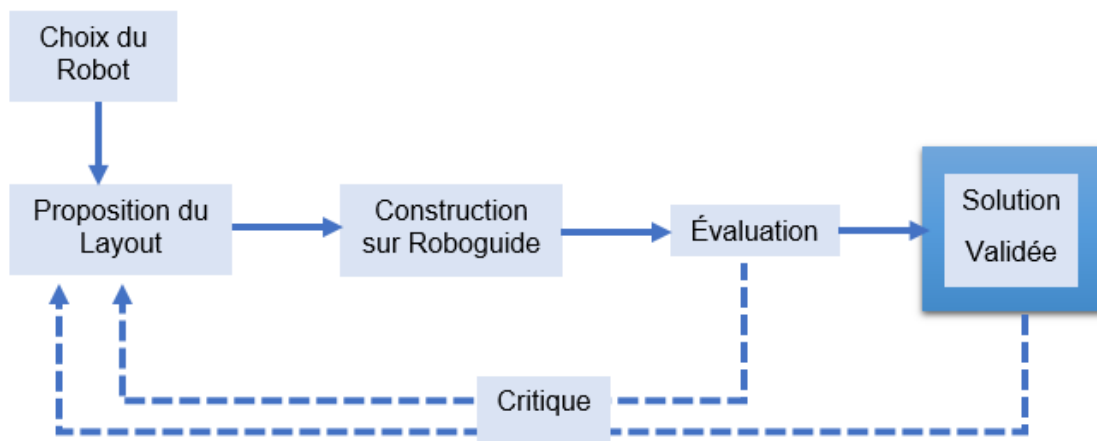


Figure 2 – Représentation des étapes du projet

Au début, il faut **choisir un robot** parmi le catalogue Fanuc qui soit capable d'accomplir les tâches proposés, en termes de capacité de charge, vitesse et rayon d'action. Ensuite, il faut **proposer le Layout**, c'est-à-dire, à partir des éléments fixes (cartons, palettes, robot) on choisit les autres éléments en quantité et dimensions adéquates, et on les arrange dans cellule. Avec ces propositions, on passe au **logiciel Roboguide** pour les implémenter dans une cellule. Il faudra implémenter les objets, les positionner, programmer le mouvement du robot, animer les mouvements des objets et programmer le DCS. Une fois qu'on a une cellule fonctionnelle, on passe à l'**Évaluation**, étape dans laquelle les critères définis dans la section 2 seront examinés, en mesurant la surface, en déterminant le débit et en faisant des analyses de sécurité.

Si la solution ne respecte pas même un des critères, elle est rejetée et on passe à la Critique, c'est-à-dire, on identifie les hypothèses explicites et implicites de la Proposition du Layout et essaye de les modifier, remplacer ou simplement rejeter. Avec une solution validée en main il est possible de chercher une autre solution plus optimisée à travers du processus de Critique déjà présenté. Lorsqu'on a plus qu'une solution on doit formuler un critère pour choisir la solution définitive. Le critère choisi par notre équipe était la surface de l'îlot : celui qui a la plus petite surface sera choisi. Avec ce schéma, l'équipe a fait trois cycles de développement, à partir desquels nous présentons la solution la plus optimisée.

4 Description de la solution

4.1 Choix du robot

Pour choisir le robot le plus adéquat pour notre solution, on doit prendre en compte le domaine d'application du robot, la cadence de production, la charge que le robot doit supporter et le rayon d'action. Dans notre cellule robotique, l'application du robot est palettiser les cartons dans les palettes. On choisit un robot du type palettisation : modèles M-710iC/50H, R-1000iA/80H, R-2000iB/100H et M-410. La charge embarquée maximale du robot est composée du préhenseur plus le carton. Le préhenseur a une masse de 20 kg , de centre de gravité (CDG) $(0, 0, 60)$ en millimètres. Les inerties sont $L_{xx} = 8.54 \times 10^{-1}\text{ kg.m}^2$, $L_{yy} = 3.04 \times 10^{-1}\text{ kg.m}^2$ et $L_{zz} = 1.083\text{ kg.m}^2$. Ces sont les données à vide, exprimés dans le repère dont l'origine est située au centre de la platine du robot, l'axe Z est perpendiculaire et sort de la platine et l'axe X point vers le haut quand le robot est sur ses zéros mécaniques. On l'appelle repère R1. Chaque carton a une masse de 50 kg et ils sont considérés comme des solides homogènes. Les dimensions sont $780 \times 540 \times 350\text{ mm}$, donc son CDG coïncide avec le centre géométrique. Par rapport à un repère situé au centre du carton (repère R2), comme montre la figure 3 les inerties sont $L_{xx} = 1.725\text{ kg.m}^2$, $L_{yy} = 3.045\text{ kg.m}^2$ et $L_{zz} = 3.75\text{ kg.m}^2$. Quand le préhenseur est en charge, le robot doit supporter une masse de 70 kg . On considère que le centre géométrique du carton est situé sur l'axe Z du repère R1. Le CDG par rapport à ce même repère est $(0, 0, 214)\text{ mm}$ et les inerties sont $L_{xx} = 6.360\text{ kg.m}^2$, $L_{yy} = 7.130\text{ kg.m}^2$ et $L_{zz} = 4.833\text{ kg.m}^2$.

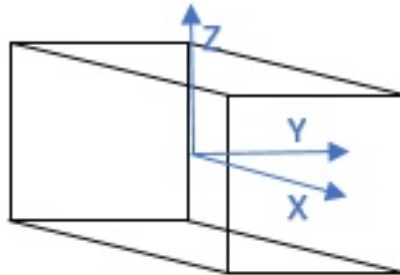


Figure 3 – Repère R1 au centre du carton

Pour déterminer le rayon d'action minimal pour le robot dans cette application, au début on a besoin de fixer une disposition a priori des *fixtures* et du robot, comme est montré dans la figure 4.

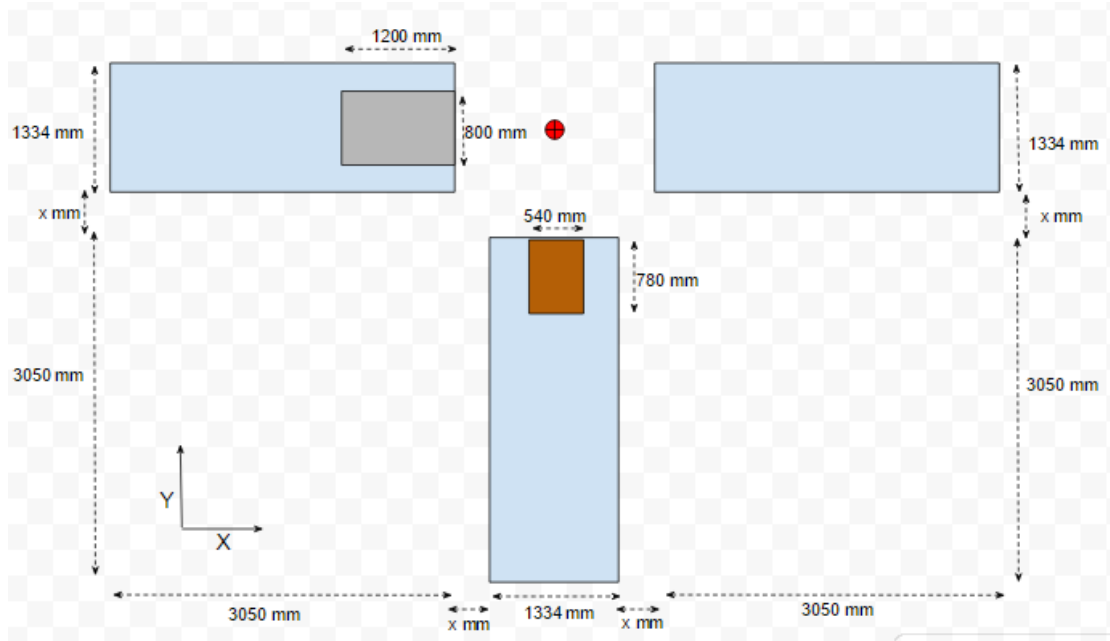


Figure 4 – Layout a priori de la cellule

Pour le rayon minimal, on considère que les convoyeurs se touchent, c'est-à-dire, $x = 0 \text{ mm}$. De cette façon, avec le robot équidistant des convoyeurs (le point rouge), le rayon d'action du robot peut être calculé comme suit :

