

CONCEPTION D'UNE CELLULE AUTOMATISÉE DE REMPLISSAGE DE SERINGUES À USAGE ORAL

par

Jérémy BROUILLARD

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAITRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 3 OCTOBRE 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



©Tous droits réservés, Jérémy Brouillard, 2018



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Ilian Bonev, directeur de mémoire
Génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Marc Paquet, président du jury
Génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Vincent Duchaine, membre du jury
Génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 4 SEPTEMBRE 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Les universités sont un terreau fertile pour le développement de projets à la fine pointe de la technologie. Des projets qui pourraient facilement révolutionner leur domaine d'étude s'ils étaient adéquatement transférés du milieu de la recherche vers le milieu industriel. Ce transfert est un défi auquel les gestionnaires et chercheurs des différentes universités font face quotidiennement.

Avant de me lancer dans la partie technique du projet de remplissage de seringues à usage oral, j'ai pris le temps de bien évaluer la rentabilité réelle d'un tel projet. J'ai visité cinq hôpitaux pédiatriques, répartis d'une extrémité à l'autre de Canada. Le but était simple, comprendre en détail la problématique vécue par les pharmacies d'hôpitaux afin de faciliter le futur transfert de mes travaux d'un milieu académique vers le milieu hospitalier.

J'ai poussé l'expérience un cran plus loin en fondant ma propre entreprise, ROSP Automation. L'objectif étant de prendre en charge la recherche de financement, le développement et le lancement du produit commercialisable sur le marché. Le fait de démarrer une entreprise est en soit un défi considérable, le fait d'en démarrer une en parallèle à mes études de deuxième cycle en est un autre. Pour m'aider dans cette tâche, j'ai participé au programme d'accélération d'entreprise du Centech de Montréal, un incubateur d'entreprise technologique associé à l'ÉTS. Ce programme m'a permis d'acquérir de précieuses connaissances en entrepreneuriat technologique et de transformer le projet scolaire en un projet commercialement réalisable.

Le présent document traite essentiellement du développement technique de la solution proposée au problème de remplissage de seringues, mais dans les faits, les trois dernières années ont été pour moi formatrice dans une multitude de domaines, certains techniques et d'autres non. Sur ce, bonne lecture.

REMERCIEMENTS

Je tiens sincèrement à remercier plusieurs personnes ayant participé de près ou de loin à ce magnifique projet.

Au personnel de l'ÉTS, qui m'a donné l'opportunité de me développer en tant qu'ingénieur et qui m'a donné l'opportunité de transmettre mes connaissances à d'autres via l'enseignement. À Ilian Bonev d'avoir chapeauté ce projet depuis des années, de m'avoir donné les outils et les conseils nécessaires à la réalisation de ce projet et, surtout, de m'avoir permis de faire mes premiers pas dans le domaine du développement technologique. À François Vadnais pour son apport important à la qualité de l'enseignement au Département de génie de la production automatisée (GPA) de l'ÉTS. À Julie St-Laurent, Stéphane Hébert et Anthony Remington, pour leur aide à la réalisation de la démonstration pour la journée portes ouvertes de l'ÉTS.

À tous les gens qui ont été impliqués de près ou de loin à ROSP Automation. Mon premier partenaire, Léo, avec qui j'ai fait les premières visites d'hôpitaux. Félix, avec qui nous avons fait les premiers concepts mécaniques. Alex, avec qui j'ai rocker le programme d'accélération d'entreprise du Centech. Jérémy, avec qui j'ai voyagé jusqu'à Vancouver pour faire avancer ce projet. Sans oublier Étienne, Jean-Philippe, Julien, Guillaume, Marco, Marc-André, et j'en passe. À Pierre Lavallée de ABB, pour son support et sa confiance envers le projet.

Au personnel du CHU Sainte-Justine, tout particulièrement à Jean-Marc Forest, un pharmacien passionné par son métier et porteur du projet d'automatisation des seringues orales depuis le début des années 2000. Il est la personne qui m'a transmis la passion nécessaire pour réaliser ce projet. Je lui souhaite de tout mon cœur que le travail que j'ai effectué au cours des trois dernières années l'aide à atteindre son objectif et facilite son quotidien et celui de tous ses collègues de la pharmacie centrale du CHU Sainte-Justine.

À toutes les personnes impliquées dans le Centech de l'ÉTS. Vous m'avez appris la différence entre être un inventeur et un entrepreneur. Merci particulier à Luc pour la quantité incroyable de temps qu'il passe à aider la prochaine génération d'entrepreneur du Québec.

VIII

« Au côté de chaque grand homme, il y a une grande femme. » À ma magnifique femme, Caroline. D'une patience incroyable, elle qui me supporte/m'endure dans mes projets les plus fous. Elle qui reste forte lorsque j'en ai le plus besoin et qui me permet d'être une personne meilleure chaque jour

Mes parents, qui m'ont permis d'avoir une éducation à la hauteur de mon potentiel et qui m'ont appris à travailler et à me dépasser. Ma petite sœur, Noémy, elle-même professionnelle du milieu de la santé, qui fait don d'elle-même pour le bien des autres. Elle est une inspiration importante pour ce projet. À mes amis qui m'ont entendu parler de ce projet beaucoup plus souvent que nécessaire dans les trois dernières années.

En terminant, je voudrais remercier Charles Tisseyre et toute l'équipe de Découverte. Vous avez été mon premier contact avec la science. Vous avez ouvert mon cerveau chaque dimanche et avez grandement influencé mon choix de carrière. Dans un même ordre d'idée, j'aimerais remercier toutes les personnes qui prennent de leur temps pour transmettre leur connaissance via internet, que ce soit sur un site web, un blog, Wikipédia ou sur YouTube. La connaissance est ce qui rendra le monde meilleur, transmettez-la sans modération.

CONCEPTION D'UNE CELLULE AUTOMATISÉE DE REMPLISSAGE DE SERINGUES ORALES

Jérémy BROUILLARD

RÉSUMÉ

L'automatisation prend de plus en plus de place dans le milieu hospitalier. Elle permet de réaliser des économies de temps et d'argent. En ce sens, le CHU Sainte-Justine, un hôpital pour enfants situé à Montréal, demande le développement d'une cellule automatisée permettant de reconditionner les médicaments liquides oraux commercialement disponibles en vrac. Le reconditionnement, présentement effectué manuellement, consiste à remplir des seringues à usage oral. Considérant qu'aucun appareil automatisé pour ce faire n'est présentement disponible sur le marché, le présent projet consiste à la conception des systèmes de manipulation, du système de remplissage, du système de gestion des matières premières et du système d'inspection des produits finis. Le système de manipulation est constitué de deux robots sériels et de deux préhenseurs électriques parallèles. Un adaptateur universel novateur est développé afin d'accommoder les nombreuses bouteilles aux formes et volumes variés. Le système de remplissage est constitué de trois actionneurs électriques deux linéaires et un rotatif, permettant de maintenir en place les bouteilles et les seringues et d'effectuer le remplissage sans l'intervention du robot. Le système de gestion des matières premières entrepose les six différents volumes de seringues dans des chargeurs et la centaine de bouteilles de médicaments sur un support métallique en mettant à profit l'adaptateur universel. Pour terminer, le système d'inspection utilise un système de reconnaissance de forme et permet de reconnaître la présence de bulle d'air faussant le volume de médicament à l'intérieur de la seringue. En conclusion, le système de remplissage de seringues à usage oral est une option viable et rentable pour un hôpital pédiatrique. La prochaine étape consiste à débloquer les fonds nécessaires à la construction d'un prototype fonctionnel.

Mots clés : Automatisation, robot, hôpital, seringues à usage oral

DESIGN OF AN AUTOMATED ORAL SYRINGE FILLING SYSTEM

Jérémy BROUILLARD

ABSTRACT

Automation takes more and more space in hospitals. It helps realize savings in terms of money and time. Considering that, the CHU Sainte-Justine, a pediatric hospital located in Montreal, asked for the development of an automated system for reconditioning of bulk liquid oral medications. The reconditioning, done manually at the moment, consists of filling oral syringes, one by one. A hospital like CHU Sainte-Justine has to fill more than 500 different syringes each day, which leads to safety risks for the patients (associated with errors in the preparation) and health problems for the pharmacy technicians. Considering that there is no automated system on the market to manage that task, this project consists of designing the handling systems, the filling system, the consumable managing system and the inspection system. The handling system is built of two serial robot arms and two electric parallel grippers. An innovative universal adaptor is developed to accommodate the wide variety of bottle shapes and sizes. The filling system is built using three electrical actuators, two linear and one rotary, holding the bottles and the syringes while filling the syringes without the robot intervention. The consumable managing system use metallic loader to store the six different volumes of syringes and a metallic rack and the universal bottle adaptor to store the bottles. At last, the inspection system uses a pattern recognition algorithm to find air bubbles in the syringes. Those bubbles could alter the volume of medication in the syringe. To conclude, the oral syringes filling system is a viable and cost effective for children's hospitals. The next step of the project consists of finding the money needed to build a working prototype.

Keywords: Automation, robot, hospital, oral syringe

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Méthodologie de gestion des médicaments dans le domaine hospitalier	5
1.2 Reconditionnement et distribution des médicaments	8
1.3 Automatisation de pharmacies dans le domaine hospitalier	16
1.3.1 Pénétration des outils automatisés dans le marché	30
1.3.2 Impact et résultat des outils automatisés.....	31
1.4 CHU Sainte-Justine.....	32
1.4.1 Besoins particuliers.....	32
1.4.2 Stratégie de reconditionnement actuelle	33
1.4.3 Impact de la méthode manuelle	37
1.4.4 Requis du projet	37
1.4.5 Analyse des coûts.....	39
1.4.6 Autres hôpitaux pédiatriques canadiens.....	41
1.5 Anciens projets.....	42
CHAPITRE 2 SYSTÈME DE MANIPULATION.....	45
2.1 Cadre théorique.....	45
2.1.1 Structure de la cellule.....	45
2.1.2 Robot.....	45
2.1.3 Préhenseur.....	49
2.2 Méthodologie	54
2.2.1 La structure de la cellule	54
2.2.2 Les bras robotisés.....	54
2.2.3 Le système de préhension	54
2.3 Résultats et analyse.....	59
2.3.1 Structure de la cellule.....	59
2.3.2 Robot.....	62
2.3.3 Préhenseur.....	66
Les seringues orales	66
Stratégie de préhension	66
Géométrie des seringues	66
Espace de travail	68
Emplacement de préhension	70
Choix méthode de préhension et type de préhenseur.....	70
Conception des accessoires de préhension	72
Les bouteilles de médicaments liquides.....	75
Stratégie de préhension	75
Géométrie des bouteilles.....	75
Espace de travail	77

	Emplacement de préhension	80
	Choix méthode de préhension et type de préhenseur.....	83
	Conception des accessoires de préhension	83
CHAPITRE 3	SYSTÈME DE REMPLISSAGE	89
3.1	Cadre théorique.....	89
3.2	Résultats et analyse.....	91
CHAPITRE 4	SYSTÈME DE STOCKAGE DE LA MATIÈRE PREMIÈRE.....	93
4.1	Cadre théorique.....	93
4.2	Résultats et analyse.....	94
CHAPITRE 5	SYSTÈME D'INSPECTION	99
5.1	Cadre théorique.....	99
5.1.1	Traitement d'image.....	100
5.1.2	Projection de zone.....	101
5.1.3	ACP.....	102
5.1.4	Bayes Quadratique	104
5.1.5	K-nn	105
5.1.6	SVM.....	105
5.2	Méthodologie.....	106
5.2.1	Images et traitement d'image.....	106
5.2.2	Projection de zone.....	108
5.2.3	ACP.....	108
5.2.4	Bayes.....	109
5.2.5	K-nn	109
5.2.6	SVM.....	110
5.2.7	Comparaison des performances	111
5.3	Résultats.....	111
5.3.1	Création de la base de données.....	111
5.3.2	Implémentation et comparaison des classificateurs.....	114
5.4	Analyse	119
CHAPITRE 6	DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS	121
6.1	Système de manipulation	121
6.2	Système de remplissage	123
6.3	Système de gestion des matières premières	124
6.4	Système d'inspection	125
6.5	Recommandations.....	126
CONCLUSION	129
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		133

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Salaire moyen des techniciens et des infirmières du CHU Sainte-Justine.39
Tableau 1.2	Coût de production des doses de médicaments liquides oraux.....41
Tableau 2.1	Différentes méthodes de préhension et ses standards.....51
Tableau 2.2	Comparaison des caractéristiques des robots sériels en évaluation65
Tableau 2.3	Présentation des différents volumes de seringue, ainsi que les dimensions reliées.67
Tableau 2.4	Spécifications techniques du préhenseur parallèle WSG-2572
Tableau 2.5	Dimensions importantes de l'échantillon des bouteilles.....76
Tableau 5.1	Paramètre Zone Projection.....108
Tableau 5.2	Taux de recouvrement des paramètres tests.....113
Tableau 5.3	Résultats Quadratique Bayes115
Tableau 5.4	Pourcentages erreur en fonction du paramètre k.....116
Tableau 5.5	Résultats k-nn.....117
Tableau 5.6	Pourcentages erreur en fonction des paramètres g et C118
Tableau 5.7	Résultats SVM118
Tableau 5.8	Résultats combinés.....118

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Remplissage de seringue orale.....2
Figure 0.2	Modélisation du système ROSP 2R-150.....3
Figure 1.1	Unit dose sac7
Figure 1.2	Processus de gestion des médicaments au CHU Sainte-Justine9
Figure 1.3	Processus de gestion des médicaments du CHU Sainte-Justine9
Figure 1.4	Bouteille de médicaments oraux solides en vrac10
Figure 1.5	Exemple de cartes alvéolées11
Figure 1.6	Bande de plastique pour la préparation des unit doses12
Figure 1.7	Bouteille de médicament oral liquide12
Figure 1.8	Nomenclature des différentes composantes d’une seringue orale13
Figure 1.9	Gobelet de plastique.....14
Figure 1.10	Gobelet à bille14
Figure 1.11	Bouteille de médicament injectable15
Figure 1.12	Seringues intraveineuses et sac de soluté.....15
Figure 1.13	Le BlistAssist de la compagnie McKesson.....16
Figure 1.14	Le VBM 200F de la compagnie McKesson.....17
Figure 1.15	Le SynMed de la compagnie Synergie Médicale17
Figure 1.16	L’OnDemand Accuflex de la compagnie Omnicell.....18
Figure 1.17	L’Auto-Print de la compagnie Medical Packaging inc.....18
Figure 1.18	Le FastPak Elite de la compagnie ARxIUM.....19
Figure 1.19	L’ATP de la compagnie Swisslog.....19
Figure 1.20	Le PACMED 500 de la compagnie McKesson20

XVIII

Figure 1.21	Le ROBOT-Rx de la compagnie Omnicell.....	20
Figure 1.22	L'Auto-Draw® de la compagnie Medical Packaging inc.....	21
Figure 1.23	La REAPEATER Pump de la compagnie Baxa	21
Figure 1.24	Les NE500, NE1000 et NE1600 de la compagnie ProSense.....	22
Figure 1.25	Système en développement par la compagnie Filamatic	23
Figure 1.26	Le FD-PHARMA de la compagnie Medical Packaging inc.....	23
Figure 1.27	Le Fluidose Series 5 de la compagnie Medical Packaging inc.....	24
Figure 1.28	Le Speedy Wet Cadet® de la compagnie Euclid.....	24
Figure 1.29	Le RMD818	25
Figure 1.30	La REAPEATER Pump de la compagnie Baxa	25
Figure 1.31	Le Rapid-Fill de la compagnie Baxa	26
Figure 1.32	Le RIVA de la compagnie ARxIUM.....	27
Figure 1.33	L'i.v.STATION Non-Hazardous Compounding Robot de la compagnie Omnicell.....	27
Figure 1.34	L'i.v.STATION ONCO Hazardous Compounding Robot de la compagnie Omnicell.....	28
Figure 1.35	L'INTELLIFILL I.V. de la compagnie Baxter.....	28
Figure 1.36	L'APOTECACHemo de la compagnie Loccioni	29
Figure 1.37	L'Extrafill-05 du groupe Marchesini	29
Figure 1.38	Le FPS5 du groupe Marchesini.....	30
Figure 1.39	L'EQUASHIELD® Pro de la compagnie EQUASHIELD	30
Figure 1.40	Processus actuel de préparation des seringues de médicaments oraux liquides du CHU Sainte-Justine	35
Figure 1.41	Processus proposer de préparation de médicaments oraux liquides du CHU Sainte-Justine	36
Figure 1.42	Modélisation d'un système de remplissage de seringues orales.....	43

Figure 1.43	Preuve de concept d'un système de remplissage de seringues orales Karim Kalafate	44
Figure 2.1	Robot de type sériel	46
Figure 2.2	Robot de type parallèle	47
Figure 2.3	Robot de type cartésien.....	47
Figure 2.4	Différence entre la précision et la répétabilité	48
Figure 2.5	Présentation d'un préhenseur angulaire et d'un préhenseur parallèle	52
Figure 2.6	Positionnement d'un objet cylindrique manipulé par un préhenseur parallèle et un préhenseur angulaire	53
Figure 2.7	Représentation du nombre de points de contact des trois formes géométriques les plus communes.....	55
Figure 2.8	Démonstration du nombre de points de contact en fonction du nombre et de la forme des doigts utilisés.....	56
Figure 2.9	Exemple de formes de doigts et degrés de liberté.....	57
Figure 2.10	Type d'approche pour la prise d'un objet cylindrique.....	57
Figure 2.11	Modélisation d'un préhenseur et d'un bras de robot	58
Figure 2.12	Représentation simplifiée de l'espace de travail nécessaire au stockage des bouteilles.	60
Figure 2.13	Plan d'aménagement initial.....	61
Figure 2.14	Structure d'aluminium fournie par la compagnie Vention	61
Figure 2.15	Espace de travail sphérique nécessaire au stockage des bouteilles.....	62
Figure 2.16	Le robot sériel IRB1200-5/0.9 de ABB	63
Figure 2.17	Le robot sériel KR 6 R900 sixx HM-SC de KUKA	63
Figure 2.18	Le robot sériel LR Mate 200iD/7LC de FANUC	64
Figure 2.19	Le robot sériel GP7 de YASKAWA.....	64
Figure 2.20	Présentation d'une seringue orale et de ses composantes.....	67
Figure 2.21	Modélisation de la récupération d'une seringue dans le réservoir.....	68

Figure 2.22	Modélisation de l'insertion de la seringue dans la bouteille.....	69
Figure 2.23	Modélisation de la phase de bouchonnage.....	69
Figure 2.24	Représentation des différentes zones à proscrire pour la prise	70
Figure 2.25	Présentation du préhenseur parallèle WSG-25	71
Figure 2.26	Modélisation de la position d'une seringue pour 2 volumes différents	72
Figure 2.27	Modélisation du concept de doigts proposé pour manipuler les seringues orales.....	73
Figure 2.28	Modélisation du processus d'insertion.....	74
Figure 2.29	Modélisation de la bride de montage pour fixer le préhenseur Weiss WSG- 25.....	74
Figure 2.30	Montage complet du préhenseur et des doigts de robot.....	75
Figure 2.31	Entrepôt partiel des médicaments du CHU Ste-Justine	76
Figure 2.32	Modélisation du support à bouteilles	77
Figure 2.33	Modélisation du processus d'insertion d'une bouteille dans le support à bouteilles.....	78
Figure 2.34	Modélisation du positionnement de la bouteille dans la zone de remplissage	78
Figure 2.35	Modélisation du positionnement de la bouteille sur le mélangeur	79
Figure 2.36	Modélisation du positionnement de la zone d'échange de bouteilles entre le préhenseur et le technicien.....	79
Figure 2.37	Modélisation des différentes zones à éviter en fonction des informations recueillies	80
Figure 2.38	Modélisation de la présentation de l'adaptateur	81
Figure 2.39	Vue de dessus et vue de coupe de l'adaptateur universelle	81
Figure 2.40	Vue explosée de l'adaptateur universel	82
Figure 2.41	Modélisation du déplacement des mâchoires	83
Figure 2.42	Modélisation de la composante de prise et modélisation de l'action de préhension par les doigts du préhenseur à seringues	84

Figure 2.43	Modélisation du concept d'un préhenseur utilisant l'adhésion magnétique.....	85
Figure 2.44	Modélisation d'une bride de montage à deux préhenseurs.....	86
Figure 3.1	Système de remplissage des seringues.....	90
Figure 3.2	Système de remplissage des seringues, assemblage de la seringue et de la bouteille.....	90
Figure 3.3	Positionnement et maintien de l'assemblage bouteille-seringue pour le remplissage	91
Figure 3.4	Processus de remplissage des seringues orales.....	92
Figure 4.1	Matrice de positionnement des seringues	93
Figure 4.2	Chargeur pour les seringues de 3 ml.....	95
Figure 4.3	Support à bouteilles de médicaments liquides	96
Figure 4.4	Insertion de l'adaptateur universel dans le support de bouteille.....	96
Figure 4.5	Utilisation de la zone d'échange entre l'opérateur et le robot	97
Figure 5.1	Deux classes de seringue, avec bulle à gauche et sans bulles à droite.....	100
Figure 5.2	Représentation visuelle de la projection de zone.....	102
Figure 5.3	ACP - Positionnement du référentiel	103
Figure 5.4	ACP - Projection sur les caractéristiques à variance élevée	104
Figure 5.5	Seringue dans le support lors de la prise de photo.....	107
Figure 5.6	Prise de photo pour base de données, classe avec bulle à gauche et classe sans bulles à droite.....	111
Figure 5.7	Traitements d'image sur la base de données.....	112
Figure 5.8	Variabilité exprimée en fonction du nombre de composantes.....	114
Figure 5.9	Pourcentages erreur en fonction du paramètre k.....	115
Figure 5.10	Pourcentages erreur en fonction des paramètres g et C	117

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASHP	<i>American Society of Hospital Pharmacists</i>
CHU	Centre Hospitalier Universitaire
CHUL	Centre Hospitalier de l'Universitaire Laval
DDL	Degré de liberté
ÉTS	École de technologie supérieure de Montréal
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
TCP	<i>Tool Center Point</i>

INTRODUCTION

De nos jours, le système hospitalier est en constante évolution partout dans le monde. Que ce soit au niveau des traitements médicaux qu'au niveau des méthodes de travail, de nombreuses améliorations sont proposées et mises en application chaque année afin de tenter d'améliorer l'efficacité des soins offerts.

Cependant, ce désir constant d'amélioration au niveau de l'efficacité a un effet pervers sur le système québécois. Les coûts rattachés aux soins hospitaliers sont en augmentation constante, et ce, dans un contexte financier jugé préoccupant par le gouvernement en place. De ce fait, des solutions sont recherchées afin de créer des économies sans pour autant mettre en péril le bien-être des utilisateurs du réseau. Dans plusieurs secteurs, l'automatisation de certaines tâches est une solution envisageable. Il existe déjà des cellules automatisées qui réalisent le reconditionnement de médicaments en comprimés solides ou encore des cellules qui réalisent les préparations de médicament nécessaires aux traitements de chimiothérapie. Ce type de cellules permet à des établissements à travers le monde de réaliser des économies de temps et d'argent. Elles augmentent aussi la sécurité du personnel lorsqu'ils sont en présence de produits dangereux, comme c'est le cas des médicaments utilisés pour lutter contre le cancer.

C'est dans cette optique que la pharmacie centrale du Centre Hospitalier Universitaire Sainte-Justine (CHU Ste-Justine) a contacté l'École de technologie supérieure pour lui proposer un projet, dont l'objectif était d'automatiser le processus manuel de remplissage de seringues de médicaments liquides oraux. Plusieurs éléments sont à considérer afin de rendre le processus plus efficace, efficient et sécuritaire. Ce besoin est particulièrement marqué dans les hôpitaux pour enfants. C'est dans le but de réduire les risques d'étouffement et d'améliorer la précision des doses administrées que les hôpitaux pédiatriques remplacent certains médicaments sous forme solide par des médicaments sous forme liquide. Dans les deux cas, les médicaments sont prescrits par le médecin traitant et, généralement, préparés à la pharmacie centrale de l'hôpital. La centralisation des activités liées à la gestion des médicaments permet aux centres de santé d'assurer un meilleur suivi sur la qualité du produit et de réaliser des économies d'échelle. L'automatisation de certaines tâches fait partie des économies d'échelle possibles.

Comme mentionné précédemment, certains systèmes existent déjà. Le PacMed 500 de McKesson, pour des médicaments solides, en est un bon exemple. La cellule prépare des doses unitaires prêtes à être administrées. Malheureusement, il n'existe pas de solution complètement automatisée prenant en charge les médicaments liquides oraux sur le marché.

Leur préparation est donc faite manuellement par des techniciens et des infirmières. La préparation d'une dose consiste à mesurer une quantité de médicament liquide prescrit à l'aide d'une seringue orale. Une fois remplie, la seringue est bouchonnée, étiquetée, ensachée et inspectée. La seringue (ou le groupe de seringues) est ensuite acheminée au patient pour l'administration. La figure 0.1 montre le remplissage d'une seringue orale.



Figure 0.1 Remplissage de seringue orale
Tirée de Healthcare Packaging (2018)

Le présent projet consiste à la conception d'une cellule robotisée permettant la préparation automatisée des doses de médicaments liquides oraux. Pour se faire, le système doit être en mesure de gérer jusqu'à 120 bouteilles de médicament différents et jusqu'à six volumes de seringue distincts. Il doit être en mesure de fonctionner de façon autonome. La seule exception est le remplissage des matières premières (médicaments, seringues, bouchons, étiquettes, sacs) et de la sortie des produits finis. La figure 0.2 démontre une modélisation du système qui a été proposé par l'entreprise que j'ai fondée, en parallèle à mes études. Celui-ci est nommé le ROSP 2R-150.

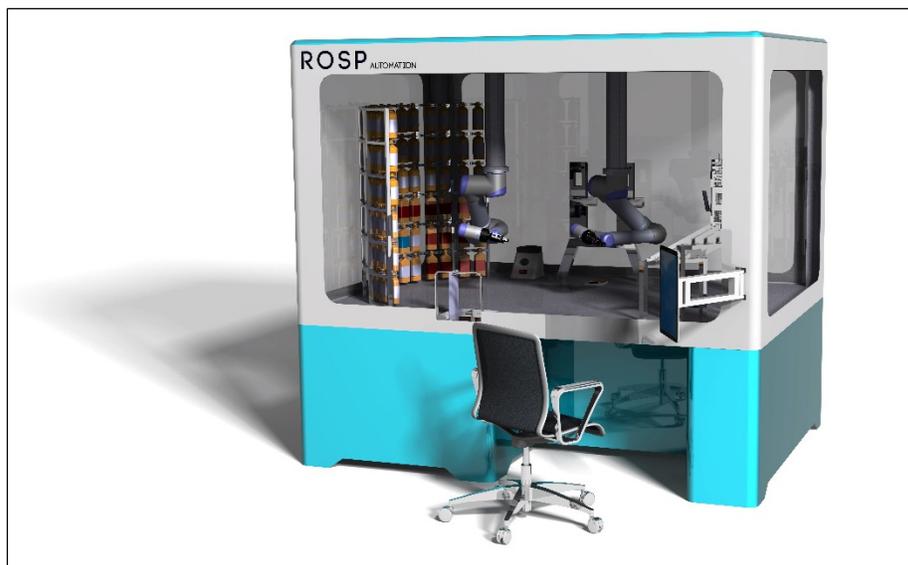


Figure 0.2 Modélisation du système ROSP 2R-150

Dans le projet du ROSP 2R-150, plusieurs équipements propres à l'automatisation seront utilisés. Des robots industriels, des actuateurs électriques, un système de vision et des préhenseurs en feront partie. Les différents chapitres du présent rapport couvriront la sélection et la conception des systèmes de manipulation, soit la structure de la cellule, les robots industriels et les préhenseurs, du système de remplissage, du système de gestion de matière première, soit les seringues et les bouteilles de médicament, et du système d'inspection des produits finis. D'autres composants et sous-systèmes, tels que le bouchonnage, l'étiquetage et l'ensachage, sont nécessaires au bon fonctionnement du système, mais ne seront pas couverts ici.

Dans le chapitre suivant, une revue de littérature et une revue de la situation actuelle du CHU Sainte-Justine seront présentées. Par la suite, les chapitres 2 à 5 présenteront la conception des systèmes de manipulation (2), de remplissage (3), de stockage (4), et d'inspection (5). Pour terminer, le chapitre 6 reviendra sur les différents concepts développés et offrira les recommandations nécessaires à la poursuite du projet.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Méthodologie de gestion des médicaments dans le domaine hospitalier

La recherche de gains d'efficacité est omniprésente dans notre société. Les organismes privés, publics ou parapublics tentent, continuellement, de faire plus avec les ressources mises à leur disposition. Les hôpitaux ne font pas exception à cette règle. C'est particulièrement le cas dans les sociétés dotées d'un régime médical public. À titre d'exemple, en 2016, les provinces canadiennes ont dépensé entre 34,3 % (Québec) et 43.2 % (Ontario) de leur budget annuel en soins de santé (Barua, Emes & Palacios, 2017). Le financement du système de la santé provient majoritairement des taxes et des impôts. Ce fait pousse les gouvernements à exercer sur le système une pression constante vers l'obtention de gains d'efficacité. Plusieurs projets sont mis en place dans les différents départements des hôpitaux, afin d'atteindre cet objectif. Le présent projet se concentre sur un seul département : les pharmacies internes des hôpitaux.

La gestion des médicaments dans les centres hospitaliers n'est pas un problème récent. Elle a été le sujet d'études pour la première fois dans les années 1950 (Buchanan, 1985). À cette époque, il était commun pour chaque étage d'un hôpital d'être équipé d'une pharmacie. Cette pratique amenait des complications d'ordre logistique. On peut penser aux réserves de médication dédoublées, aux pertes de médicaments dues à la péremption, à la main-d'œuvre de la pharmacie dédoublée et aux suivis complexes des doses de médicaments administrés (McNally, Page, & Sundeland, 1997 et O'Brodovich & Rappaport, 1991). Au début des années 1960 (Black & Nelson, 1991), l'hôpital de Long Beach en Californie et l'hôpital de Rochester au Minnesota proposent de centraliser les activités liées à la gestion des médicaments dans un département de pharmacie (Buchanan, 1985). À cette même époque, les gestionnaires des hôpitaux commencent à prendre conscience que la méthode de gestion des médicaments en place entraîne un nombre élevé d'erreurs médicales et que ces erreurs ont un impact financier important sur leurs établissements et sur la société en générale.

Les sources d'erreurs médicales incluent le mauvais fonctionnement d'un système ou d'un appareil, les erreurs humaines ou une combinaison de celles-ci. Les erreurs humaines se divisent en deux groupes : le premier groupe inclut le manque d'expérience et le manque de connaissances pour réaliser une tâche et le second groupe inclut les dérangements, les distractions et la fatigue durant l'accomplissement d'une tâche (McNally and al., 1997). L'utilisation de pharmacies distribuées sur les différents étages requiert pour chaque membre du personnel infirmier une série d'étapes. En effet, les infirmiers doivent : se rendre au lit du patient, lire la prescription laissée par le médecin, se rendre à la petite pharmacie, préparer la dose prévue et retourner au lit du patient pour l'administration. Ces nombreuses étapes et ces nombreux déplacements augmentent le nombre de facteurs de dérangement et de distraction. De plus, les membres du personnel infirmier ne sont pas formés de façon aussi approfondie dans le domaine des médicaments qu'un médecin ou un pharmacien. Leur manque de connaissances dans ce domaine est aussi un facteur de risque d'erreurs humaines.

Pour tenter de pallier aux nombreuses erreurs médicales en lien avec les médicaments, Buchanan (1985) propose une combinaison de la centralisation des pharmacies à une méthode nommée « unit dose ». L'université d'Iowa et l'Université de l'Arkansas ont été des précurseurs dans ce domaine. Ils ont élaboré cette méthode en considérant que les capacités et les connaissances d'un pharmacien vont au-delà de la simple production de médicament et elles peuvent être davantage utilisées dans le processus clinique (Black & Nelson, 1991). La méthode unit dose consiste à recueillir une copie des prescriptions faites par les médecins et à préparer les doses de médicament dans la pharmacie centrale. Pour chacun des patients, la pharmacie mesure, étiquette et emballe individuellement les différentes doses dans un format prêt pour l'administration.

Les systèmes unit dose respectent les éléments suivants : 1) les pharmaciens interprètent toutes les prescriptions de médicament à partir d'une copie de la prescription du médecin, 2) les pharmaciens et leurs techniciens tiennent un registre de chaque patient afin de pouvoir détecter les allergies, les interactions entre les médicaments et les duplications de traitement, 3) les doses sont emballées et étiquetées individuellement en doses unitaires et 4) les doses sont préparées pour une période n'excédant jamais 24 heures (Buchanan, 1985). La figure 1.1 présente une

dose de médicament préparée selon la méthode unit dose. Cette dose est composée de trois pilules différentes et est emballée dans un sachet de plastique. Les informations, concernant le médicament et le patient, sont inscrites sur le sachet. S'il s'agit de plusieurs doses, les sachets sont reliés ensemble.



Figure 1.1 Unit dose sac
Tirée de Sabandith (2016)

En 1975, l'American Society of Hospital Pharmacists, une association regroupant les pharmaciens d'hôpitaux aux États-Unis, adopte le système centralisé d'unit dose, affirmant que celui-ci, en plus d'améliorer la sécurité des patients, permet de réduire au maximum les coûts en lien avec la gestion des médicaments (Buchanan, 1985 et Black & Nelson, 1991). De nombreuses études ont permis de confirmer cette affirmation. Schnell (1976), O'Brodovich et Rappaport (1991) ainsi que McNally et al. (1997) ont tous mesurés des effets positifs des transitions entre un système de pharmacies distribuées à un système de pharmacies centralisées utilisant la méthode unit dose. L'hôpital pour enfants de Toronto a mesuré une diminution du taux d'erreur de 10,3 % avant la transition à 2,9 % après celle-ci (O'Brodovich & Rappaport, 1991). McNally et al. (1997) ont noté des diminutions des coûts de médicament variant de 2 % à 20 % selon les hôpitaux étudiés. Cette diminution de coûts est attribuable à la réduction des inventaires et à la réduction du gaspillage. Étant emballées individuellement, les doses inutilisées peuvent être retournées à la pharmacie et réutilisées par la suite (Black & Nelson, 1991).

L'avènement de la méthode unit dose et de la centralisation des pharmacies a créé de nouvelles opportunités. L'unification des méthodes et la centralisation des activités ont grandement augmenté le nombre de tâches standardisées à accomplir, le tout ouvrant la voie à la création d'une formation de technicien en pharmacie (Black & Nelson, 1991) et, un peu plus tard, à l'apparition des premiers équipements d'automatisation de pharmacie.

1.2 Reconditionnement et distribution des médicaments

Comme présenté précédemment, la méthode unit dose amène de nouveaux processus de préparation des doses individuelles de médicament et augmente l'implication des pharmaciens dans le processus clinique. La présente recherche étant réalisée en partenariat avec un département de génie, le processus clinique ne sera pas le sujet principal à l'étude. Il se concentrera sur le processus entourant le reconditionnement et la distribution des médicaments. La distinction entre les deux est présentée dans les travaux de Black & Nelson (1991).

