



**HAL**  
open science

# Contributions et limites des techniques lean vers l'intégration de robotique collaborative dans les process d'assemblage : une approche expérimentale.

Anthony Quenehen

## ► To cite this version:

Anthony Quenehen. Contributions et limites des techniques lean vers l'intégration de robotique collaborative dans les process d'assemblage : une approche expérimentale.. Génie des procédés. HESAM Université, 2022. Français. NNT : 2022HESAE008 . tel-03669482

**HAL Id: tel-03669482**

**<https://pastel.hal.science/tel-03669482v1>**

Submitted on 16 May 2022

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

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

**ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

**LISPEN - Campus de Lille**

# THÈSE

présentée par : **Anthony QUENEHEN**  
soutenu le : **04 janvier 2022**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

*Discipline* : **Section CNU 61**

*Spécialité* : **Génie Industriel**

**Contributions et limites des techniques lean vers l'intégration  
de robotique collaborative dans les process d'assemblage :  
une approche expérimentale.**

**THÈSE dirigée par :**  
**MM. Olivier GIBARU et Lionel ROUCOULES**

**et co-encadrée par :**  
**Mme Nathalie KLEMENT**

**Jury**

<b>M. Cristovão SILVA</b>	Professeur, Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra	Président
<b>M. Patrick PUJO</b>	MdC (HDR), CRET-LOG, Aix-Marseille Université	Rapporteur
<b>M. Olivier CARDIN</b>	MdC (HDR), LS2N, Université de Nantes	Rapporteur
<b>M. Olivier GIBARU</b>	Professeur, LISPEN, Arts et Métiers	Examineur
<b>M. Lionel ROUCOULES</b>	Professeur, LISPEN, Arts et Métiers	Examineur
<b>Mme Nathalie KLEMENT</b>	MdC, LISPEN, Arts et Métiers	Examinatrice
<b>M. Nicolas CASIER</b>	Manager, Operation Management Division, Toyota Motors Manufacturing France	Invité

**T  
H  
È  
S  
E**



# Table des matières

Liste des tableaux	7
Liste des figures	11
Introduction	14
<b>1 Problématique et objectif de recherche</b>	<b>15</b>
1.1 L'implémentation de technologie innovante, un problème nouveau?	16
1.2 Lean et industrie 4.0	17
1.2.1 Brève description du concept d'industrie 4.0	17
1.2.2 Structure du lean manufacturing	19
1.2.3 Des antagonismes en surface	21
1.2.4 Similitudes et complémentarités	22
1.3 Objectifs du travail de recherche	24
<b>2 Contextualisation et définition d'un cadre théorique</b>	<b>27</b>
2.1 Industrie 4.0 – robotique collaborative	28
2.1.1 Un potentiel et des attentes dans le milieu industriel	28
2.1.2 Collaboration et interaction homme-robot	28
2.1.3 Intérêt ergonomique, différents modèles disponibles	30
2.1.4 Les différentes approches de résolution	32
2.1.4.1 Les approches centrées sur l'intégration	32
2.1.5 Les approches par modélisation de problème	34
2.1.5.1 Les problèmes d'ordonnancement	35
2.1.5.2 Les problèmes d'équilibrage de ligne	35
2.2 Lean Manufacturing	39
2.2.1 L'amélioration continue	39
2.2.1.1 Mise en œuvre des activités de kaizen	41