- On met le robot au milieu de la hauteur de la couche de cartons, ce qui correspond à trois cartons ($3 \times 350 = 1050 \text{ mm}$ par rapport aux convoyeurs) ;
- Convoyeurs de palettes : il est aligné au robot dans l'axe Y et la distance dans l'axe X est $540 + 540/2 + 1334/2 = 1477 \text{ mm}$. Le rayon total $d = \sqrt{1477^2 + 1050^2} = 1812.19 \text{ mm}$.
- Convoyeur de cartons : il est aligné au robot dans l'axe X, et la distance dans l'axe Y est $1334/2 + 780/2 = 1057 \text{ mm}$. Le rayon total $d = \sqrt{1057^2 + 1050^2} = 1498.88 \text{ mm}$.

Alors, le rayon minimale est 1812.19 mm . Dans la suite, on a la liste des robots qui satisfont ces critères et leurs caractéristiques.

Tableau 1 – Robots qui satisfont les critères du problème

Série	Version	Type	Charge Max. (Kg)	Rayon (mm)	Axes	Prix
R-1000	iA	80H	80	2230	5	45 000 €
R-2000	iB	100H	100	2655	5	50 000 €
M-410	iB	140H	140	2850	5	55 000 €
M-410	iC	185	185	3143	4	55 000 €
M-410	iC	315	315	3143	4	55 000 €
M-410	iB	450	450	3130	4	-
M-410	iB	700	700	3143	4	-

Pour choisir un d'entre les robots qui satisfont les critères, on a fait l'analyse budgétaire des séries R-1000, R-2000 et M-410. Le R-1000iA/80H est le moins cher, alors on l'a choisi pour faire des tests de simulation dans le but d'analyser s'il répond bien à la cadence de production. La cadence du convoyeur de carton est de 411 produits/heure, ce qui correspond à un carton toutes les 8.76 secondes. La distance entre le carton et la position la plus loin où le carton doit être déposé dans la palette est 2,776 m, et alors la vitesse moyenne du robot pour mettre le carton dans la palette et retourner à la position initiale doit être supérieur à 0,64 m/s, une vitesse qui semble raisonnable pour le robot. On a simulé le robot toute en contrôlant le taux des cartons, et la vitesse du robot est vraiment suffisante.

4.2 Placement du robot et des *fixtures*

Les convoyeurs sont des éléments importants pour le fonctionnement de la cellule, puisqu'ils y apportent les cartons, et les emportent. Cependant, ils occupent une surface considérable de la cellule. Alors, on a commencé l'optimisation de la surface pour trouver une bonne disposition des convoyeurs dans la cellule. On a considéré que la largeur minimale des convoyeurs de palette est la largeur des palettes (800 mm) et la largeur minimale du convoyeur de cartons est la largeur des cartons (540 mm). On a ajouté à ces valeurs une marge de sécurité. Le placement des *fixtures* qui nous semble permettre de réduire le plus la surface est montrée dans les images suivantes.