Le processus de reconditionnement et de distribution des médicaments de la méthode unit dose suit généralement les huit étapes suivantes : 1) un médecin rédige une prescription pour un patient, 2) une copie de la prescription est envoyée à la pharmacie centrale, 3) un technicien intègre la prescription à la base de données de la pharmacie, 4) un technicien prépare (mesure, étiquette, emballe) la dose prescrite, 5) un technicien place la dose dans le tiroir d'un chariot de transport, 6) un pharmacien inspecte l'ensemble des doses produites dans la journée, 7) un employé transporte le chariot vers les unités de soin, et 8) un membre du personnel infirmier administre la dose au patient (Pesko, 1991). La figure 1.2 et la figure 1.3 présentent les différentes étapes du processus sous la forme d'un schéma blocs et de photos. La définition claire de ces étapes permet une meilleure distribution du travail et des responsabilités parmi les différents intervenants. Il est à noter que, selon la méthode unit dose, le pharmacien est le dernier rempart clinique contre les erreurs de médication. En d'autres mots, il est professionnellement responsable de l'état des doses quittant la pharmacie vers les unités de soins (Pesko, 1991).

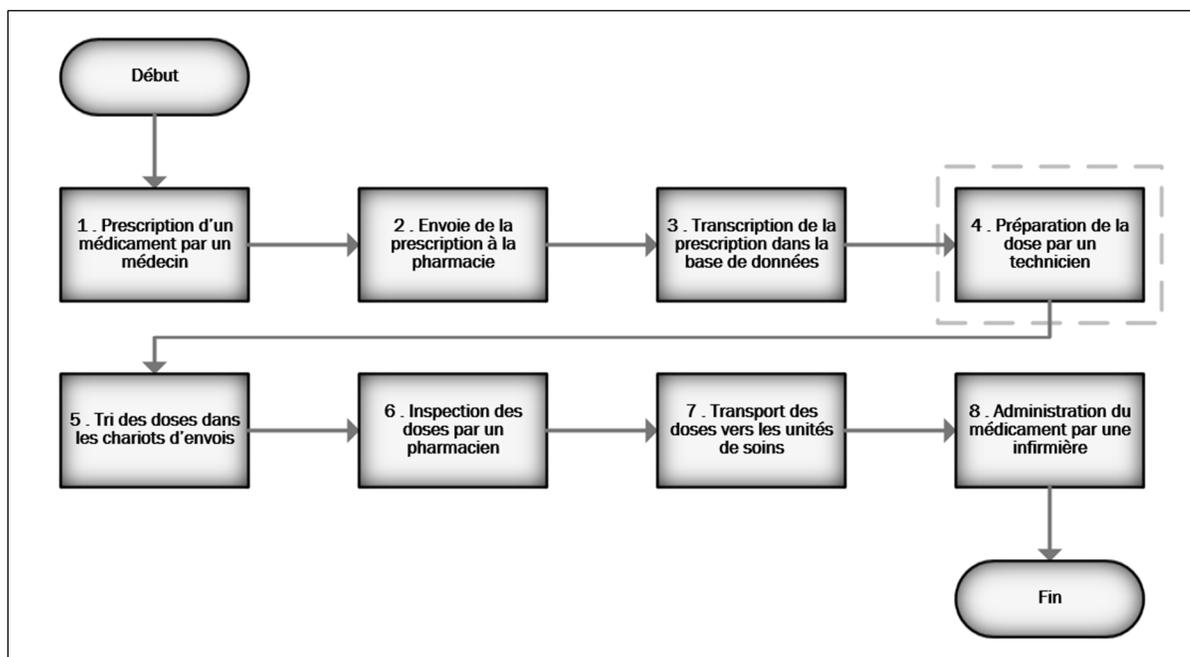


Figure 1.2 Processus de gestion des médicaments au CHU Sainte-Justine



Figure 1.3 Processus de gestion des médicaments du CHU Sainte-Justine
Adaptée de WWAG (2007), de SER (2016) et de AJP (2015)

Le présent projet se consacrera à la quatrième étape du processus, soit la mesure, l'étiquetage et l'emballage de la dose unitaire. Pour cette étape, l'American Society of Hospital Pharmacists (ASHP) a mis en place certaines règles. La première consiste à respecter ou à surpasser les normes alimentaires au niveau de la propreté (Pesko, 1991). La seconde requiert que l'emballage de la dose de médicaments comble les quatre fonctions suivantes : 1) protéger leur contenu de toute détérioration environnementale (p. ex., photodécomposition), 2) protéger leur contenu

de toute détérioration due à la manipulation (p. ex., bris et contamination), 3) identifier leur contenu de façon précise, et 4) permettre l'utilisation de leur contenu rapidement, facilement et de façon sécuritaire. La dernière oblige la pharmacie à garder l'historique de toutes les activités en lien avec la préparation des doses de médicaments du centre de santé (Pesko, 1991).

L'intégration de ces différents éléments de standardisation a créé un cadre propice à l'intégration d'outils, facilitant le travail des techniciens. Par contre, avant d'aborder ce sujet, il est nécessaire de recueillir des informations sur les types de médicaments à manipuler et sur les types d'emballage disponibles sur le marché et surtout, respectant les quatre fonctionnalités demandées par l'ASHP.

De façon générale, les médicaments à traiter par la pharmacie peuvent être séparés en trois groupes distincts : 1) les solides oraux, 2) les liquides oraux et 3) les injectables (Pesko, 1991). Les médicaments du groupe solides oraux, aussi connus sous le nom de pilules ou de comprimés, sont les plus répandus et les plus utilisés dans les centres hospitaliers.

Les réserves de médicaments solides oraux sont, majoritairement, entreposées en vrac dans des bouteilles de plastique comme le représente la figure 1.4.



Figure 1.4 Bouteille de médicaments oraux solides en vrac

Pour leur reconditionnement selon la méthode unit dose, deux types d'emballage sont généralement préconisés : les cartes alvéolées, communément appelées blisters, et les bandes de plastique (Pesko, 1991). Une carte alvéolée consiste en deux pièces distinctes : une feuille de plastique transparente thermoformée pour créer un certain nombre de dômes pouvant accueillir les doses de comprimés et une feuille de carton sellant les dômes d'un côté. Le côté libre de la feuille de carton est utilisé pour imprimer toutes les informations concernant le médicament et son administration. La figure 1.5 présente un modèle de carte alvéolée disponible sur le marché. Il est à noter qu'un très grand nombre de modèles de carte sont offerts aux hôpitaux.



Figure 1.5 Exemple de cartes alvéolées
Tirée de Maple Mountain Pharmacy (2018)

L'administration d'un médicament solide oral emballé dans une carte alvéolée se fait simplement en décollant la feuille de carton du dôme de plastique. Le médicament peut ensuite être ingéré par le patient.

Ensuite, la bande de plastique est constituée de deux bandes de plastique thermocollées l'une sur l'autre afin de créer de petits sachets unis les uns aux autres. Le tout forme une chaîne de doses. Une impression est apposée sur chaque sachet, donnant les informations nécessaires à l'administration et au suivi du médicament. Il est à noter qu'au moins une des deux bandes de plastique du départ doit être transparente, afin de permettre l'inspection de la dose avant son envoi vers les unités de traitement. Il suffit de déchirer ou de couper le sachet de plastique pour

accéder au médicament lors de l'administration. La figure 1.6 présente un exemple de bande de plastique utilisée dans les hôpitaux.



Figure 1.6 Bande de plastique pour la préparation des unit doses
Tirée de Yaskawa America, inc. (2018)

Du côté des médicaments liquides oraux, les réserves sont entreposées dans des bouteilles de plastique. La figure 1.7 présente une bouteille de médicament oral liquide en vrac.



Figure 1.7 Bouteille de médicament
oral liquide

Pour leur reconditionnement selon la méthode unit dose, trois types d'emballage sont préconisés : 1) la seringue orale, 2) le gobelet de plastique et 3) le gobelet de plastique avec bille (Pesko, 1991). La seringue orale est l'emballage le plus utilisé pour les médicaments liquides

oraux, majoritairement parce qu'il permet de mesurer, protéger et administrer le médicament sans utiliser un second outil. La seringue est composée du corps de la pompe (partie cylindrique qui contient le médicament), du piston (mécanisme permettant de soutirer ou d'administrer le médicament), de la buse et de la gradation (permettant la lecture du volume contenu dans la seringue). Les informations cliniques du médicament sont apposées sur une étiquette collée sur le corps de la seringue. La figure 1.8 présente une seringue orale et les noms de ses différentes composantes.

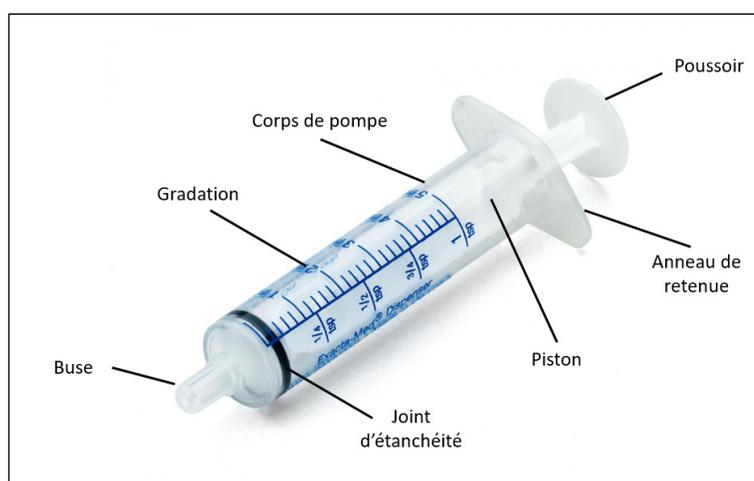


Figure 1.8 Nomenclature des différentes composantes d'une seringue orale

L'administration d'un médicament liquide oral emballé dans une seringue orale se fait en insérant la buse dans la bouche du patient ou en reliant la seringue à un tuyau de gavage inséré dans la gorge d'un patient.

Ensuite, le gobelet est un petit récipient de plastique thermoformé. Celui-ci est rempli de médicament liquide et sellé par une pellicule de plastique ou d'aluminium. Les informations en lien avec le médicament et l'administration sont imprimées sur la pellicule. La figure 1.9 présente un modèle de gobelet de plastique disponible sur le marché.



Figure 1.9 Gobelet de plastique
Tirée de Amazon (2018)

Dans la majorité des cas, le gobelet est directement utilisé pour administrer le médicament liquide au patient. Dans certains cas, il faut soutirer le liquide du gobelet à l'aide d'une seringue orale afin d'administrer le médicament directement ou grâce à un tuyau de gavage.

Finalement, très peu de choses séparent le gobelet standard du gobelet à bille. Contrairement au gobelet standard, le gobelet à bille est acheté déjà sellé par une pellicule d'aluminium. Le remplissage se fait par un trou situé au fond du récipient. Une fois le gobelet à bille rempli, l'orifice est bouché à l'aide d'une bille de plastique. Une étiquette comportant les informations du médicament est apposée sur le gobelet à bille. L'administration des médicaments contenus dans ce type d'emballage est la même que pour le gobelet standard. La figure 1.10 présente un modèle de gobelet à bille utilisé par certains hôpitaux.



Figure 1.10 Gobelet à bille
Tirée de Kutza (2007)

Pour terminer, les réserves de médicaments injectables sont conservées dans des bouteilles en verre. La figure 1.11 présente une bouteille en verre contenant un médicament injectable.

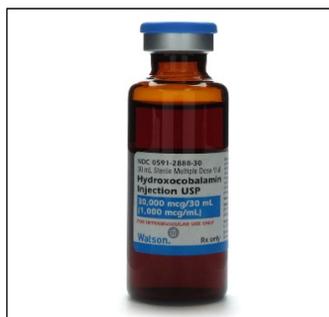


Figure 1.11 Bouteille de médicament injectable
Tirée d' Akorn (2018)

Pour respecter la méthode unit dose, ces médicaments sont emballés dans des seringues intraveineuses ou ils sont mélangés dans des sacs de soluté (Pesko, 1991). Les informations relatives au médicament et à leur administration sont imprimées sur une étiquette et collées sur la seringue ou sur le sac de soluté. L'administration de ces médications se fait en injectant le liquide dans le corps du patient à l'aide de la seringue intraveineuse ou en reliant le sac de soluté à un cathéter par une tubulure stérile. La figure 1.12 présente des seringues injectables et un sac de soluté.



Figure 1.12 Seringues intravei-
neuses et sac de soluté

1.3 Automatisation de pharmacies dans le domaine hospitalier

Selon Pesko (1991), les équipements servant à reconditionner les médicaments reçus en vrac ou produits à la pharmacie pour qu'ils respectent la méthode unit dose peuvent être séparés en trois catégories : 1) manuels, 2) semi-automatisés et 3) automatisés. Le développement de tels équipements étant une opportunité d'affaires indéniable, plusieurs compagnies se sont déjà lancées dans l'aventure.

Les cartes alvéolées sont en soit des outils de préparation manuelle de doses de médicaments oraux solides. Un technicien de la pharmacie peut remplir celles-ci en déposant les doses de médicaments dans les différents dômes de plastique, le tout en suivant une liste générée par la base de données de l'hôpital. Il selle ensuite les dômes en utilisant la feuille de carton adhésive (Pesko, 1991).

Pour faciliter cette tâche, McKesson Automation Canada a lancé, en 2017, le système BlistAssist®, un système semi-automatisé d'aide au remplissage de cartes alvéolées. Il indique au technicien dans quel dôme il doit placer les médicaments et enregistre une photo du produit fini, afin de faciliter l'inspection de la carte par le pharmacien (McKesson Canada, 2018a). Le BlistAssist est présenté sur la figure 1.13.



Figure 1.13 Le BlistAssist de la compagnie McKesson
Tirée de McKesson Canada (2018a)

McKesson distribue aussi le VBM 200F, un système automatisé de préparation de cartes alvéolées présenté à la figure 1.14. Celui-ci peut accueillir jusqu'à 200 types de comprimés différents (McKesson, 2018b).



Figure 1.14 Le VBM 200F de la compagnie McKesson
Tirée de McKesson (2018b)

La compagnie canadienne Synergie Médicale fabrique, de son côté, le SynMed (Synergie Médicale, 2015). Tout comme le VBM 200F, le SynMed est conçu pour automatiser le remplissage de cartes alvéolées. La figure 1.15 présente l'appareil fabriqué sur la Rive-Sud de Montréal.



Figure 1.15 Le SynMed de la compagnie Synergie Médicale
Tirée de Synergie Médicale (2015)

De son côté, Omnicell distribue l'OnDemand Accuflex, un appareil automatisé utilisant un bras robotisé sériel pour passer d'un médicament à l'autre lors du remplissage des cartes alvéolées. Un technicien est toutefois nécessaire pour alimenter le système en cartes alvéolées. La figure 1.16 présente le robot sériel et les équipements qui l'entourent (Omnicell, 2017).



Figure 1.16 L'OnDemand Accuflex
de la compagnie Omnicell
Tirée d'Omnicell (2017)

En ce qui concerne les bandes de plastique, l'option manuelle n'est pas envisageable. Une machine semi-automatisée ou automatisée doit être utilisée. Medical Packaging inc. produit l'appareil Auto-Print. De petites dimensions, celui-ci s'installe sur une table de travail et ne prend en charge qu'un médicament à la fois. L'intervention du technicien est donc régulièrement requise pour maintenir la production. L'appareil est présenté à la figure 1.17 (Medical Packaging inc., 2018).



Figure 1.17 L'Auto-Print de la compagnie Me-
dical Packaging inc.
Tirée de Medical Packaging inc. (2018)

Les compagnies ARxIUM, Swisslog et McKesson produisent toutes des systèmes automatisés très semblables, appelés cabinets, pour préparer les doses en bande de plastique. Ces cabinets peuvent accueillir entre 200 et 500 types de comprimés différents. Ces trois systèmes sont présentés respectivement sur les figures 1.18, 1.19 et 1.20. Le système sélectionne les médicaments utilisés et les achemine par gravité à l’emballeuse située au bas de l’appareil (ARxIUM, 2018; JVM, 2016; McKesson, 2018c et Swisslog, 2018).



Figure 1.18 Le FastPak Elite de la compagnie ARxIUM
Tirée d'ARxIUM (2018)



Figure 1.19 L'ATP de la compagnie Swisslog
Tirée de Swisslog (2018)



Figure 1.20 Le PACMED 500 de la
compagnie McKesson
Tirée de McKesson (2018c)

Pour terminer avec les bandes de plastique, le ROBOT-Rx de la compagnie Omnicell réalise le travail de la même façon que l'OnDemand Accuflex, soit en utilisant un bras robotisé sériel pour sélectionner les médicaments, mais reconditionne les comprimés à l'aide de bandes de plastiques et non de cartes alvéolées. La figure 1.21 présente le ROBOT-Rx (Omnicell, 2018a).

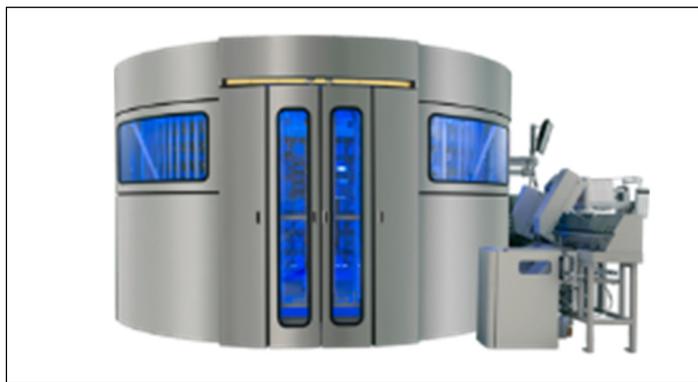


Figure 1.21 Le ROBOT-Rx de la compagnie Omnicell
Tirée d'Omnicell (2018a)

Tout comme les médicaments oraux solides avec les cartes alvéolées, les médicaments oraux liquides peuvent être reconditionnés manuellement en utilisant la seringue orale comme seul outil. Il suffit au technicien d'insérer la seringue dans la bouteille et de soutirer le contenu de celle-ci à l'aide du piston de la seringue (Pesko, 1991).

La compagnie Medical Packaging inc. produit de son côté le système Auto-Draw. Un système semi-automatisé qui requiert que le technicien place, une à une, les seringues dans un réceptacle à cet effet. L'Auto-Draw est présenté à la figure 1.22. Le système utilise ensuite une pompe péristaltique pour injecter le bon volume de liquide dans la seringue. Le technicien doit aussi remplacer la tuyauterie lorsqu'il change de médicament (Medical Packaging inc., 2016a).



Figure 1.22 L'Auto-Draw® de la compagnie Medical Packaging inc.
Tirée de Medical Packaging inc. (2016a)

De son côté, Baxa produit le REPEATER Pump fonctionnant selon le même principe de pompe péristaltique et d'intervention humaine que l'Auto-Draw. Le volume de chaque nouvelle dose peut être ajusté par le technicien en utilisant une interface de commande. La pompe est présentée sur la figure 1.23 (Baxter, 2018a).



Figure 1.23 La REAPEATER Pump de la compagnie Baxa
Tirée de Baxter (2018a)

Les appareils NE500, NE1000 et NE1600 de la compagnie ProSense utilisent pour leur part un vérin électrique pour actionner le piston d'une ou plusieurs seringues afin de soutirer le liquide de la bouteille, comme présenté sur la figure 1.24. Ce système est lui aussi semi-automatisé, requérant une intervention humaine pour chaque dose préparée (ProSense Laboratory & Process equipment, 2018).

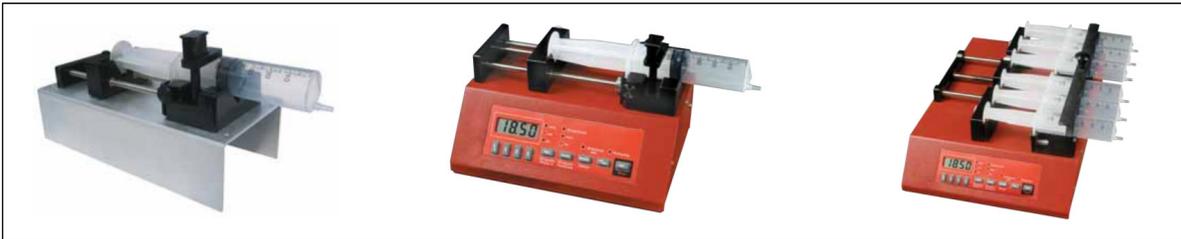


Figure 1.24 Les NE500, NE1000 et NE1600 de la compagnie ProSense
Tirée de ProSense Laboratory & Process equipment (2018)

Le dernier système présenté pour le remplissage de seringues orales n'est pas encore sur le marché. Il est actuellement en développement par la compagnie américaine Filamatic. Les seuls détails disponibles à ce jour proviennent des demandes de brevet déposées par la compagnie. Les plans préliminaires du système sont présents sur la figure 1.25. Le système se veut semi-automatisé, utilisant des bras robotisés pour manipuler les seringues et les bouteilles de médicament. Il utilise aussi un système de vérin électrique pour effectuer le remplissage et un système de vision artificielle pour inspecter les seringues orales. Un technicien est nécessaire pour installer un adaptateur universel sur les différentes bouteilles de médicament (Bennett, Chopper, Grosskopf, Perazzo & Rosen, 2014).

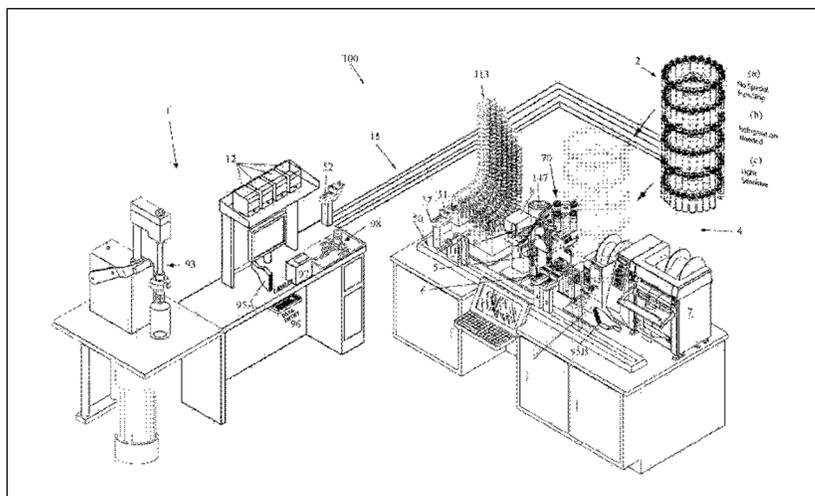


Figure 1.25 Système en développement par la compagnie
Filamatic
Tirée de Bennett et al. (2014)

Plusieurs appareils existent sur le marché du côté des gobelets de plastique. La compagnie Medical Packaging inc. produit le FD-PHARMA et le Fluidose Series 5, des systèmes automatisés mesurant le volume de médicament à l'aide de seringues métalliques reliées à une bouteille de médicament via un système de tuyauterie. Les deux équipements sont présentés dans l'ordre sur la figure 1.26 et la figure 1.27. L'appareil produit donc des lots d'un même médicament et il requiert l'intervention d'un technicien pour changer de médication (Medical Packaging inc., 2016b; Medical Packaging inc., 2018).

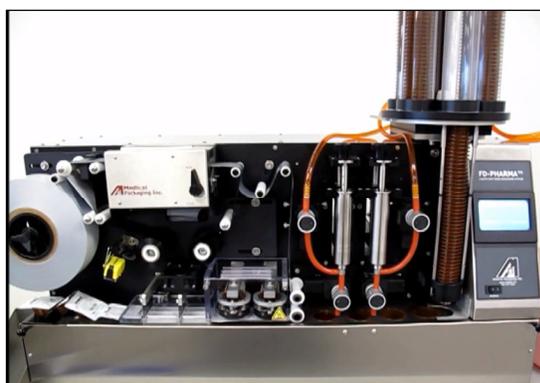


Figure 1.26 Le FD-PHARMA de la compagnie Medical Packaging inc.
Tirée de Medical Packaging inc. (2016b)

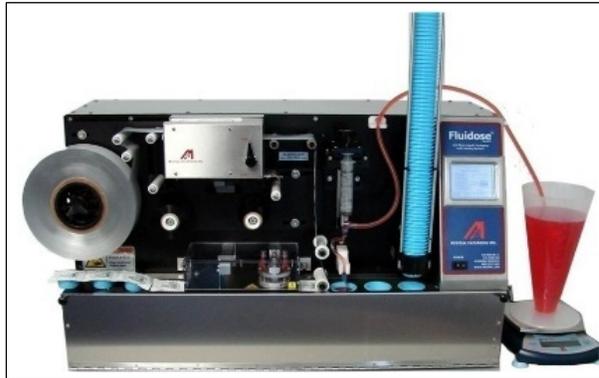


Figure 1.27 Le Fluidose Series 5 de la compagnie Medical Packaging inc.
Tirée de Medical Packaging inc. (2018)

Le Speedy Wet Cadet® de la compagnie Euclid exécute sensiblement le même travail, mais remplace les seringues métalliques par une pompe péristaltique REPEATER Pump de Baxa. Le duo est présenté sur la figure 1.28 (Euclid Medical Products, 2015).



Figure 1.28 Le Speedy Wet Cadet® de la compagnie Euclid
Tirée d'Euclid Medical Products (2015)

Une compagnie française s'est associée avec l'hôpital pour enfants de La Charité-sur-Loire, en France, afin de créer le RMD818. Celui-ci est en mesure d'accueillir jusqu'à 20 médicaments liquides oraux à la fois. Il utilise un système de pompe manuelle pour soutirer et mesurer les médicaments puis pour les transférer dans les gobelets. Ce système, présenté à la figure 1.29, est complètement automatisé, il ne requiert des interventions humaines qu'au moment de remplir ses matières premières et qu'au moment de vider les produits finis (Lagrange, 2013).

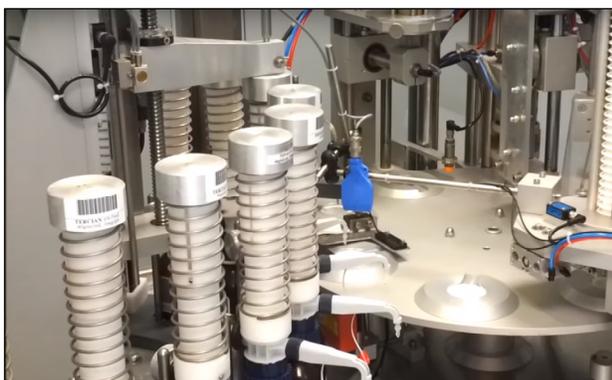


Figure 1.29 Le RMD818
Tirée de Lagrange (2013)

La pompe péristaltique REAPEATER Pump de la compagnie Baxa peut aussi être utilisée pour aider le technicien à remplir les gobelets à bille. La figure 1.30 présente le processus de remplissage manuel avec une mesure de dose automatisée (Baxter, 2018a).



Figure 1.30 La REA-
PEATER Pump de la com-
pagnie Baxa
Tirée de Baxter (2018a)

Tout comme les médicaments oraux, les médicaments injectables peuvent être préparés manuellement par le personnel médical en utilisant les seringues comme seul équipement (Pesko, 1991). L'aiguille de la seringue est introduite dans la partie caoutchouteuse du bouchon de la bouteille de médicament. Le liquide est mesuré avec la graduation de la seringue et ensuite injecté dans le patient ou dilué dans un sac de soluté.

Pour le remplissage des seringues seulement, la compagnie Baxa a mis sur le marché le Rapid-Fill. Celui-ci remplit des seringues en boucle avec un volume de liquide fixe. Les seringues sont attachées les unes aux autres sur une longue bande de plastique. Le système requiert l'intervention d'un humain pour changer de médicament ou de volume de remplissage. Le Rapid-Fill est présenté sur la figure 1.31 (Kutza, 2007).



Figure 1.31 Le Rapid-Fill de la compagnie Baxa
Tirée de Kutza (2017)

Les huit prochains systèmes présentés sont en mesure de préparer des seringues injectables et des sacs de soluté. Ils sont tous destinés au marché des médicaments injectables dangereux, il n'y a qu'à penser aux médicaments traitant le cancer. L'objectif principal de ces systèmes est donc la protection du personnel de pharmacie; les gains potentiels en efficacité sont relégués en deuxième place. L'utilisation de bras robotisés sériels est pratiquement la norme parmi ceux-ci.

Le premier est distribué par la compagnie ARxIUM et se nomme le RIVA (ARxIUM, 2018). La figure 1.32 présente le système et son bras robotisé de marque Stäubli.



Figure 1.32 Le RIVA de la compagnie ARxIUM
Tirée d'ARxIUM (2018)

Les deux prochains systèmes sont distribués par la compagnie Omnicell. La figure 1.33 présente l'i.STATION Non-Hazardous Compounding Robot (Omnicell, 2018b) et la figure 1.34, son grand frère, l'i.v.STATION ONCO Hazardous Compounding Robot (Omnicell 2018c). Le second système se spécialise au niveau de médicaments oncologiques dangereux.



Figure 1.33 L'i.v.STATION Non-Hazardous Compounding Robot de la compagnie Omnicell
Tirée d'Omnicell (2018b)



Figure 1.34 L'i.v.STATION ONCO
Hazardous Compounding Robot de la
compagnie Omnicell
Tirée d'Omnicell (2018c)

De son côté, la compagnie Baxter produit l'INTELLIFILL I.V. présenté à la figure 1.35 (Baxter, 2018b).



Figure 1.35 L'INTELLIFILL I.V. de la
compagnie Baxter
Tirée de Baxter (2018b)

Une autre compagnie dans le marché s'appelle Loccioni et elle distribue l'APOTECACHemo. La figure 1.36 présente l'APOTECACHemo (Loccioni, 2012).



Figure 1.36 L'APOTECAchemo
de la compagnie Loccioni
Tirée de Loccioni (2012)

L'Extrafill-05 et le FPS5 du groupe Marchesini sont aussi des systèmes de remplissage de seringues injectables automatisé utilisant un bras sériel pour une partie des manipulations. La figure 1.37 présente l'Extrafill-05 (Marchesini Group, 2015a) et la figure 1.38 présente le FPS5 (Marchesini Group, 2015b).



Figure 1.37 L'Extrafill-05 du groupe Marchesini
Tirée de Marchesini Group (2015a)



Figure 1.38 Le FPS5 du groupe Marchesini
Tirée de Marchesini Group (2015b)

Le dernier système présenté dans cette section est l'EQUASHIELD® Pro de la compagnie EQUASHIELD. Comparativement aux autres systèmes, il utilise un robot cartésien pour manipuler les différentes bouteilles et seringues. Il est présenté à la figure 1.39 (EQUASHIELD, 2017).



Figure 1.39 L'EQUASHIELD® Pro de la compagnie EQUASHIELD
Tirée d'EQUASHIELD (2017)

1.3.1 Pénétration des outils automatisés sur le marché

Les équipements de reconditionnement de médicaments ont connu un certain succès dans le milieu hospitalier. L'ASHP a conduit, en 2014, un sondage sur les habitudes de préparation et de distribution des doses de médicaments par les pharmacies d'hôpitaux américaines (Pedersen, Schneider & Scheckehoff, 2015). Le sondage, publié dans l'American Journal of Health-

System Pharmacy (AJHP), révèle que 97 % des hôpitaux utilisent un certain niveau d'automatisation dans leur quotidien, cette proportion a doublé depuis 1999. (Pedersen et al., 2015) Les systèmes robotisés sont, par contre, à la traîne avec une pénétration de marché de seulement 8.3 %, en reculant de 2,5 % par rapport au sondage de 2010. Il est remarqué que 25,8 % des hôpitaux utilisent, encore de façon principale, une méthode centralisée manuelle. Ce nombre a toutefois rapidement diminué depuis le début du siècle, il se chiffrait alors à 69,7 % des établissements (Pedersen et al., 2015). Toujours selon la même étude réalisée en 2014, les robots, préparant des seringues intraveineuses, ne sont présents que dans 3,2 % des centres hospitaliers des États-Unis, en lente progression par rapport au sondage de 2010 (2,6 %). Les systèmes robotisés sont principalement présents dans les hôpitaux de plus de 400 lits.

Un autre sondage, réalisé en 2017 par Halvorse (2017) pour le compte de la compagnie Pharmacy Purchasing & Products, révèle que 67 % des hôpitaux sondés aux États-Unis prévoient une augmentation de leur budget en automatisation dans un horizon de 3 à 5 ans. Il faut par contre noter que ces budgets incluent également l'automatisation des systèmes informatiques et des processus de travail. Il révèle aussi que 91 % des répondants reconnaissent la nécessité de reconditionner certains médicaments dans leurs locaux. En terminant, le sondage révèle que 60 % des établissements réalisent présentement des préparations de façon manuelle, que 45 % utilisent de petits appareils sur table (p. ex. Auto-Draw, Auto-Fill) et que 27 % utilisent des appareils à grand volume (p. ex. PacMed) (Halvorse, 2017).

1.3.2 Impact et résultat des outils automatisés

Trois études distinctes ont été réalisées pour évaluer l'efficacité de trois systèmes automatisés. La première, réalisée en 2013 par Jacq & Lagrange (2014), évalue les performances du système RMD 818. L'étude conclut qu'après huit ans d'utilisation, l'appareil a apporté des changements positifs pour le centre hospitalier. Pour une production de 4500 doses orales liquides par mois, le taux de non-conformité révélé est inférieur à 0,04 %. Toujours selon l'étude, le temps consacré par le personnel infirmier à la préparation des médicaments a drastiquement chuté. La conclusion de cette étude suggère l'achat d'un second système RMD 818.

La seconde étude, réalisée en 2015 par Al-Jazairi et al. (2015), étudie l'impact de l'intégration d'un système de préparation de seringues injectables et de sac de soluté pour des médicaments dangereux. L'appareil est le CytoCare de la compagnie Health Robotics. Celle-ci ne détient plus les droits sur l'appareil depuis maintenant quelques années. L'étude révèle que le système robotisé échoue à rencontrer les spécifications de précision dans 15 % des cas lorsqu'utilisé pour préparer plus de 2900 doses annuellement. L'étude conclut que l'efficacité du système est limitée et que la technologie ne semble pas assez mature pour son adoption universelle.

La troisième étude réalisée en 2017 par Hioki, Iwamoto, Morikawa, Okuda, Paolucci & Sudo (2017) évalue les performances du système APOTECACHemo. Ce système est la version renouvelée du CytoCare présenté dans l'étude réalisée par Al-Jazairi et al. (2015). Cette nouvelle mouture du système a été rendue possible par le rachat des droits du CytoCare par la compagnie LOCCIONI. L'étude démontre que le robot a permis d'éliminer la contamination résiduelle des médicaments en comparaison avec une production manuelle. De plus, le temps de préparation des doses de chimiothérapie a diminué d'environ 3 minutes pour s'établir à 6,11 min. L'étude conclut que l'APOTECACHemo donne un avantage incontestable au niveau de la précision et de la sécurité.

1.4 CHU Sainte-Justine

Le centre hospitalier universitaire (CHU) Sainte-Justine est le plus grand centre de médecine pédiatrique au Canada. Il est aussi l'un des quatre plus importants centres en Amérique. Cet établissement, plus que centenaire, est situé à Montréal et compte 5 000 employés. Son centre de recherche est particulièrement reconnu dans les domaines des maladies du cerveau, des maladies musculosquelettiques et des sciences du mouvement, des pathologies foeto-maternelles et néonatales, de la santé métabolique, des maladies virales, immunitaires et cancers et de l'avancement et du devenir en santé (CHU Sainte-Justine, 2018).