## TABLE DES MATIÈRES

---

2.2.1.2	Application au cadre de la recherche . . . . .	41
2.2.2	Principe d'interaction homme machine - jidoka . . . . .	42
2.2.3	L'amélioration de la performance – cycle kaizen / innovation . . . . .	43
2.2.4	Le type de connaissances mises en jeu – lien avec les compétences . . . . .	43
2.3	Discussion . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Proposition de méthodologie</b>	<b>47</b>
3.1	La recherche orientée conception . . . . .	48
3.1.1	Principes . . . . .	48
3.1.2	Modélisation du processus de résolution : le cycle de Blum . . . . .	51
3.1.2.1	Adaptation du cycle de Blum . . . . .	52
3.1.3	Mise en œuvre de la phase de résolution dans la conception de méthode . . . . .	54
3.1.3.1	Séquencement des différentes méthodes dans le plan d'expérimentation	56
3.1.3.2	Choix des cas d'étude et organisation des expérimentations . . . . .	57
3.2	Algorithme de résolution . . . . .	59
3.2.1	Modélisation du problème . . . . .	59
3.2.2	Principe de fonctionnement . . . . .	61
3.2.2.1	Génération de liste et affectation des tâches . . . . .	61
3.2.2.2	Amélioration de la représentativité des valeurs de $C_{eco}$ et $C_{ergo}$ dans le calcul de la fonction objectif . . . . .	64
3.2.2.3	Optimisation du score de la solution par meta-heuristique . . . . .	68
3.3	Synthèse sur la proposition . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Construction de l'environnement d'expérimentation</b>	<b>71</b>
4.1	Dispositif expérimental initial . . . . .	72
4.1.1	Choix du produit support du cas d'étude . . . . .	72
4.1.2	Caractérisation du process d'assemblage . . . . .	72
4.1.2.1	Assemblage manuel . . . . .	72
4.1.2.2	Assemblage coopératif . . . . .	73
4.1.2.3	Simplification de la description du process, détermination des relations de précedence . . . . .	74
4.1.3	Constitution de l'équipe . . . . .	75
4.2	Phase d'essais prototypes et validation de l'algorithme . . . . .	76
4.2.1	Phase prototype et cadrage du protocole . . . . .	76
4.2.1.1	Description détaillée du protocole simplifié . . . . .	79
4.2.1.2	Analyse des résultats expérimentaux de la phase prototype . . . . .	81

## TABLE DES MATIÈRES

---

4.2.1.3	Conclusions sur la phase d'expérimentation prototype . . . . .	89
4.2.2	Validation de l'algorithme de résolution . . . . .	90
4.2.2.1	Méthode de validation . . . . .	90
4.2.2.2	Résultats obtenus . . . . .	93
4.3	Synthèse partielle . . . . .	97
<b>5</b>	<b>Expérimentations des situations de co-intégration de la cobotique et des techniques lean</b>	<b>101</b>
5.1	Organisation générale . . . . .	103
5.2	Phase '0 méthode' . . . . .	103
5.2.1	Création de process . . . . .	104
5.2.2	Amélioration de la solution proposée . . . . .	109
5.3	Phase d'application des techniques lean . . . . .	111
5.3.1	Intervention sur les techniques lean . . . . .	111
5.3.2	Cas d'étude : réduction du temps de cycle . . . . .	112
5.3.2.1	Etape de création de process. . . . .	112
5.3.2.2	Phase d'amélioration du process cobotisé . . . . .	114
5.3.3	Cas d'étude : intégration d'un effecteur double (vissage et préhension) . . . . .	117
5.3.4	Cas d'étude : double objectif économique et ergonomique . . . . .	120
5.3.5	Conclusion sur l'utilisation des techniques lean . . . . .	121
5.4	Recours à la méthode lean modifié . . . . .	122
5.4.1	Intervention . . . . .	123
5.4.2	Initialisation . . . . .	123
5.4.3	Premier cycle d'essais . . . . .	124
5.4.3.1	Résultats généraux . . . . .	124
5.4.3.2	Modification du modèle de calcul des temps cobot . . . . .	124
5.4.4	Résultats du deuxième cycle d'itération : temps cobot modifiés . . . . .	126
5.4.4.1	Application au cas d'étude : réduction du temps de cycle . . . . .	127
5.4.4.2	Application au cas d'étude : intégration d'un effecteur de vissage . . . . .	131
5.4.4.3	Application au cas d'étude : objectif ergonomique et économique . . . . .	133
5.4.5	Discussion sur la phase d'utilisation de l'outil de résolution algorithmique ('lean modifié') . . . . .	136
5.5	Conclusion générale sur la campagne d'expérimentation . . . . .	136
<b>6</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>139</b>
6.1	Conclusions . . . . .	140
6.2	Perspectives . . . . .	140

## TABLE DES MATIÈRES

---

<b>Bibliographie</b>	<b>143</b>
<b>Liste des annexes</b>	<b>150</b>
<b>A Calcul de la charge ergonomique du process manuel</b>	<b>151</b>
<b>B Calcul de la charge ergonomique avec maximisation du mode coopératif</b>	<b>153</b>
<b>C Nomenclature du vérin support d'expérimentation</b>	<b>155</b>
<b>D Questionnaire d'engagement pour la conception du premier process cobotisé</b>	<b>157</b>
<b>E Questionnaire de retour de perception sur le premier process cobotisé</b>	<b>159</b>
<b>F Synthèse des itérations sur le process cobotisé du groupe D - notes des participants.</b>	<b>161</b>
<b>G Méthode d'estimation des temps de tâche pour le cobot</b>	<b>163</b>
<b>H Questionnaire de retour sur les solutions algorithmiques</b>	<b>167</b>