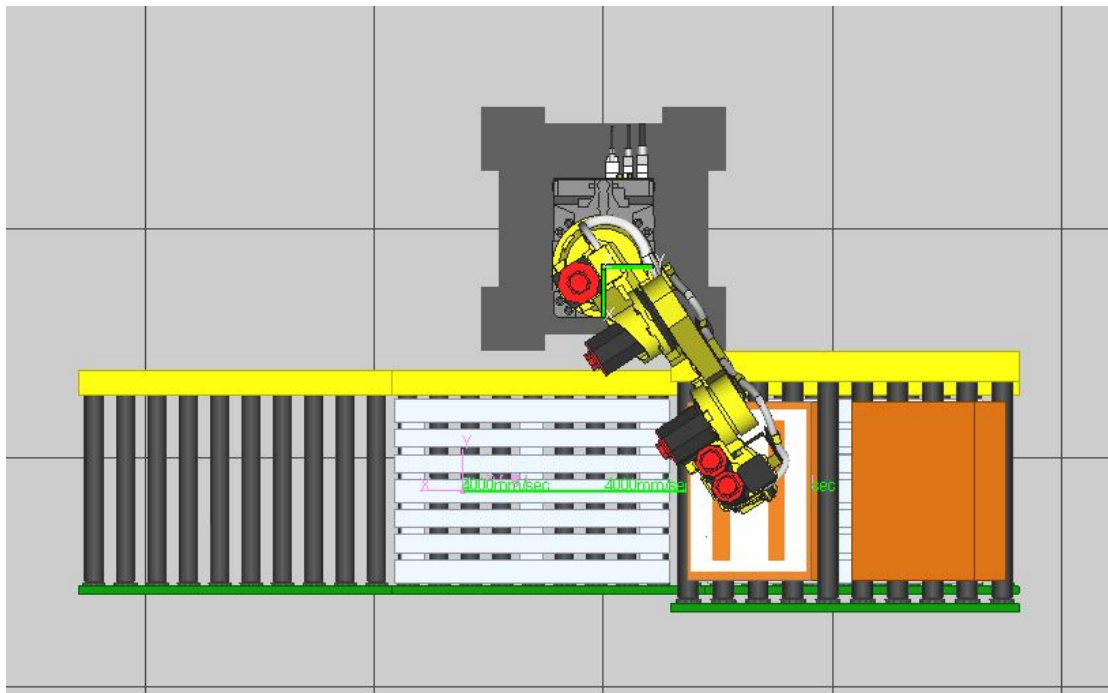


Figure 5 – Vue du dessus de la cellule robotique

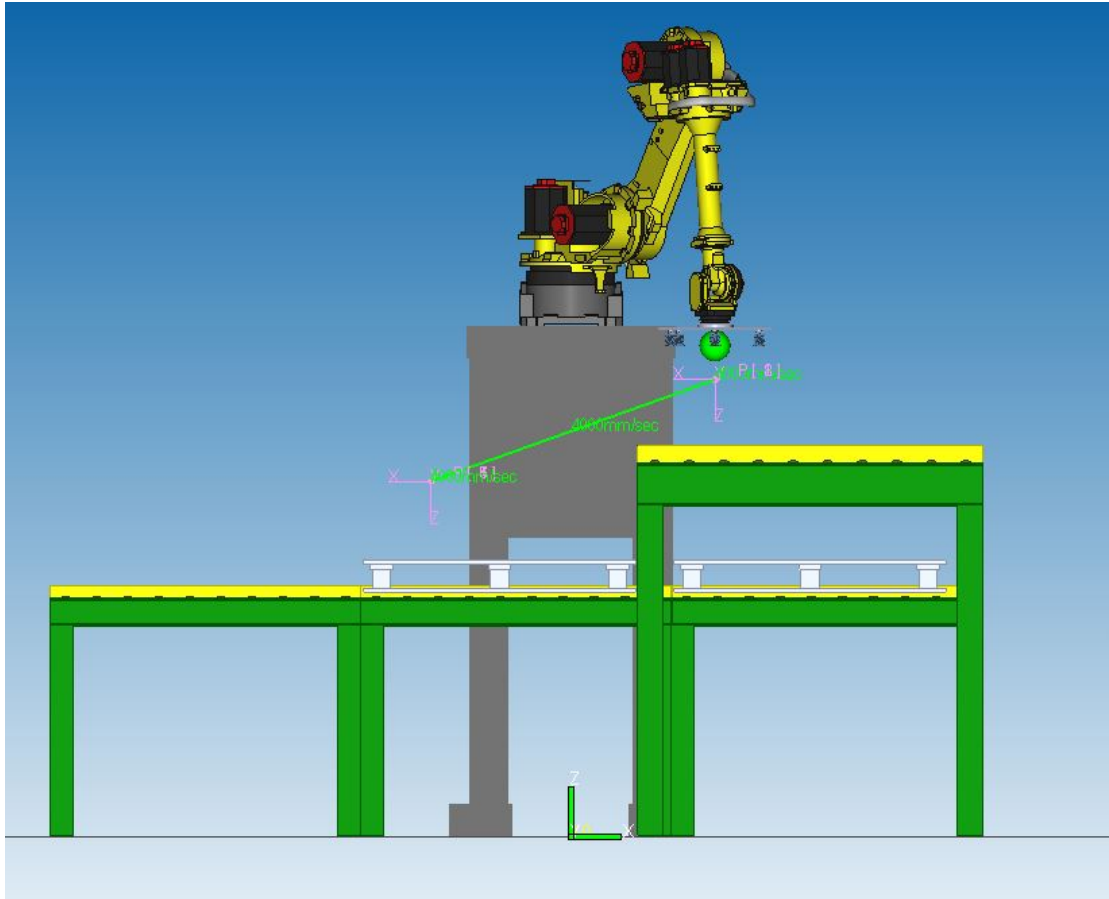


Figure 6 – Vue frontale de la cellule robotique

Pour choisir cette configuration, on a résolu la limitation suivante : les emplacements où les cartons et les palettes sont posés sur le convoyeur et d'où les palettes sont prises doivent être inaccessibles pour le robot, dans le but de garantir la sécurité de ceux qui vont les poser (un ouvrier ou une autre machine). C'est possible d'effectuer les opérations souhaitées avec un seul convoyeur de palettes qui fonctionne à un seul sens.

De cette manière, on a besoin de trois zones dans le convoyeur : une pour poser les palettes vides, une empiler les cartons sur la palette par le robot et une autre pour prendre les palettes pleines. Avec cette disposition, la seule façon qu'on a trouvé pour réduire la surface occupée par des convoyeurs est en verticalisant les opérations. Il est possible de mettre le convoyeur de cartons sur la partie des convoyeurs de palette où les palettes vides sont placées. Pour ce faire, les normes de sécurité doivent être pris en compte, car des opérateurs peuvent travailler dans cette zone pour poser les palettes. Ces normes de sécurité seront discutées dans la section 4.4.

Un avantage de cette solution est que, en plus d'être efficace par rapport à la disposition des convoyeurs, elle réduit aussi la distance entre les cartons et la position où ils doivent être déposés sur les palettes. Cela permet de réduire la surface de l'îlot occupé par la trajectoire du robot aussi bien que de réduire le temps d'empilage des cartons sur la palette. Pour le robot, le plus efficace est le placer au milieu de sa zone de travail. Comme il doit empiler des cartons en 6 couches sur une palette, qui est sur un convoyeur, la zone de travail vertical du

robot se prolonge du premier carton dans la palette jusqu'au sixième. Le milieu correspond alors à la hauteur du convoyeur de carton plus la hauteur de trois cartons : 2150 mm . Expérimentalement, la meilleure hauteur qu'on a trouvé est 2250 mm . Le robot est donc placé sur un piédestal. Pour la position horizontale du robot, on a choisi le milieu du palette qui est en train d'être remplie avec les cartons, avec une distance horizontale 454 mm entre le centre du robot et le début du convoyeur de palettes.

4.3 Trajectoire du robot

Pour déterminer les points qui vont contrôler la trajectoire du robot, on n'utilise qu'un repère user. Ce repère est défini par rapport au centre de la base du robot, 2250 mm au dessous, ce qui correspond au sol. De cette façon, il était plus facile de déterminer les points, avec leur hauteur 'globale'. La direction des axes est montrée dans les figures 5 et 6.

Comme toutes les opérations du robot sont faites dans une même ligne en X, et tous les convoyeurs étant horizontales, un seul repère est suffisant.

Pour générer la trajectoire du robot, on n'utilise que deux positions fixées : les points P_1 et P_2 . P_1 correspond à la position sur le milieu du carton qui arrive dans le convoyeur de cartons. P_2 correspond à la position sur le milieu du carton de la première couche qui remplit la palette, à gauche. P_1 et P_2 sont montrés dans la figure suivante. Tous les points de la trajectoire sont générés avec ces positions, en appliquant des offsets.

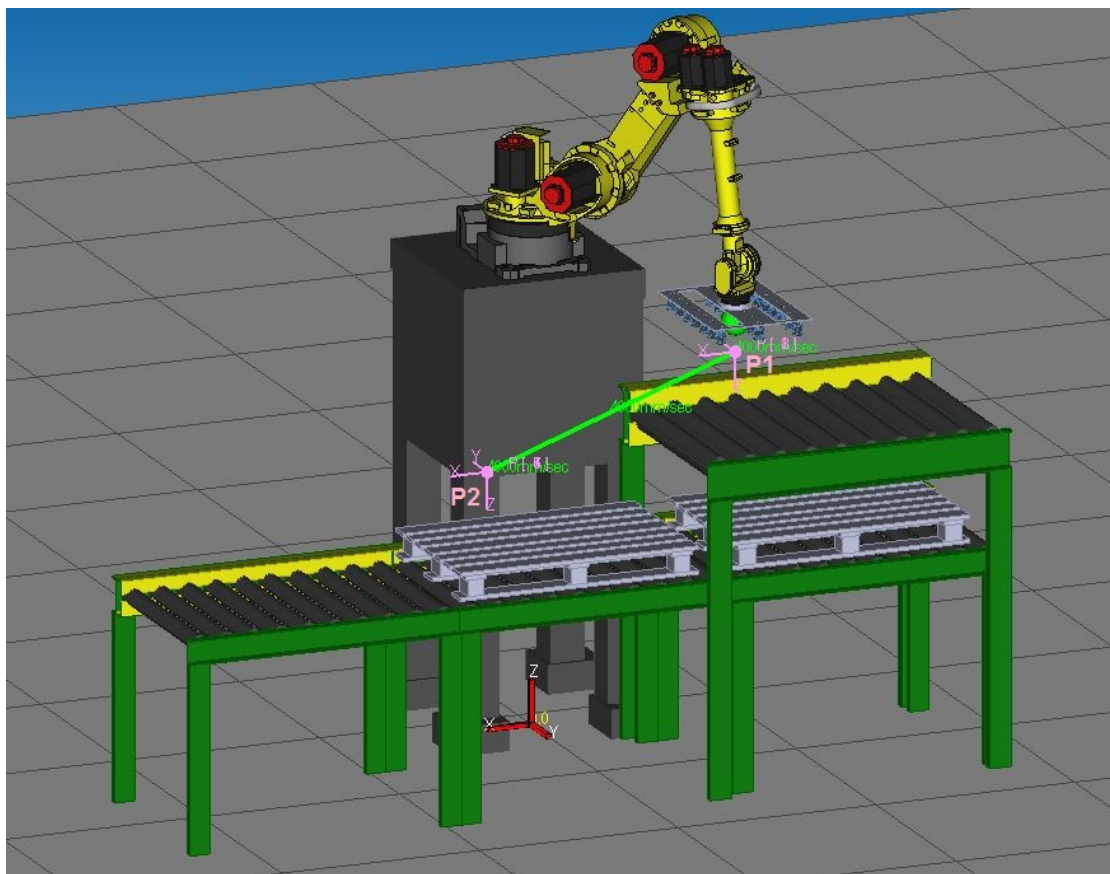


Figure 7 – Positions de référence du programme du robot

Pour générer des offsets pour la trajectoire, on utilise six points de référence PR. Dans le tableau 2, il y a toutes les correspondances entre les PR qu'on a utilisé, leur fonction et leur valeur.