1.4.1 Besoins particuliers

Le CHU Sainte-Justine possède un département de pharmacie centrale employant environ 100 personnes, dont une trentaine de pharmaciens et une cinquantaine de techniciens. Comme la

majorité des hôpitaux modernes, il utilise la méthode unit dose pour reconditionner leurs médicaments. Ceux sous forme solide sont reconditionnés en utilisant les bandes de plastique à l'aide d'un PacMed 500. La pharmacie de l'hôpital possède un tel équipement depuis le milieu des années 1990.

Comparativement aux hôpitaux standards, majoritairement axés sur la clientèle adulte, les hôpitaux pédiatriques prennent en charge la clientèle à besoins particuliers que sont les enfants. Ces besoins particuliers sont variés et couvrent l'ensemble des départements de ces hôpitaux. L'administration des médicaments n'y fait pas exception. Certains médicaments solides, produits pour les adultes, ne sont pas adaptés aux enfants. Le dosage nécessaire pour ces derniers, en raison de leur taille et de leur âge, est souvent moindre que le plus petit dosage disponible commercialement. Les différences assez importantes de tailles et d'âge chez les enfants entraînent une variation constante des posologies utilisées dans les hôpitaux pédiatriques. De plus, certains jeunes patients ne sont pas en mesure d'ingérer des médicaments sous forme de comprimé.

Pour résoudre ces différents problèmes, les professionnelles de la santé utilisent des médicaments oraux liquides, pour traiter bon nombre d'enfants. Certains de ceux-ci sont disponibles commercialement. Par contre, lorsque les besoins sont encore plus particuliers, les pharmaciens et les techniciens des hôpitaux pédiatriques doivent produire les médicaments liquides eux-mêmes (magistraux). L'équipe médicale du CHU Sainte-Justine a donc pris la décision d'employer les seringues orales pour reconditionner cette forme de médication.

1.4.2 Stratégie de reconditionnement actuelle

Le reconditionnement des médicaments liquides oraux au CHU Sainte-Justine est actuellement un processus complètement manuel. De ce fait, le pharmacien Jean-Marc Forest, du Centre Hospitalier Universitaire Sainte-Justine, croit qu'il est possible d'automatiser les tâches manuelles relatives au remplissage des seringues orales afin d'en diminuer les risques d'erreur et les coûts associés.

La première étape pour évaluer cette affirmation consiste à bien cerner les différentes tâches manuelles actuellement exécutées par le personnel. Cette étape permet de déterminer les tâches

qui sont susceptibles d'être automatisées et de déterminer la meilleure façon d'intégrer un tel système au processus déjà établi dans la pharmacie.

Des rencontres avec M. Forest ont été organisées afin de documenter le processus. Voici donc le processus complet de gestion des médicaments utilisés par l'hôpital, de la prescription faite par le médecin jusqu'à l'administration au patient faite par le personnel infirmier :

- 1- Le médecin rédige une prescription papier pour un patient sur une unité de soins.
- 2- La prescription est faxée au département de pharmacie.
- 3- Des techniciens entrent la prescription dans la base de données de la pharmacie (logiciel Gesfor).
- 4- Le logiciel Gesfor fait la gestion des prescriptions et regroupe les ordonnances par médicament.
- 5- Le logiciel Gesfor transfère les données au logiciel maison PariBatch.
- 6- Le logiciel PariBatch lance l'impression des étiquettes des seringues à remplir.
- 7- Le technicien se connecte dans le logiciel PariBatch et scanne le code-barres sur l'étiquette.
- 8- Le logiciel informe le technicien du médicament à prendre dans la réserve et une photo de la bouteille apparaît à l'écran.
- 9- Le technicien prend le médicament dans la réserve et scanne le code-barres du produit. Il entre la date d'expiration dans l'ordinateur.
- 10- Le technicien remplit la seringue selon le volume présenté par le logiciel PariBatch. Il est à noter qu'un mouvement de va-et-vient du piston est nécessaire afin d'éliminer l'air présente dans la buse de la seringue avant de réaliser la mesure finale.
- 11- Le technicien bouchonne la seringue.
- 12- Le technicien appose l'étiquette sur la seringue en s'assurant de ne pas cacher la partie graduée de celle-ci afin que le volume du médicament soit lisible.
- 13- Le technicien place la seringue dans un sac de type "Ziplock". Une indication sur le sac est présente si le médicament doit être réfrigéré.
- 14- Le pharmacien vérifie les doses produites par le technicien.
- 15- Le technicien répartit les médicaments préparés dans la journée par patient dans différents chariots qui sont séparés selon les unités de soins, ensuite séparés par chambre et ensuite séparés par lit.
- 16- Le technicien déplace les chariots sur les unités de soins.
- 17- Le personnel infirmier prend le médicament à administrer dans le chariot.
- 18- Le personnel infirmier administre le médicament au patient.

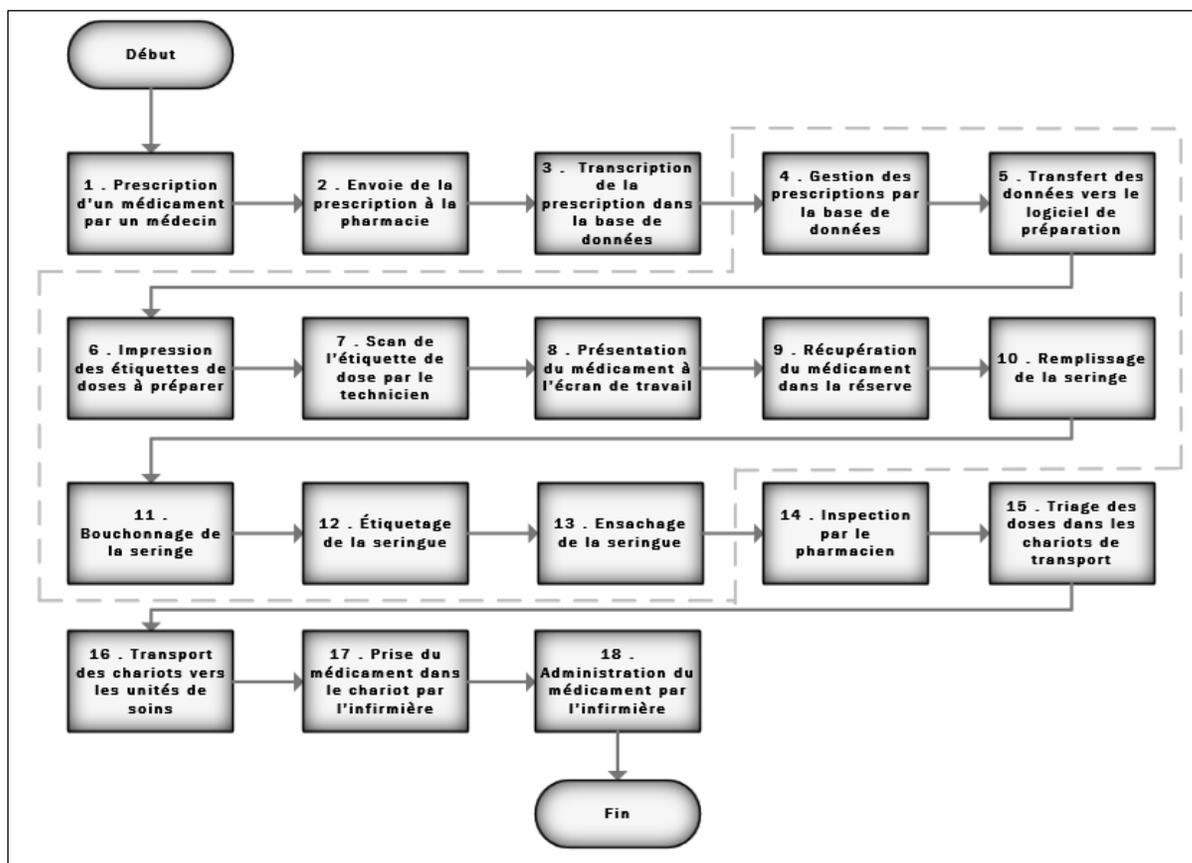


Figure 1.40 Processus actuel de préparation des seringues de médicaments oraux liquides du CHU Sainte-Justine

La figure 1.40 représente le schéma blocs de ce même processus. En observant le nombre élevé d'étapes nécessaires, il est possible de penser que l'ajout de la cellule de production automatisée pourrait réduire le nombre d'étapes du processus global de l'hôpital en les regroupant. Cette réduction des étapes engendrerait potentiellement une réduction du besoin en main-d'œuvre de la pharmacie. La figure 1.41 représente le schéma blocs du processus complet de la gestion des médicaments si certaines étapes étaient regroupées par l'utilisation d'un processus automatisé.

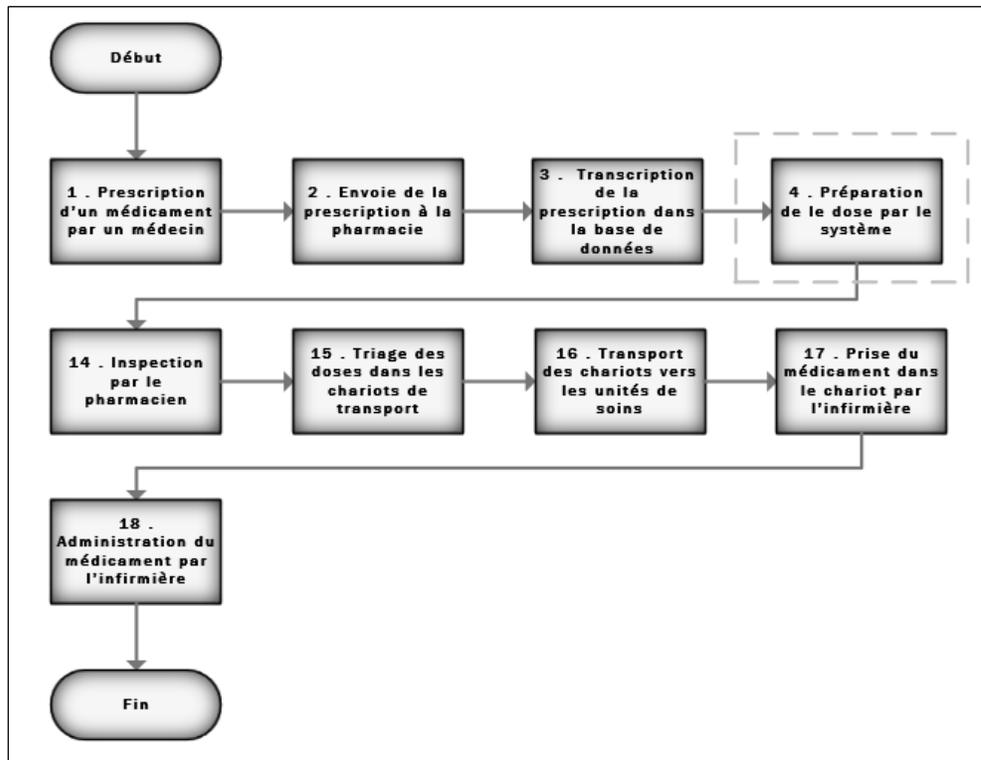


Figure 1.41 Processus proposer de préparation de médicaments oraux liquides du CHU Sainte-Justine

Plusieurs étapes seraient donc regroupées et traitées par la cellule automatisée. Voici la liste des différentes tâches qui pourraient être effectuées par cette cellule :

- 1- Lecture de la base de données Gesfor.
- 2- Optimisation de l'ordre de préparation.
- 3- Impression et numérisation des étiquettes.
- 4- Gestion de la réserve de médicaments.
- 5- Gestion de la réserve de seringues.
- 6- Brassage des médicaments.
- 7- Remplissage des seringues.
- 8- Bouchonnage des seringues.
- 9- Étiquetage des seringues.
- 10- Inspection des seringues.
- 11- Ensachage des seringues.

1.4.3 Impact de la méthode manuelle

Le reconditionnement manuel des doses de médicaments liquides apporte son lot de problèmes à la pharmacie du CHU Sainte-Justine. Le premier problème concerne la sécurité des patients. Le fait d'employer des techniciens pour faire ce travail induit des risques d'erreur humaine. Il est difficile pour un humain de garder un niveau de concentration élevé lors de la réalisation de tâches répétitives. Or la clientèle pédiatrique est particulièrement vulnérable aux erreurs de médication. Le second problème concerne les coûts en main d'œuvre engendrés par ce processus. La pharmacie du CHU Sainte-Justine emploie l'équivalent de quatre techniciens à temps complet pour réaliser cette tâche. En plus de ces techniciens, un pharmacien doit vérifier les doses préparées. Il faut aussi mentionner que la pharmacie n'est pas en mesure de réaliser la totalité des doses de médicaments liquides oraux nécessaires quotidiennement. Les médicaments dits "au besoin" (PRN) sont acheminés en vrac sur les étages et sont mesurés grâce aux seringues orales par le personnel infirmier présent sur le plancher. Ce fait augmente substantiellement les frais liés au reconditionnement des médicaments et augmente les risques d'erreur en réduisant le pourcentage de doses vérifiées par le pharmacien. Le dernier problème concerne la santé du personnel de la pharmacie. La préparation de seringues orales est une tâche hautement répétitive pouvant créer de problème musculosquelettique chez les personnes qui l'exécute. Plusieurs techniciens se plaignent donc de douleurs au dos et aux membres supérieurs. En plus des douleurs, ce problème entraîne un roulement de personnel important pour la pharmacie, augmentant du même fait les coûts liés au remplissage des seringues.

1.4.4 Requis du projet

Afin de déterminer les barèmes du projet, il est nécessaire de faire la liste des requis du Centre Hospitalier Universitaire Sainte-Justine. Ceux-ci couvrent les critères de performance et les critères de sécurité du projet.

Temps de cycle de la production (TC)

Le temps de cycle est le temps entre la production de deux unités sur une chaîne de montage ou dans une cellule automatisée (Olivier, 2014). Dans le cas du présent projet, le temps de

cycle représente le laps de temps entre le début du remplissage d'une première seringue et le début du remplissage d'une seconde seringue. Le TC se calcule de la façon suivante :

$$TC = \text{Temps total de production} / \text{Nombre d'unité à produire} \quad (1.1)$$

Selon les informations obtenues par le CHU Sainte-Justine, la production journalière de seringues de la pharmacie se situe entre 550 et 650 doses. À cela, il faut ajouter les 500 doses produites par jour par le personnel infirmier présent sur le plancher. Pour combler les besoins actuels, il serait nécessaire de produire un minimum de 1150 doses par jour. Par contre, il est préférable de prévoir une augmentation future de la demande. Ce nombre sera augmenté à 1200 doses/jour afin de prendre en considération les fluctuations potentielles.

Toujours en considérant les données obtenues par le CHU Sainte-Justine, le quart de travail des techniciens de la pharmacie débute à 7h30 et se termine à 16h. Les employés doivent terminer la production pour 14h30 afin de laisser au pharmacien le temps d'inspecter les doses avant l'envoi des chariots sur les unités de soins à 16h00. Afin de respecter cet horaire, le système automatisé disposera de 420 minutes pour réaliser l'ensemble des doses.

$$TC = \frac{420 \text{ minutes}}{1200 \text{ doses}} = 21 \frac{\text{secondes}}{\text{dose}} \quad (1.2)$$

Le système devra donc être en mesure de réaliser un peu moins de trois doses à la minute.

Précision de remplissage des doses

La précision d'une mesure est directement reliée à la précision de l'outil de mesure employé. Dans le cas présent, l'outil de mesure utilisé est la seringue orale. Celle-ci permet une précision de $\pm 5\%$ sur les volumes mesurés. Le système devra donc respecter cet intervalle. Il est important de se rappeler qu'un pharmacien doit vérifier toutes les doses quittant la pharmacie, que celles-ci aient été produites par un humain ou par une machine.

Flexibilité

Pour combler les besoins de l'hôpital pédiatrique, le système doit être en mesure d'accueillir la centaine de médicaments utilisés quotidiennement. Ceux-ci sont fournis dans des bouteilles de plastique de formes et de tailles variées. Le système doit aussi accueillir les six volumes de seringues utilisés par la pharmacie; soit 1 ml, 3 ml, 6 ml, 10 ml, 20 ml et 60 ml. Un des objectifs du projet étant de réduire les coûts en main d'œuvre de la pharmacie, le système doit être en mesure de garder une quantité de matière première afin de minimiser le nombre de remplissages nécessaires au cours d'une journée de travail.

Matériel utilisé

Le système n'étant pas installé dans un milieu industriel, la maintenance peut difficilement être réalisée par le personnel de l'hôpital. Il est donc nécessaire de minimiser les risques de bris et les besoins de calibration. L'utilisation d'équipement de calibre industriel est donc à préconiser. De plus, l'hôpital n'étant pas muni d'un système d'air comprimé traditionnellement présent dans un environnement industriel, l'utilisation d'équipement électrique sera priorisée comparativement à l'utilisation d'équipement pneumatique. L'implantation d'une pompe et d'un réservoir dans le système est une option potentielle, mais le bruit créé par un tel système et le coût à l'achat des composantes rendent cette option moins intéressante.

1.4.5 Analyse des coûts

Le présent projet ayant comme objectif de réduire le coût de production des seringues orales pour l'hôpital Sainte-Justine, il est nécessaire de déterminer le coût actuel de cette tâche. L'hôpital a été en mesure de fournir certains détails concernant les salaires et avantages sociaux de ses employés. Le tableau 1.1 présente le salaire annuel moyen des techniciens de la pharmacie et des membres du personnel infirmier de l'hôpital. Il présente aussi les avantages sociaux, les charges salariales et les frais de gestions.

Tableau 1.1 Salaire moyen des techniciens et des infirmières du CHU Sainte-Justine

	Technicien en pharmacie	Infirmière plancher
Salaire	33 000\$	55 350\$

Avantages sociaux	6 800\$	20,6 %
Charges salariales	9 500\$	11,3 %
Sous total	44 300\$	79 295\$
Frais de gestion	20 %	20 %
Total	53 160\$	89 154\$

Il en découle qu'un technicien employé à temps plein par la pharmacie coûte, en moyenne, 53 160\$ et qu'un membre du personnel infirmier employé à temps plein par l'hôpital coûte, en moyenne, 89 154\$. Ces chiffres n'incluent pas les heures supplémentaires et les primes particulières (p. ex. prime de nuit, prime pour une journée fériée, etc.). Afin de déterminer le coût unitaire de préparation d'une dose de médicament liquide oral à la pharmacie, il suffit de diviser le coût total en main d'œuvre de la pharmacie par le nombre de doses produites par année. La pharmacie emploie quatre techniciens à temps plein, le tout représente donc une masse salariale totale de 212 640\$. Elle produit en moyenne 600 doses par jour, 365 jours par année, totalisant 219 000 doses par année. Le calcul de coût unitaire pour la production en pharmacie est donc de 0,97\$ par seringue. Le calcul du coût unitaire de remplissage des seringues orales par le personnel infirmier présent sur le plancher est un peu plus complexe et nécessite de poser une hypothèse. En effet, aucun membre du personnel infirmier présent sur les unités de soins n'est attribué à temps complet au remplissage des seringues. Cette tâche est ajoutée aux tâches quotidiennes de tous les membres du personnel infirmier. Il faut donc déterminer le temps total impliqué dans cette tâche. Pour ce faire, il faut multiplier le nombre de seringues produites en moyenne par jour par ces professionnels par le nombre de jours dans une année, et ensuite multiplier le résultat par le nombre de minutes nécessaire pour préparer une dose. Le CHU Sainte-Justine estime que 500 doses sont préparées en moyenne chaque jour sur les unités de soins, donc environ 182 500 doses par année. Toujours selon le CHU Sainte-Justine, il faut une minute à un technicien pour préparer une dose de médicament liquide oral lorsqu'il en produit à la chaîne. Par contre, la situation est différente pour le personnel infirmier qui doit se déplacer du lit du patient, jusqu'à la petite pharmacie de l'unité de soins, préparer la dose et ensuite revenir auprès du patient. Une estimation conservatrice du temps moyen nécessaire pour réaliser le tout a été établie à 3 minutes. Les membres du personnel infirmier doivent donc réaliser un total de 9 125 heures de travail par année pour réaliser cette tâche. En travaillant 52

semaines à raison de 35 heures par semaine, l'hôpital embauche 5 professionnels infirmiers à temps complet pour le reconditionnement des médicaments liquides oraux, soit des frais de 445 770\$ sur la masse salariale ou encore 2,44\$ par dose préparée. Le coût total de cette tâche, incluant les techniciens et le personnel infirmier, est donc de 658 410\$ par année. Le tableau 1.2 présente les coûts de production unitaires des seringues orales à l'hôpital Sainte-Justine.

Tableau 1.2 Coût de production des doses de médicaments liquides oraux

	Technicien en pharmacie	Infirmière plancher
Coût moyen	53 160\$	89 154\$
Nombre d'employés	4	5
Coût total	212 640\$	445 770\$
Coût par dose produite	0,97\$	2,44\$

Dans l'optique de rendre le projet financièrement rentable pour le centre hospitalier, il serait appréciable que le coût d'achat du système avoisine les 500 000\$. Le tout permettrait à l'hôpital d'atteindre le point de rentabilité en moins d'un an. Du côté de la fabrication du système lui-même, les coûts devraient avoisiner les 200 000\$, permettant d'atteindre une marge de profit brute de 60 %, laissant ainsi une certaine marge de manœuvre pour les frais de gestion, les frais de justice, les frais de vente, etc.

1.4.6 Autres hôpitaux pédiatriques canadiens

Des rencontres ont aussi été organisées avec d'autres hôpitaux pédiatriques de l'Est du Canada. Le Montreal Children's Hospital, le CHUL Mère-Enfant de Québec et le Sick Kids de Toronto ont été visités dans le but de comparer les méthodes de travail, les besoins et l'intérêt des dirigeants par rapport à un projet d'automatisation de la préparation des seringues orales.

Les rencontres ont permis de constater que les méthodes employées dans ces différents centres pédiatriques étaient similaires et que leurs besoins l'étaient tout autant. Les quatre centres visités, en incluant le CHU Sainte-Justine, vivent sensiblement les mêmes problèmes en ce qui concerne 1. le remplissage des seringues, soit l'augmentation continue des coûts qui y sont

reliés, 2. la difficulté à trouver et retenir la main-d'œuvre qualifiée pour réaliser cette tâche ainsi que 3. l'apparition de problème de santé physique lorsque ce travail est effectué sur une trop longue période. Les besoins en matière de capacité de production des trois hôpitaux québécois sont comparables. De son côté, le centre de Toronto nécessiterait une capacité de production pouvant atteindre 2000 doses par jour.

1.5 Anciens projets

Le pharmacien Jean-Marc Forest est l'instigateur du projet. Il s'associe dès le début des années 2000 avec un professeur et un groupe d'étudiants de la Polytechnique Montréal afin d'élaborer un système automatisé pour les seringues orales. Un concept impliquant de nombreux cylindres de verre où seraient déversés les médicaments liquides est présenté. Un système de tuyauterie et de pompe est rattaché aux cylindres afin d'injecter le liquide dans les seringues orales. Des signaux d'alarme se font rapidement entendre du côté de l'hôpital. Plusieurs médicaments peuvent être d'apparence très similaire, il serait donc impossible de déterminer si un technicien a commis une erreur lors du remplissage des cylindres. De plus, l'utilisation de pompe et de tuyauterie augmente les risques de contamination et le temps de nettoyage. Le projet est donc rejeté.

M. Forest revient à la charge quelques années plus tard et propose à l'ÉTS le projet. Ilian Bonev, responsable de la chaire de recherche canadienne en robotique de précision, le prend donc en charge. Frédéric Gagné réalise en 2009 un premier projet de simulation de l'automatisation de la tâche de remplissage. Comme ses collègues qui poursuivront le projet, il se limite aux étapes de manipulation des bouteilles et des seringues, ne prenant pas en charge les étapes de bouchonnage, étiquetage et ensachage. Son concept utilise un robot cartésien, un préhenseur parallèle et un système de vision artificiel (Gagné, 2009). La figure 1.42 présente la modélisation du système.

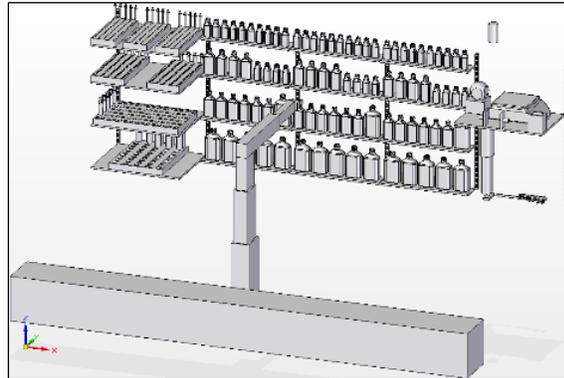


Figure 1.42 Modélisation d'un système de remplissage de seringues orales
Tirée de Gagné (2009)

La même année, Maxime Théberge, réalise une preuve de concept pour le remplissage des seringues orales en utilisant un bras robotisé sériel de la compagnie ABB. La démonstration est fonctionnelle et remplit avec précision les seringues. Le temps nécessaire pour la tâche est de 90 secondes. Un technicien est nécessaire pour alimenter le système et réaliser le bouchonnage, l'étiquetage et l'ensachage des produits (Théberge, 2010).

En 2010, Karim Kalafate reprend le projet de M. Théberge afin d'en améliorer les performances. Une vidéo disponible sur le site YouTube présente la preuve de concept (CoRo ÉTS, 2010). Le temps de remplissage est alors réduit, atteignant environ 45 secondes. Tout comme pour le projet de M. Gagné et M. Théberge, un technicien est nécessaire pour les tâches subséquentes au remplissage. La figure 1.43 présente le robot IRB 1600 de ABB effectuant une tâche de remplissage de seringue de médicament oral.

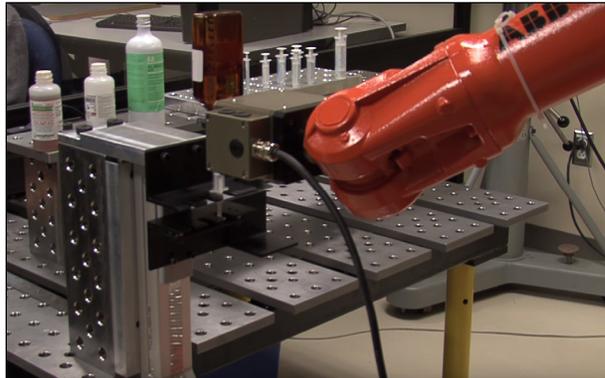


Figure 1.43 Preuve de concept d'un système
de remplissage de seringues orales fait par
Karim Kalafate
Tirée de Coro ÉTS (2010)

CHAPITRE 2

SYSTÈME DE MANIPULATION

2.1 Cadre théorique

La cellule de remplissage de seringues de médicaments liquides oraux est constituée de plusieurs systèmes travaillant de concert pour réaliser la tâche. Le présent chapitre aborde le système de manipulation et les sous-systèmes qui le composent. Les sous-systèmes de manipulation incluent toutes les pièces permettant de déplacer des objets dans la cellule, que ce soit les seringues, les bouteilles, etc. Les trois principaux sous-systèmes sont donc 1) les bras robotisés, 2) les systèmes de préhension et 3) la structure de la cellule procurant, aux robots et aux préhenseurs, un environnement de travail.

2.1.1 Structure de la cellule

La structure de la cellule peut être définie comme étant le squelette supportant les différents éléments du système. Les bras robotisés font partie des éléments les plus importants du système, la structure doit donc être en mesure de leur offrir un positionnement adéquat dans l'aire de travail et doit être assez rigide pour accepter les efforts provoqués par leurs accélérations et leurs décélérations. En plus de supporter les robots, la structure doit offrir assez d'espace de travail pour accueillir les différentes matières premières (bouteilles de médicament et seringues orales) et les différents consommables (étiquettes, sacs, bouchons). Elle doit aussi être en mesure d'accueillir les différents équipements nécessaires au remplissage, au bouchonnage, à l'étiquetage et à l'ensachage.

2.1.2 Robot

Les bras robotisés sont les composantes maîtresses de la cellule. Ils sont utilisés pour toutes les tâches nécessitant la manipulation des bouteilles de médicament et de seringues orales. ISO (the International Organization for Standardization) définit un robot industriel comme étant un

« manipulateur, multi-application et reprogrammable, commandé automatiquement, programmable sur trois axes ou plus, qui peut être fixé sur place ou mobile, destiné à être utilisé dans des applications d'automatisation industrielle » (ISO, 2018).

Les robots industriels sont séparés en plusieurs grandes familles ; les robots sériels, parallèles, cartésiens, etc. Les robots sériels sont composés, au minimum, de trois joints rotatifs. La majorité des robots industriels sériels possèdent six articulations rotatives et six degrés de liberté. La figure 2.1 présente trois éléments des robots sériels : à droite, les articulations rotatives, au centre, l'espace de travail et, à gauche, une photo d'un robot sériel disponible sur le marché (IFR, 2016).

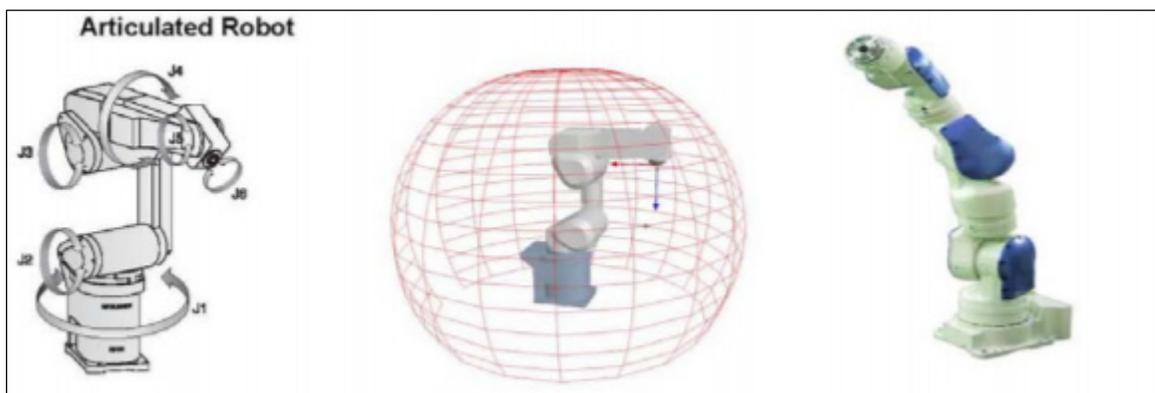


Figure 2.1 Robots de type sériel
Tirée de IFR (2016)

Les robots parallèles, dont les robots Delta, sont composés, au minimum, de deux bras connectés au niveau de l'effecteur et de la base du robot. Le mouvement commun de ces bras permet de positionner un préhenseur selon un système cartésien (X, Y, Z). Un ou plusieurs articulations motorisées peuvent être ajoutées au niveau de l'effecteur afin d'augmenter le nombre de degrés de liberté de ces robots. La figure 2.2 présente un robot parallèle de type Delta (IFR, 2016).

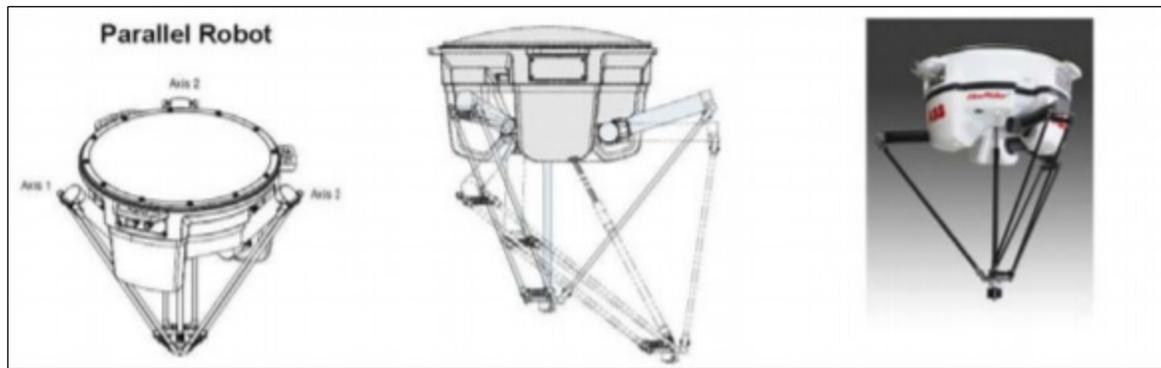


Figure 2.2 Robot parallèle de type Delta
Tirée de IFR (2016)

De leur côté, les robots cartésiens sont composés de guides linéaires leur permettant d'atteindre des positions selon un système de coordonnées cartésien (X, Y, Z). La figure 2.3 présente un robot cartésien typique (IFR, 2016).



Figure 2.3 Robot de type cartésien
Tirée de IFR (2016)

Dans le cadre du présent projet, ces trois types de robots sont tous potentiellement utiles pour l'exécution des différentes tâches.

La sélection des robots utilisés se fera selon plusieurs critères :

La portée : La portée du robot est la distance entre la base du robot et la surface de son enveloppe de travail. L'enveloppe de travail est l'ensemble de la zone atteignable par le centre du poignet du robot (Bonev et Noiseux, 2014). La portée est un critère important de la sélection ; elle doit être suffisamment grande pour inclure tous les objets à manipuler et aussi petite que

possible afin de minimiser le coût d'achat du robot. En effet, le prix d'achat d'un robot industriel est généralement proportionnel à la grosseur de celui-ci et donc de sa portée.

La charge utile : La charge utile est la charge maximale qui peut être attachée ou supportée par le poignet du bras robotisé. Cette charge est la combinaison du poids de l'outil et du poids de ce qui est transporté par le robot. La charge utile du robot doit donc être supérieure à la charge nécessaire pour réaliser les tâches.

Précision et répétabilité : La répétabilité est définie comme une mesure de la reproductibilité de la même pose du robot, pour la même consigne de positions articulaires. La précision d'un robot décrit la capacité du robot à atteindre une pose commandée (Olabi, 2011). La figure 2.4 démontre la différence entre la précision et la répétabilité d'un robot.

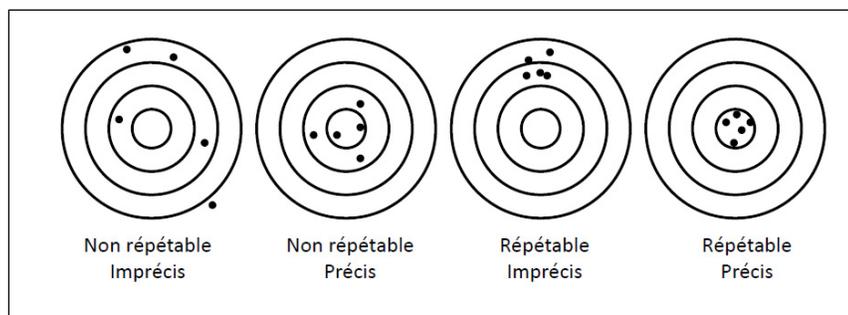


Figure 2.4 Différence entre la précision et la répétabilité
Tirée d'Olabi (2011)

Prix : Le coût d'achat des bras robotisés est un critère directement en lien avec l'atteinte de l'objectif de réduction des coûts de préparation des doses de médicaments liquides oraux. Il doit être minimisé, mais permettre l'atteinte des autres critères de sélection. La qualité et la fiabilité du produit final ne doivent pas être sous-estimées au profit d'une réduction de coût.