# Liste des tableaux

2.1	A qualitative comparison of collaboration modes under performance criteria . . . . .	30
2.2	Synthèse de la recherche bibliographique sur les approches par modélisation de problème	38
3.1	Table des temps de tâche (TT) et de relaxaion (RT) pour chacun des modes d'exécution (le symbole $\infty$ représente une tâche non réalisable dans le mode proposé) . . . . .	63
4.1	Résultat du regroupement des opérations en tâches. (TT = Task Time, RT = Relaxation Time). La valeur $\infty$ est appliquée sur les tâches où la coopération n'est pas pertinente.	75
4.2	Réglages des robots collaboratifs pour les phases expérimentales . . . . .	80
4.3	Synthèse des performances de la phase d'essais prototypes . . . . .	88
4.4	Retour de perception des participants sur les compétences développées . . . . .	89
4.5	Instances de validation . . . . .	91
4.6	Nombre maximal de prédécesseurs par tâche pour chaque famille d'instance . . . . .	92
4.7	Couples de paramètres $L1$ $L2$ . . . . .	93
4.8	synthèse sur la convergence de l'algorithme . . . . .	94
4.9	Résultats comparatifs pour les instances de test . . . . .	96
4.10	Synthèse des résultats pour le cas d'étude réel . . . . .	97
5.1	Répartition des équipes sur les différentes mises en situation . . . . .	103
5.2	Synthèse des résultats obtenus pour la création des premiers process collaboratifs . . .	105
5.3	Synthèse des itérations sur le premier process cobotisé du groupe D . . . . .	110
5.4	Synthèse des process recréés après l'intervention lean . . . . .	113
5.5	Résultat des phases d'amélioration de process pour les groupes E et G . . . . .	114
5.6	Décomposition du process obtenu après introduction de l'effecteur double - groupe F .	119
5.7	Retour général sur les solutions algorithmiques . . . . .	127
5.8	Décomposition du process créé par le groupe G après réflexion sur les propositions de l'algorithme . . . . .	128

LISTE DES TABLEAUX

---

# Table des figures

1.1	Développement des révolutions industrielles, adapté de Roth [1] . . . . .	17
1.2	Structure of Industrie 4.0 [2] . . . . .	19
1.3	'Le temple du lean' - version simplifiée . . . . .	20
1.4	zones d'interactions entre lean et industrie 4.0 . . . . .	23
2.1	Les catégories d'interaction homme robot, adapté de [3] . . . . .	29
2.2	Méthode de conception de cellule collaborative [4] . . . . .	33
2.3	Le Toyota Production System, tiré de Liker, <i>the toyota Way</i> [5] . . . . .	40
2.4	Exemple de table de combinaison . . . . .	42
2.5	Kaizen et innovation - Imai [6] . . . . .	43
2.6	Le modèle SECI [7] . . . . .	44
3.1	Cycle de développement dans un contexte de recherche orientée conception, [8] . . . . .	50
3.2	Le cycle de modélisation par Blum et Leiß, [9] . . . . .	51
3.3	Cycle de blum - version ' <i>0 méthode</i> ' . . . . .	53
3.4	Cycle de blum - version <i>lean</i> . . . . .	53
3.5	Cycle de blum - version <i>lean modifié</i> . . . . .	54
3.6	Proposition de cycle de conception de création de process d'assemblage cobotisé . . . . .	55
3.7	Différents points de rupture entre objectifs et résultats . . . . .	56
3.8	Continuité entre objectifs et résultats atteints . . . . .	58
3.9	Plan d'expérimentation général . . . . .	59
3.10	Synoptique complet de parcours d'un cas d'étude . . . . .	60
3.11	Configurations possibles du process collaboratif et représentations des coûts économiques et ergonomiques associés . . . . .	61
3.12	Exemple de graphe de précedence. . . . .	62
3.13	Matrice associée au graphe de précedence de la figure 3.12 . . . . .	62
3.14	Principe de recouvrement entre les cycles . . . . .	65
3.15	Cas de figure possibles avec impact du recouvrement sur $C_{eco}$ et $C_{ergo}$ . . . . .	66