Tableau 2 – Offsets utilisés dans le programme du robot

Point de référence	Fonction	Valeur (mm)
PR[1]	Point de départ du programme.	$P_1 + (0, 0, 150)$
PR[2]	Distance verticale d'approche pour la prise des cartons.	$(0, 0, 150)$
PR[3]	Distance verticale pour éviter les collisions du robot avec les cartons déjà positionnées lors qu'il enlève le carton du convoyeur de cartons.	PR[2], si le robot est en train de remplir la première couche dans la palette, sinon, $(0, 0, \text{PR}[5,3] - 350)$
PR[4]	Déterminer la position du prochain carton à être déposé sur la palette.	$(0, Y_c, Z_c)$, étant Y_c égal 0 pour les cartons à gauche 600 à droite, et $Z_c = (i-1)*350$, i' la couche du carton
PR[5]	Distance verticale d'approche pour la dépose des cartons.	$\text{PR}[4] + \text{PR}[2]$
PR[6]	Distance verticale pour éviter les collisions du robot avec les cartons déjà positionnées lors qu'il va déposer le carton dans la palette.	$\text{PR}[5] + (0, 0, 350)$

On a défini huit points pour maîtriser la trajectoire du robot. Ces points utilisent les offsets montrés avant et sont variables avec la position du carton à être déposé sur la palette. La figure 8 montre la trajectoire du robot, en remarquant les points fixés. La tableau 3 explique la fonction de chaque point choisi.

On peut observer dans la tableau 3 qu'il n'y a que trois points de type FINE. Ces points correspondent aux emplacements où le robot doit prendre le carton (P[2]), déposer le carton (P[6]) et s'arrêter en attente pour le prochaine carton. Par conséquent, leur position doit être précisément respectée, et pour cela on utilise les points du type FINE. Les autres points sont utilisés pour bien fixer le profil de la trajectoire du robot, mais il n'a pas besoin de passer exactement sur eux. Pour cela on utilise les points CNT 100.

Tous les mouvements du robot sont du type <Linear>. Ce type de mouvement n'est pas le plus optimal par rapport à la vitesse du robot, mais de cette façon on limite les mouvements du robot à la zone sur le convoyeur de palettes, et on peut réduire plus la surface de l'îlot, ce qui est l'objectif principal du projet. Par rapport à la cadence du processus, les mouvements linéaires sont suffisants, et cette question est mieux explorée dans la section 5.2. La figure 9 montre toute la trajectoire du robot pour remplir une palette avec six couches de deux cartons.

Tableau 3 – Points utilisés dans la trajectoire du robot

Point	Fonction	Valeur	Type
P[1]	Point d'approche pour la prise	$P_1 + PR[2]$	CNT 100
P[2]	Point de prise d'un carton	P_1	FINE
P[3]	Point intermédiaire pour aller au convoyeur de palettes sans collision avec la pile de cartons	$P_1 + PR[3]$	CNT 100
P[4]	Point intermédiaire sur le convoyeur de palettes sans collision avec la pile de cartons	$P_2 + PR[4] + PR[6]$	CNT 100
P[5]	Point d'approche pour la dépose	$P_2 + PR[4] + PR[5]$	CNT 100
P[6]	Point de dépose d'un carton	$P_2 + PR[4]$	FINE
P[7]	Point intermédiaire pour retourner sur le convoyeur de cartons sans collision avec la pile de cartons	$P_2 + PR[4] + PR[6]$	CNT 100
P[8]	Point d'attente pour un autre carton qui arrive sur le convoyeur de cartons	$P_1 + PR[3]$	FINE