Vitesse (linéaire et angulaire) : Un dernier critère est régulièrement employé lors de la sélection d'un robot, soit la vitesse de travail de celui-ci. La vitesse linéaire d'un robot est la vitesse maximum avec laquelle il peut se déplacer d'un point à un autre en traçant une ligne droite entre les deux points. La vitesse angulaire, quant à elle, est la vitesse de rotation des différentes articulations du robot. Dans le cas du présent projet, le temps de déplacement du robot n'affecte pas de façon significative le temps de cycle du système. Ce critère peut donc être négligé.

2.1.3 Préhenseur

Les systèmes de préhension sont des éléments cruciaux dans l'élaboration de la cellule automatisée. Il est important de bien évaluer la stratégie de préhension, la méthode de préhension, les types de préhenseurs et de concevoir des doigts adaptés aux trois éléments précédents.

Ces systèmes mécaniques sont nommés préhenseur et ils sont définis de la façon suivante :

Les préhenseurs sont des sous-systèmes d'un mécanisme de manutention permettant un contact temporaire avec un objet à être saisi. Ils assurent la position et l'orientation lors du déplacement et de l'assemblage de l'objet à l'équipement de manutention. La préhension est effectuée par application de force et par imitation de la forme d'un élément [Traduction libre] (Monkman, Hesse, Steinmann & Schunk, 2007, p.2).

Afin de créer un système de préhension efficace, il est important d'élaborer un plan de préhension complet incluant toutes les composantes. Selon Monkman & al. 2007, les propriétés de l'emplacement de la préhension sont cruciales. Elles peuvent se résumer en ces cinq caractéristiques :

1. le point de préhension fixe ;
2. le point de préhension migratoire ;
3. le point de préhension oscillant ;
4. le point de préhension inconnu qui doit être déterminé par la perception sensorielle ;
5. le point de préhension tridimensionnel inconnu.

En plus de déterminer l'emplacement de préhension, il faut prendre en considération l'accessibilité à ce point de préhension. Le préhenseur doit avoir l'espace nécessaire pour se mouvoir sans entrer en collision avec des éléments de la cellule. Le choix du robot utilisé influence grandement cet aspect. Un robot ayant six degrés de liberté peut atteindre toutes les positions et toutes les orientations dans son enveloppe de travail.

Pour saisir une pièce à l'aide du préhenseur, deux stratégies sont possibles :

1. une stratégie prédéterminée, dans laquelle les opérations sont préprogrammées ;
2. une stratégie variable, dans laquelle les opérations sont définies, mais sont adaptables aux différentes situations en fonction des informations remises par des capteurs.

Une stratégie de préhension variable oblige le préhenseur ou le système automatisé à se doter de capteurs. Ceux-ci permettent de connaître la position de l'objet à saisir et sa stabilité pendant la manipulation. Les systèmes de vision artificielle peuvent aider à ce type de tâche.

Les difficultés liées à la stratégie de préhension dépendent généralement de l'état (position et orientation) de l'objet à saisir. De plus, certains objets présentent des surfaces qui sont proscrites pour la prise. Cela peut être causé par la fragilité de la pièce ou encore par le besoin d'accès à cette surface durant les manipulations.

Pour déterminer la bonne stratégie de préhension, les zones suivantes doivent être établies sur l'objet à manipuler : zone proscrite, zone réservée, zone de préhension et zone de support. La zone réservée (déjà tenue par un autre système de préhension) et la zone de support ne doivent pas chevaucher la zone de préhension déterminée pour la prochaine prise. De plus, la zone de préhension doit se situer aussi près que possible du centre de masse de l'objet.

Il existe quatre (4) méthodes de préhension : par contact, par déformation, par adhésion et à distance :

1. « Un préhenseur par contact est un préhenseur mécanique où la préhension est effectuée par une force impactant l'objet à manipuler » [Traduction libre] (Monkman et al., 2007, p.6). La méthode par contact requiert le mouvement d'une mâchoire solide pour produire la force nécessaire à la prise d'un objet.
2. « Un préhenseur par déformation utilise la pénétration de la surface de l'objet par le préhenseur. La pénétration de l'objet peut être intrusive (pointes) ou non intrusive (anneau et crochet) » [Traduction libre] (Monkman et al., 2007, p.6).
3. « Un préhenseur par adhésion utilise le contact direct entre le préhenseur et la surface de l'objet à manipuler afin de produire une force d'adhésion entre eux. Les adhésifs chimiques et thermiques font partie de cette catégorie » [Traduction libre] (Monkman et al., 2007, p.5).
4. « Un préhenseur à distance utilise une force de liaison entre le préhenseur et l'objet à manipuler qui est produite par un champ. Le champ peut prendre la

forme d'un mouvement d'air, de magnétisme ou de déplacement de charge électrostatique » [Traduction libre] (Monkman et al., 2007, p.3). La méthode à distance, que ce soit magnétique, vide d'air ou électrostatique, utilise un champ de force pour créer une adhésion avec un objet, mais ne nécessite pas nécessairement un contact initial entre le préhenseur et l'objet (Monkman et al., 2007).

Chacune des méthodes de préhension possède ses avantages et ses inconvénients. Le tableau 2.1 présente les usages typiques pour chacune des méthodes.

Tableau 2.1 Différentes méthodes de préhension et les usages typiques

Méthode de préhension	Type de préhenseur	Matière composant l'objet
Par contact		Objets rigides
Par déformation	Intrusive	Objets flexibles
	Non intrusive	Objets flexibles
À distance	Vide d'air	Matériel rigide et non poreux
	Adhésion magnétique	Matériel ferreux
	Adhésion électrostatique	Matériel en feuille léger et micropièces
Par adhésion	Thermique	Objets flexibles
	Chimique	Fibre de carbone imprégné
	Tension de surface	Micropièces

Dans le cadre du présent projet, seules les méthodes par contact et à distance sont considérées. En effet, les objets qui seront pris, dans le présent projet, sont faits en matière répondant davantage à ces types de préhension (rigide et non poreux).

En plus des différents types de préhenseur disponibles, plusieurs conceptions mécaniques peuvent être mises en place pour chacun de ces types. Par exemple, un préhenseur par contact peut être conçu de façon à ce que ses mâchoires se déplacent parallèlement ou en effectuant un mouvement de rotation. La figure 2.5 présente un préhenseur angulaire et un préhenseur parallèle.

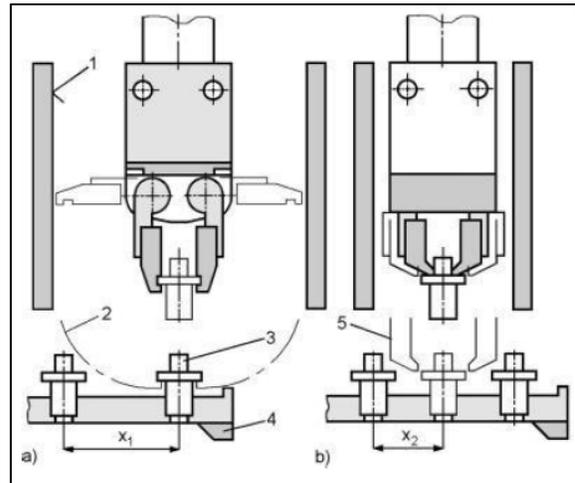


Figure 2.5 Présentation d'un préhenseur angulaire et d'un préhenseur parallèle
Tirée de Monkman et al. (2007)

La figure 2.5 démontre que l'espace de travail nécessaire pour l'activation d'un préhenseur angulaire est plus important que celui pour un préhenseur parallèle. Il est nécessaire de tenir compte de cette caractéristique lors de la mise en place de la stratégie de préhension. En contrepartie, le préhenseur angulaire offre une distance de course plus grande que le préhenseur parallèle pour un boîtier de préhenseur de taille similaire.

En dehors de l'espace de travail et de la distance de course, la conception mécanique d'un préhenseur par contact influence la position d'un objet à manipuler lorsque celui-ci est saisi. Cette situation a un impact important lors de la manipulation d'objets sphériques ou cylindriques dont le diamètre est variable. La figure 2.6 présente la position de l'axe central de deux cylindres de diamètres différents en fonction de la méthode mécanique de préhension utilisée.

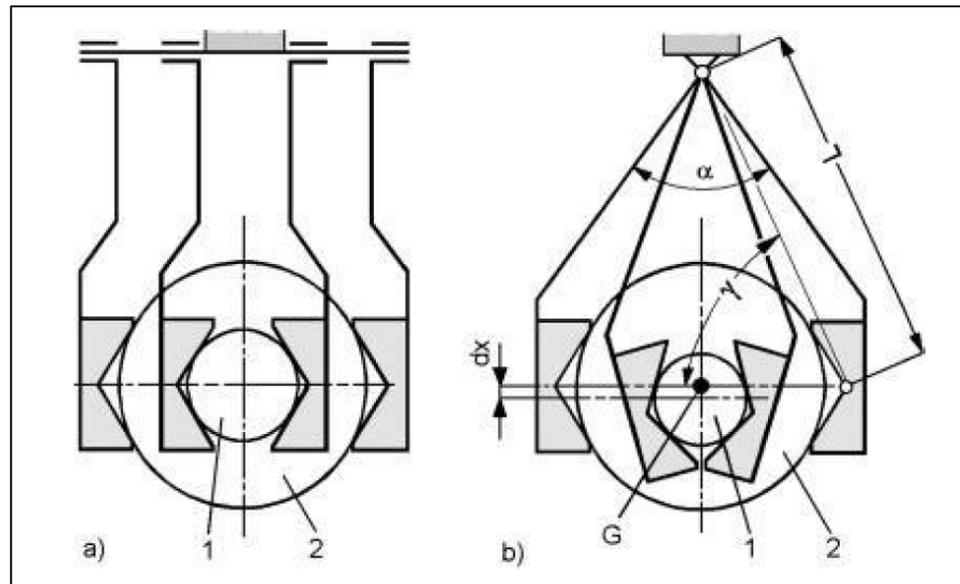


Figure 2.6 Positionnement d'un objet cylindrique manipulé par un préhenseur parallèle et un préhenseur angulaire
Tirée de Monkman et al. (2007)

Avec ses informations, il est possible de constater que pour conserver une position de prise constante lors de la manipulation d'objets cylindriques de tailles variées, un préhenseur parallèle est de mise. Cet aspect est encore plus important lorsque les doigts du préhenseur ont une forme prismatique.

2.2 Méthodologie

2.2.1 La structure de la cellule

La conception de la structure de la cellule est un processus itératif. En effet, le choix des dimensions et de l'aménagement de la machine influencera le choix du robot, qui à son tour influencera le positionnement des équipements et influencera à nouveau les dimensions et l'aménagement de la machine.

Il est tout de même nécessaire de débiter le processus en définissant certaines hypothèses en lien avec l'espace nécessaire pour stocker les différentes matières premières, les différents consommables ainsi que les différents équipements nécessaires. Il est aussi nécessaire de poser certaines hypothèses en lien avec l'environnement de travail, par exemple une hauteur et une largeur maximum afin de pouvoir déplacer le système dans un hôpital. Ces hypothèses permettront de déterminer des dimensions de base utiles à la sélection du robot.

2.2.2 Les bras robotisés

La première étape de la sélection consiste à identifier les différents robots susceptibles de remplir les tâches de manipulation requises. Le type de robot à utiliser (sériel, parallèle, cartésien, etc.) devra tout d'abord être déterminé. Il est ensuite possible d'identifier les différents fournisseurs potentiels ainsi que les modèles de robot que chacun d'eux offre.

La seconde étape consiste à évaluer les bras robotisés grâce à une matrice de sélection. Cette méthode éprouvée de gestion de projet est présentée dans le PMBoK 2009 (Project Management Institute, 2009). Elle consiste à déterminer les différents critères de sélection et à leur donner un poids décisionnel. Par la suite, il faut insérer les différentes spécifications des robots évalués dans la matrice de sélection afin de déterminer, objectivement, l'appareil convenant le mieux au projet.

2.2.3 Le système de préhension

En plus du préhenseur lui-même, plusieurs autres composantes doivent être ajoutées afin d'effectuer les tâches de manutention. Les doigts du préhenseur font partie de ces composantes.

Leur conception est directement reliée à la stratégie de préhension établie au début du processus et à la forme de l'objet à manipuler.

La conception des doigts commence par la sélection du nombre de points de contact requis pour la prise. Un nombre plus élevé de points de contact améliore la répartition de la force de préhension. Parallèlement, un trop grand nombre de points peut surcontraindre l'objet et fausser son positionnement. La figure 2.7 présente le nombre de points de contact entre chacune des trois géométries les plus communes et les doigts du préhenseur.

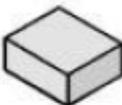
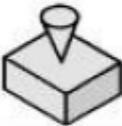
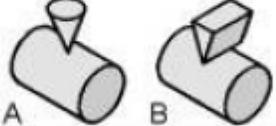
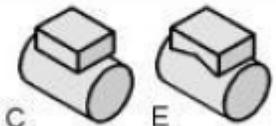
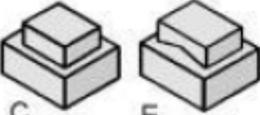
k	Object form		
	cuboid	cylinder	sphere
			
1			
2			
3			

Figure 2.7 Représentation du nombre de points de contact des trois formes géométriques les plus communes
Tirée de Monkman et al. (2007)

Le nombre de doigts utilisés pour la préhension affecte aussi la stabilité de la pièce. La conception des doigts doit prendre ce fait en considération. La figure 2.8 démontre le nombre de points de contact sur un objet en fonction du nombre et de la forme des doigts utilisés.

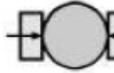
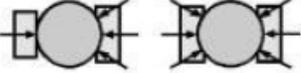
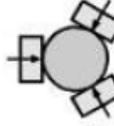
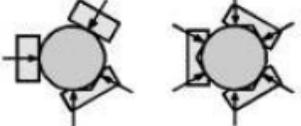
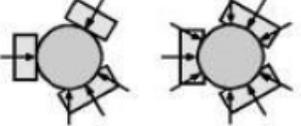
	single point contact	two point contact	multi-point contact
1 finger gripper			
2 finger gripper			
3 finger gripper			

Figure 2.8 Démonstration du nombre de points de contact en fonction du nombre et de la forme des doigts utilisés
Tirée de Monkman et al. (2007)

De larges surfaces de contact actives, entre les doigts et l'objet à déplacer, augmentent la stabilité de la prise. L'imitation, par la forme des doigts, de la surface de la zone de préhension, est une bonne façon d'augmenter la surface de contact active (Monkman et al, 2007).

En plus de la stabilité de la prise, la forme des doigts influence aussi le nombre de degrés de liberté permettant à la pièce de potentiellement bouger. Si l'objet possède encore des degrés de liberté une fois la prise effectuée, la stabilité de la prise devra être compensée autrement. La force de friction provoquée par le contact entre les doigts du préhenseur et la surface de l'objet permettra de limiter les mouvements potentiels. La figure 2.9 donne des exemples de forme de doigts et le nombre de degrés de liberté restant pour une géométrie d'objet donnée.

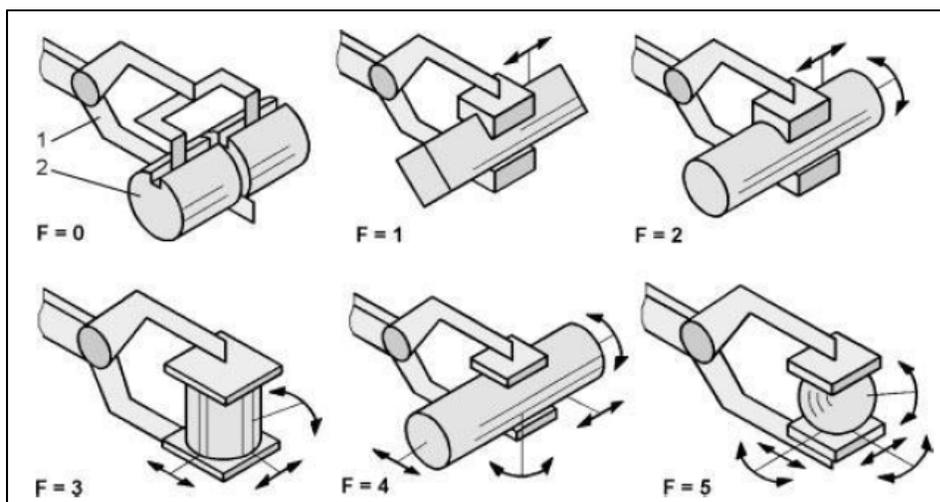


Figure 2.9 Exemple de formes de doigts et degrés de liberté
Tirée de Monkman et al. (2007)

La géométrie retenue pour les doigts peut aussi affecter le choix du préhenseur, particulièrement au niveau d'un préhenseur parallèle. La distance de cours nécessaire est directement liée à la stratégie de préhension et à la forme des doigts. La figure 2.10 montre la distance de course nécessaire pour un préhenseur parallèle manipulant un objet cylindrique considérant une forme de doigts prismatiques en fonction du type d'approche utilisé (axiale ou radiale).

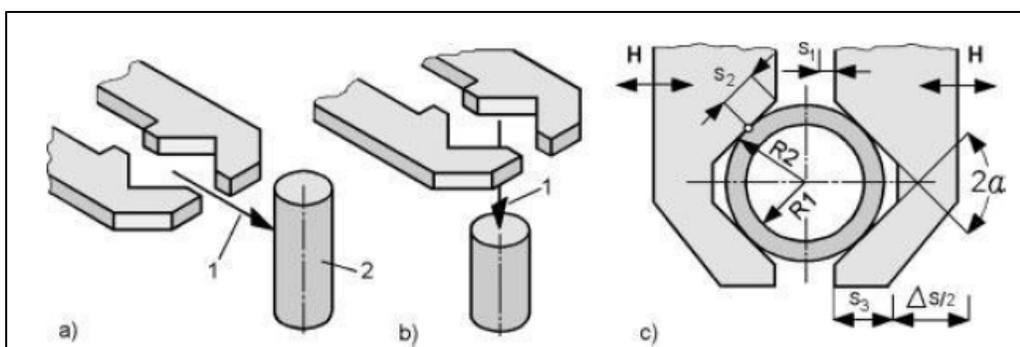


Figure 2.10 Type d'approche pour la prise d'un objet cylindrique
Tirée de Monkman (2007)

L'utilisation de préhenseur est largement répandue dans le milieu industriel. Son utilisation est encore plus marquée au niveau des systèmes robotisés. Ils permettent à des bras robotisés, ayant des avantages importants comme la flexibilité, la vitesse et la répétabilité, d'entrer en

interaction avec d'autres éléments physiques. Ils sont installés au bout du poignet du robot et deviennent un prolongement de celui-ci.

Dans la majorité des cas, il est nécessaire de concevoir une bride de montage afin d'installer le préhenseur sur le poignet du robot. Cette bride de montage doit fixer solidement le préhenseur avec le robot pour en assurer la précision, sans pour autant nuire à son espace de travail. En plus de fixer le préhenseur en place, la bride de montage peut jouer plusieurs rôles. Elle peut être équipée de capteurs de force, pour détecter une collision de l'outil. Elle peut aussi donner une marge de manœuvre à certaines tâches du préhenseur, par exemple une insertion. Finalement, elle peut aussi servir de changeur d'outils.

Une fois les dimensions du préhenseur et de la bride de montage connus, elles sont transmises au contrôleur du robot afin de calculer le référentiel de l'outil. Ce référentiel est nommé le TCP (Tool Center Point). Il est positionné au point central d'utilisation de l'outil, dans le cas présent un préhenseur. La figure 2.11 présente une illustration simplifiée d'un préhenseur parallèle attaché au poignet d'un robot. Le référentiel du TCP est positionné au centre des doigts du préhenseur et l'axe des Z du TCP est aligné avec l'axe des Z du référentiel du poignet du robot. Le référentiel du TCP peut être modifié selon les besoins du programmeur. Cependant, les conclusions et discussions, du présent rapport, seront faites en fonction du référentiel de TCP présenté ci-dessous.

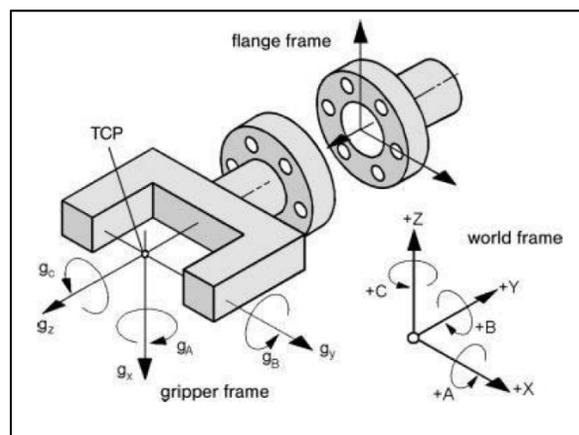


Figure 2.11 Modélisation d'un préhenseur et d'un bras de robot
Tirée de Monkman et al. (2007)

2.3 Résultats et analyse

2.3.1 Structure de la cellule

La première étape consiste à poser certaines hypothèses en lien avec l'espace de travail disponible dans un hôpital. Les premières limitations rencontrées sont la hauteur et la largeur maximum afin que le système puisse traverser les portes doubles des corridors des hôpitaux. La hauteur maximum des portes présente au CHU Sainte-Justine est de 2 030 mm et la largeur est de 1 830 mm. La seconde hypothèse est en lien avec l'espace nécessaire pour stocker la centaine de bouteilles de médicaments liquides oraux. Considérant l'espace de travail d'un robot industriel généralement sphérique ou cylindrique, il est avantageux de disposer les bouteilles en suivant la surface d'une de ces formes. Afin de simplifier l'analyse, l'enveloppe de travail cylindrique est employée. Il est à noter qu'au maximum 40 % de l'enveloppe de travail cylindrique d'un robot peut être réservé pour l'entreposage des médicaments, le 60 % restant devant être utilisé pour les différentes tâches de remplissage et manipulations. Les bouteilles mesurent en moyenne 100 mm de largeur et 140 mm de hauteur, leur aire est donc en moyenne de 14 000 mm². Le stockage doit donc avoir, au minimum, une aire de 1 400 000 mm² et la surface de l'espace de travail du robot une aire minimum de 3 500 000 mm². La formule permettant de calculer l'aire de la partie courbée d'un cylindre est :

$$Aire = 2\pi rh \quad (2.1)$$

où r est le rayon du cylindre et h est la hauteur du cylindre.

La variable h peut être déterminée en soustrayant de la hauteur maximum de la structure, l'épaisseur de la structure elle-même ainsi qu'un espace au niveau du sol pour accueillir les différents contrôleurs et autres pièces mécaniques cachés aux yeux des opérateurs. La hauteur de cet espace au sol est arbitrairement établie à 750 mm et l'épaisseur de la structure à 200 mm. La variable h est donc égale à 1 080 mm. La formule suivante permet donc de trouver le rayon du cylindre. Cette donnée représente la portée minimum d'un robot dont l'espace de travail est cylindrique.

$$Ar = \frac{Aire}{2\pi h} \quad (2.2)$$

$$r = \frac{3500000}{2\pi * 1080} \quad (2.3)$$

$$r \cong 516 \text{ mm} \quad (2.4)$$

La figure 2.12 est une représentation simplifiée de l'espace nécessaire pour stocker les différentes bouteilles ainsi que l'espace de travail cylindrique qui s'y rattache. Les rectangles de couleur représentent l'aire requise pour entreposer une bouteille.

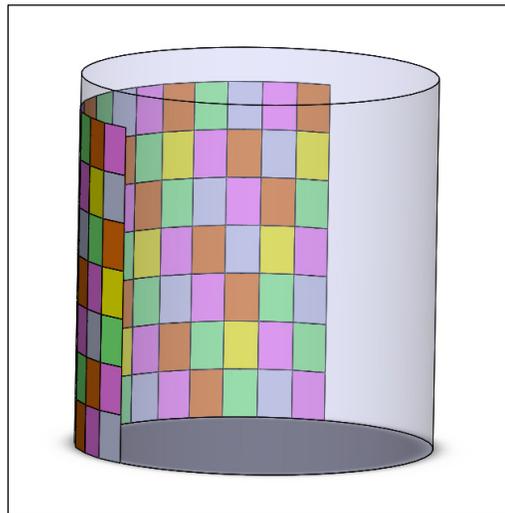


Figure 2.12 Représentation simplifiée de l'espace de travail nécessaire au stockage des bouteilles.

Pour maximiser l'efficacité de la cellule, deux bras robotisés seront utilisés ; le premier est responsable de la gestion des bouteilles de médicament et le second est responsable de la gestion des seringues. Une zone centrale est réservée pour le remplissage des seringues et est partagée entre les espaces de travail des deux robots. Afin d'utiliser au maximum l'espace disponible dans la cellule, les robots seront fixés au plafond de la cellule. La figure 2.13 présente les différentes composantes de la cellule et leurs dimensions approximatives.

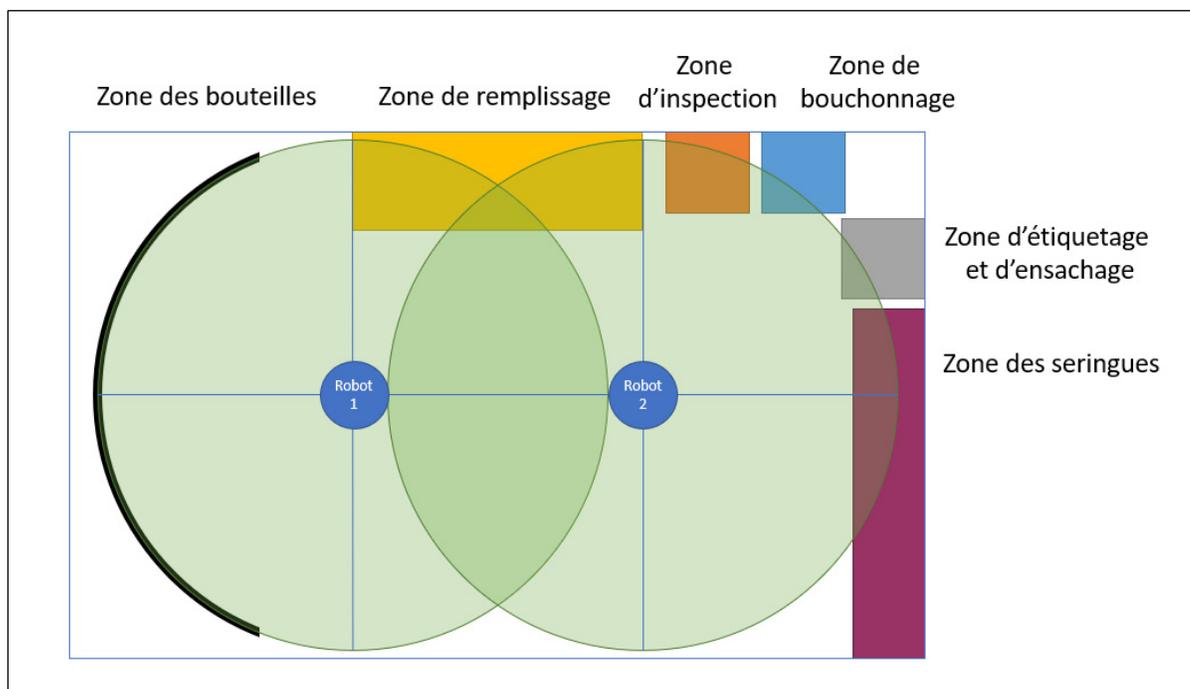


Figure 2.13 Plan d'aménagement initial

Pour la phase de prototypage, une structure en aluminium assemblée fournie par la compagnie montréalaise Vention est utilisée (Vention, 2018). La figure 2.14 présente la structure.



Figure 2.14 Structure d'aluminium fournie par la compagnie Vention

2.3.2 Robot

Comme mentionné dans la section méthodologie de ce chapitre, la première étape de sélection d'un robot industriel consiste à déterminer le type de robot employé. Considérant les limitations au niveau de l'orientation des poses des robots parallèles, des robots SCARA et des robots cartésiens, un robot de type sériel est à préconiser. Afin de pleinement exploiter la flexibilité des robots sériels, les bras devront avoir au minimum six degrés de liberté (ddl).

Plusieurs compagnies œuvrent dans le domaine de la robotique industrielle, il serait excessivement long d'en présenter la liste complète. De ce fait, seuls quatre des fabricants les plus connus ont été abordés : ABB, KUKA, FANUC et YASKAWA.

La seconde étape consiste à sélectionner, parmi les fabricants retenus, les modèles de robot pouvant répondre aux besoins du projet. De façon générale, les fabricants de robots industriels classent leurs produits selon la portée et la charge utile. Il a été précédemment déterminé que la portée minimum des robots, selon un espace de travail cylindrique, est de 516 mm. En revanche, l'enveloppe de travail d'un robot de type sériel est plus près d'une sphère que d'un cylindre. De ce fait, le cylindre précédemment calculé doit être en mesure d'entrer complètement dans l'enveloppe de travail du robot. La figure 2.15 présente cette situation et les dimensions de l'espace de travail nécessaire.

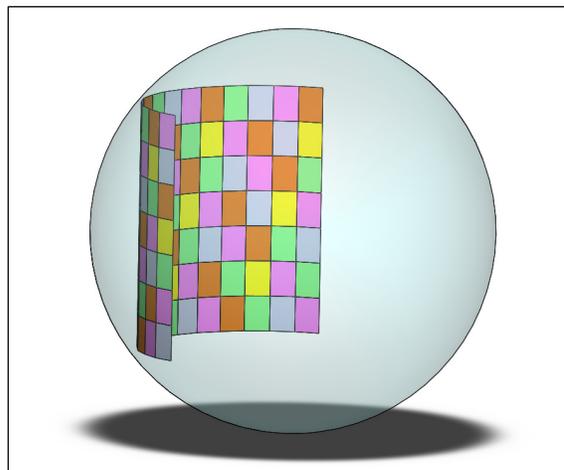


Figure 2.15 Espace de travail sphérique nécessaire au stockage des bouteilles.

Il en découle donc que la portée minimum pour un robot sériel est de 800 mm. En ce qui concerne la charge utile, la plus grosse bouteille présente au CHU Sainte-Justine a un volume de 1 litre. La densité du volume qu'elle contient est semblable à la densité de l'eau, soit 1 kg/litre. La charge utile du robot doit donc se trouver au-dessus de 1 kilogramme.

Le premier robot évalué sera le IRB1200-5/0.9 de la compagnie ABB. La figure 2.16 présente le robot (ABB, 2018).



Figure 2.16 Le robot sériel
IRB1200-5/0.9 de ABB
Tirée de ABB (2018)

Le second robot, le KR 6 R900 sixx HM-SC de la compagnie KUKA, est présenté à la figure 2.17 (KUKA, 2018).



Figure 2.17 Le robot sériel KR
6 R900 sixx HM-SC de KUKA
Tirée de KUKA (2018)

Le troisième robot évalué est le LR Mate 200iD/7LC fabriqué par FANUC. Il est présenté sur la figure 2.18 (FANUC, 2018).



Figure 2.18 Le robot sériel LR
Mate 200iD/7LC de FANUC
Tirée de KUKA (2018)

Pour terminer, le robot GP7 de YASKAWA sera évalué. La figure 2.19 le présente (YASKAWA, 2018).



Figure 2.19 Le robot sériel GP7
de YASKAWA
Tirée de KUKA (2018)

Le tableau 2.2 consolide les différentes caractéristiques des robots en évaluation. Les caractéristiques évaluées sont celles présentées dans la section 2.1.1 du présent document.

Tableau 2.2 Comparaison des caractéristiques des robots sériels en évaluation

Fabricant	ABB	KUKA	FANUC	YASKAWA
Modèle	IRB1200-5/0.9	KR 6 R900 sixx HM-SC	LR Mate 200iD/7LC	GP7
Image				
Porté	900 mm	900 mm	911 mm	927 mm
Charge utile	5 kg	6 kg	7 kg	7 kg
Répétabilité	0.025 mm	0.030 mm	0.030 mm	0.030 mm
Poids	54 kg	62 kg	27 kg	34 kg
Prix	24 300 \$US	26 000 \$US	25 000 \$US	23 500 \$US
Proposition de financement	- 18 versements mensuels de 1 350 \$US - Prêt de deux mois gratuit	Aucune	Aucune	Location de 1 450 \$US/mois
Autre	Connaissance du langage de programmation RAPID	Connaissance du langage de programmation KRL	Connaissance du langage de programmation TPP	Aucune connaissance du langage de programmation IN-FORM
Notes	- Bonne relation entre l'ÉTS et ABB - Main-d'œuvre issue de l'ÉTS formée sur ABB			

Le tableau 2.2 démontre que les caractéristiques de dimensions et de performances des quatre robots sont très similaires. Il en va de même pour les prix, les quatre robots se détaillant entre 23 500 \$US et 26 000 \$US. La réelle différence est présente au niveau de la collaboration de la compagnie et son désir d'investir dans la relève. Dans le cas du projet de ROSP, ABB a été

la compagnie la plus proactive. Elle a offert un prêt gratuit d'un robot IRB1200-5/0.9 pour deux mois pour des tests préliminaires. Elle a aussi offert de financer deux robots IRB1200-5/0.9 neufs à raison de 18 versements mensuels de 2 750 \$US. En plus de cet aspect, ABB entretient déjà de très bonnes relations avec l'ÉTS depuis près d'une dizaine d'années. Les robots utilisés par les étudiants du programme de génie de la production automatisée sont des IRB1600. La main-d'œuvre issue de l'ÉTS est donc déjà à l'aise avec ce produit. À tout cela, il faut ajouter la grande disponibilité et le dévouement de M. Pierre Lavallée, le représentant de ABB robotique au Québec.

Ces différents aspects font donc pencher la balance du côté des robots IRB1200-5/0.9 de ABB. Deux robots de ce type seront utilisés pour le projet.

2.3.3 Préhenseur

Les notions de la littérature seront reprises et mises en pratique pour déterminer la meilleure stratégie de préhension à utiliser, la meilleure méthode de préhension et le meilleur type de préhenseur. Ces informations seront ressorties pour le système de préhension de la preuve de concept ainsi que pour le système de préhension du prototype RO SP 2R-150. Rappelons que les besoins de préhension sont situés au niveau des seringues orales et des bouteilles de médicament. Ceux-ci seront évalués séparément dans cette section.

Les seringues orales

Stratégie de préhension

Étant mentionnés dans la littérature, les éléments à tenir compte lors de l'évaluation de la stratégie de préhension sont les emplacements de préhension, l'espace de travail et la géométrie de l'objet à manipuler. L'emplacement de préhension est souvent tributaire de l'espace de travail et de la géométrie de l'objet. Il sera donc évalué en dernier.

Géométrie des seringues

Les seringues, utilisées dans le processus de préparation des doses de médicaments liquides oraux, sont produites spécifiquement pour cette tâche. Elles sont fabriquées à base de plastique. Contrairement aux seringues intraveineuses qui sont munies d'une aiguille, les seringues orales

sont munies d'une buse permettant le remplissage et l'administration du médicament. La figure 2.20 démontre une seringue orale et ses composantes.