TABLE DES FIGURES

---

4.1	Vérin pneumatique, support d'expérimentations . . . . .	72
4.2	SWCT du process d'assemblage manuel du vérin pneumatique . . . . .	73
4.3	graphe de précédence . . . . .	74
4.4	Vérin simplifié utilisé pour la phase prototype . . . . .	77
4.5	cas d'étude sélectionné pour la phase prototype . . . . .	77
4.6	Protocole de conception de la phase prototype . . . . .	78
4.7	Relation entre le temps de cycle et le ratio de transfert, modèle simplifié, tiré de [10] .	82
4.8	Impact des transferts et kaizen sur le temps de cycle [10] . . . . .	83
4.9	SWCT pour les process $M1$ et $M1'$ . . . . .	83
4.10	SWCT pour les process $M1$ et $M1'$ . . . . .	84
4.11	SWCT pour le process $PA1$ . . . . .	85
4.12	SWCT pour le process $PA2$ . . . . .	85
4.13	évolutions respectives des process $M1$ et $M2$ lors de la phase d'introduction du cobot	86
4.14	SWCT pour le process $PA3$ . . . . .	87
4.15	Relation entre compétences et réduction de temps de cycle . . . . .	90
4.16	classement des scores obtenus par les différents couples $L1$ & $L2$ pour différentes valeurs de $\alpha$ , en version 3 modes . . . . .	98
4.17	classement des scores obtenus par les différents couples $L1$ & $L2$ pour différentes valeurs de $\alpha$ , en version 2 modes . . . . .	99
4.18	Amélioration relative moyenne apportée par l'utilisation du mode coopératif pour différentes valeurs de $\alpha$ pour les 12 instances de test. . . . .	99
4.19	Visualisation des meilleures solutions avec et sans coopération pour $\alpha = 0.5$ . . . . .	100
5.1	Adaptation du cycle de Blum '0 méthode' . . . . .	106
5.2	Différents choix de séparation homme-machine et leur impact sur le temps d'attente opérateur. . . . .	107
5.3	tentative de représentation temporelle du process cobotisé lors de sa phase de création - groupe C . . . . .	108
5.4	Tentative de visualisation d'un process cobotisé en tenant compte des précédences - groupe C . . . . .	108
5.5	Synthèse du retour de perception sur la création du premier process cobotisé (phase '0 méthode'). Décompte des commentaires mentionnant les aspects techniques ou méthodologiques à l'issue de la création de process . . . . .	109
5.6	Synthèse du retour de perception de la création de process cobotisé suite à l'intervention sur les techniques lean . . . . .	113
5.7	Feuille de découpage de temps de l'équipe $G$ , avec exploitation du temps d'attente du cobot . . . . .	115

## TABLE DES FIGURES

---

5.8	Evolution de l'implantation du poste de travail du groupe $G$ suite à l'évolution de la séquence de tâches transférées au cobot . . . . .	116
5.9	Effecteur double réalisé pour permettre de transférer certaines opérations de vissage au cobot (groupe F) . . . . .	117
5.10	Table de combinaison du process réalisé lors de l'intégration de l'effecteur double (groupe F) . . . . .	118
5.11	Poste de travail du groupe F avec tracé de la trajectoire des tâches de dépose et vissage de la face inférieure . . . . .	119
5.12	Détail de l'opération de préparation de vissage des pattes de fixation . . . . .	122
5.13	Principe d'utilisation de l'outil de recherche de solution algorithmique . . . . .	124
5.14	Maillage d'un poste de travail (groupe G) pour l'estimation des temps de trajectoire cobot . . . . .	125
5.15	Comparaison des corrélations obtenues entre les différentes méthodes d'estimation des temps de tâche cobot . . . . .	126
5.16	Décomposition par causes d'inefficiences des solutions algorithmiques perçues par les utilisateurs : Groupe G . . . . .	127
5.17	Evolution de l'implantation du poste de travail du groupe $G$ suite à l'évolution de la séquence de tâches transférées au cobot, incluant la dernière itération . . . . .	129
5.18	Table de combinaison de la dernière itération du groupe G et synthèse des résultats précédents . . . . .	130
5.19	Evolution de la matrice de précédence et impact sur les solutions identifiées (groupe G). . . . .	130
5.20	Décomposition par causes d'inefficiences des solutions algorithmiques perçues par les utilisateurs - groupe F . . . . .	131
5.21	Illustration de la solution retournée par l'algorithme proposant un vissage simultané des deux faces du vérin. . . . .	132
5.22	Représentation graphique de la matrice de précédence réalisée par le groupe F . . . . .	132
5.23	Représentation graphique de l'amélioration de la matrice initialement proposée par le groupe F (figure 5.22) . . . . .	133
5.24	Décomposition par causes d'inefficiences des solutions algorithmiques perçues par les utilisateurs - groupe E . . . . .	134
5.25	Illustration des solutions proposées par l'outil de résolution algorithmique pour le cas d'étude 'amélioration de la performance économique et ergonomique' - groupe E . . . . .	135
5.26	Illustration de la proposition générée par le groupe E . . . . .	136
G.1	Représentation d'une trajectoire sur un plan de travail incluant le <b>profil de vitesse</b> . . . . .	163
G.2	Représentation du profil de vitesse sur un tronçon. . . . .	164
G.3	Illustration de la feuille de calcul mise à disposition . . . . .	165