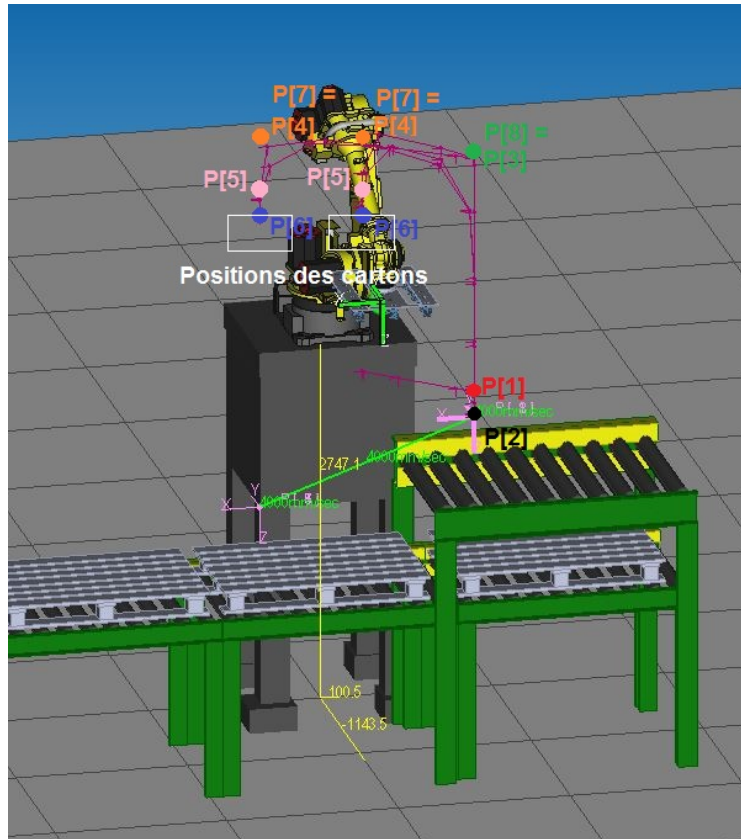


Figure 8 – Trajectoire réalisée par le robot

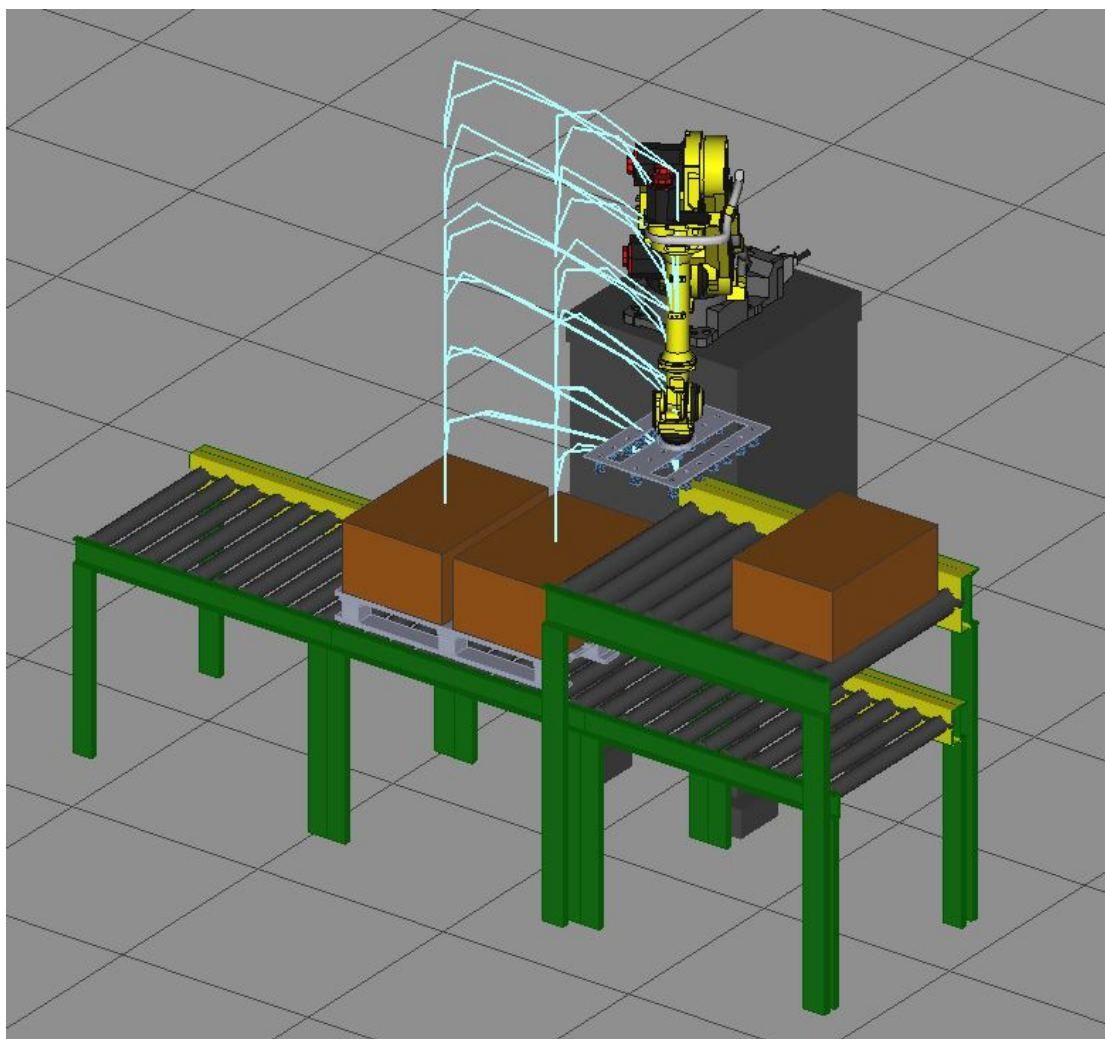


Figure 9 – Trajectoire du robot pour remplir une palette

4.4 Considérations relatives à la sécurité opérationnelle

Comme décrit dans la section 2, les mesures de sécurité représentent une partie essentielle de notre solution. Dans le contexte de la sécurité on proposera l'utilisation des fonction DCS, disponibles pour les robots FANUC. Pour nous aider à concevoir et dimensionner les systèmes de sécurité nous utiliserons la norme ISO 13849-1, qui concerne les parties relatives à la sécurité d'un système de commande (SRP/CS) et classe les risques en termes de Performance Level, comme décrit succinctement dans la figure 10.

D'abord il faut identifier les sources de risque présentes dans la cellule. Les palettes sont introduites dans le convoyeur, aussi bien que enlevés, par des chariots élévateurs. Cette interaction se produit à l'intérieur de l'enveloppe de travail du robot, et donc il y a le risque des blessures graves, en plus cet accès est assez fréquent.

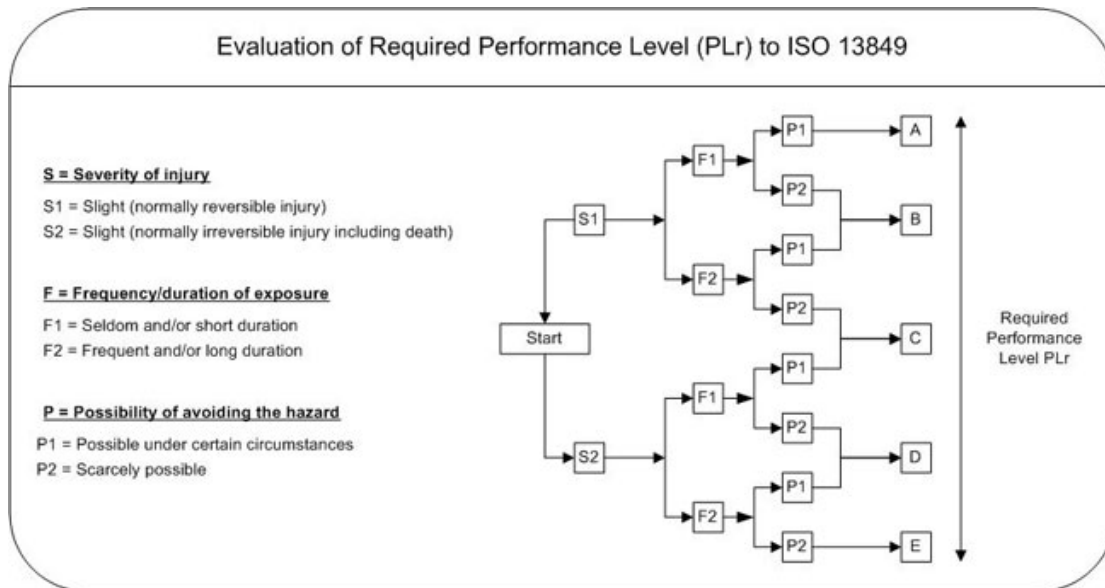


Figure 10 – Évaluation du niveau PLr. Source : [3]

Le risque est particulièrement grave dans l'espace entre les deux convoyeurs. Un autre risque est trouvé dans la période de maintenance pendant laquelle le technicien sera en contact direct avec le robot. Le processus de maintenance doit se produire souvent pour garantir le bon fonctionnement du robot et augmenter sa durée de vie. Le dernier risque associé à l'opération du robot est la chute des objets, particulièrement les cartons, ce qui est un risque constant dans l'opération de la cellule. Les évaluations des risques en termes de Performance Level requis sont présentées dans le tableau 4.

Tableau 4 – Performance Level Requis

Source de Risque	S	F	P	PLr
Accès des palettes	S2	F2	P1	PLd
Maintenance	S2	F1	P1	PLb
Chute d'objets	S1	F2	P1	PLb

Avant tout, pour éviter la chute des objets et empêcher l'entrée de personnel non autorisé il suffit de mettre en place une barrière autour de la cellule. La barrière doit être plus haute que la pile de cartons, dans la solution on a fixé la hauteur comme 4,2 m. Des panneaux «Ne pas franchir» pourront être apposés sur l'ensemble des barrières de manière lisible pour plus de sécurité.

Afin de réduire le risque entre les deux convoyeurs on propose de fixer la barrière au convoyeur supérieur de façon que le robot n'ait pas accès direct aux opérateurs qui déposent les palettes, comme montré dans la figure 12.