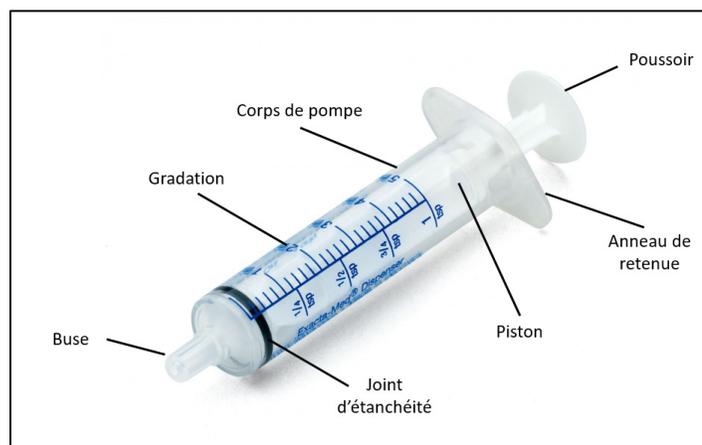


Figure 2.20 Présentation d'une seringue orale et de ses composantes

Les seringues orales, utilisées par les hôpitaux pédiatriques, sont fournies par la compagnie NeoMed et viennent en six volumes différents. Le tableau 2.3 présente les différents volumes disponibles ainsi que les dimensions qui y sont associées.

Tableau 2.3 Présentation des différents volumes de seringue, ainsi que les dimensions reliées.

Volume	Poussoir	Hauteur corps	Diamètre corps	Anneau retenu
1 ml	10 mm	78 mm	7 mm	20 mm
3 ml	14 mm	65 mm	10 mm	25 mm
5 ml	16 mm	68 mm	14 mm	30 mm
12 ml	18 mm	70 mm	15 mm	32 mm
20 ml	20 mm	71 mm	17 mm	34 mm
60 ml	25 mm	90 mm	23 mm	40 mm

Il est à noter que seule la seringue de 1 ml dispose d'une buse qui est centrée sur le corps de pompe. Cette situation amène un niveau de complexité plus élevé au moment de faire l'insertion de la buse dans la bouteille. Ce fait pourrait influencer le choix ou le design des préhenseurs.

Espace de travail

L'espace de travail disponible pour les actions de préhension est défini selon les différents postes de travail visités par l'objet à manipuler. Voici les cinq actions nécessitant la préhension des seringues.

La sortie du chargeur à seringues : Le préhenseur doit prendre la prochaine seringue disponible à la sortie de la chute à seringues. La figure 2.21 représente le chargeur à seringue dans la chute. Les doigts du préhenseur doivent être capables, par leur forme, de corriger en partie une erreur de positionnement de la seringue.

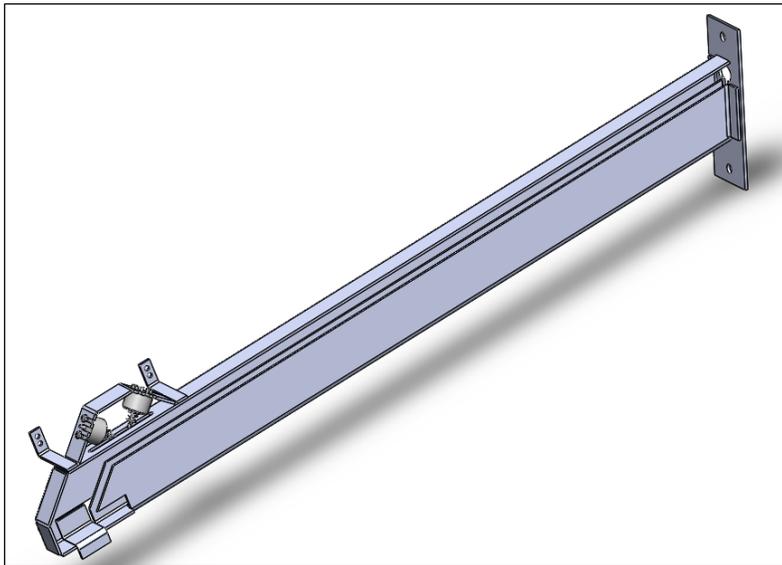


Figure 2.21 Modélisation du chargeur à seringues

La zone de remplissage : Le préhenseur doit insérer la seringue orale, prise dans la chute, dans la bouteille du prochain médicament à préparer. Il doit aussi permettre d'effectuer un mouvement de rotation lors de l'insertion dans la bouteille. Ce mouvement permet d'insérer les seringues de 20 ml et de 60 ml qui sont, autrement, impossibles à insérer en raison de leur buse décentrée. Le préhenseur doit maintenir l'alignement de la seringue et stabiliser la position de la seringue selon l'axe des X. La figure 2.22 présente l'insertion linéaire.



Figure 2.22 Modélisation de l'insertion de la seringue dans la bouteille

Le bouchonnage : Le préhenseur doit permettre la mise en place d'un bouchon obstruant la sortie de la buse de la seringue. Pour se faire, il doit stabiliser la position de la seringue selon l'axe des X et ne pas obstruer la zone de la buse. La figure 2.23 présente la phase de bouchonnage.



Figure 2.23 Modélisation de la phase de bouchonnage

L'étiquetage : Le préhenseur doit passer la seringue au travers du système d'étiquetage. L'étiquette doit être placée de façon à ne pas obstruer ni la position du joint d'étanchéité du piston ni l'échelle de gradation présente sur la seringue à cette position.

L'emballage : Le préhenseur doit prendre le produit fini (seringue remplie, inspectée, bouchonnée et étiquetée) et le déposer dans la chute de l'ensacheuse. Cette tâche n'a pas de requis particulier.

Emplacement de préhension

L'emplacement de préhension, ou zone de préhension, est l'endroit où la force du préhenseur sera appliquée. Les informations recueillies précédemment permettent de réduire la quantité d'options de prise par élimination. La figure 2.24 présente les différentes zones étant proscrites pour la prise.

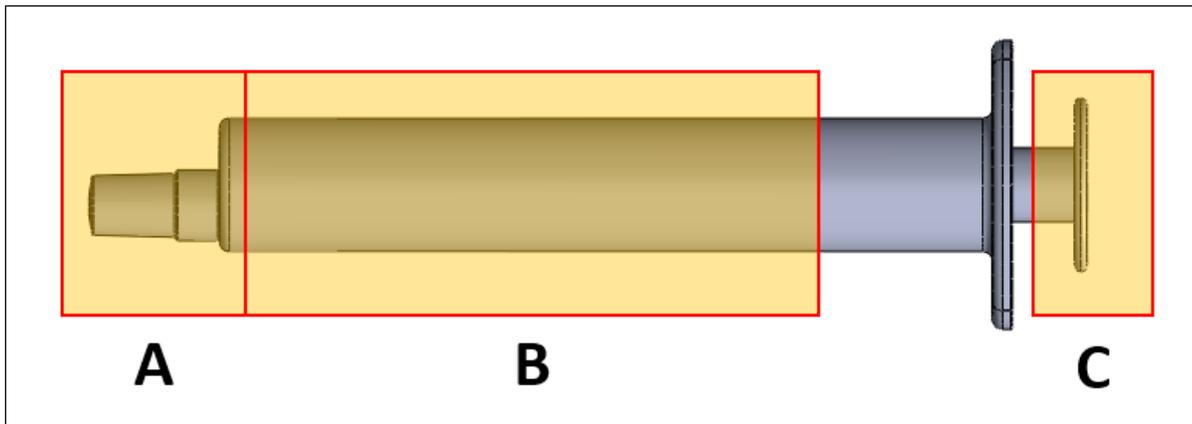


Figure 2.24 Représentation des différentes zones à proscrire pour la prise

La zone A est proscrite, car cet espace est nécessaire pour l'insertion de la seringue dans la bouteille et pour le remplissage. La zone B est proscrite en raison de l'inspection et de l'étiquetage. La zone C, quant à elle, est proscrite, car le piston et le poussoir sont des pièces mobiles et n'auront pas de positions fixes tout au long du processus. Le haut du corps de pompe et l'anneau de retenue englobent la zone de préhension disponible et souhaitable.

Choix de la méthode de préhension et du type de préhenseur

Considérant la rigidité de la matière première composant les seringues, un préhenseur par contact est utilisé pour la manipulation. Il permettra d'appliquer des forces sur la partie cylindrique de la seringue, afin de la retenir et de la positionner.

Considérant que le diamètre extérieur du corps cylindrique des seringues varie de 6 mm à 30 mm en fonction du volume utilisé (entre 1 ml et 60 ml), le préhenseur et les doigts doivent être en mesure de s'adapter. Leur adaptation ne doit pas modifier la position du centre de la seringue. L'axe radial de la seringue doit toujours être confondu avec l'axe des X du « Tool Center Point » (TCP), et ce, peu importe le volume, de la seringue à manipuler.

Deux types de préhenseurs par contact peuvent être utilisés : le préhenseur parallèle et le préhenseur angulaire. Il a été mentionné précédemment que le préhenseur angulaire ne conserve pas la position du centre d'un objet cylindrique si celui-ci est de diamètre variable. Le préhenseur parallèle est donc plus souhaitable pour les tâches à réaliser.

Pour la phase de preuve de concept, le préhenseur parallèle WSG-25 de la compagnie Weiss Robotics est utilisé. La figure 2.25 présente le préhenseur et le tableau 2.4 présente ses spécifications techniques.



Figure 2.25 Présentation du préhenseur parallèle WSG-25
Tirée de Weiss Robotics (2018)

Tableau 2.4 Spécifications techniques du préhenseur parallèle WSG-25

Distance de course	64 mm (32 mm par doigt)
Vitesse de préhension	5-300 mm/s
Force de préhension	5-20 N
Dimensions	100 x 25 x 57 mm (L x B x H)
Poids	320 g
Alimentation	24 V
Interfaces de communication	Ethernet

Conception des accessoires de préhension

Une fois le préhenseur sélectionné, il est nécessaire de concevoir les doigts qui seront en contact avec la surface de la seringue. La conception des doigts est tributaire de la forme de la pièce à manipuler ainsi que des différentes tâches à réaliser. Dans le cas d'une forme cylindrique, il est préférable d'utiliser une forme de doigt prismatique. Celle-ci permet d'assurer un alignement constant entre l'axe radial de la seringue et l'axe des X du TCP. La figure 2.26 présente le concept de doigts proposé pour manipuler les seringues orales de divers volumes.

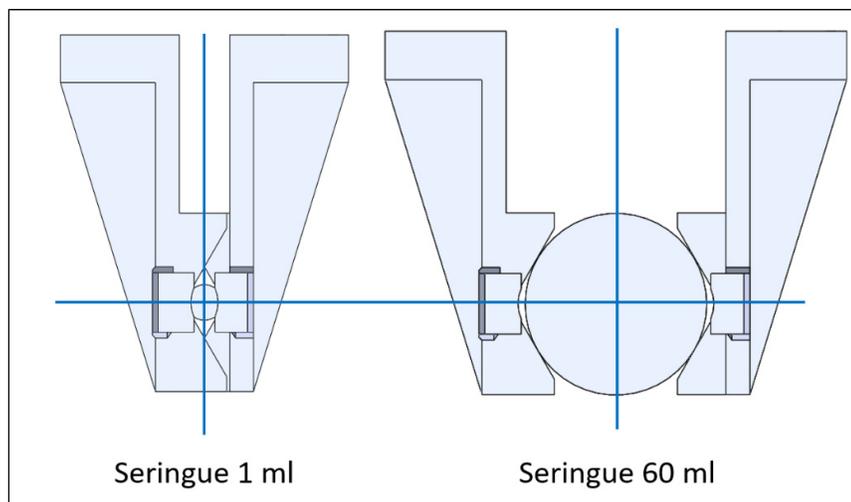


Figure 2.26 Modélisation de la position d'une seringue pour deux volumes différents

Étant donné leur conception, les doigts ont la possibilité de s'engastrer l'un dans l'autre. Cet élément permet une prise constante, peu importe les différents volumes de seringue. La figure

2.27 démontre la position de l'axe radial des six différents volumes de seringues lors de leur manipulation par le préhenseur.

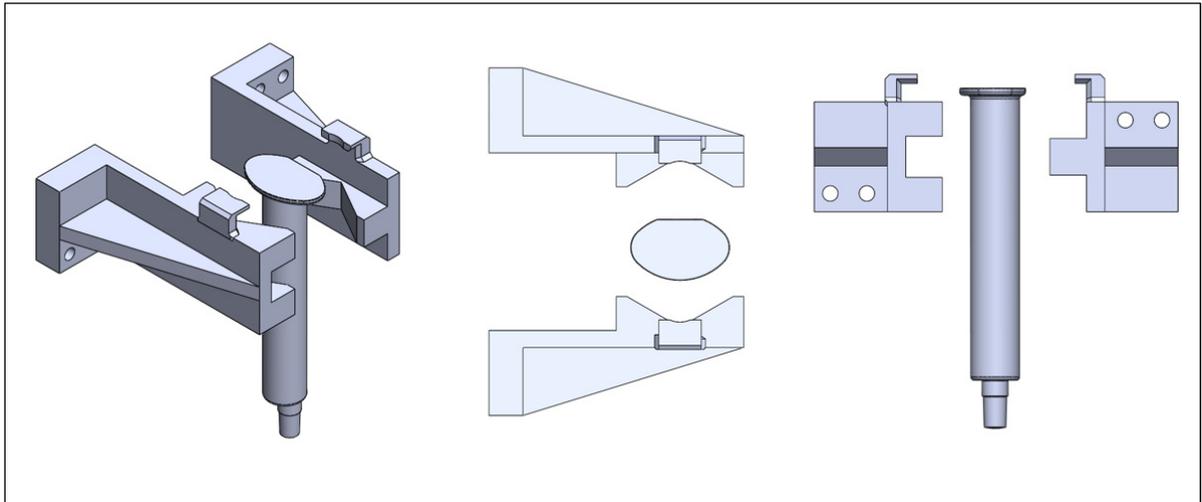


Figure 2.27 Modélisation du concept de doigts proposé pour manipuler les seringues orales

Comme présenté dans le choix de la zone de préhension, l'effort de préhension sera effectué sur la partie cylindrique du haut du corps de la pompe. Les doigts de forme prismatique ne contraignent pas le déplacement de la pièce selon l'axe des Z du TCP. Cette contrainte est nécessaire afin d'assurer un bon positionnement au niveau de l'insertion de la seringue dans la bouteille de médicament et au niveau du bouchonnage. Pour corriger ce problème, une protubérance a été ajoutée dans le haut des deux doigts du préhenseur. Au moment de l'insertion, la seringue prend appui sur les protubérances, limitant ainsi le mouvement du corps de la seringue. La figure 2.28 démontre le processus d'insertion.

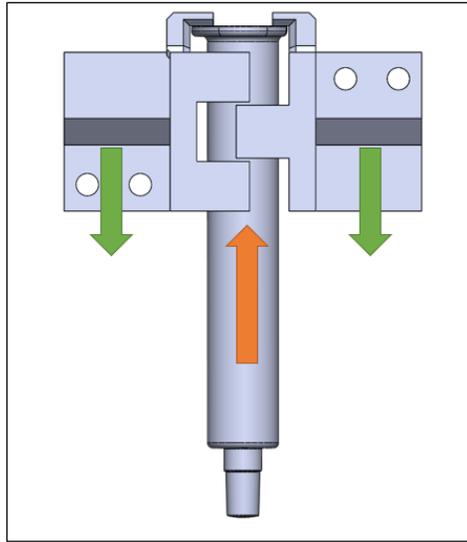


Figure 2.28 Modélisation du processus d'insertion

Il est aussi nécessaire de concevoir la bride de montage du préhenseur en fonction des dimensions du poignet du robot utilisé. La figure 2.29 présente une modélisation de la bride de montage utilisée pour fixer le préhenseur Weiss WSG-25 au robot ABB IRB1200 et la figure 2.30 présente le montage complet du préhenseur, de ses doigts et du robot.

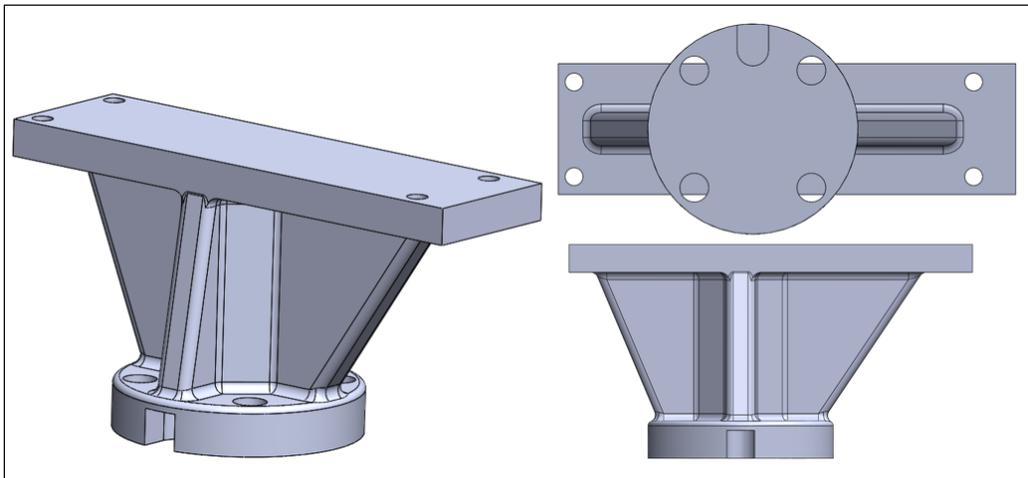


Figure 2.29 Modélisation de la bride de montage pour fixer le préhenseur Weiss WSG-25



Figure 2.30 Montage complet du préhenseur et des doigts de robot (sur un robot KUKA)

Les bouteilles de médicaments liquides

Stratégie de préhension

En suivant la même méthodologie que pour les seringues, la première étape de conception d'un système de préhension est de déterminer la stratégie employée. La géométrie de la pièce, l'espace de travail ainsi que l'emplacement de préhension sont les composantes de cette stratégie.

Géométrie des bouteilles

En attente de leur utilisation, les médicaments liquides sont entreposés dans des bouteilles de plastique. La majorité des médicaments sont achetés directement des fabricants. Ils sont livrés dans des bouteilles de formes et de volumes variés. Une autre partie des médicaments liquides est préparée directement à la pharmacie centrale et est entreposée dans des bouteilles de formes variées achetées à cet effet. La figure 2.31 présente une partie des médicaments utilisés par le CHU Ste-Justine.



Figure 2.31 Entrepôt partiel des médicaments du CHU Ste-Justine

Considérant l'utilisation d'une centaine de médicaments différents quotidiennement, la variété des formes et des volumes de bouteilles rend l'automatisation du processus complexe. L'analyse des formes et des dimensions d'un échantillon de bouteille est donc nécessaire. Le tableau 2.5 répertorie les dimensions de l'échantillon de bouteilles fourni par le CHU Sainte-Justine.

Tableau 2.5 Dimensions importantes de l'échantillon des bouteilles

Échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hauteur	192	100	140	104	93	128	110	99	128	77
Largeur	60	60	66	51	45	70	51	58	57	30
Diamètre du goulot	20	16	21	27	18	32	28	23	17	19
Forme R = Rectangulaire C = Cylindrique	R	C	C	R	C	C	R	R	R	C

De façon générale, les plus grandes différences de forme se trouvent au niveau du corps de la bouteille. Cependant, les goulots de ces bouteilles sont très semblables. Leurs formes sont cylindriques de diamètre allant de 16 mm à 32 mm.

Espace de travail

L'espace de travail disponible pour les actions de préhension est défini selon les différents postes de travail visités par l'objet à manipuler. Voici les six actions nécessitant la préhension des bouteilles.

La zone d'entreposage des bouteilles : Le préhenseur doit prendre et déposer une bouteille déterminée à un emplacement précis sur le support à bouteilles (figure 2.32). L'insertion de la bouteille dans le support (figure 2.33) se fait avec précision.



Figure 2.32 Modélisation du support à bouteilles

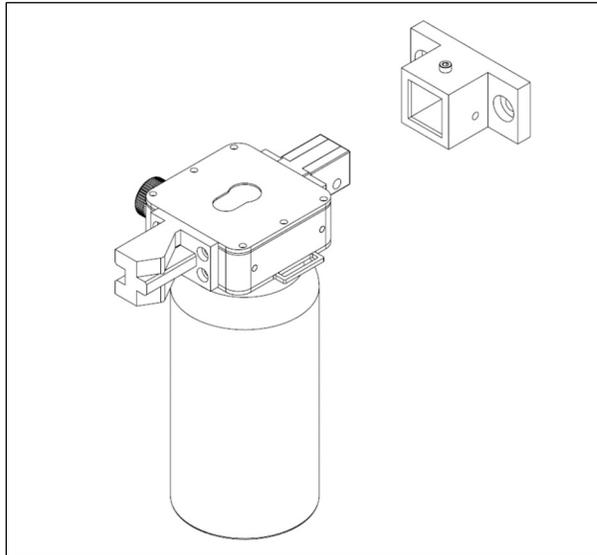


Figure 2.33 Modélisation du processus d'insertion d'une bouteille dans le support à bouteilles

La zone de remplissage : Le préhenseur doit positionner la bouteille de médicament sur le système de remplissage (Figure 2.34)



Figure 2.34 Modélisation du positionnement de la bouteille dans la zone de remplissage

Le mélangeur : Le préhenseur doit placer la bouteille de médicament dans le mélangeur (figure 2.35) avant qu'elle soit utilisée pour le remplissage. Cette étape permet d'assurer l'homogénéité du mélange de médicaments liquides.



Figure 2.35 Modélisation du positionnement de la bouteille sur le mélangeur

La zone d'échange : Le préhenseur doit échanger les bouteilles de médicament vide ou pleine avec le technicien. Pour le faire, le préhenseur doit prendre ou déposer une bouteille à une position définie dans la zone d'échange. La figure 2.36 représente la zone d'échange.



Figure 2.36 Modélisation du positionnement de la zone d'échange de bouteilles entre le préhenseur et le technicien

Emplacement de préhension

L'emplacement de préhension, ou zone de préhension, est déterminée en fonction la géométrie de la pièce et de l'espace de travail. La figure 2.37 présente les différentes zones à éviter en fonction des informations recueillies.

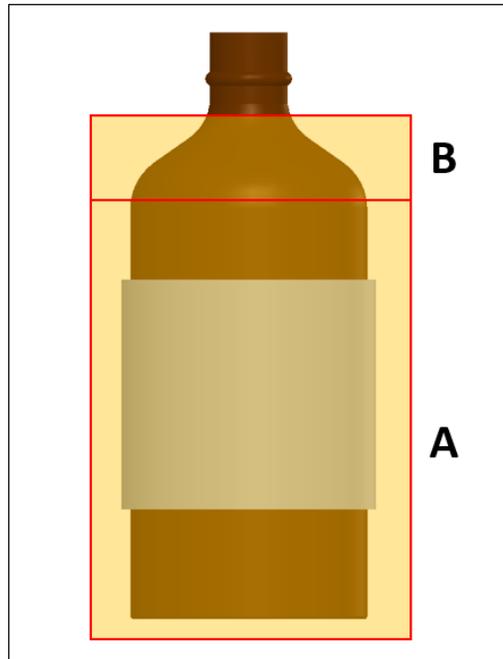


Figure 2.37 Modélisation des différentes zones à éviter en fonction des informations recueillies

La zone A n'est pas souhaitable en raison de la trop grande diversité de forme et de hauteur présente dans l'échantillon. La zone B est aussi problématique en raison de sa forme irrégulière. La zone de préhension proposée est donc le goulot des bouteilles. Celui-ci est de forme cylindrique constante, seul le diamètre externe varie. Il est tout de même à noter que certaines caractéristiques des goulots peuvent compliquer la tâche de préhension. La longueur du goulot et la dimension des filets, servant à visser le bouchon, en font partie.

Afin d'écartier ce problème, ainsi que certains autres problèmes reliés à la gestion des bouteilles qui ne seront pas discutés ici, un adaptateur universel a été conçu pour assurer une prise ferme

sur toutes les bouteilles. La figure 2.38 présente l'adaptateur universel développé et installé sur une bouteille.

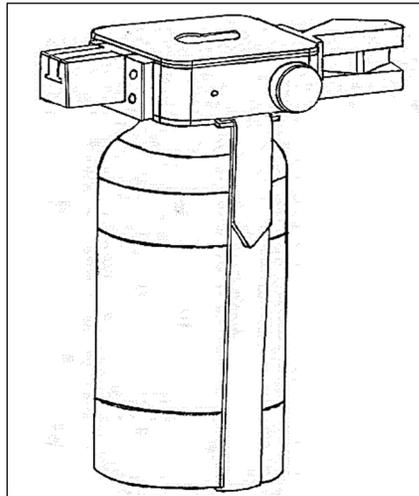


Figure 2.38 Modélisation de la présentation de l'adaptateur

La figure 2.39 présente une vue de dessus et une vue de coupe de l'adaptateur universel et la figure 2.40 présente une vue explosée de l'adaptateur universel.

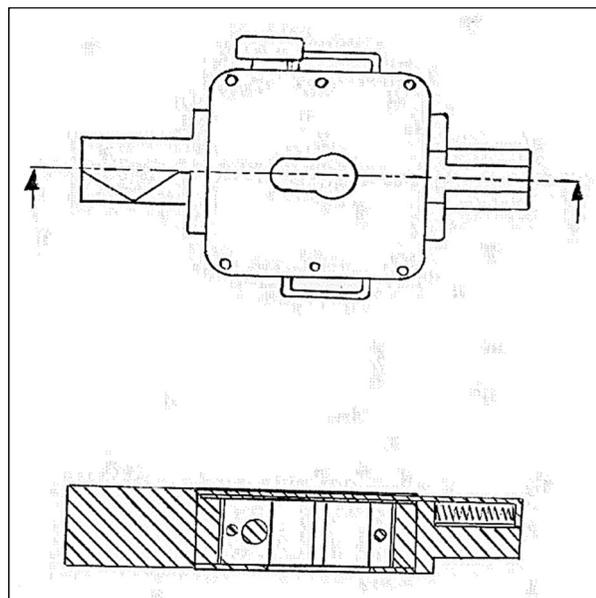


Figure 2.39 Vue de dessus et vue de coupe de l'adaptateur universelle

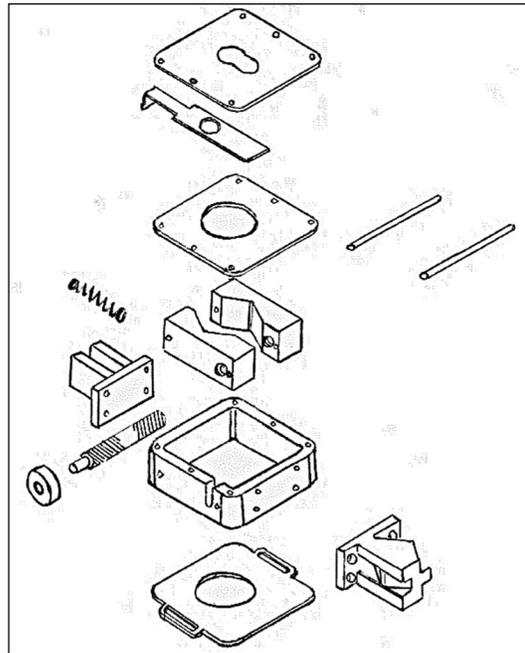


Figure 2.40 Vue explosée de l'adaptateur universel

L'adaptateur universel est composé de deux mâchoires prismatiques s'adaptant à la forme cylindrique des goulots des bouteilles de médicament. Sa forme permet de s'adapter à des diamètres externes de goulots allant de 16 à 32 mm. Les mâchoires sont maintenues en place dans un boîtier par deux tiges d'acier. Les tiges servent aussi de guide lors du déplacement des mâchoires. Une visse sans fin meut par une force de rotation humaine et permet ainsi de déplacer les mâchoires. Un pas de visse particulier a été mis en place pour permettre un déplacement synchronisé des mâchoires. En effet, la première moitié de la visse à un pas « tourne à droite » et la seconde moitié un pas « tourne à gauche ». Une rotation horaire de la visse sans fin permet de déplacer les deux mâchoires simultanément vers le centre et une rotation anti-horaire permet de les déplacer vers l'extérieur. La figure 2.41 présente le déplacement des mâchoires.

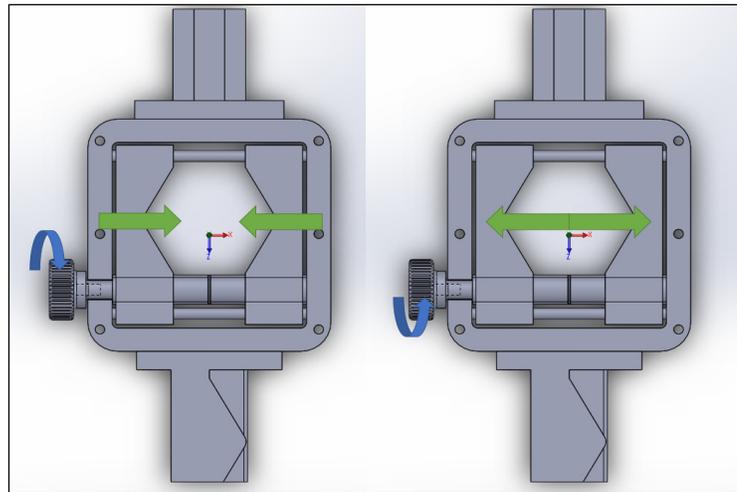


Figure 2.41 Modélisation du déplacement des mâchoires

Choix méthode de préhension et type de préhenseur

La méthode de préhension par contact et le préhenseur parallèle, utilisés pour les seringues, sont des solutions viables pour manipuler l'adaptateur et les bouteilles. Ceux-ci sont, en effet, des objets rigides et leur position est connue en tout temps.

Pour les phases de développement futur, il sera intéressant d'évaluer la possibilité d'utiliser la méthode de préhension à distance en utilisant un préhenseur de type magnétique. Ce type de préhenseur peut être conçu et fabriqué par l'équipe de travail, diminuant ainsi les coûts de production. Le volume de son boîtier sera aussi plus petit que le préhenseur parallèle présentement utilisé, permettant une plus grande flexibilité au robot.

Conception des accessoires de préhension

Une fois les méthodes de préhension ainsi que les types de préhenseur sélectionnés, il est nécessaire de concevoir les accessoires de préhension. La figure 2.42 présente la composante de prise et l'action de préhension par les doigts du préhenseur à seringue.

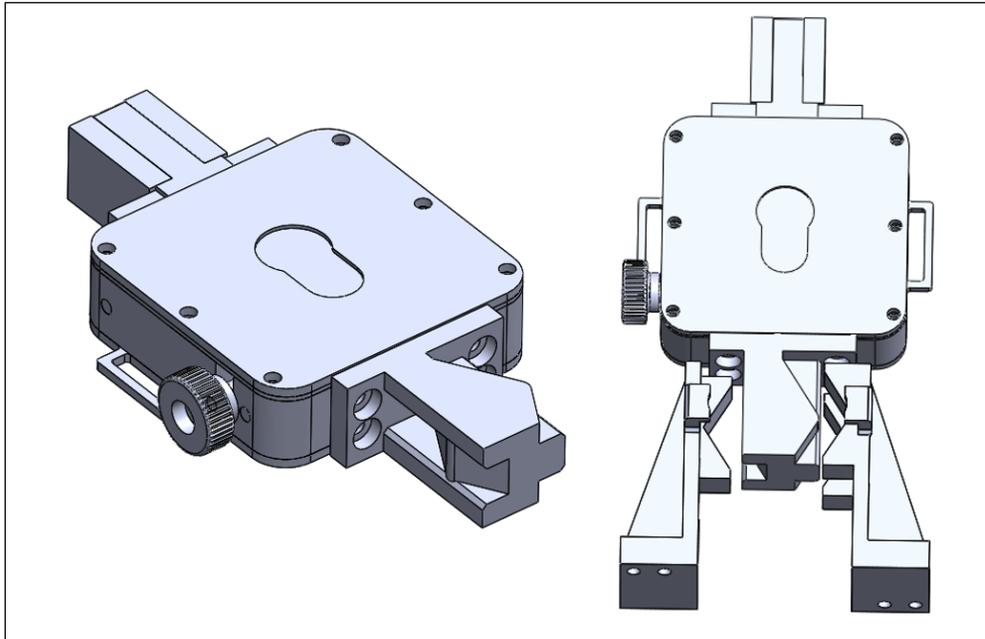


Figure 2.42 Modélisation de la composante de prise et modélisation de l'action de préhension par les doigts du préhenseur à seringues

Le design, de la composante de prise, permet une autocorrection du positionnement des doigts lors de la saisie. Leur conception triangulaire permet une plus grande l'attitude au moment d'amorcer la prise et une grande précision lorsque celle-ci est complétée.

Pour les phases futures, le concept proposé est de remplacer la section de prise actuelle par une pyramide à base carrée fabriquée à l'aide d'un matériel ferreux. Le préhenseur sera équipé d'une section femelle ayant une géométrie de pyramide à base carrée et d'un électroaimant. La figure 2.43 présente le concept proposé.

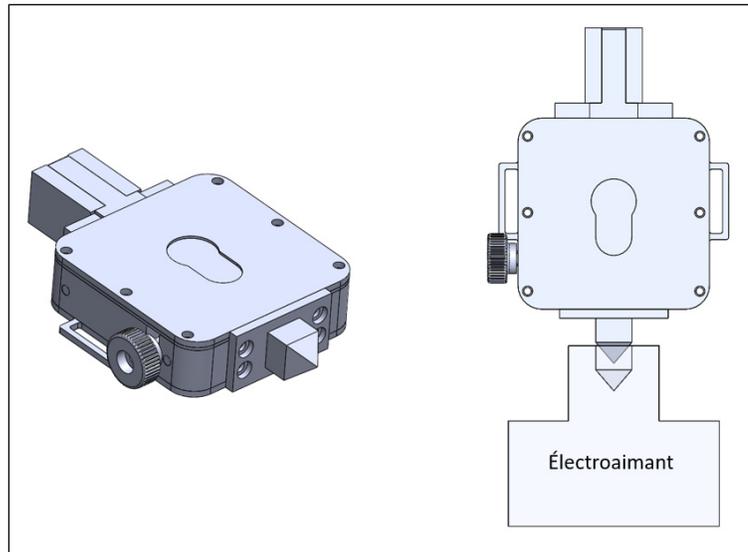


Figure 2.43 Modélisation du concept d'un préhenseur utilisant l'adhésion magnétique

L'utilisation de la pyramide à base carrée permet de corriger le positionnement de la pièce à manipuler au moment de débiter la manœuvre de prise. Elle permet aussi de contraindre et positionner la pièce dans tous les axes. Le préhenseur lui-même, n'étant constitué que d'un électroaimant, sera abordable à fabriquer et le volume de son boîtier sera moindre que le volume du boîtier d'un préhenseur parallèle.

Une étude plus approfondie du concept est tout de même nécessaire. Un problème potentiel est rapidement identifiable. Il s'agit de trouver une façon de sécuriser la pièce lors d'un mouvement du robot, advenant une perte de courant au niveau de l'électroaimant. Un système de verrouillage doit être développé afin d'enrayer ce risque.

Dans le but d'améliorer le temps de cycle du système, une analyse des temps de travaux des différentes stations devra être réalisée. Cette analyse ne pourra être réalisée adéquatement avant la mise en place du prototype, celui-ci étant nécessaire pour déterminer le temps de travail de chaque station. Une fois l'analyse réalisée, il sera possible de déterminer les goulots d'étranglement du système.