TABLE DES FIGURES

---

# Introduction

Ce travail s'inscrit dans une ligne de recherche portant sur l'étude des technologies de l'Industrie 4.0 dans un contexte d'excellence opérationnelle. Afin d'ancrer cette activité dans une dimension concrète, c'est à dire en prise avec la complexité des systèmes réels, le LISPEN (**L**aboratoire d'**I**ngénierie des **S**ystèmes **P**hysiques et **N**umériques) du campus de Lille, avec le soutien de la Fondation Arts& Métiers s'est doté d'une ligne d'assemblage flexible à échelle 1, que nous avons conçue, développée et mise en service avec l'équipe d'ingénierie du laboratoire. Cet outil, par sa simplicité et sa modularité, permet de réaliser de l'intégration de technologies de façon graduelle et itérative, avec un retour direct sur les contraintes à considérer, ainsi que des projections sur les potentiels bénéfiques. Ce choix a aussi surtout été guidé par la prise en compte du facteur humain (et notamment des opérateurs) dans l'intégration de technologies, que ce soit sous les aspects d'acceptabilité ou de développement des compétences. L'opérateur (ou l'utilisateur dans un sens plus large) est de notre point de vue un acteur incontournable des transformations de son environnement. Il s'agit donc d'accompagner la nécessaire montée en compétences, qui lui permettra de continuer à occuper une place centrale dans le système de production, et de maintenir son implication à un niveau élevé, facteur incontournable d'une performance éthique et durable.

Le travail mis en œuvre dans cette séquence constitue un élément de cette vision. La recherche de méthode de conception de process collaboratif homme-robot est un travail préparatoire de l'intégration des robots collaboratifs dans des environnements flexibles et reconfigurables, afin de déterminer comment ces caractéristiques peuvent être maintenues ou améliorées à travers ces moyens de production innovants. Cette perspective orientera certains choix de cadrage lors des expérimentations présentées dans ce manuscrit.

Enfin, des séquences pédagogiques sur l'efficacité opérationnelle et la gestion des flux de productions ont été développées dans cette usine école, en parallèle de ce travail de recherche. La diffusion de connaissance est une composante elle aussi essentielle de notre mission de recherche à nos yeux. Il est donc important de créer un environnement pédagogique évolutif et dynamique qui recyclera les fruits de cette activité de recherche et de celles qui suivront vers les élèves ingénieurs de notre établissement.

Ce manuscrit se structure autour de cinq chapitres. Dans un premier temps, nous formulerons les objectifs de ce travail de recherche en clarifiant la notion de maintien de la performance industrielle lors des phases d'intégration de technologie innovante. Une deuxième chapitre sera consacré à la définition d'un cadre théorique pour la technologie à l'étude - la robotique collaborative, ainsi que les aspects méthodologiques associés au lean manufacturing qui seront utilisés pour rechercher l'efficacité dans la conception et la réalisation de process d'assemblage mettant en jeu la robotique collaborative. Un troisième chapitre élaborera une proposition méthodologique pour atteindre les objectifs fixés. Ce cadre méthodologique s'appuiera sur les outils de recherche collaborative, plus précisément la recherche