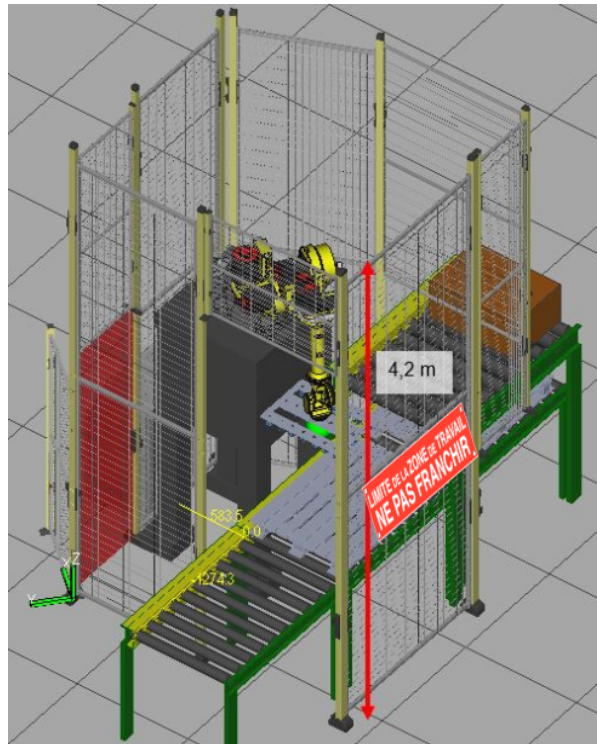


Figure 11 – Cellule robotique avec les barrières

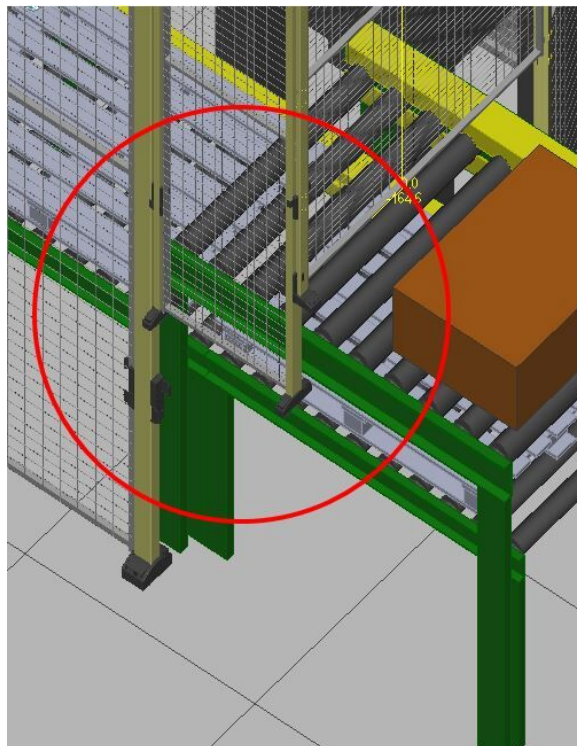


Figure 12 – Détail de la barrière fixé au convoyeur supérieur

Malgré les barrières, les accès et la maintenance ne sont pas encore sécurisés. Pour répondre aux risques évalués comme PLd on utilisera la fonction *Cartesian Position Check* du DCS, et cette fonction garantit que dans le cas où le robot (ou le User Model du outil + carton) touche la limite de la région DCS la puissance du robot sera coupé immédiatement (power-off stop). La région permise du DCS est définie par cinq points comme on peut voir dans la figure 13.

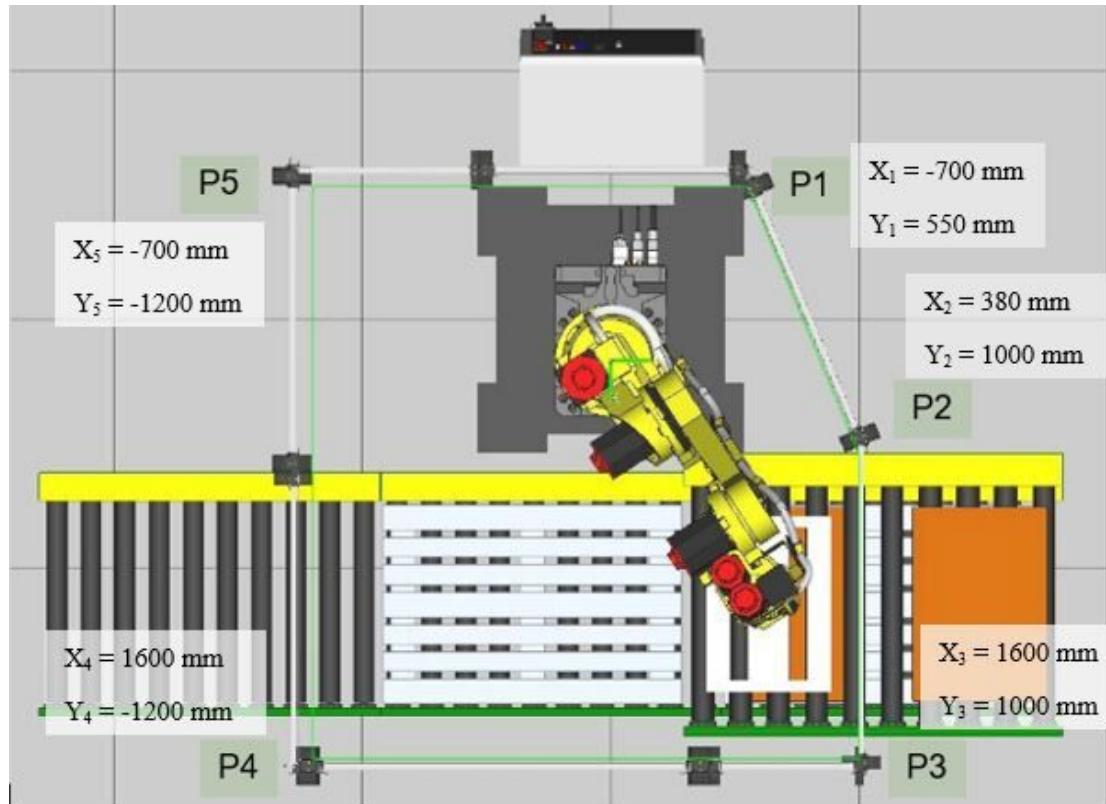


Figure 13 – Points de la région du Cartesian Position Check

La région externe à la barrière est sécurisée, ce qui réduit le risque expérimenté par les opérateurs. Le dernier risque qu'on doit traiter est, finalement, la maintenance, et pour ça on propose d'utiliser des interrupteurs de verrouillage dans la porte d'entrée de la cellule, qui coupent la puissance du robot lorsque la porte est ouverte, au moyen des entrées de sécurité du DCS (Fence input).

4.5 Entrées et sorties du robot

Pour bien synchroniser le mouvement du robot avec les autres éléments mobiles de la cellule, on a besoin d'utiliser les entrées et sorties numériques du robot. Le tableau 5 décrit les signaux utilisés.

Tableau 5 – Entrées et sorties numériques utilisées

Nom	Type	Fonction
DO[3]	Sortie	Activer le convoyeur pour apporter la palette pleine à la zone de déchargement. Est activé lorsque le robot finit de remplir une palette et désactivé lorsque la palette arrive dans la zone de déchargement.
DO[6]	Sortie	Activer le préhenseur à vide.
DI[1]	Entrée	Avertir le robot qu'il y a un carton disponible dans la région de prise.
DI[4]	Entrée	Avertir le robot qu'il y a une palette dans la position de chargement.

Pour que les DI soient générés, on a besoin de deux capteurs : un sur le convoyeur de cartons et un autre sur le convoyeur de palette. Le DO du robot doit contrôler le fonctionnement d'une partie du convoyeur de palettes. Il y a d'autres signaux qui doivent être mesurés/générés pour contrôler la cellule. Ces signaux sont montrés dans le tableau 6, avec les noms qu'on a utilisés dans la simulation.