La présente section contient une piste de solution pour la réduction du temps de cycle si le temps d'utilisation des robots devient le goulot d'étranglement. La configuration des préhenseurs proposés jusqu'à maintenant oblige les robots à réaliser plusieurs trajets à vide et favorise ainsi les temps d'arrêt sur les autres équipements. Prenons par exemple le préhenseur à seringue. Si une seringue est pleine et en attente dans la zone de remplissage, le préhenseur doit 1) se rendre vide à la zone de remplissage, 2) prendre la seringue, et 3) effectuer les étapes d'inspection, 4) de bouchonnage, 5) d'étiquetage et 6) d'ensachage avant de pouvoir aller prendre une nouvelle seringue et la fournir à la zone de remplissage.

Cette situation se présente très bien pour l'utilisation de deux préhenseurs montés sur le même robot. Le choix du préhenseur et la conception des doigts n'ont pas à être modifiés. Seule la conception de la bride de montage du préhenseur doit être modifiée. Elle doit permettre de fixer les deux préhenseurs au poignet du robot sans nuire au mouvement ou à la capacité de préhension du système. Pour ce faire, un angle de 90 degrés sépare les deux préhenseurs parallèles. La figure 2.44 présente un concept de bride de montage à deux préhenseurs.

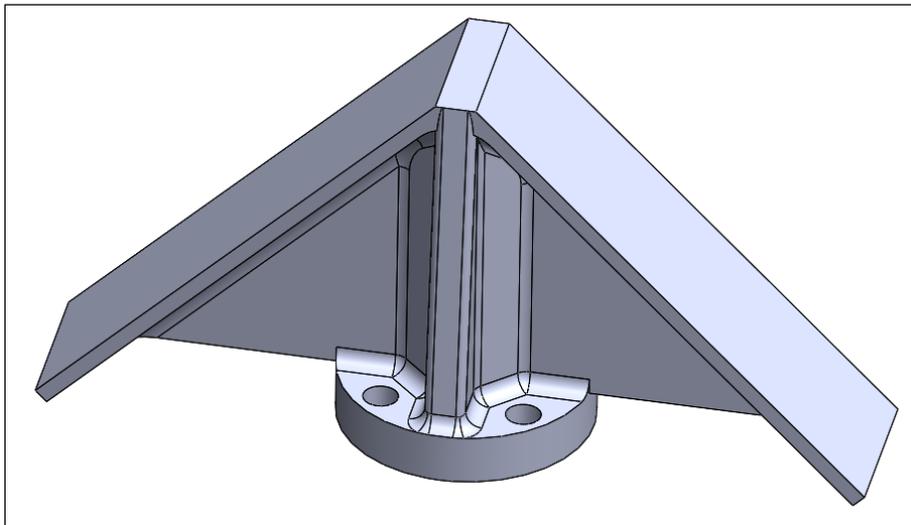


Figure 2.44 Modélisation d'une bride de montage à deux préhenseurs

La situation du préhenseur à bouteille est la même. Il serait très intéressant de pouvoir éviter les trajets à vide et les temps d'attente sur les autres équipements. De la même façon que le système de préhension des seringues, le préhenseur magnétique à électroaimant pourrait être dédoubler sur la bride de montage afin d'éviter que les préhenseurs se nuisent dans leur travail

(un angle de 90 degrés les sépare). La conception sera semblable à ce qui a été proposé pour la bride de montage du préhenseur à seringues.

CHAPITRE 3

SYSTÈME DE REMPLISSAGE

3.1 Cadre théorique

Le système de remplissage des seringues orales est une composante essentielle de la cellule de reconditionnement de médicaments liquides oraux. Il doit permettre de remplir les différents volumes de médicaments dans les différentes seringues de façon précise et rapide. Jérémy Webb, étudiant en génie de la production automatisée à l'ÉTS et membre de l'équipe de ROSP Automation, a rédigé un rapport à ce sujet en 2017 (Webb, 2017). Ce système ayant été développé en collaboration avec l'auteur du présent document et certains autres membres de l'équipe de ROSP Automation, seul un rapide résumé sera présenté ici.

Les difficultés rencontrées lors de la conception du système de remplissage sont semblables à celles rencontrées lors de la conception du système de préhension. La variabilité importante, au niveau du volume des seringues et de la forme des bouteilles, rend la standardisation du processus plus complexe.

La preuve de concept présenté en 2010 par Karim Kalafate utilisait un système de remplissage composé d'un actuateur linéaire électrique et de support en métal, permettant d'accueillir les différents volumes de seringue (Kalafate, 2010). La figure 3.1 et la figure 3.2 présentent ce système.

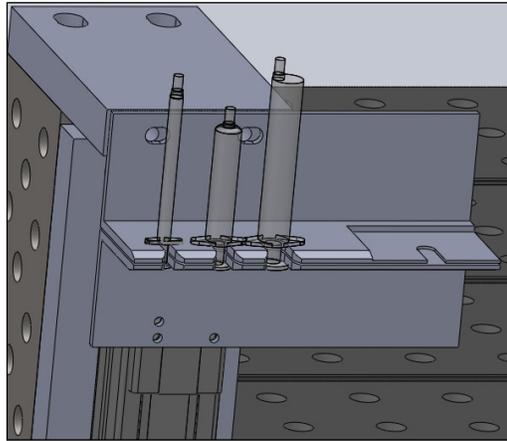


Figure 3.1 Système de remplissage des seringues
Tirée de Kalafate (2010)

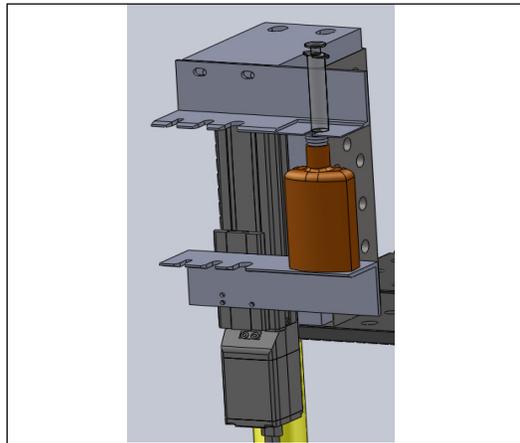


Figure 3.2 Système de remplissage des seringues, assemblage de la seringue et de la bouteille
Tirée de Kalafate (2010)

Le concept proposé s'est montré efficace pour le remplissage des différents volumes de seringue. Il s'est, cependant, montré lent et il nécessite beaucoup d'intervention de la part du bras robotisé. Selon ce concept, le robot doit venir positionner la bouteille de médicament sur le support afin d'être immobilisé par l'axe linéaire. Le robot doit ensuite introduire la seringue dans le goulot de la bouteille (Figure 3.2), prendre l'assemblage, le positionner tel que présenté sur la figure 3.1 et le maintenir en place pour la durée complète du remplissage. Il est donc impossible pour le robot de réaliser plusieurs tâches à la fois.

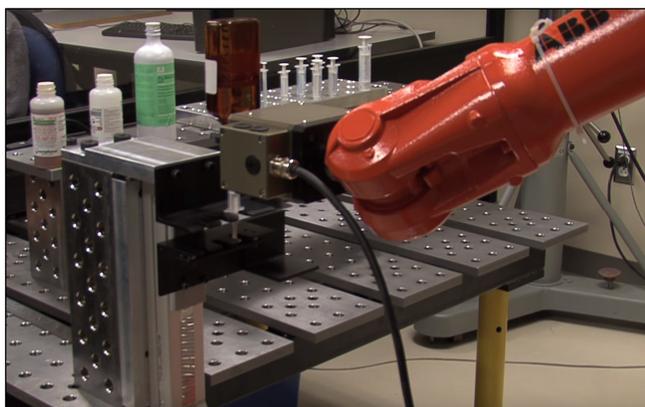


Figure 3.3 Positionnement et maintien de l'assemblage bouteille-seringue pour le remplissage
Tirée de Coro ÉTS (2010)

3.2 Résultats et analyse

Dans le but d'accélérer le processus de remplissage, trois propositions ont été retenues. Premièrement, le nombre de manipulations de la bouteille de médicament par le robot doit se limiter à deux ; soit 1) mettre la bouteille sur le système de remplissage au début de processus et 2) reprendre la bouteille lorsque la seringue est remplie. Ensuite, l'assemblage de la seringue et de la bouteille doit être réalisé de façon autonome par le système de remplissage. En terminant, le robot ne doit pas être requis tout au long de la séquence de remplissage.

L'adaptateur universel pour les bouteilles, conçu dans la section préhension du Chapitre 2 du présent document, permet de rapidement répondre à la première proposition. La bouteille peut être maintenue en place sur le système tout au long du procédé de remplissage, et ce, en utilisant la partie de l'adaptateur à bouteille, permettant d'entreposer ceux-ci sur le support à bouteille. La seconde proposition peut être réalisée en ajoutant un second actuateur linéaire électrique. Celui-ci ayant pour but de joindre la seringue et la bouteille, et d'en maintenir fermement l'assemblage tout au long du remplissage. En plus de diminuer l'implication du robot dans le processus de remplissage, cette proposition permet de réduire les risques de fuite de médicament. En ce qui concerne la troisième et dernière proposition, un autre actuateur électrique est nécessaire, cette fois-ci, un actuateur rotatif. Une fois l'assemblage bouteille-seringue effectué, il permettra de tourner l'assemblage permettant que la bouteille soit au-dessus

de la seringue. Ce positionnement facilitera le transfert du liquide de la bouteille à la seringue. La figure 3.4 présente les différentes étapes de remplissage.

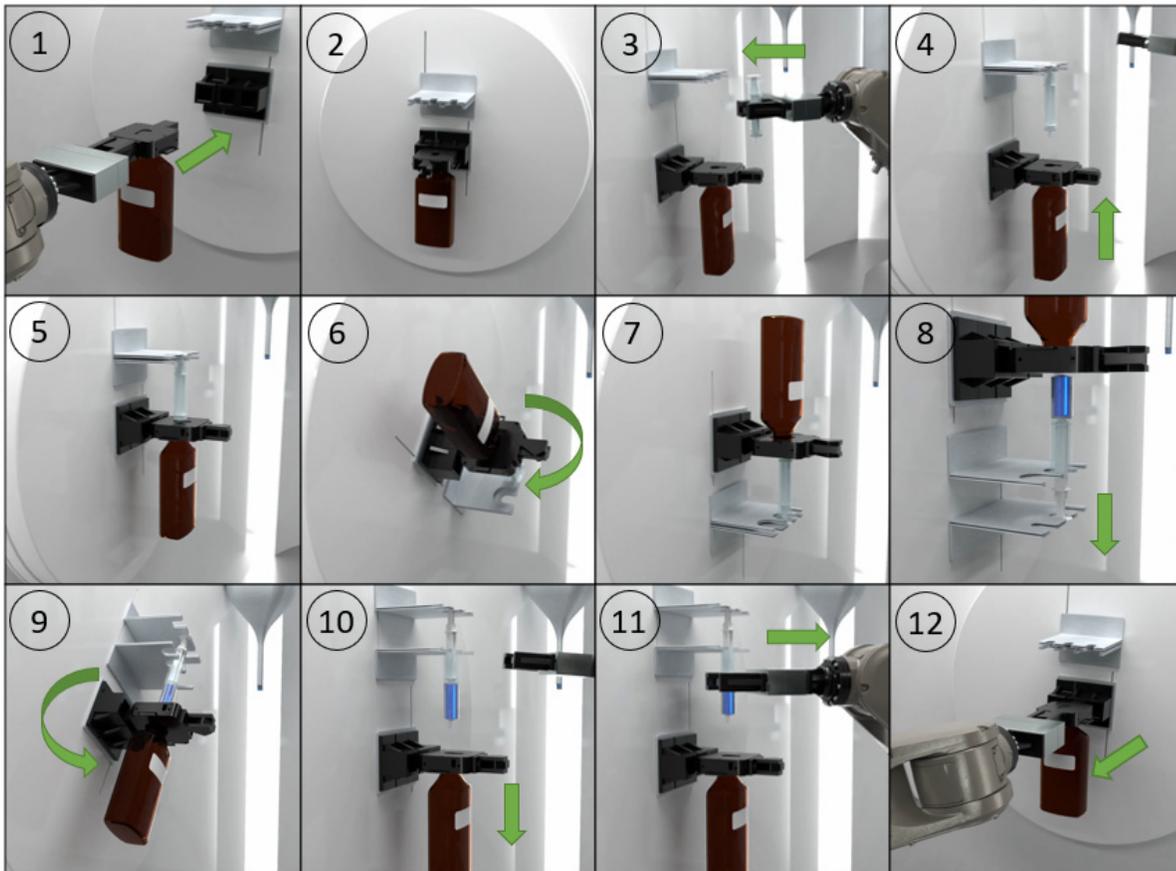


Figure 3.4 Processus de remplissage des seringues orales

En plus des gains de temps déjà abordés, cette solution permet au système, si plusieurs seringues du même médicament doivent être remplies, de laisser la bouteille de médicament en place. Cet avantage diminue encore plus le nombre de manipulations à réaliser par les bras robotisés et influence à la baisse le temps de cycle du système.

Le fait de rendre le système de remplissage moins dépendant de la présence du robot pour fonctionner permettrait d'implanter plus d'un système de remplissage dans la cellule de reconditionnement de médicaments liquides oraux. Le temps de cycle en serait encore une fois positivement affecté. Cependant, utiliser trois actionneurs électriques, en comparaison à un seul pour la preuve de concept, augmentera le coût en matériel pour la cellule.

CHAPITRE 4

SYSTÈME DE STOCKAGE DE LA MATIÈRE PREMIÈRE

4.1 Cadre théorique

Pour atteindre le niveau d'automatisation désiré, le système doit être en mesure de gérer un stockage de matière première. Le cas inverse obligerait la présence continue d'un technicien dont la seule tâche serait d'alimenter la cellule de remplissage. Il est, pour l'instant, impossible d'éliminer complètement la tâche de remplissage par un technicien, mais il est possible de la réduire à un niveau plus raisonnable. Il serait raisonnable qu'un technicien remplisse le système quatre fois par quart de travail, soit à toutes les deux heures.

Les différentes matières premières à gérer sont les seringues orales, les bouteilles de médicaments liquides, les bouchons, les étiquettes et les sacs à seringues. Il est à noter que la présente section se concentrera sur les seringues et les bouteilles.

La preuve de concept, réalisé en 2010 par Karim Kalafate, proposait une méthode simple pour gérer et stocker les seringues. Une matrice usinée dans un bloc d'aluminium permettait de positionner les seringues pour faciliter la prise de celles-ci par le robot (Kalafate, 2010). La figure 4.1 présente la matrice.

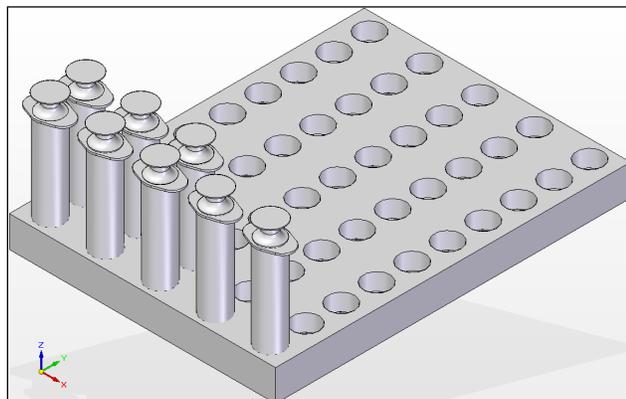


Figure 4.1 Matrice de positionnement des seringues
Tirée de Kalafate (2010)

Cette méthode est fonctionnelle pour une preuve de concept, mais requière beaucoup d'espace dans la cellule. En effet, le robot doit être en mesure d'atteindre chacune des seringues positionnées sur la matrice et de se dégager de façon sécuritaire. Il serait donc préférable que la prise des seringues se fasse à un seul endroit. Chaque volume de seringue pourrait avoir un chargeur distinct dont la sortie permettrait une bonne préhension par le robot. Un autre désavantage de la solution présentée pour la preuve de concept est que l'opérateur ne peut pas remplir la matrice lorsque le système est en fonction. Le fait d'accéder à la matrice lorsque le robot est en marche entraînerait des risques de blessures importantes. Il serait donc préférable de pouvoir alimenter la cellule en seringues sans avoir à s'introduire dans ladite cellule.

Aucune réelle proposition n'avait été faite en ce qui concerne la gestion des médicaments. Ceux-ci étaient simplement déposés sur une table. Cette méthode n'est pas recommandable, car la vibration causée par le déplacement du robot pourrait, avec le temps, déplacer les bouteilles et les rendre impossibles à saisir par le robot. Le système de gestion des bouteilles doit donc positionner et maintenir en place celles-ci. Tout comme pour la seringue, le technicien responsable de la cellule doit pouvoir alimenter le système en bouteilles de médicaments liquides sans devoir arrêter celui-ci et sans mettre sa sécurité en danger.

4.2 Résultats et analyse

La solution proposée pour l'entreposage et la gestion des seringues est un chargeur fabriqué en feuille d'acier inoxydable découpé au laser et plié. Chacun des six volumes de seringue disposera de son chargeur spécifiquement conçu selon les dimensions extérieures de la seringue. La figure 4.2 présente le chargeur associé aux seringues de 3 ml. Il est à noter que le design des autres chargeurs être très similaire, seules les dimensions varient.

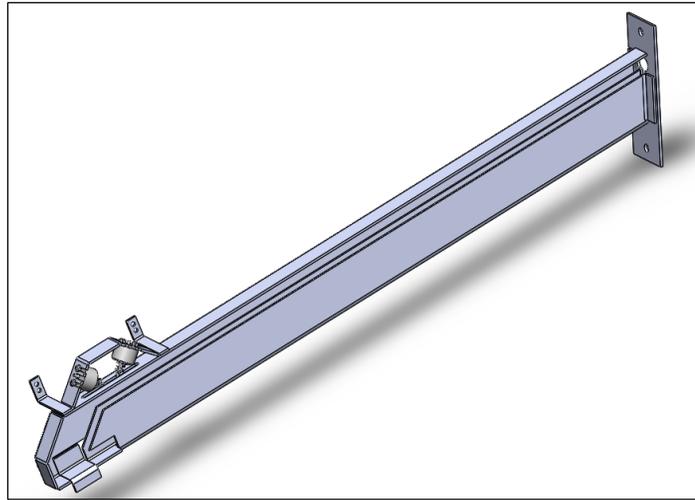


Figure 4.2 Chargeur pour les seringues de 3 ml

Le chargeur est conçu de façon à être fixé directement à la structure de la cellule. Les seringues peuvent être insérées par l'opérateur sur la partie droite de celui-ci. La gravité les acheminera jusqu'aux deux solénoïdes. Les solénoïdes servent, ensuite, à laisser passer une seule seringue. Celle-ci descendra jusqu'au bas du chargeur, le piston positionné vers le bas, afin d'être pris par le préhenseur du robot.

Ce type de chargeur a plusieurs avantages. Il permet tout d'abord de stocker 100 seringues de 3 ml, soit le nombre nécessaire pour deux heures de fonctionnement du système. Il permet ensuite à l'opérateur d'effectuer le remplissage sans entrer dans la zone de fonctionnement du robot. De plus, il minimise la quantité de positions à atteindre avec le robot.

Du côté de la gestion des bouteilles de médicaments liquides, l'adaptateur universel pour les bouteilles permet de fixer celles-ci de façon solide sur un support métallique. Des embouts femelles, fixés sur le support métallique, permettent d'insérer la partie mâle de l'adaptateur universel. La figure 4.3 présente le support à bouteille et la figure 4.4 présente la mise en place de l'adaptateur sur le support.

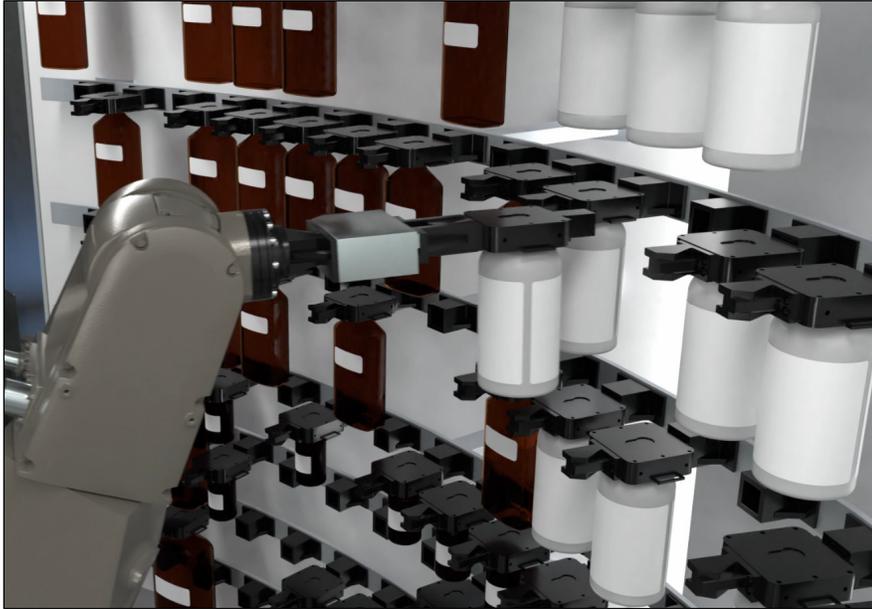


Figure 4.3 Support à bouteilles de médicaments liquides

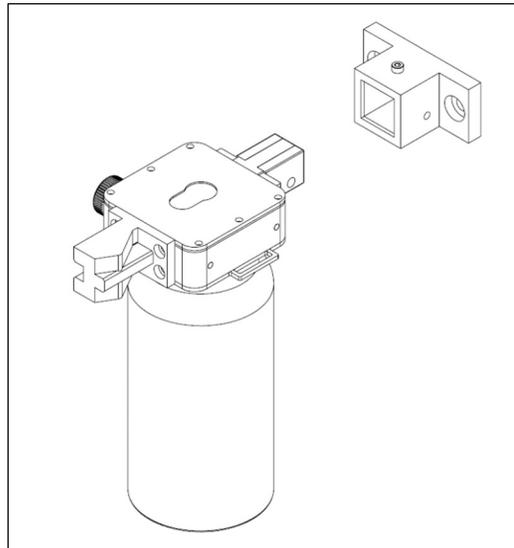


Figure 4.4 Insertion de l'adaptateur universel dans le support de bouteille

Le concept présenté permet d'entreposer la centaine de médicaments utilisés à la pharmacie du CHU Sainte-Justine. Le système de positionnement empêche la bouteille de se déplacer entre les utilisations et permet au robot d'effectuer une bonne préhension.

Pour éviter que le robot et l'opérateur aient à partager un espace de travail, le robot se chargera lui-même d'aller positionner les bouteilles sur le support. Il est tout de même nécessaire que l'opérateur et le robot puissent s'échanger les bouteilles vides et les bouteilles pleines. Pour résoudre ce problème, une zone d'échange a été ajoutée au système. Cette zone est atteignable par le robot et par l'opérateur, mais un mécanisme d'ouverture empêche que les deux y aient accès au même moment. La figure 4.5 présente un concept préliminaire de zone d'échange et le processus qui s'y rattache.

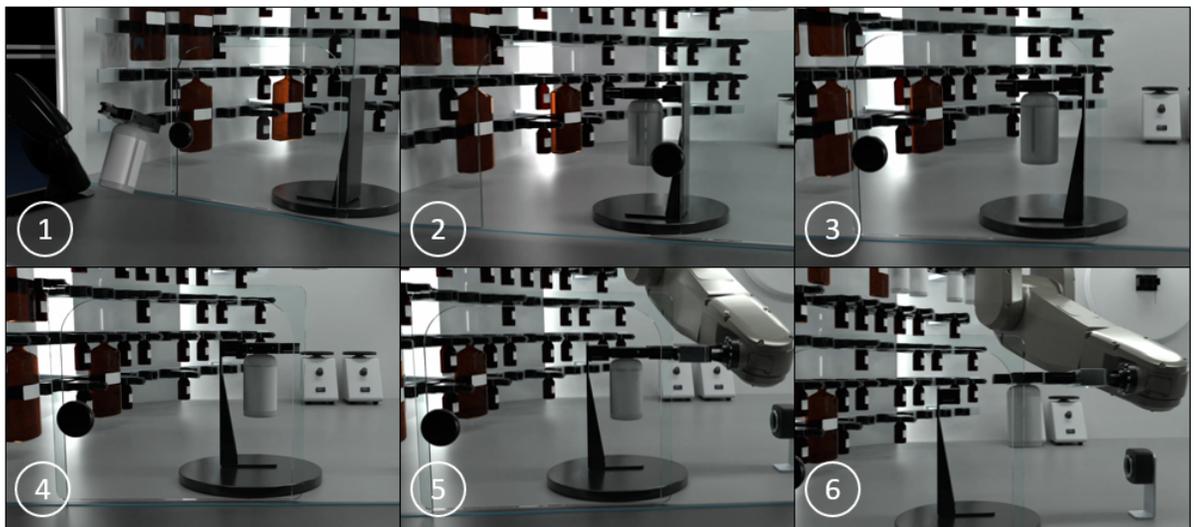


Figure 4.5 Utilisation de la zone d'échange entre l'opérateur et le robot

CHAPITRE 5

SYSTÈME D'INSPECTION

5.1 Cadre théorique

L'objectif du présent chapitre est d'établir les bases d'un système d'inspection permettant de déterminer l'acceptabilité d'une dose de médicament produite par le RO SP 2R-150. Pour ce faire, un algorithme, capable de différencier une seringue qui est acceptable d'une qui ne l'est pas, doit être développé. Plusieurs critères entrent en jeu pour l'acceptation d'une dose de médicament liquide oral. Les deux principaux critères d'évaluation sont la précision du volume de la dose et l'exactitude du médicament utilisé. Dans le cadre du présent projet, seule la précision du volume des doses sera mesurée. Il est possible d'évaluer le volume présent dans une seringue en mesurant le trajet effectué par le piston de la seringue lors du remplissage. Cette mesure peut être prise en photographiant le produit fini et en calculant le nombre de pixels présent entre le début du corps de la seringue et la position du joint d'étanchéité. Si les photos sont prises à une distance constante de l'objectif, il est possible de calculer l'échelle reliant un pixel à une distance physique. Considérant l'important contraste entre les différents éléments à identifier pour prendre cette mesure, l'utilisation de simples méthodes de traitements d'image est suffisante. De ce fait, cette partie du travail ne sera pas couverte dans le présent chapitre. Il sera considéré que la position du joint d'étanchéité concorde avec le volume de médicament requis par la prescription.

Cependant, même si le volume intérieur de la seringue est le bon, des bulles d'air se retrouvent souvent prisonnières de la seringue, ce qui en affecte le volume réel à la baisse. Ces bulles d'air proviennent généralement de la bouteille de médicament ou de l'air déjà présent dans la buse de la seringue avant son remplissage. L'objectif de ce chapitre est donc de développer un algorithme de reconnaissance de bulles dans les seringues orales. Celui-ci pourra faire la différence entre deux classes, 1) les seringues avec bulles et 2) les seringues sans bulles. La figure 5.1 présente les deux classes de seringue, à gauche, avec bulle et à droite, sans bulles.



Figure 5.1 Deux classes de seringues, avec bulle à gauche et sans bulles à droite

Plusieurs éléments théoriques et techniques doivent être combinés pour développer cet algorithme. Trois méthodes seront évaluées afin de déterminer la faisabilité du projet et de déterminer si une méthode se distingue des autres en termes de performance. La performance d'un algorithme de classification peut être déterminée selon le pourcentage d'erreurs commises et le temps de traitement nécessaire. Il est à noter que dans le domaine de la santé, un pourcentage d'erreurs faible doit toujours être priorisé à un temps de traitement faible. La section suivante présentera donc brièvement les trois méthodes : 1) Bayes Quadratique, 2) k-nn et 3) SVM. Elle présentera aussi d'autres connaissances théoriques nécessaires à l'extraction des caractéristiques d'une image et à la création d'une base de données contenant les caractéristiques de plusieurs images. Le chapitre sera ensuite suivi de la méthodologie permettant de créer la base de données et de la traiter. Finalement, il y aura la présentation des résultats et leur analyse.

5.1.1 Traitement d'image

Le traitement des images prises pour la base de données est primordial au bon fonctionnement des systèmes de reconnaissance de formes. Il permet un premier élagage des informations présentes dans une image afin de, par la suite, faciliter le travail de l'algorithme de classification. Par exemple, le fait qu'une photo soit en couleur n'est pas nécessairement utile à la classification de certaines images, transformer celle-ci en tons de gris ou littéralement la binariser peut alléger la quantité d'information à traiter.

Il est aussi possible d'augmenter les contrastes d'une image afin de retirer plus d'information de celle-ci. L'histogramme d'une image en tons de gris peut être obtenu grâce à des algorithmes de traitement d'image. Un seuil (threshold) peut ensuite être utilisé afin de séparer les pixels importants de ceux qui ne le sont pas. Il est possible ensuite de saturer complètement les pixels importants et, inversement, ceux qui ne nous importent pas.

L'augmentation des contrastes, via le seuil, laisse parfois des pixels isolés et indésirables dans l'image. Des algorithmes d'érosion et de propagation permettent de se débarrasser des petits regroupements de pixels isolés. Ces algorithmes aident aussi légèrement à adoucir les contours des éléments importants.

5.1.2 Projection de zone

La projection de zone est une méthode simple employée pour réaliser l'extraction de caractéristiques d'une image. De façon générale, la méthode consiste à créer une grille de $m \times n$ zones sur l'image. Cette grille permet de connaître les tendances, en termes d'occurrence de pixels, de différentes sections de l'image.

De façon plus précise, la première étape de la projection de zone consiste à redimensionner également toutes les images de la base de données. Le redimensionnement de l'image a plusieurs effets. Premièrement, il permet de comparer les images, ce qui serait impossible si les images étaient de dimensions différentes. Deuxièmement, des dimensions plus grandes auront pour effet d'augmenter la précision de l'image et la longueur du vecteur de caractéristique de l'image. Un vecteur de caractéristique plus long entraînera un temps de traitement plus long. Il y a donc un juste milieu à atteindre.

Il faut ensuite déterminer la grandeur des fenêtres qui composeront la grille de l'image. Celles-ci influenceront aussi la longueur du vecteur de caractéristique de l'image, plus la fenêtre est petite, plus la dimension de la grille est grande et donc, plus le vecteur de caractéristique qui en ressort est grand. Le fait d'avoir une petite fenêtre augmente le niveau de précision des caractéristiques obtenues, mais augmente aussi les chances que ces caractéristiques soient semblables, voire identiques, aux caractéristiques d'autres images (Hedjam, 2016).

La meilleure façon de déterminer les paramètres optimaux à utiliser est de calculer le taux de recouvrement de la base de données selon différents paramètres. En d'autres mots, le taux de recouvrement est défini par le niveau d'empiètement des caractéristiques d'une classe sur une autre classe.

L'application de la projection de zone, avec des paramètres de dimensions d'image et de fenêtre, va comme suit : 1) chacune des cases de la grille, créée à partir des pixels de l'image originale, sont évaluées indépendamment, 2) il y a calcul de la moyenne des valeurs de chaque colonne de pixels pour créer un vecteur de moyenne. La moyenne de ce nouveau vecteur est ensuite calculée et la valeur obtenue remplace les pixels de la case de la grille. Lorsque cette étape est réalisée pour toutes les cases de la grille, un vecteur de longueur m est construit avec la moyenne des valeurs de chacune des colonnes de la grille. Un vecteur de longueur n est aussi construit avec la moyenne des valeurs de chaque ligne de la grille. Pour terminer, la grille $m \times n$ est transformée en un vecteur auquel le vecteur de longueur m et le vecteur de longueur n sont concaténés. Le vecteur obtenu est le vecteur de caractéristique de l'image évaluée (Hedjam, 2016). La figure 5.2 présente la situation.

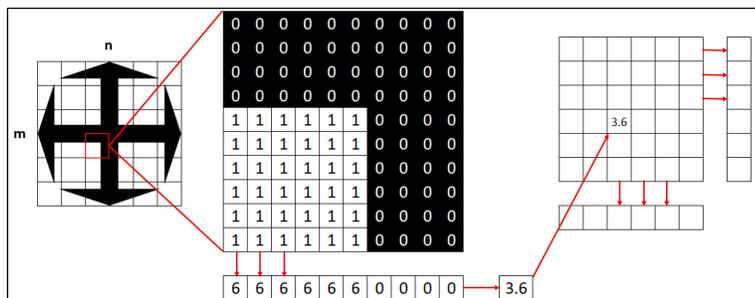


Figure 5.2 Représentation visuelle de la projection de zone
Tirée de Hedjam (2016)

5.1.3 ACP

L'analyse des composantes principales (ACP) est une méthode statistique permettant une réduction de la dimensionnalité des vecteurs de caractéristiques d'un échantillon. Cette méthode se base sur le principe que les caractéristiques extraites n'ont pas toutes la même valeur en termes de différenciation. En d'autres mots, certaines caractéristiques ont plus de valeur que d'autres.

Pour réaliser l'ACP, il est nécessaire de calculer les vecteurs propres ainsi que les valeurs propres à partir de la matrice de covariance de la base de données d'apprentissage. L'objectif de ce calcul est de déterminer, par combinaison linéaire, les axes selon lesquels la variance des données est la plus grande (Hedjam, 2016).

La figure 5.3 présente un exemple simple de distribution de donnée à deux dimensions.

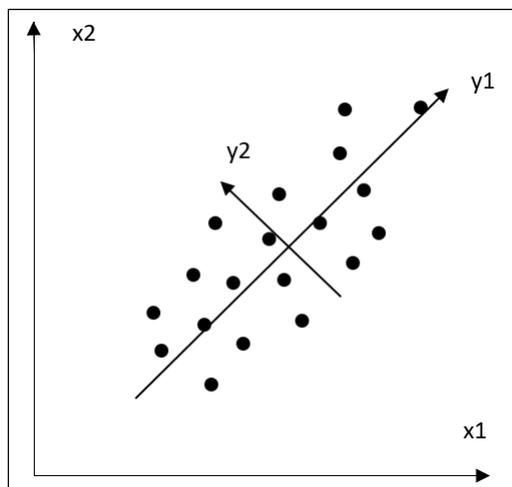


Figure 5.3 ACP - Positionnement du référentiel
Tirée de Hedjam (2016)

Selon un ensemble de données d'apprentissage caractérisé par $X1$ et $X2$, il est possible de calculer deux nouvelles caractéristiques, $Y1$ et $Y2$, qui forment un repère par les vecteurs propres et la moyenne des données. La caractéristique $Y1$ a une variance plus importante que la caractéristique $Y2$, ce qui amène à la conclusion que $Y1$ est plus discriminant que $Y2$.

Il est donc possible de projeter les données selon la caractéristique $Y1$ telle que présentée sur la figure 5.4 (Cheriet, 2016 et Hedjam, 2016).