orientée conception, dans souci de rendre compte de la complexité réelle des cas d'études et de pouvoir enrichir le modèle proposé au fil des expérimentations. Cette partie portera aussi sur l'élaboration d'un algorithme de résolution afin d'évaluer la qualité des solutions identifiées au cours des expérimentations mais aussi pour fournir un relai aux techniques lean dans les mises en situation les plus complexes. Un quatrième chapitre consistera en la création d'un cadre expérimental pour effectuer un premier test de la proposition méthodologique, tant pour la partie collaborative mettant à contribution les étudiants, que pour tester la performance de l'algorithme testé dans les cas d'études envisagés. Le cinquième et dernier chapitre restituera les résultats de la phase d'essais dits fonctionnels, pour lesquels les différentes méthodes de création de process seront testées sur des cas d'étude de complexité variable. Enfin, une dernière partie synthétisera les acquis de ce travail de recherche et abordera les perspectives de développement à lui apporter.

# Chapitre 1

## Problématique et objectif de recherche

### Contenu

---

<b>1.1</b>	<b>L'implémentation de technologie innovante, un problème nouveau ? . . . . .</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Lean et industrie 4.0 . . . . .</b>	<b>17</b>
1.2.1	Brève description du concept d'industrie 4.0 . . . . .	17
1.2.2	Structure du lean manufacturing . . . . .	19
1.2.3	Des antagonismes en surface . . . . .	21
1.2.4	Similitudes et complémentarités . . . . .	22
<b>1.3</b>	<b>Objectifs du travail de recherche . . . . .</b>	<b>24</b>

---

Ce premier chapitre a pour but de clarifier la problématique de ce travail de recherche. Pour cela nous aborderons la question de la performance industrielle, et de son maintien lors de phase d'intégration de technologie. Plus précisément, nous tenterons de clarifier les interactions entre les concepts d'industrie 4.0, qui porte une vaste proposition technologique pour la performance industrielle, et celui de lean manufacturing, qui est aujourd'hui reconnu comme le système prépondérant pour maximiser la performance opérationnelle.

## 1.1 L'implémentation de technologie innovante, un problème nouveau ?

L'industrie 4.0 peut-elle, à elle seule, délivrer la promesse d'excellence opérationnelle et d'avantage compétitif qu'elle porte ?

Pour une technologie disponible à l'échelle industrielle, comme la robotique collaborative, les premiers résultats apparaissent contrastés, notamment en terme de productivité en remplacement des opérateurs, et ouvrent des questions vers les développements de compétences associées à leur intégration. Pour autant, dans cette situation nouvelle, est-il possible de distinguer clairement les limites intrinsèques de la technologie (objectif initial irréaliste) d'un possible échec lors de son implémentation, ou la combinaison des deux. Dans une étude portant sur plusieurs sociétés ayant intégré des robots collaboratifs pour des opérations d'assemblage, Andersson [11] met en évidence des difficultés dans les phases d'implémentation, ou au niveau de la performance obtenue, avec des temps de cycle en deçà des objectifs visés, remettant parfois en cause la pertinence même du recours à un robot collaboratif. Certes, certaines tentatives avaient pour but de se familiariser avec cette nouvelle offre technologique, mais ces limites ont été rencontrées dans des domaines où la robotique collaborative est supposée avoir un avantage sur la robotique classique : facilité d'intégration dans des process initialement manuels, et accessibilité de la programmation.

Cette situation illustre la notion du succès d'une implémentation technologique, et de l'évaluation de la performance qui en découle. En effet, il est important de distinguer un succès appelé technique (la mise en place physique de la solution envisagée), des bénéfices de performance et compétitivité. Selon Voss, le premier relève de la capacité d'une application à être fonctionnelle, disponible. Mais cette étape nécessaire n'est pas suffisante pour garantir les bénéfices de performance, qui seront obtenus par l'appropriation de la solution par les opérationnels, permettant sa stabilisation et son amélioration future [12]. Dans une étude comparative d'implémentation de robotique industrielle entre des firmes anglaises et japonaises [13] qui correspond à la troisième révolution industrielle (voir figure 1.1), le même auteur distingue aussi les approches dites 'technology push' (poussées par la technologie) de celles 'demand pull' (tirées par le besoin). Les premières privilégient des solutions techniquement ambitieuses, visant à exploiter au mieux le potentiel offert par la technologie, quitte à passer par des compétence externes à l'organisation, alors que les dernières se concentrent sur la pertinence de son utilisation par rapport aux besoins de l'organisation - y compris les opérateurs - pour l'intégration de solutions nécessairement plus simples. Déjà les stratégies 'demand pull' démontraient de meilleurs résultats opérationnels, et notamment le développement d'une performance durable, car entretenue par des améliorations incrémentales, pour certaines issues de suggestions des opérateurs.