Tableau 6 – Signaux externes pour contrôler la cellule

Nom	Type	Fonction
DO[2]	Signal de contrôle	Apporter les palettes vides à la position de chargement. Est activé si DI[3] = ON et DI[4] = OFF (il y a une palette vide et il n'y pas une palette en cours de remplissage).
DO[5]	Signal de contrôle	Apporter les cartons qui arrivent sur le convoyeurs de cartons à la positions de prise du robot. Est activé si DI[1] = ON et DI[2] = OFF (il y a un carton sur le convoyeur de cartons mais il n'y a pas un carton dans la position de prise).
DI[2]	Capteur	Avertir qu'il y a un carton qui arrive sur le convoyeur de carton.
DI[5]	Capteur	Avertir que la palette est arrivée dans la zone de déchargement.

On peut voir pour ces signaux que le convoyeur de palettes doit permettre leur activation par zone. Il y en a aussi d'autres entrées/sorties dans notre programme Roboguide que ne sont utiles que pour contrôler la simulation.

4.6 Programmation du robot

Le programme qui contrôle le robot est composé globalement de deux fonctions. La première, qui s'appelle **MAIN**, est la fonction principale du programme. Dans cette fonction, on déclare et initialise toutes les variables du programme, les positions P_1 et P_2 et tous les points de référence (PR). On initialise aussi les sorties du robot (DO) et le payload. Cette fonction démarre trois boucles : une pour répéter les mouvements du robot à chaque palette vide qui arrive ; une pour répéter la prise et dépose des cartons dans toutes les six couches sur la palette ; et une pour répéter les mouvements de prise et dépose des cartons à droite et à gauche d'une même couche.

Pour faire les mouvements, la fonction **Prisedepose_Conv** est appelée. Elle vérifie aussi les conditions des entrées (s'il y a un carton à prendre ou une palette pour déposer les cartons) pour mettre le robot en attente, lorsqu'il est nécessaire. La fonction **Prisedepose_Conv** déclare les points de mouvement du robot (P) et change leur valeur à chaque position sur la palette où le carton doit être déposé. Elle contrôle le mouvement du robot grâce à des points et contrôle aussi la prise et la dépose des cartons.

Dans le fichier Roboguide fourni avec la solution, il y a aussi d'autres fonctions dans le programme, mais ces fonctions ne sont utiles que pour la simulation. Pour obtenir une simulation plus compatible avec la réalité, il faut ajouter les masses et les inerties des objets (carton et préhenseur) au programme de simulation, ce qui est fait par la déclaration du PAYLOAD. De cette façon, le logiciel les prendra en compte pour déterminer les efforts et la vitesse du robot. On aura une mesure plus précise du débit de la cellule. De plus, la programmation du PAYLOAD dans le programme TPE améliore les performances du robot et sa durée de vie. Quelques autres détails ont été nécessaires pour générer et synchroniser le mouvement des objets dans la simulation, de manière à ce qu'elle semble plus réaliste. De cette façon, on a pu mesurer le débit de production pour le comparer avec l'antérieur. Les résultats sont détaillés dans la section 5.2.

5 Évaluation : Résultats et Performance

5.1 Surface de l'îlot

Pour calculer la nouvelle surface occupée par l'îlot de sécurité, on a pris en compte premièrement la région démarquée par l'enceinte de sécurité, comme il est montré dans la figure 14.

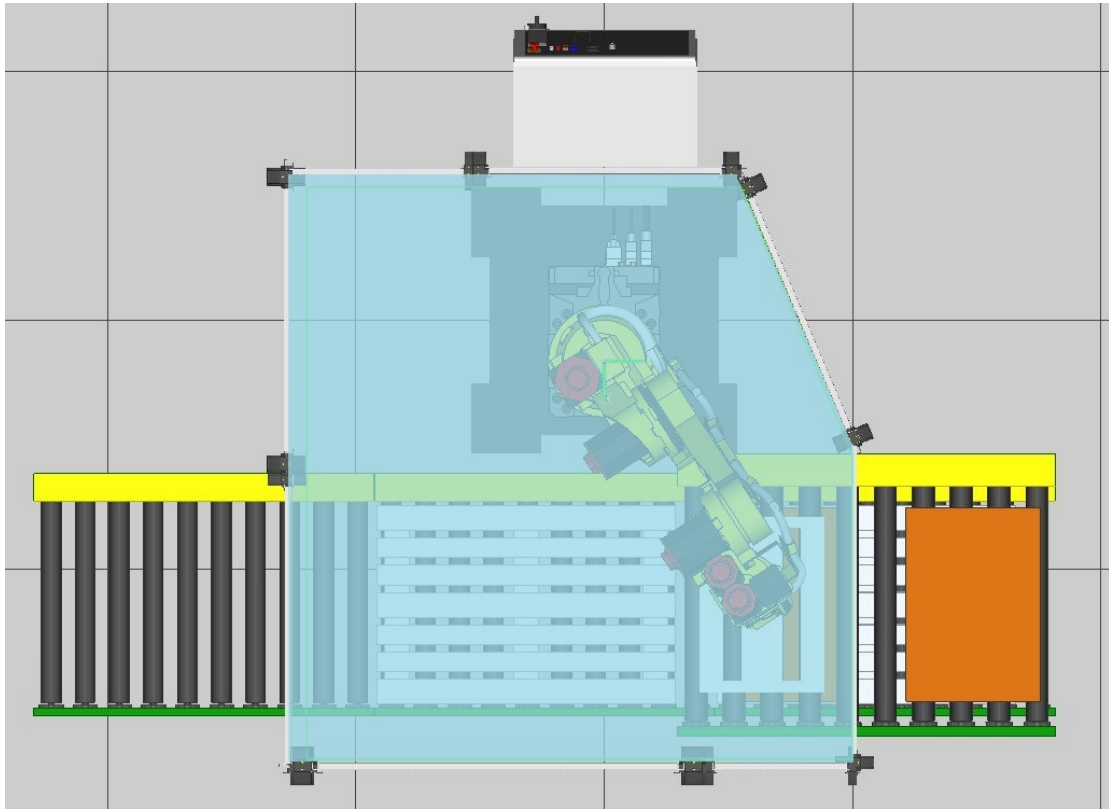


Figure 14 – Zone de travail de la cellule robotique

De cette façon, la surface de la zone d'opération du robot qu'on a obtenu est de 5.33 m^2 , ce qui correspond à une réduction 58.86% de la surface. On peut voir qu'on a bien répondu à l'objectif principal du projet, qui était de réduire au moins par deux la surface de l'îlot. C'est donc déjà une solution fonctionnelle qui est conforme aux objectifs imposés. De plus, même lorsque l'on prend en compte la surface occupée par tous les éléments ajoutés à la simulation, comme il est montré dans la figure 15, on a une valeur de 7.466 m^2 de surface. Cela montre une réduction de la surface de la cellule originale, laquelle ne prendrait en compte que la palettisation des cartons. En plus, notre solution permettra une intégration de cette cellule avec les autres opérations de l'usine, ou avec autres cellules de palettisation, si elles existent, puisque le flux de cartons est maintenant unidirectionnel.