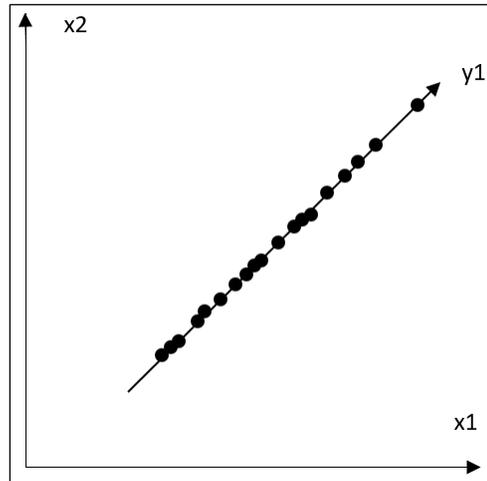


Figure 5.4 ACP - Projection sur les caractéristiques à variance élevée
Tirée de Hedjam (2016)

5.1.4 Bayes Quadratique

Cet algorithme utilise des approches paramétriques dans lesquelles il faut émettre comme hypothèse la nature de la distribution des données. Le classificateur Bayes Quadratique est basé sur l'hypothèse que les données de chacune des classes suivent une distribution normale multivariée (Cheriet, 2016). Cette distribution suit la formule suivante :

$$P(w_j|x) = \frac{p(x|w_j)P(w_j)}{p(x)} \quad (5.1)$$

Ce document suggère de travailler avec les fonctions discriminantes de chacune des classes selon le logarithme naturel de l'équation précédente (Craciun, 2004; Cheriet, 2016 et Hedjam, 2016). Ce qui donne alors :

$$d_j(x) = \ln \hat{P}(w_j) - \frac{1}{2} \ln(|\hat{\Sigma}|) - \frac{1}{2} (x - \hat{\mu}_j)^T \hat{\Sigma}^{-1} (x - \hat{\mu}_j) \quad (5.2)$$

De plus, il est à considérer que les 10 classes sont équiprobables puisqu'ils ont chacune le même nombre d'échantillons. Ceci permet d'observer que le premier terme de l'équation, qui est la probabilité *a priori* : $\hat{P}(w_j) = 1/c$ (où c représente le nombre de classes du problème), n'affecte pas la décision finale et peut être retiré de l'équation. Pour terminer, il est considéré

que la valeur maximale parmi les fonctions discriminantes associées à chacune des classes est utilisée afin de prendre une décision. Cette décision donne la prédiction de la classe de l'élément analysé.

5.1.5 K-nn

Pour ce classificateur, il n'est pas nécessaire de faire l'hypothèse de la distribution des données puisqu'elle utilise une approche non paramétrique. Selon ce document, les données d'entraînement permettent d'établir un modèle des différentes classes lors de la classification d'une donnée de la base de test. Le but est de calculer la distance entre cette donnée de test et l'ensemble des données d'entraînement. Une valeur d'étiquette est affectée à cette donnée à l'aide d'un vote majoritaire sur les k données les plus proches (TREMBLAY, 2004). La formule à utiliser pour calculer la distance euclidienne est :

$$d_i = (x - x_i)^T(x - x_i) \quad (5.3)$$

Dans ce cas, x représente la donnée à classifier et x_i représente l'une des n variables de la base de données d'entraînement.

5.1.6 SVM

Le type de classificateur appelé SVM (Support Vector Machine) est un classificateur binaire dont l'objectif est de déterminer la frontière « optimale » séparant les données d'apprentissage des deux classes. Cette frontière est définie par la formule suivante :

$$\sum_{i=1}^n y_i \alpha_i K(x_i, x) + b = 0 \quad (5.4)$$

Dans cette formule x_i représente les données de la base d'apprentissage et y_i représente les étiquettes 1 ou -1 qui sont attribuées aux données x_i . $y_i = 1$ lorsque les données d'une classe sont analysées et $y_i = -1$ lorsque les données des autres classes doivent être séparées (Hedjam, 2016). La variable K représente un noyau de Mercer. Ceci permet de projeter les données analysées dans un espace d'une plus haute dimension dans lequel il sera possible de faire une

séparation linéaire des classes. Dans la phase d'apprentissage, les coefficients α_i et le biais b sont optimisés afin de maximiser la marge de séparation.

Une partie du code de l'algorithme du SVM a été tiré du document *SVM 1 vs All algorithm* (Hedjam, 2016). Les paramètres qui entraînent le modèle de classification sont γ et C . Le paramètre γ (gamma), du Gaussien kernel, permet de manipuler les classifications non linéaires et C est le paramètre de compromis du classificateur (Adankon, 2005).

Dans un système cartésien à deux dimensions, les points d'une classe ne peuvent être séparés linéairement par rapport aux autres. Donc, il faut transformer le système cartésien à une dimension supérieure. De cette façon, il sera possible de séparer les classes de façon linéaire à l'aide d'un plan. Le paramètre γ contrôle la forme des sommets des points lorsque le système passe d'une dimension à une autre. Un grand gamma permet d'obtenir un sommet plus large et moins haut, tandis qu'un petit gamma donne une bosse forte et pointue. Gamma permet de mieux distribuer les points pour la classification tout en affectant le biais du plan et la variance. De plus, le paramètre C affecte aussi le biais et la variance dans la classification linéaire du SVM. C'est pourquoi plusieurs valeurs des paramètres sont utilisées lors de la classification afin d'obtenir la meilleure distribution et le plus petit taux d'erreur. Pour ce projet, les valeurs des combinaisons seront [0.1 0.01 0.001 0.0001] pour γ et [1 10 100 1000 10000] pour C (HEDJAM, 2016).

5.2 Méthodologie

Plusieurs étapes sont nécessaires afin de créer un classificateur capable de repérer des bulles dans des seringues orales. La première consiste à créer une base de données contenant des photos appartenant aux deux classes, avec bulles et sans bulles. Il est ensuite nécessaire d'extraire les vecteurs de caractéristiques des images. La dernière étape consiste à entraîner les différents algorithmes de reconnaissance de formes et d'en comparer les résultats.

5.2.1 Images et traitement d'image

La première étape consiste à prendre des photos des seringues orales remplies de médicaments liquides. Dans le but de simplifier l'expérience, un support en papier blanc est construit. Celui-

ci a pour but d'assurer un positionnement similaire des seringues entre chaque photo. Il permet aussi d'incliner de quelques degrés la seringue afin que la gravité pousse les bulles, si la seringue en contient, vers le coin supérieur droit. Le support est aussi équipé d'un fond blanc augmentant le contraste avec la seringue. Ces trois avantages pourront facilement être présents dans le système d'inspection de la version finale du ROSP 2R-150. Toujours dans le but d'alléger l'expérimentation, la base de données sera uniquement constituée de seringue de 20 ml et le médicament employé sera toujours le même. Voir la figure 5.5 pour un exemple du support. De plus, 472 photos sont prises en tout, 236 de la classe 1 (sans bulles) et 236 de la classe 2 (avec bulles).



Figure 5.5 Seringue dans le support lors de la prise de photo

La seconde étape consiste à cibler la zone de la photo ayant une importance plus grande au niveau de la reconnaissance de bulle. Cette zone est comprise entre la buse et le joint d'étanchéité du piston de la seringue. Un algorithme automatisé de traitement d'image doit être développé afin de pouvoir effectuer un recadrage au niveau de la zone cible. Pour se faire, une segmentation d'image à l'aide d'un seuil (threshold) et d'un histogramme des tons de gris est utilisée. Cette étape se solde en une image binarisée mettant un fort accent sur la partie de la seringue contenant le médicament. Un algorithme d'érosion et de propagation est utilisé pour se débarrasser des pixels récalcitrants. Le recadrage et l'enregistrement des photos sont ensuite réalisés. Chaque classe se voit ensuite attribuer une étiquette dans la base de données.

5.2.2 Projection de zone

L'extraction des caractéristiques des images de la base de données est réalisée grâce à la projection de zone. Afin de minimiser le taux de recouvrement de la base de données, les deux paramètres sont évalués, soit la dimension de l'image et la dimension des fenêtres d'inspection. Les paramètres sont évalués avec les données du tableau 5.1.

Tableau 5.1 Paramètre Zone Projection

Dimensions images	100 × 200	50 × 100
Dimensions fenêtres	5 × 5	10 × 10

Pour chacune des paires de paramètres possibles, il faut extraire les caractéristiques de l'image et calculer le taux de recouvrement. Il faut choisir la paire de paramètres qui minimise ce taux.

5.2.3 ACP

La réduction de la dimensionnalité est réalisée grâce à l'analyse des composantes principales. Pour ce faire, il faut calculer la matrice de covariance de la base de données d'apprentissage. Il faut, ensuite, calculer les vecteurs propres et les valeurs propres de cette matrice de covariance.

Les valeurs propres représentent le taux de variance de chaque caractéristique. Il est ainsi possible de connaître le poids de chaque caractéristique par rapport à la somme totale de la variance. Ce poids est exprimé en pourcentage. Les poids sont ensuite triés par ordre croissant afin de connaître les caractéristiques les plus importantes. Il faut ensuite déterminer combien de caractéristiques seront nécessaires pour atteindre une variance de 95 % par rapport à la somme des variances. Pour terminer, il faut projeter les caractéristiques moins significatives sur les caractéristiques plus significatives à l'aide des vecteurs propres.

Pour entraîner et comparer les performances de différents classificateurs sur la base de données précédemment créée, trois classificateurs seront utilisés : Bayes, K-nn et SVM. Considérant la simplicité du système et de la base de données, les classificateurs plus complexes, par exemple les réseaux de neurones, sont considérés comme superflus. Leurs performances, en termes de précision, ne contrebalancent pas leur complexité d'implantation.

5.2.4 Bayes

Pour créer le classificateur selon Bayes, la base de données d'apprentissage est divisée selon les deux classes du présent problème. Pour chacune de ces classes, il est nécessaire de calculer le vecteur moyen des données (μ_j) et la matrice de covariance (Σ_j). Ces deux variables servent, par la suite, à la classification des échantillons de test.

Pour chacune des images de test, la fonction discriminante de celle-ci sera calculée pour chacune des classes ($d_j(x)$). Il y a ensuite comparaison entre les deux valeurs obtenues pour une même image et la valeur la plus élevée détermine la classe prédite par l'algorithme. Pour chaque image de test, la classe est enregistrée dans une matrice de prédiction.

La matrice de prédiction est ensuite utilisée pour comparer les résultats obtenus avec les étiquettes réelles de la base de données de test. Les erreurs de prédiction sont ensuite accumulées afin d'obtenir le pourcentage d'erreur du classificateur. Considérant le fait que le présent système ne comporte que deux classes, il n'est pas nécessaire de créer une matrice de confusion. Une erreur de classification résultera automatiquement au fait de croire que l'image appartient à la classe qui n'est pas la sienne.

5.2.5 K-nn

Pour créer un classificateur K-nn, les données d'apprentissage sont divisées en deux parties. Une partie sert à l'apprentissage et l'autre à la validation de la donnée k . La base de données est séparée 2/3 - 1/3, soit 2/3 pour l'apprentissage et 1/3 pour la validation.

Ensuite, pour chaque donnée de la partie de validation la distance euclidienne est calculée avec chacune des valeurs de la partie d'apprentissage. Selon le k choisi, les k distances minimales sont prises pour l'attribution de l'étiquette. Un vote de majorité est effectué afin de prédire la classe d'appartenance de la donnée testée. Si aucune valeur ne porte la même étiquette, la valeur avec la plus petite distance euclidienne est sélectionnée. Cette étape est effectuée pour chaque valeur de k voulu.

Une erreur sera cumulée chaque fois qu'il y aura une différence entre la prédiction et la classe réelle de l'échantillon. Pour obtenir le pourcentage d'erreur pour les différents k , la somme des

erreurs est divisée par le nombre de valeurs total. Par la suite, un graphique des taux d'erreurs en fonction de k est tracé.

Une fois le k optimal trouvé sur la base d'apprentissage, il est utilisé sur la base de test afin de calculer le taux d'erreur réel.

5.2.6 SVM

Pour créer un classificateur SVM, les données d'apprentissage sont divisées en deux parties. Une partie sert à l'apprentissage et l'autre à la validation. La base de données est séparée 2/3 - 1/3, soit 2/3 pour l'apprentissage et 1/3 pour la validation.

Afin de bien entraîner le modèle, les valeurs des combinaisons de $[0.1 \ 0.01 \ 0.001 \ 0.0001]$ pour γ et de $[1 \ 10 \ 100 \ 1000 \ 10000]$ pour C sont utilisées. Une étiquette de 1 est attribuée aux valeurs de la classe à analyser et une étiquette de -1 à toutes les autres classes. Il faut noter que cette tâche doit être effectuée pour chacune des classes. Le modèle de classification est entraîné à l'aide des paramètres γ et C , ainsi qu'avec la base de données d'apprentissage. Le modèle entraîné servira de classificateur pour la base de données de validation. Les résultats sont enregistrés dans une matrice $N \times 2$, où N représente le nombre d'éléments de la base de données et 2 le nombre de classes. Une matrice de prédiction sera ainsi créée et une comparaison avec la matrice d'étiquette permettra d'évaluer le taux d'erreur pour cette combinaison de paramètres. Une fois les taux d'erreurs trouvés pour toutes les combinaisons de paramètres, les paramètres permettant le plus petit taux d'erreur seront retenus comme les paramètres optimaux γ^* et C^* .

Pour la phase de test, la phase d'apprentissage sur la base de données entière à l'aide des paramètres optimaux est faite, afin d'entraîner le modèle de test. Par la suite, la classification de la base de données de test est faite et les résultats sont enregistrés dans une matrice. À partir de cette matrice obtenue, une matrice de prédiction est créée selon les valeurs maximales. Les prédictions sont comparées à la matrice d'étiquette de test afin d'en évaluer son taux d'erreur.

5.2.7 Comparaison des performances

Une fois les trois classificateurs créés, leurs performances seront comparées selon deux critères : 1) l'exactitude des prévisions effectuées ainsi que 2) le temps de calcul nécessaire pour faire cette prévision. Considérant que, dans une utilisation *in situ* du système présenté, l'entraînement se fait bien avant d'avoir besoin de classifier un nouvel échantillon, le temps nécessaire pour cet entraînement ne sera pas pris en compte. Dans un même ordre d'idée, le fait que la version finale d'un tel système soit implémentée sur un ordinateur de haute performance permet d'omettre la quantité de mémoire nécessaire à l'utilisation du classificateur.

5.3 Résultats

Cette section présente les résultats obtenus en effectuant les étapes présentées dans la précédente méthodologie. Les résultats sont présentés selon l'ordre dans lequel ils ont été obtenus.

5.3.1 Création de la base de données

La création de la base de données est une étape essentielle à l'atteinte de l'objectif principal. Les 472 photos prévues ont été prises et séparées en deux classes, soit sans la présence de bulle ou avec la présence de bulle. La figure 5.6 présente un exemple de chacune des classes.

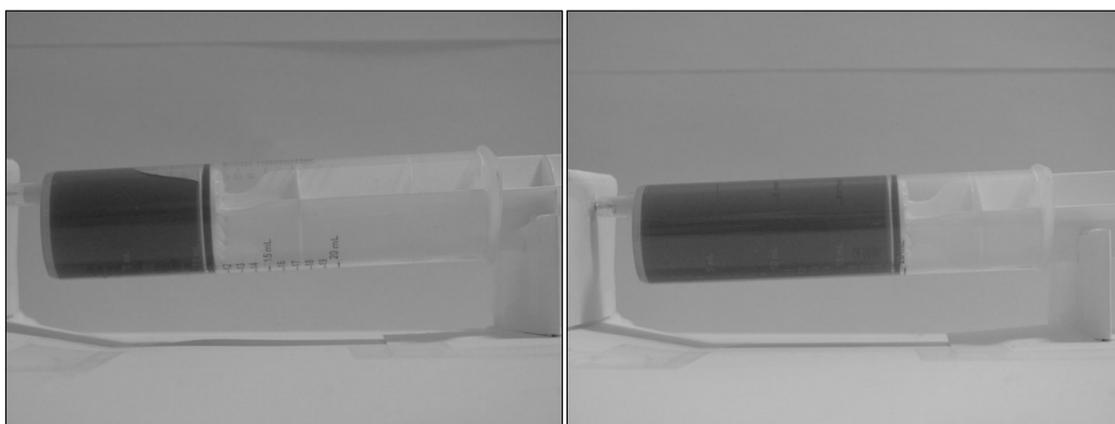


Figure 5.6 Prise de photo pour base de données, classe avec bulle à gauche et classe sans bulles à droite

Les photos ont été prises en modifiant constamment le volume de liquide présent dans la seringue et en faisant varier la grosseur des bulles. Le but étant de remplir la base de données avec le plus d'exemples possible.

Comme prévu, le design du support a permis d'avoir un bon contraste avec les éléments composant le fond et a permis d'utiliser la gravité afin de concentrer les bulles près du piston de la seringue. Deux éléments seront fort utiles pour le reste du projet, permettant de simplifier le travail des algorithmes de classement, et peuvent être transférés dans la version finale du système.

L'étape du traitement d'image a été la plus longue de cette section. De nombreux tests ont été effectués afin de trouver une combinaison de traitements qui permet de binariser l'image sans perdre de détails. L'image a ensuite été recadrée et repositionnée afin de présenter le point d'intérêt de celle-ci, soit la section de l'image présentant la partie de la seringue contenant le liquide. L'application de la méthode de segmentation par histogramme a permis d'obtenir un résultat satisfaisant. La figure 5.7 montre les images selon différentes étapes du traitement. La photo de droite montre l'image avec une augmentation des contrastes par aplanissement de l'histogramme, suivie au centre d'une segmentation par imposition de seuil sur l'histogramme. Finalement, l'image de droite présente la zone d'intérêt recadrée, libérée des pixels parasites et tournée afin d'aligner la seringue avec l'image.

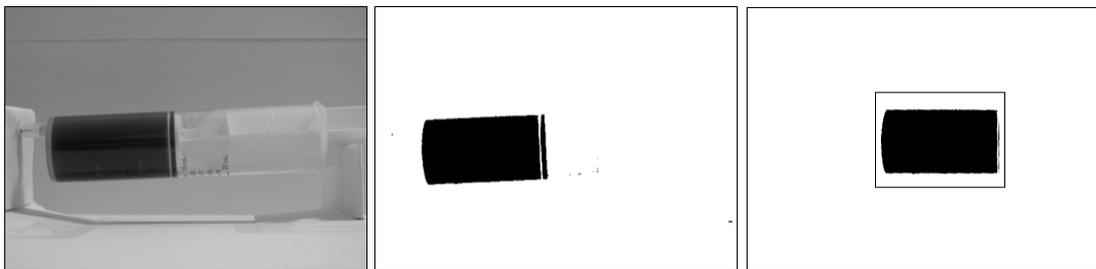


Figure 5.7 Traitements d'image sur la base de données

Il est à noter que l'algorithme créé permet de repérer et de recadrer une seringue, peu importe où celle-ci se trouve dans la photo. Le fait de placer la seringue toujours au même endroit devient donc superflu pour la reconnaissance de bulle, mais nécessaire à la prise de mesure pour déterminer la position du joint d'étanchéité (voir section 5.1).

Les différents paramètres de la projection de zone ont été implémentés dans l'algorithme programmé à cet effet. Le tableau 5.2 présente les taux de recouvrement obtenus pour les quatre différentes paires de paramètres.

Tableau 5.2 Taux de recouvrement des paramètres tests

		Fenêtres	
		10 × 10	5 × 5
Dimensions images	100 × 200	1,0204	1,2755
	50 × 100	3,0612	2,551

À la lumière des résultats obtenus, il est possible de conclure que la meilleure combinaison serait une image redimensionnée à 100 × 200 et dont les fenêtres d'observation seraient de 10 × 10. Cela pourrait porter à croire qu'une image de plus grandes précisions avec des fenêtres d'observation plus grande permettrait d'avoir un taux de recouvrement plus petit de façon générale. Cependant, pour en arriver à cette conclusion, d'autres essais devraient être réalisés. Un algorithme pourrait déterminer la tendance de cette fonction pour en déterminer les minimums locaux et globaux.

La projection de zone avec les paramètres choisis donne une base de données composée de vecteurs de caractéristique de dimension 230. Il a été déterminé que l'ACP serait utilisé afin de réduire la dimensionnalité des vecteurs de caractéristique. Le taux de variance a été fixé à 95 % de la variance total. La figure 5.8 présente le graphique des taux cumulés des différentes caractéristiques placées en ordre décroissant.

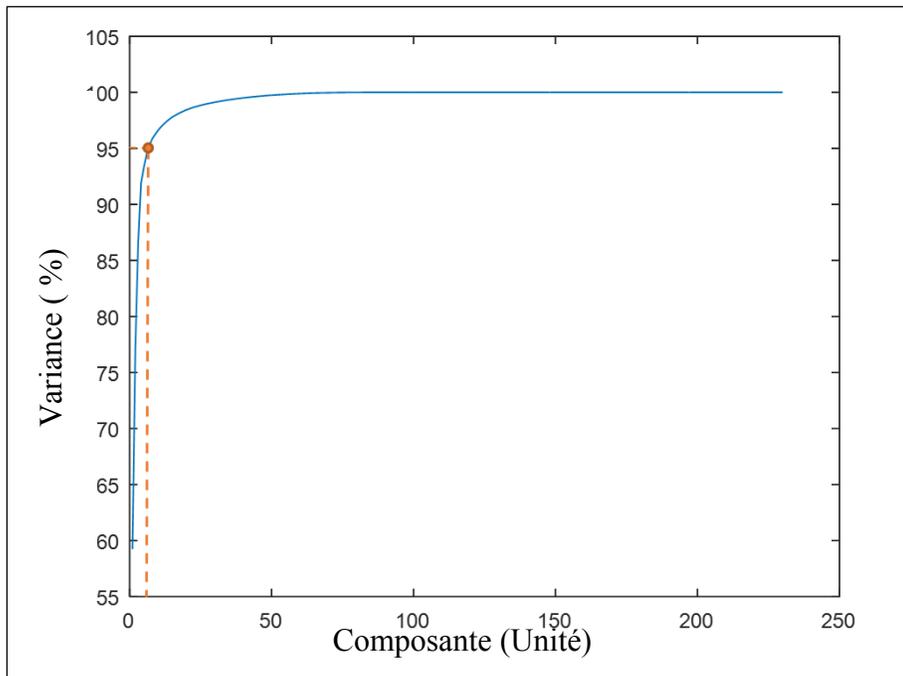


Figure 5.8 Variabilité exprimée en fonction du nombre de composantes

Il est possible d'observer sur ce graphique que le niveau de variance cumulative de 95 % est rapidement atteint. Plus précisément, seulement 7 caractéristiques sont nécessaires. Ce résultat est possiblement influencé par la position de l'élément différenciateur entre les classes. En effet, plus de 50 % de la zone d'intérêt des images de la base de données reste inchangée que ce soit pour une classe ou pour l'autre. Les nouveaux vecteurs de caractéristiques, ainsi créés, ciblent donc très certainement le coin supérieur droit des différentes photos.

5.3.2 Implémentation et comparaison des classificateurs

Le premier classificateur mis en place est le Quadratique de Bayes. L'échantillon d'apprentissage a permis de calculer les matrices de covariance et les vecteurs moyens des données de chaque classe. Ceux-ci ont été utilisés afin de créer les fonctions discriminantes à deux classes.

La phase de test a été réalisée avec les 80 échantillons de la base de données de test. Le pourcentage d'erreur commise sur celle-ci est de 0 %. Les 80 échantillons ont été classés dans leur classe respective en un temps de 0.039 seconde. Le tableau 5.3 présente ces résultats.

Tableau 5.3 Résultats Quadratique Bayes

Erreur sur la base de test (%)	0
Temps de traitement (seconde)	0,039

Le second classificateur développé est le k-nn. Pour commencer, la base de données d'apprentissage a été divisée en deux parties représentant 2/3 et 1/3 de tous les éléments. Ces deux parties ont permis l'apprentissage et la validation des différents k entre 1 et 20. La figure 5.9 et le tableau 5.4 présentent les résultats obtenus.

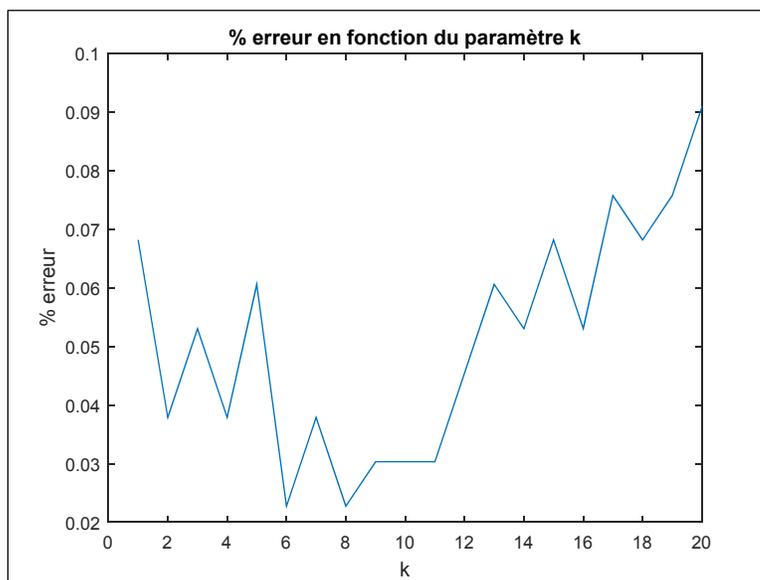


Figure 5.9 Pourcentages erreur en fonction du paramètre k

Tableau 5.4 Pourcentages erreur en fonction du paramètre k

k	% d'erreur
1	6,8182
2	3,7879
3	5,3030
4	3,7879
5	6,0606
6	2,2727
7	3,7879
8	2,2727
9	3,0303
10	3,0303
11	3,0303
12	4,5455
13	6,0606
14	5,3030
15	6,8182
16	5,3030
17	7,5758
18	6,8182
19	7,5758
20	9,0909

Les résultats obtenus proposent que les paramètres k optimaux soient 6 et 8 avec un pourcentage d'erreur de 2.2727 %. C'est le paramètre $k = 6$ qui sera retenu. Il n'y a pas de différence majeure entre le fait de choisir un paramètre ou l'autre. Celui-ci n'affecte que la partie du vote majoritaire se déroulant à la toute fin de l'algorithme. Le fait de choisir le plus petit des deux paramètres n'affecte pas le temps de traitement.

La base de données de test a été mise dans l'algorithme de classification k-nn avec $k = 6$. Les résultats obtenus sont très semblables à ceux de Bayes. Le tableau 5.5 présente les résultats.

Tableau 5.5 Résultats k-nn

Erreur sur la base de test (%)	0
Temps de traitement (seconde)	0,018

Le dernier classificateur est le SVM. La base de données d'apprentissage a été divisée en deux parties représentant $2/3$ et $1/3$ de tous ses éléments. Ces deux parties ont permis l'apprentissage et la validation des différentes paires de paramètres γ et C . La figure 5.10 et le tableau 5.6 montrent les résultats obtenus.

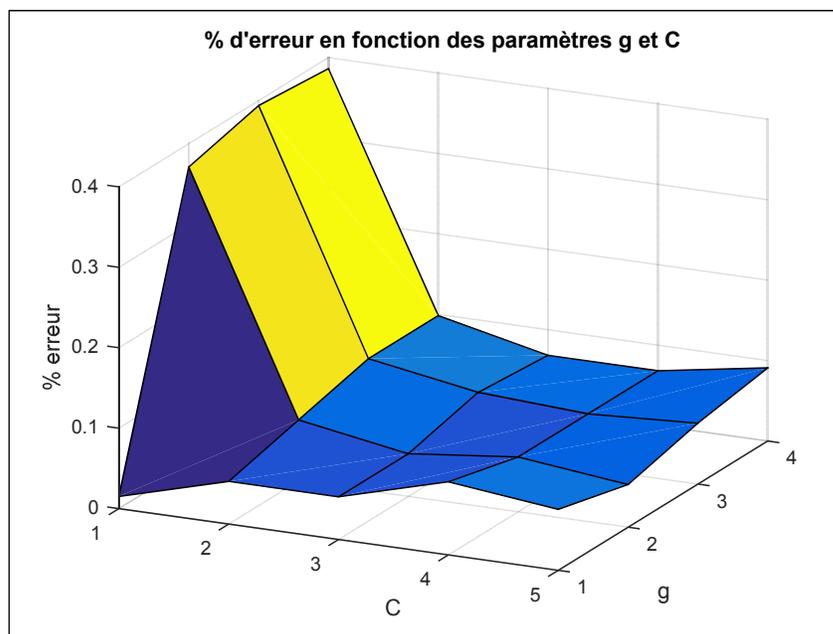


Figure 5.10 Pourcentages erreur en fonction des paramètres γ et C

Tableau 5.6 Pourcentages erreur en fonction des paramètres γ et C

		C				
		1	10	100	1 000	10 000
γ	0,1	1,25 %	5,30 %	5,30 %	9,09 %	7,58 %
	0,01	37,12 %	7,58 %	5,30 %	6,82 %	5,30 %
	0,001	39,39 %	9,85 %	7,58 %	6,82 %	7,58 %
	0,0001	38,64 %	9,85 %	6,82 %	6,82 %	9,09 %

Afin de minimiser le potentiel d'erreur du classificateur, les paramètres $\gamma=0,1$ et $C=1$ ont été sélectionnés. Leur pourcentage d'erreur prévu est de 1,25 %.

Les 80 échantillons de la base de données de test ont été classifiés grâce à la méthode SVM. Le tableau 5.7 présente les résultats obtenus.

Tableau 5.7 Résultats SVM

Erreur sur la base de test (%)	0
Temps de traitement (seconde)	0,053

Tous comme les deux classificateurs précédents, aucune erreur de classification n'a été commise au moment de la validation avec la base de données de test. Par ailleurs, le temps de traitement a été, cette fois, plus élevé que ceux de Bayes et de Knn.

Le tableau 5.8 présente les résultats combinés des trois méthodes de classification.

Tableau 5.8 Résultats combinés

	Erreur (%)	Temps de traitement (seconde)
Bayes	0	0,039
K-nn	0	0,018
SVM	0	0,053

5.4 Analyse

Le fait que les trois classificateurs aient été parfaits, en termes de nombre d'erreurs, est à la fois surprenant et encourageant. Deux éléments peuvent expliquer ce résultat. Tout d'abord, la simplicité du système à évaluer. En effet, celui-ci ne comporte que deux classes, les échantillons avec bulles et les échantillons sans bulles. Ensuite, le traitement d'image appliqué sur ces échantillons simplifie aussi énormément le problème. Les résultats auraient été surement différents si une classification sur l'image brute sans recadrage et sans binarisation avait été tentée. De plus, la qualité de photos présentes dans la base de données utilisée pour la comparaison des classificateurs pourrait influencer, voire biaiser, le résultat. La faible quantité d'échantillons peut donner une mauvaise représentation de la performance réelle d'un classificateur.

Par ailleurs, il est remarqué que le temps de traitement des différents classificateurs est très rapide; quatre-vingts échantillons classés en moins d'un vingtième de seconde pour le plus lent des trois. Pour ce critère d'évaluation, le K-nn se distingue des autres algorithmes. Il ne nécessite que 18 millièmes de seconde pour classer un échantillon. Par ailleurs, se temps de traitement augmentera si la quantité d'échantillons de la base d'apprentissage augmente.

Pour conclure cette section, aucun des trois algorithmes ne s'est réellement distingué des autres au niveau des critères de performance évalués. De ce fait, d'autres expérimentations seront nécessaires afin de déterminer l'algorithme de classement le plus approprié à l'inspection des seringues de médicaments oraux.

CHAPITRE 6

DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 Système de manipulation

Les différents sous-systèmes qui constituent les systèmes de manipulation de la cellule de remplissage de seringues de médicaments liquides oraux sont les composantes maitresses du présent projet. Elles permettent d'acheminer les différentes matières premières d'une station de travail à une autre sans intervention humaine. Elles sont, de ce fait, à la base du concept d'automatisation du projet. Le fait d'utiliser une structure métallique comme fondation fut la décision la plus simple à prendre. Il est tout à fait logique d'emprunter cette avenue pour des raisons techniques, comme le fait de fixer solidement et précisément les robots, et pour des raisons de sécurité, comme le fait de séparer adéquatement les opérateurs du système et les bras robotisés. Par contre, il est à noter que le fait de fixer les robots au plafond de la structure est un choix pratique et un choix esthétique. Du point de vue pratique, le but de la majorité des systèmes automatisés est de minimiser l'espace de travail du système. Pour atteindre cet objectif, il faut maximiser le taux d'utilisation du volume intérieur de la cellule. En fixant le robot de façon normale, soit la base vers le bas, la majorité de notre espace de plancher est automatiquement sacrifiée. De plus, l'espace disponible au plafond est libéré. Le fait est que, pour la majorité des systèmes qui doivent être ajoutés à une cellule automatisée, l'espace disponible au plafond est difficilement utilisable. Il faut donc d'augmenter la superficie de la cellule. Cela entraîne une augmentation de la portée du robot à utiliser et par le fait même entraîne une augmentation des coûts. En fixant les robots au plafond, l'espace de plancher de la cellule est complètement libéré. Celui-ci peut ensuite être utilisé pour accueillir d'autres sous-systèmes. Du point de vue esthétique, le fait d'utiliser deux bras robotisés fixés au plafond permet aux gens, du milieu de la santé, de faire un rapprochement entre le travail du robot et le travail présentement effectué par les techniciens et les infirmières responsable de cette tâche. Ce rapprochement facilite l'acceptation du système par les techniciens et augmente le niveau de confiance des pharmaciens et des gestionnaires en lien avec la sécurité médicale du système. La sécurité est un enjeu indéniable pour les décideurs du système et ils ont mentionné, à plusieurs reprises au courant

du projet, que le concept proposé les rejoignait en opposition avec un système qui serait de type « boîte noire ». Le fait de pouvoir suivre les étapes de remplissage une à une, de voir le bras robotiser prendre les bouteilles et les seringues de la même manière qu'un être humain est un soulagement pour eux.

D'autre part, l'utilisation d'un bras robotisé sériel pour ce projet est en soit une décision importante. Le concept aurait pu être basé sur un système de convoyeur acheminant les matières premières et les produits en cours, d'une station de travail à l'autre. Ce choix aurait potentiellement fait épargner des coûts au niveau de l'achat des équipements. Plus de pièces auraient pu être faites maison et adaptées directement pour les besoins du projet. Le fait d'avoir un système de convoyeur directement adapté aux besoins présents limite la facilité d'adaptation du système à l'évolution des besoins. Un des avantages premiers d'utiliser un bras robotisé sériel est sa flexibilité. Comme définie par ISO (ISO, 2018), un robot sériel est multitâche, flexible et reprogrammable. De ce fait, advenant un changement dans les besoins du système, que ce soit l'ajout d'un volume de seringue différent ou l'ajout d'une station de remplissage, l'utilisation d'un robot sériel permettra une adaptation rapide de la cellule aux nouvelles contraintes, et ce, sans modification mécanique majeure. La flexibilité des bras robotisés permet aussi d'améliorer l'optimisation des séquences de travail du système, après que celui-ci ait été construit et testé.

L'utilisation d'un robot sériel, en opposition à l'utilisation d'un robot parallèle ou d'un robot cartésien, s'explique aussi en partie en raison de la flexibilité qu'il apporte. Les six degrés de liberté d'un bras sériel permettent d'atteindre la majorité des poses nécessaires dans l'espace de travail. D'un autre côté, le robot parallèle, avec ses quatre degrés de liberté, et le robot cartésien, avec ses trois degrés de liberté, sont plus limités, plusieurs poses étant simplement inatteignables avec ceux-ci. De plus, comme mentionné au paragraphe précédent, il ne faut pas sous-estimer l'aspect esthétique des robots sériels rappelant les bras d'un humain.

Pour conclure sur le choix des robots, en observant la méthode de manipulation utilisée par les compagnies ayant déjà développé des systèmes de remplissage de seringue dans le domaine des médicaments injectables, il est possible de voir que les robots sériels combinent une bonne part du marché. Le RIVA (ARxIUM, 2018), les deux modèles de i.v. STATION (Omniceil,

2018), l'INTELLIFILL IV (Baxter, 2018), l'APOTECACHemo (Loccioni, 2018), l'Extrafill-05 et le FPS5 (Marchesini, 2018) utilisent tous ce type de robot. Ce fait tend à confirmer que l'utilisation de robots sériels est un choix judicieux.