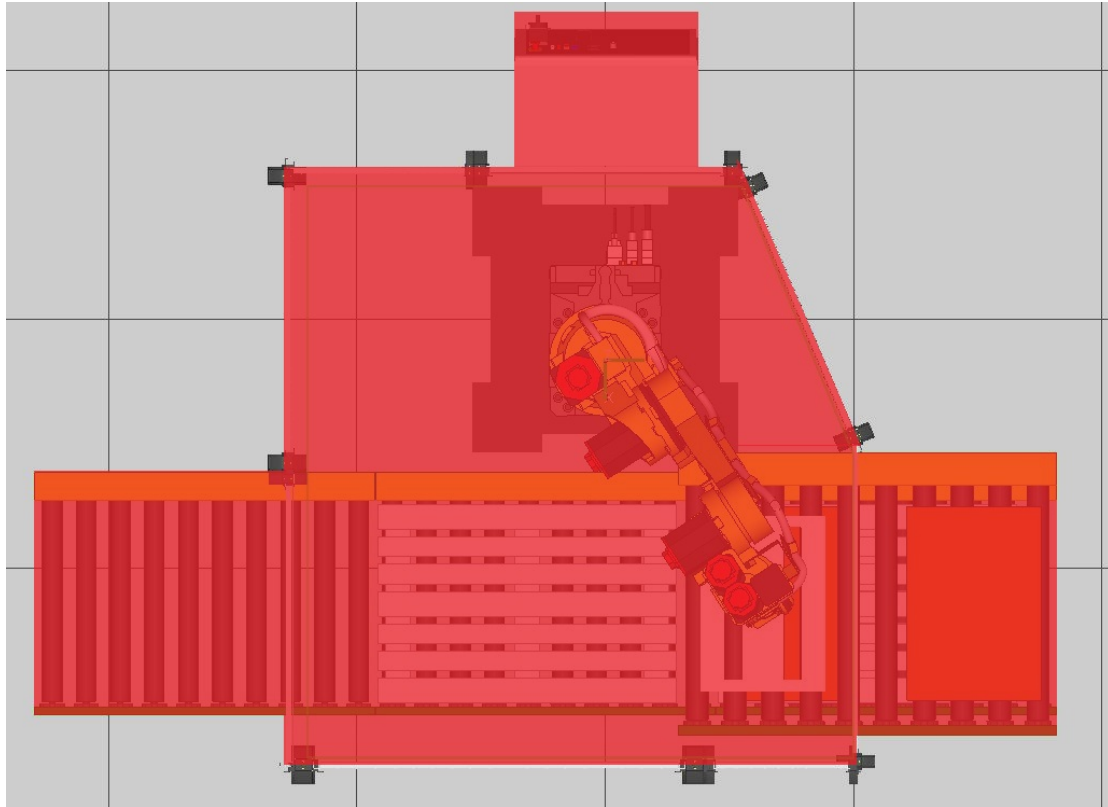


Figure 15 – Surface occupée par tous les éléments ajoutés dans la simulation

5.2 Cadence de production

Par rapport à la cadence de production, les résultats obtenus sont très satisfaisants. Premièrement, pour avoir une évaluation plus précise de la performance, on a pris en compte la cadence qui a été fournie dans les contraintes du projet (411 cartons par heure et temps de prise/dépose des cartons par le préhenseur) et on a programmé la création des cartons pour être d'accord avec cette valeur. On a vu que, dans tous les cas, le robot attend l'arrivée d'autres cartons. Le temps moyen d'attente par les cartons est de (4.08 ± 0.14) s (temps moyen en variations constatées). Le temps d'exécution de la tâche a été évalué avec l'outil Profiler de Roboguide, trois fois pour chaque carton, en prenant soin d'éliminer les temps de déblocage des freins. Alors, le robot n'est pas seulement capable de maintenir la cadence de production, mais il permet aussi de l'augmenter. On peut augmenter la vitesse de production à 411 cartons tous les (32 ± 1) minutes, ce qui correspond à environ (770 ± 24) cartons par heure. On peut augmenter de (87.3 ± 5.8) % la vitesse de production. Si on considère le pire cas, quand le robot prend plus de temps pour réaliser son mouvement, il reste en attente pour le prochain carton pendant 3.76 s. Cela permet encore d'augmenter la cadence de production en 75% (720 cartons par heure).

5.3 Sécurité

Dans la discussion autour de la sécurité on a proposé trois mesures pour faire face aux risques associés à l'opération de la cellule, et l'accent a été mis sur la conformité avec la norme internationale ISO 13849-1, donc il faut valider la cellule avec cette norme. Le processus de validation de la norme, comme décrit dans la mise à jour de 2006, est basée sur le principe que le PL obtenu par une SRP/CS doit être plus grand ou égal au PL requis par la source de risque en question. Les *Performance Levels* de chaque fonction, selon FANUC, sont décrits ci-dessous.

Tableau 7 – Performance Level des fonctions de sécurité vs PL requis

Source de Risque	PLr	Solution Proposée	PL
Accès des palettes	PLd	Cartesian Position Check	PLd
Maintenance	PLc	Fence input	PLe

Ce tableau montre, donc, que du point de vue de la norme ISO 13849-1 notre cellule est validée.

5.4 Prévision Budgétaire

Pour faire la prévision budgétaire, on va analyser les principaux éléments présents dans la cellule. Au-dessous, on a un tableau avec l'estimation de prix de ces éléments :

Tableau 8 – Estimation de prix

Éléments	Prix
Robot R-1000iA	45000 €
Fonction de sécurité DCS	2000 €
Préhenseur à ventouses*	700 €
Total	47700 €

* - Tarif estimée à partir de l'informations sur l'internet

Les tarifs du Robot (on considère que le Contrôleur R-30iB est inclus dans le prix total du robot de la gamme R-1000iB) et de la fonction de sécurité DCS ont été pris dans le catalogue de prix de la Fanuc, qui présente les tarifs non-contractuels pour ce projet. Le prix de l'outil utilisé dans le robot, le préhenseur à ventouse, a été estimé sur la base de prix de l'ensemble robot, machine et outil trouvés sur l'Internet. Les autres éléments de la cellule, comme les convoyeurs, la barrière de l'enceinte de sécurité et les coûts d'installation et d'intégration n'ont pas été considérées dans l'étude de budgétaire. On ne peut pas estimer avec précision le prix de ces éléments parce qu'il dépende beaucoup du modèle et du fabricant de l'élément. Le modèle, par exemple, des convoyeurs, peut dépendre des autres convoyeurs de l'usine (les convoyeurs qui acheminent les cartons à la cellule, ou les convoyeurs éventuels qui apportent les palettes vides) et et d'autres contraintes d'intégration. Cependant, on sait qu'il est nécessaire d'acheter un convoyeur pour le cartons et un autre pour les palettes, qui peut être activé par zone, et aussi les capteurs pour les contrôler. Dans le cas de l'enceinte de sécurité, on a besoin d'un modèle « fait sur mesure », et donc de demander un budget directement au fabricant pour cela.

6 Conclusion

L'objectif de ce projet était de concevoir et dimensionner une cellule robotisée chargé de palettiser les produits finis d'une usine, avec les traits suivants :

- Avoir une surface totale maximum de $6,48 \text{ m}^2$;
- Être capable de palettiser et rendre disponibles dans le local approprié 411 cartons/heure ;
- Être en accord avec la norme de sécurité ISO 13849-1

À la fin, nous avons proposé une cellule fonctionnelle avec une surface de $5,33 \text{ m}^2$, une capacité de palettiser jusqu'à 720 cartons/heure tout en respectant les exigences de sécurité de la norme ISO 13849-1. Cette solution satisfait les objectifs initiaux et va même au-delà, en offrant la possibilité de réduire les coûts de production à long terme et en manifestant une vraie responsabilité sociale et environnementale.

Références

- [1] FANUC ACADEMY. *La robotique industrielle - GUIDE DE L'UTILISATEUR*. 2016. ISBN : 978-2-01-399824-6.
- [2] Project Management Institute. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge, Third Edition (PMBOK Guides)*. Project Management Institute, 2004. ISBN : 193069945X.
- [3] Andrew Mathieson. Choosing a chain hoist control system. <http://www.jands.com.au/support/product-support/staging-technical-materials/choosing-a-chain-hoist-control-system-part-4>, 2016 (Consulté le 19/01/2017).