Du côté du système de préhension, le choix de préhenseurs parallèles électriques est facilement justifiable considérant leur précision et le peu d'espace qu'ils requièrent pour effectuer leur travail. Ils sont aussi généralement silencieux, ce qui est un détail important lorsqu'un système automatisé est destiné à un milieu non industriel. De plus, ne requérant pas d'alimentation en air comprimé, le service n'étant pas disponible dans le milieu hospitalier, ce type de préhenseur diminue les coûts de la cellule en évitant d'y ajouter une pompe et un réservoir pour l'air comprimé.

6.2 Système de remplissage

Le système de remplissage proposé dans le présent projet est une amélioration directe du système proposé par Kalafate (2010). L'utilisation de plusieurs actionneurs électriques en opposition à l'utilisation d'un seul actionneur permet de libérer les robots tout au long du processus de remplissage. Le fait de rendre le système de remplissage moins dépendant des robots amène une amélioration du temps de cycle global du système. Un robot peut, en effet, effectuer des tâches en lien avec la gestion de la réserve de bouteille, pendant que l'autre effectue des tâches en lien avec le bouchonnage et l'étiquetage des produits finis, le tout sans ralentir le processus de remplissage. Le fait de rendre le système de remplissage plus autonome permet aussi d'intégrer plusieurs stations de remplissage au système. Intégrer plus d'une station de remplissage permet de remplir plusieurs seringues en parallèle, et donc de réduire le temps de cycle, sans affecter la qualité du produit fini. Il sera toutefois nécessaire de construire un prototype fonctionnel de la station de remplissage afin de déterminer avec précision le temps de cycle du concept présenté. Il est cependant possible d'évaluer le temps de remplissage en se référant aux fiches techniques des composantes proposées dans le rapport de Webb (2017). Ce temps de cycle est d'environ 20 secondes. Il est inférieur au temps de cycle de 21 secondes, nécessaire à l'atteinte de l'objectif de production du CHU Sainte-Justine, mais ne laisse pas suffisamment de temps pour ajouter les tâches des gestions des médicaments, d'inspection, de bouchonnage

et d'ensachage. Ce temps de remplissage est tout de même une grande amélioration comparativement aux 45 secondes nécessaires pour le remplissage d'une seringue dans la preuve de concept présenté par le CoRo (2010).

6.3 Système de gestion des matières premières

Les propositions entourant les sous-systèmes de gestion de matières premières présentés dans le présent document mettent les bases pour la version finale de la cellule robotisée. Le fait d'utiliser des chargeurs à seringues permettant d'accumuler bon nombre de seringues dans un espace restreint permet de limiter le nombre d'interactions nécessaire entre l'opérateur et la machine. Le but étant de libérer autant que possible le personnel de la pharmacie en augmentant au maximum l'autonomie de la cellule. De plus, le concept proposé permet de limiter le nombre de pièces mobiles et de pièces mécaniques en priorisant l'utilisation de la gravité pour faire circuler les seringues dans le système.

Le concept proposé pour la gestion des bouteilles de médicament permet de maximiser l'utilisation du système d'adaptateur universel des bouteilles. Ce dernier permet de positionner les bouteilles de façon précise et stable sur le support métallique. Il permet aussi d'éviter que des contaminants (par ex. de la poussière ou d'autres médicaments liquides) ne pénètrent dans la bouteille de médicament. Le fait d'avoir une réserve de médicament contenant la centaine de bouteilles utilisée quotidiennement dans une pharmacie d'hôpital pédiatrique permet de rendre le système plus autonome. Il nécessite ainsi moins d'intervention de l'opérateur pour le remplissage des médicaments et ces interventions peuvent être concentrées et effectuées au même moment que le remplissage des seringues.

En terminant, l'implantation de la zone d'échange de bouteilles entre l'opérateur et le bras robotisé permet d'assurer la sécurité de ce premier. Le fait d'empêcher que le robot et l'opérateur aient accès à la zone d'échange au même moment assure que l'opérateur ne sera pas blessé par le robot. De plus, l'utilisation de la zone d'échange oblige le robot à positionner les bouteilles dans la réserve de médicament. Ce faisant, le système est toujours en plein contrôle de son inventaire. À l'opposer, si l'opérateur mettait lui-même les médicaments dans la réserve, les risques de malentendu entre l'humain et la machine augmenteraient. L'opérateur pourrait,

par exemple, dire au système qu'il met la bouteille du médicament A à la position X du support à médicament et le médicament B à la position Y, mais malencontreusement mettre le médicament A à la position Y et le médicament B à la position X. Il serait alors pratiquement impossible pour le système de détecter la faute. Les doses produites par la suite à l'aide de ses deux médicaments seraient donc non conformes et potentiellement dangereuses.

6.4 Système d'inspection

La fiabilité du système d'inspection fourni avec le ROSP 2R-150 est un élément à ne pas sous-estimer. Il est le dernier rempart de la cellule contre les erreurs. Comme mentionné dans la revue de littérature, le pharmacien a la responsabilité d'inspecter chaque dose de médicament produite dans la pharmacie. De ce fait, une erreur commise par le système n'entraînera pas automatiquement une erreur de médication pour le patient, mais elle minera grandement la confiance des professionnels de la santé envers le système de remplissage.

Les expériences réalisées permettent de démontrer qu'un système d'inspection par reconnaissance de formes serait tout à fait adapté au besoin du système. L'inspection pour repérer la présence de bulles pourrait être effectuée avec un taux de réussite avoisinant les 100 %. Pour améliorer la fiabilité des résultats, une base de données plus volumineuse devra être créée. De ce fait, l'utilisation de l'algorithme k-nn n'est pas le meilleur choix. En effet, malgré le temps de traitement très bas obtenu lors des tests, une augmentation de la grosseur de la base de données entraînera une augmentation du temps de traitement d'un échantillon à classer. Les algorithmes Bayes et SVM sont donc à prioriser. Il est tout de même à noter que les tests effectués dans le présent projet tentaient simplement de prouver que l'inspection était possible avec un tel système. Beaucoup de travail reste à accomplir afin de déterminer une méthode optimale.

En terminant au sujet de l'inspection, le fait d'incliner légèrement la seringue afin de concentrer les bulles d'air en un seul et unique endroit, combiné au fait d'utiliser un fond blanc pour bien contraster avec la seringue lors de la prise de photo, semble grandement faciliter le travail des algorithmes de reconnaissance de formes. Un tel système peut facilement être implémenté

dans la version finale de la cellule. La seringue pourrait être déposée sur un support ou maintenue en place par le robot lors de la prise de la photo.

6.5 Recommandations

Le présent projet n'étant qu'une des étapes de la démarche d'automatisation de la tâche de remplissage des seringues orales du CHU Sainte-Justine, plusieurs recommandations peuvent être proposées pour les prochaines étapes du projet. Les recommandations en lien avec les sujets couverts dans le présent document seront tout d'abord abordées, suivront ensuite les recommandations sur les autres sous-systèmes de la cellule.

La première recommandation concerne l'envergure du projet lui-même. Il serait intéressant de concevoir un système plus petit pour la prochaine phase de prototypage. En opposition avec les propositions faites précédemment, le prototype pourrait être en mesure d'accueillir entre 20 et 30 médicaments, ceux-ci pourraient être sélectionnés parmi les médicaments les plus souvent utilisés. Il pourrait aussi prendre en charge les quatre plus petits volumes de seringues et non les six différents volumes comme dans le cas présent. Il est à noter que les quatre plus petits volumes de seringues comptent pour près de 85 % de la production journalière. Ceci permettrait de simplifier le design du système, mais surtout de réduire les coûts de fabrication. Il serait potentiellement possible d'effectuer l'ensemble des tâches avec un seul robot. Considérant les 25 000 \$US nécessaires pour l'achat d'un robot, le fait d'en utiliser qu'un est non négligeable sur le prix total de la cellule.

En ce qui concerne le système de préhension et comme discuté dans le chapitre à ce sujet, il serait intéressant d'équiper le robot d'un système de double préhenseur. Cela permettrait de diminuer le nombre de déplacements à vide effectués par le robot et ainsi diminuer le temps de cycle du système.

Au niveau de la gestion des matières premières, certaines inquiétudes en matière d'ergonomie peuvent être soulevées. Selon le concept, de gestion des seringues, présenté, celles-ci doivent être insérées une à une dans les chargeurs par le technicien. Cela implique que l'opérateur

devra effectuer des mouvements répétitifs en ayant les mains au-dessus des épaules. Cette position est favorable au développement de trouble musculosquelettique. Pour corriger ce problème, un chargeur supplémentaire pourrait être rempli en position assise sur une table de travail adjacente au système. Une fois rempli, le chargeur externe pourrait être connecté au chargeur fixe de la machine afin de remplir ce dernier en un seul mouvement.

Toujours en ce qui concerne la gestion des matières premières, la disposition des bouteilles vides est à prendre en considération. Un simple récipient à déchet pourrait être ajouté au système. Il serait intéressant de profiter de cette occasion pour ajouter un système de détrompeur à l'entrée de ce récipient afin d'empêcher le technicien de jeter, par inadvertance, la bouteille vide sans avoir préalablement enlevé l'adaptateur universel. Le détrompeur pourrait simplement être un trou dont le diamètre serait légèrement plus gros que le diamètre de la plus grosse bouteille, mais moins gros que la longueur de l'adaptateur universel. De ce fait, il serait impossible de jeter les deux pièces en même temps.

Afin d'améliorer le système d'inspection et surtout d'augmenter son attrait pour les gestionnaires d'hôpitaux, il serait intéressant de créer une base de données gardant en mémoire une photo de chacune des doses inspectées par le système. De cette façon, si un problème survient au moment d'administrer le médicament ou après son administration, l'hôpital aura en main une photo montrant l'état du produit lorsqu'il est sorti du système.

De plus, il serait fort intéressant d'évaluer la possibilité de différencier les différents types de médicaments à l'intérieur des seringues. Ce niveau de sécurité supplémentaire permettrait de s'assurer que le technicien a fourni le bon médicament au système et que le système a utilisé le bon médicament à partir de sa réserve de bouteilles.

L'interface utilisateur du système est aussi un élément à ne pas négliger dans les prochaines étapes du projet. Il est important de se rappeler que les personnes qui utiliseront ce système n'œuvrent pas dans un milieu industriel ou technologique. L'interface devra donc être simple d'utilisation et avoir une esthétique soignée. Il faudra aussi prendre en compte certains niveaux de sécurité et certains niveaux de droit d'accès. Un technicien peut, par exemple, avoir accès au démarrage et à l'arrêt de la cellule ainsi qu'au remplissage des consommables, mais devra

faire appel à un pharmacien pour entrer une commande spontanée ou encore ajouter un médicament à la base de données du système.

Le présent projet ne couvrant pas l'optimisation du système, un travail important serait à réaliser sur ce point. Certaines étapes de développement de la cellule doivent, par ailleurs, être réalisées avant de pouvoir s'attaquer à cette partie du problème. L'optimisation du système peut consister à l'ordonnancement des tâches du robot, à l'optimisation des trajectoires de mouvement ou encore au positionnement des bouteilles de médicaments dans la réserve. Le but étant de réduire au maximum le temps de cycle du système en impactant au minimum les équipements utilisés.

La prochaine recommandation est liée à l'évolution des besoins des clients. Le personnel technique responsable du développement du produit devra être à l'affût des changements dans les pratiques du milieu des pharmacies hospitalières. Un bon exemple concerne les seringues. Un nouveau standard pour les buses de celle-ci vient d'être mis sur le marché. Celui-ci est nommé ENFIT. Selon ce standard, la buse est maintenant équipée d'un système de détrompeur empêchant les seringues orales d'être confondues avec les seringues parentérales et injectées dans la tubulure des solutés. Le système de détrompeur exige, par contre, que les bouteilles soient équipées d'un embout de remplissage particulier. Cela influencera indéniablement la conception du système de remplissage et du système de bouchonnage.

En terminant, le personnel technique responsable du développement du produit devra effectuer un travail de recherche approfondi sur les normes de sécurité machine à respecter ainsi que sur les normes médicales qui sont en place. Au courant du présent projet, des démarches ont été entreprises auprès du bureau d'accréditation en équipement médical de Santé Canada. Selon eux, le projet n'est pas, pour l'instant, considéré comme un appareil médical, car il n'est pas en contact direct avec le patient et qu'il n'est pas utilisé dans un but diagnostique. Il est tout de même nécessaire de garder ce dossier bien en vue, car un simple changement au niveau des normes peut occasionner des coûts et des délais supplémentaires mettant le projet en péril.

CONCLUSION

En terminant, il a été démontré que les centres hospitaliers sont des postes budgétaires importants pour les gouvernements provinciaux du Canada. De ce fait, l'automatisation de certaines tâches manuelles est une avenue à explorer afin d'augmenter la qualité des services sans nécessairement augmenter la quantité d'argent injecté dans le système de santé. En ce sens, ce projet avait pour but d'établir les bases d'un système automatisé de remplissage de seringues orales destiné à la pharmacie centrale du CHU Sainte-Justine à Montréal. Cette tâche représente un des plus grands fardeaux de la pharmacie de cet hôpital pour enfant. Le centre dépense plus de 650 000 \$ par année en main-d'œuvre pour la réalisation de celle-ci. Le tout nécessite quatre techniciens en pharmacie et six membres du personnel infirmier à temps plein.

Cinq éléments distincts ont été discutés dans le présent document. Premièrement, une revue complète des méthodes, présentement utilisées par le CHU Sainte-Justine, et des solutions disponibles sur le marché a été faite. Deuxièmement, un concept a été proposé pour les systèmes de manipulation, soit la structure de la cellule, les bras robotisés et les préhenseurs. Troisièmement, un concept a été proposé pour le système de remplissage des seringues. Quatrièmement, un concept a été proposé pour le système de gestion des matières premières, soit les six volumes de seringues orales et la centaine de bouteilles de médicaments liquides oraux. Cinquièmement, une évaluation sommaire de trois algorithmes de reconnaissance de formes a été réalisée pour déterminer la pertinence de cette méthode dans la réalisation d'un système d'inspection pour la cellule de remplissage.

En ce qui a trait aux pratiques du CHU Sainte-Justine, le centre utilise la méthode de gestion des médicaments appelée « unit dose ». Cette méthode consiste à reconditionner à l'avance les médicaments prescrits par les médecins dans la pharmacie centrale de l'hôpital. Le reconditionnement doit se faire dans un emballage permettant de protéger et d'identifier le médicament. Il doit aussi permettre au personnel soignant d'administrer facilement et rapidement la dose prescrite. En ce qui concerne spécifiquement les médicaments liquides, le CHU Sainte-Justine utilise des seringues orales en plastique pour mesurer et protéger les doses. Les se-

ringues sont remplies manuellement en soutirant le liquide directement de la bouteille de médicament. Une fois le remplissage réalisé, un pharmacien fait l'inspection de toutes les doses préparées au courant de la journée avant que celles-ci ne soient acheminées sur les étages.

Il n'existe malheureusement pas de solution à ce problème sur le marché. Pourtant, plusieurs autres systèmes sont en vente afin de remédier à des problèmes similaires en ce qui a trait aux médicaments oraux solides ou encore aux médicaments injectables. Dans le cas des médicaments liquides oraux reconditionnés en seringues orales, seules certaines solutions semi-automatisées sont disponibles. Elles nécessitent toutes l'intervention d'un technicien pour la préparation de chaque dose. Elles deviennent donc plus des outils de travail que des solutions à part entière. De plus, ces systèmes utilisent généralement des pompes péristaltiques, ce qui entraîne un besoin en maintenance et en nettoyage pratiquement égal aux gains d'efficacité réalisés.

Le concept de système de manipulation proposé utilise un support en profilé d'aluminium assemblé et deux bras robotisés de type sériel. De plus, deux préhenseurs électriques de type parallèle sont utilisés. La combinaison de ces trois éléments donne au système une flexibilité lui permettant de prendre en charge la centaine de bouteilles différentes ainsi que les six volumes de seringue. Cette flexibilité permettra aussi au système de plus facilement s'adapter à l'évolution des besoins de la pharmacie. Pour améliorer la prise sur les deux derniers éléments mentionnés, des systèmes mécaniques ont été développés. Pour la manipulation des seringues, des doigts sont ajoutés au préhenseur. Ceux-ci permettent de contraindre la seringue dans toutes les directions et de conserver l'axe central de la seringue au même endroit par rapport au préhenseur, que ce soit pour une seringue de 1 ml ou pour une seringue de 60 ml. Pour la manipulation des bouteilles, un adaptateur universel a été développé. Un des défis de ce projet est lié à la grande variété de volumes et de formes que peuvent prendre les bouteilles de médicaments. Le seul élément des bouteilles qui est relativement constant est le goulot, dont seul le diamètre varie. L'adaptateur universel se fixe donc au goulot des différentes bouteilles. Il est ajusté en fonction du diamètre des goulots de façon manuelle par l'opérateur. Il permet aussi d'éviter toute contamination du médicament et assure une prise stable pour le robot.

Du côté du système de remplissage, le concept proposé utilise trois actionneurs électriques à multiples positions. Ceux-ci ont pour but d'augmenter l'autonomie du système de remplissage en réduisant au minimum les interventions des robots dans cette partie du processus. Pour ce faire, les actionneurs peuvent maintenir la bouteille de médicament et la seringue en place, ils peuvent faire pivoter l'assemblage, afin de faciliter la descente du liquide dans la seringue, et ils peuvent effectuer le remplissage de la seringue. Cette autonomie permet de réduire le temps de cycle du remplissage et permet d'ajouter plusieurs stations de remplissage au système final.

En ce qui concerne les systèmes de gestion des matières premières, trois propositions ont été présentées. La première concerne l'emmagasiner des seringues. Celles-ci peuvent être entreposées dans des chargeurs à même la cellule. Les chargeurs empilent les seringues en position horizontale. Le tout permet au robot de récupérer les seringues dans une position précise. La seconde proposition concerne la gestion de réserve de bouteille. Celle-ci met à profit l'adaptateur universel développé, préalablement, pour faciliter la manipulation des bouteilles par le robot. L'adaptateur permet aussi de ranger les bouteilles en réserve sur un support métallique. Le positionnement des bouteilles sur ce support est entièrement géré par le robot. En d'autres mots, c'est le robot qui doit aller positionner les bouteilles sur le support et aller les reprendre lorsque le système en a besoin. Cela nous amène à la troisième et dernière proposition de cette section. Pour que le robot soit en mesure de positionner lui-même les bouteilles sur le support métallique, l'opérateur doit être en mesure de remettre cette même bouteille au robot. Il est, en revanche, impensable de laisser un humain et un robot industriel partager un espace de travail sans établir un système de sécurité fiable. Pour ce faire, une zone d'échange est proposée. Cette zone est mutuellement exclusive au robot et à l'opérateur. Une porte permet à l'opérateur d'accéder à la zone d'échange. Lorsque la porte est ouverte, le robot est incapable d'accéder à la zone d'échange, rendant la situation sécuritaire.

Pour ce qui est du système d'inspection, l'évaluation effectuée a permis de confirmer qu'il était possible de mettre en place un système permettant de repérer la présence de bulles d'air à l'intérieur de la seringue. Étant donné que ces bulles d'air viennent fausser le volume de liquide que la seringue contient, il est primordial de pouvoir les identifier. L'utilisation de photos a été suffisante pour créer la base de données nécessaire à l'entraînement de trois algorithmes de

reconnaissance de formes. Le Quadratique de Bayes, le K-nn et le SVM ont été évalués, afin de déterminer l'algorithme le plus performant en ce qui a trait au pourcentage d'erreur et au temps de traitement. L'évaluation n'a malheureusement pas permis de déterminer le meilleur algorithme à utiliser dans cette situation. Il est toutefois à noter que les trois choix ont pu identifier les seringues comportant des bulles d'air sans commettre une seule erreur.

Pour conclure, il est maintenant clair que le développement d'une cellule robotisée de remplissage de seringues de médicaments liquides oraux est un projet qui permettra d'améliorer le quotidien des professionnels de la santé œuvrant au CHU Sainte-Justine. Un tel système permettra d'économiser des sommes importantes en salaire, de réduire les problèmes de santé que subissent les techniciens en lien avec les mouvements répétitifs et de réduire les risques d'erreurs humaines au niveau des médications administrées aux patients. Il reste toutefois encore beaucoup de travail à accomplir avant d'en arriver à un système complètement fonctionnel. En plus de mettre en place les différents concepts présentés dans le présent projet, il sera nécessaire de développer les sous-systèmes qui n'ont pas encore été abordés. Ces sous-systèmes comprennent l'étiquetage, l'ensachage, le bouchonnage et l'interface utilisateur.

L'automatisation est en soit la voie à adopter pour continuer à améliorer la qualité de vie des humains partout sur la planète. Le présent projet n'en est qu'un exemple et il reste encore beaucoup de travail à accomplir dans ce domaine, mais l'ingéniosité et la persévérance de l'homme n'ont pas fini de nous surprendre.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABB (2018). Product specification – IRB 1200. [Version ABB]. Repéré à <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC046982-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- Adankon, M. M. (2005). « Optimisation de ressources pour la sélection de modèles des SVM ». Mémoire de maîtrise en génie de la production automatisée, Montréal, École de technologie supérieure, 127 p.
- Akorn (2018). Lactulose Solution, USP for Oral Administration. Repéré à http://www.akorn.com/prod_detail.php?ndc=50383-779-31
- Al-Jazairi A., Al-Jedai A., Ashour M., Balhareth S., Faris D., Ewing S., Mominah M., Nurgat Z., Qaisi S.K., & Vibar A. (2015). A three-year study of a first-generation chemotherapy-compounding robot. *Am J Health Syst Pharm* 72(12) 1036-1045. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26025995>
- Amazon (2018). Pill Pak – Weekly Twice a Day Blister Pack. Repéré à <https://www.amazon.com/Pill-Pak-Weekly-Twice-Blister/dp/B072HTP1FD>
- American Society of Hospital Pharmacists & American Society of Consultant Pharmacists. (1983). ASHP Technical Assistance Bulletin on Repackaging Oral Solids and Liquids in Single Unit and Unit Dose Packages. *Am J Hosp Pharm.* 40, 451-452.
- American Society of Hospital Pharmacists, inc. (1994). ASHP guidelines for providing pediatric pharmaceutical services in organized health care systems. *Am J Hosp Pharm*, 51, 1690-1692.
- Arxium (2018). Packaging. Repéré à <https://www.arxium.com/index.php/packaging/>
- Arxium. (2018). Innovative Pharmacy Solutions. Repéré à <https://www.arxium.com/index.php/iv-compounding/>
- Australian Journal of Pharmacy (2015). NAPSA student survey: oversupply, wages concerns. Repéré à <https://ajp.com.au/news/napsa-student-survey-oversupply-wages-concerns/>
- Barua. B., Emes, J. & Palacios, M. (2017). *The sustainability of health care spending in Canada 2017*. Fraser Institute. Repéré à <https://www.fraserinstitute.org/studies/sustainability-of-health-care-spending-in-canada-2017>
- Baxter (2018a). Repeater Pump. Repéré à <http://www.baxtermedicationdeliveryproducts.com/pharmacy-workflow/repeater.html>

- Baxter (2018b). Intellifill I.V. Repéré à <http://www.baxtermedicationdeliveryproducts.com/pharmacy-workflow/intellifill.html>
- Bennett, M., Chopper, J.M., Grosskopf, J. G., Perazzo, N. J., & Rosen, R. A., (2014). Brevet Américain n° US9466088B2. United States: National Instrument LLC.
- Black, H. J. & Nelson, S. P. (1991), Medication Distribution Systems. Dans Brown, T. R. (Éds), *Handbook of Institutional Pharmacy Practice*. (pp. 165-174). Bethesda: American Society of health Pharmacists.
- Bonev, I & Noiseux, Y. (2014). *Notes de cours GPA546*. Montréal :ÉTS, 143 p.
- Buchanan, C. (1985). A Brief History of Unit-Dose Drug Distribution. *Journal of Pharmacy Technologie*, 1(3), 127-129. Repéré à <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/875512258500100308?journalCode=pmta>
- Cheriet, M. (2016). SYS-800 : *Reconnaissance de formes et inspection*. Programme de maîtrise en génie de la production automatisée. Montréal : École de technologie supérieure.
- CHU Sainte-Justine (2018). Qui sommes-nous ? Repéré à <https://www.chusj.org/fr/A-propos-de-nous/Qui-sommes-nous>
- CoRoETS (2010, 5 novembre). *Pharmacy automation :: Robotized filing of oral syringes* [Vidéo en ligne]. Repéré à https://www.youtube.com/watch?v=g7VYCU_bhvI
- Craciun, A. (2004). « Implémentation d'une méthode robuste de détection des activité vocal ». Mémoire de maîtrise en génie électrique, Montréal, École de technologie supérieure, 181 p.
- Ducharme, P. (1984). Le service de pharmacie à la Cité de la Santé de Laval : une double vocation. *L'Union Médical du Canada*, 113, 772-775.
- Equashield (2017). Automated compounding of Hazardous Drugs. Repéré à https://www.equashield.com/wp-content/uploads/pdf/EQP_1601.1_6pages_EQpro_brochure_WEB_150p.pdf
- Euclid, Medical Products (2015). Speedy Wet Cadet. Repéré à <https://euclidmedicalproducts.com/products/speedy-wet-cadet/>
- Fanuc America Corporation (2013). Fanuc Robot LR Mate 200iD. [Version Fanuc]. Repéré à http://www.fanucamerica.com/cmsmedia/datasheets/LR%20Mate%20200iD%20Series_187.pdf
- Gagné, F. (2009). Simulation d'une cellule robotique pour le département de pharmacie du CHU Sainte-Justine à Montréal. Montréal : École de technologie supérieure.

- Halvorsen, D. (2017). Expanding the Utility of Automation Investments. *Pharmacy, Purchasing & Products* 14(8) 4-84. Repéré à <https://www.pppmag.com/digitalmag/Main.php?MagNo=192&PageNo=1#page/1>
- Healthcare Packaging (2014). Comar : Valved bottle adapter system. Repéré à <https://www.healthcarepackaging.com/article/package-feature/safety/comar-valved-bottle-adapter-system>
- Hedjam, R. (2016a). SYS-800 : Laboratoire 1 : Représentation, extraction et sélection de caractéristiques. Programme de maîtrise en génie de la production automatisée. Montréal : École de technologie supérieure.
- Hedjam, R. (2016b). SYS-800 : Laboratoire 2 : Algorithmes de classification. Programme de maîtrise en génie de la production automatisée. Montréal : École de technologie supérieure.
- Hioki, M., Iwamoto, T., Morikawa, T., Okuda, M., Paolucci, D., & Sudo, H. (2017). Performance evaluation of the compounding robot, APOTEC Achemo, for injectable anticancer drugs in Japanese hospital. *J Pharm Health Care Sci.* 3(12). Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5402647/>
- International Federation Robot (2016). Industrial robot – definition and classification. Repéré à https://ifr.org/img/office/Industrial_Robots_2016_Chapter_1_2.pdf
- International Organization for Standardization (2012). Robots et composants robotiques – Vocabulaire. Repéré à <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:fr>
- Jacq, F. & Lagrange, F. J. (2014). Developing an innovative oral unit dose robot dispenser: Patient care performance and industrial perspectives. *Le Pharmacien Hospitalier et Clinicien* 49(2) e1-e14. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211104214000435>
- JVM (2016). Automatic Tablet Dispensing & Packaging system. Repéré à <http://www.myjvm.com/global/mobile/index.html>
- Kalfate, K. (2010). Conception d'une cellule robotisée pour le remplissage de seringue à usage oral. Montréal : École de technologie supérieure.
- Kutza, C. (2007, March). Baxa Rapid-Fill, Automated Syringe Filler. *Product Spotlight*. Repéré à <https://www.pppmag.com/documents/V4N3/p14.pdf>
- L. Agba, B. (2015). *Rentabilité de projets d'automatisation (GPA786) : CHAPITRE IV*. Montréal :ÉTS, 90 p.

- Lagrange, F. (2013, 5 juillet). *High Speed Oral Dose Robot Dispenser for Robotic Pharmacy Unit*. [Vidéo en ligne]. Repéré à https://www.youtube.com/watch?v=3YGc2_0n_d0
- Loccioni (2012). Humancare. Repéré à <http://humancare.loccioni.com/about-us/projects/apoteca/>
- Maple Mountain Pharmacy (2018). EzRx Packaging System. Repéré à <https://www.maple-mountainpharmacy.com/pharmacy/ezrx-packaging-system/>
- Marchesini Group (2015a). Extrafill-05. Repéré à http://www.marchesini.com/pharma/macro-categories/aseptic-liquid/product-detail/?tx_mgsolutionproduct_pi4%5Bcat%5D=31&tx_mgsolutionproduct_pi4%5Bprod_id%5D=675&tx_mgsolutionproduct_pi4%5Btab%5D=facts
- Marchesini Group (2015b). FSP 05. Repéré à http://www.marchesini.com/pharma/macro-categories/aseptic-liquid/product-detail/?tx_mgsolutionproduct_pi4%5Bcat%5D=31&tx_mgsolutionproduct_pi4%5Bprod_id%5D=325&tx_mgsolutionproduct_pi4%5Btab%5D=facts
- McGuff Company, Inc. (2018). Hydroxocobalamin. Repéré à <https://www.mcguffmedical.com/hydroxocobalamin-vitamin-b12-1000mcgml-mdv-30ml-vial>
- McKesson Canada (2018a). How BlistAssist can Benefit Your Pharmacy. Repéré à <https://www.mckesson.ca/blistassist>
- McKesson Canada (2018b). How VBM can Benefit Your Pharmacy. Repéré à <https://www.mckesson.ca/vbm-200f>
- McKesson Canada (2018c). Do any of the Following Represen Your Pharmacy's Compliance Packaging Needs ? Repéré à <https://www.mckesson.ca/pacmed-s-series>
- McNally, K. M., Page, M. A., & Sunderland, B. (1997). Failure-mode and effects analysis in improving a drug distribution system. *Am J Health-Syst Pharm*, 54, 171-177.
- Medical Packaging inc. (2016a). Auto-Draw Oral Syringe Filling System. Repéré à <http://www.medpak.com/medical-packaging-equipment/oral-liquid-medication-packaging/auto-draw-oral-syringe-filling-machine-system/>
- Medical Packaging inc. (2016b). FD-Pharma. Repéré à <http://www.medpak.com/medical-packaging-equipment/oral-liquid-medication-packaging/fd-pharma-oral-syringe-filling-machine/>
- Medical Packaging inc. (2018). Medical Packaging inc. Bar Code-Plus™ Pharmaci y Packaging Solutions. Repéré à <http://www.midwestmedical.us/images/MPIProductBrochure.pdf>

- Monkman, G. J., Hesse, S., Steinmann, R. & Schunk, H., (2007), *Robot Grippers*, 1 ed. Weinheim. Wiley-VCH Verlag GMBH & Co.
- O’Brodivich, M. & Rappaport, P. (1991). A Study Pre and Post Unit Dose Conversion in a Pediatric Hospital. *The Canadian Journal of Hospital Pharmacy*, 44(1), 5-15.
- Olabi, A. (2011). « Amélioration de la précision des robots industriels pour des applications d’usinage à grande vitesse ». Thèse de doctorat en génie mécanique. Paris, ParisTech. 129p.
- Olivier, C. (2014). *GPA-548 – Gestion de la production : Ordonnancement*. Montréal : ÉTS. 25 p.
- Omniceil (2017). Omnicell AccuFlex. Repéré à [https://www.omnicell.com/mts/ Products and Solutions For Pharmacy/Pharmacy Automation Systems/Omniceil AccuFlex.aspx](https://www.omnicell.com/mts/Products_and_Solutions_For_Pharmacy/Pharmacy_Automation_Systems/Omniceil_AccuFlex.aspx)
- Omniceil (2018a). Robot-Rx Central Pharmacy Robotic System. Repéré à [https://www.omnicell.com/Products/Pharmacy Automation/Robotic Pharmacy Systems/ROBOT-Rx Central Pharmacy Robotic System.aspx](https://www.omnicell.com/Products/Pharmacy_Automation/Robotic_Pharmacy_Systems/ROBOT-Rx_Central_Pharmacy_Robotic_System.aspx)
- Omniceil (2018b). i.v.Station Non-Hazardous Compounding Robot. Repéré à [https://www.omnicell.com/Products/IV Solutions/ivSTATION Non-Hazardous Compounding Robot.aspx](https://www.omnicell.com/Products/IV_Solutions/ivSTATION_Non-Hazardous_Compounding_Robot.aspx)
- Omniceil (2018c). i.v.Station Onco Hazardous Compounding Robot. Repéré à [https://www.omnicell.com/Products/IV Solutions/ivSTATION ONCO Hazardous Compounding Robot.aspx](https://www.omnicell.com/Products/IV_Solutions/ivSTATION_ONCO_Hazardous_Compounding_Robot.aspx)
- Pedersen, C. A, Schneider, P. J, & Scheckehoff, D. J. (2015). ASHP national survey of pharmacy practice in hospital settings: Dispensing and administration-2014. *American Journal of Health-System Pharmacy* 72(13) 1119-1137.
- Pesko, L. J (1991), Repackaging Pharmaceuticals in Institutional Practice. Dans Brown, T. R. (Éds), *Handbook of Institutional Pharmacy Practice*. (pp. 215-236). Bethesda: American Society of health Pharmacists.
- Project Management Institute. (2009). *Guide du corpus des connaissances en management de projet*, Quatrième édition. Pennsylvanie : Project Management Institute, Inc., 489 p.
- ProSense, Laboratory & Process equipment (2018). Syringe Dosing Pump Systems. Repéré à http://www.prosense.net/files/Syring_pump_brochure.pdf

- Sabandith, S. (2016). Simplify Medication regimens to Reduce Hospital Readmissions. Repéré à <http://www.pearsonmedical.net/the-need-for-pharmacists-intervention-to-simplify-medication-regimen-to-reduce-hospital-readmissions/>
- Schnell, Br. (1976). A Study of Unit-Dose Drugs Distribution in Four Canadian Hospitals. *Can J Hosp Pharm*, 29(3), 85-90. <http://europepmc.org/abstract/med/1024023>
- Synergie Médicale (2015). Pourquoi SYNMED^{MD} ? Repéré à <http://synmedrx.com/fr/#accueil>
- Swisslog (2018). ATP Series Automated Tablet Packaging System. Repéré à <https://www.swisslog.com/en-us/healthcare/products/medication-management/atp-series-automated-tablet-packager>
- Théberge, M. (2009). Automatisation du remplissage de seringues pharmaceutiques. Montréal : École de technologie supérieur.
- Tremblay, G. (2004). « Optimisation d'ensemble de classifieurs non paramétriques avec apprentissage par représentation partielle de l'information. ». Mémoire de maîtrise, Montréal, École de technologie supérieure. 192 p.
- Webb, J. (2017). Dispositif de remplissage de seringue orale. Montréal : École de technologie supérieure.
- WMAG (2007). Sending sick child to school?. Repéré à <https://www.workingmomsagainstguilt.com/sending-your-sick-kid-to-school/>
- Yaskawa America, inc. (2018). GP7 and GP8 – Compact, High-Speed Robots. [Version Yaskawa]. Repéré à https://www.motoman.com/hubfs/Robots/GP7_GP8.pdf