Bien qu'ayant eu lieu il y a plusieurs années, cette situation tient la comparaison avec les challenges de l'adoption des technologies issues de l'industrie 4.0, et il peut être intéressant de considérer et développer la proposition que le succès de l'implémentation d'une technologie innovante dépend aussi de la stratégie employée, avec entre autres l'implication des opérateurs, et la capacité à conserver une vision focalisée sur les objectifs opérationnels.

Derrière certains éléments cités par Voss ( technologie au service du besoin, amélioration incrémentale, implication des utilisateurs), on peut deviner des principes que l'on rapproche maintenant du 'lean manufacturing'. Il peut donc être pertinent d'étudier l'influence de cette approche dans une situation d'implémentation de technologie de production qui présente des difficultés de nature comparable à celles décrites lors de la troisième révolution industrielle.

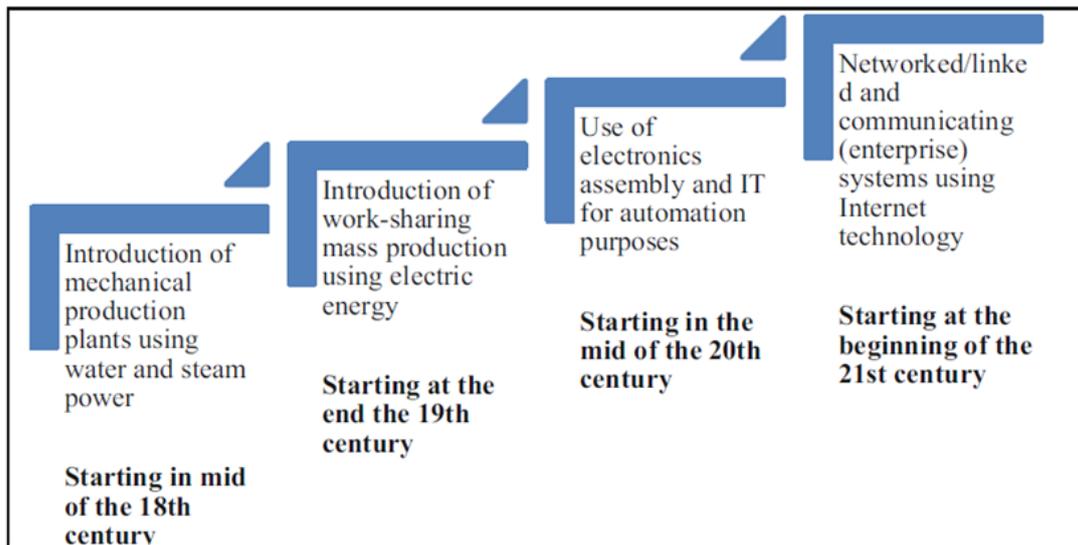


Figure 1.1 – Développement des révolutions industrielles, adapté de Roth [1]

Si le lean manufacturing était un concept encore jeune à l'époque de cette étude, il a depuis été largement décrit dans la littérature scientifique [14], et s'est aussi imposé comme un modèle majeur d'efficacité opérationnelle, dans le secteur automobile dont il est issu mais aussi dans de nombreux autres [15], subissant parfois au passage des modifications pour répondre aux contingences spécifiques des différentes organisations. Le modèle original de cette approche est le 'Toyota Production System', dont l'origine est elle-même une alternative trouvée par Toyota Motors Corporation au système de production de masse pour faire face aux contingences du Japon d'après guerre : être profitable sur un marché automobile à la capacité d'absorption limitée et 'comment produire des véhicules avec une capacité d'investissement limitée' [16]. Ce modèle s'est exporté à l'occident à la faveur du choc pétrolier et des années de croissance faible, où il a été rebaptisé 'lean' ('maigre' en anglais), en écho à sa recherche permanente d'élimination des gaspillages (appelés 'muda' en japonais) sur l'ensemble de la chaîne de production de valeur.

Le lean manufacturing n'est donc pas a priori une approche 'techno-centrée', non plus un ensemble de méthodes visant à l'intégration de technologie, pourtant sa complémentarité avec la proposition essentiellement technologique de l'Industrie 4.0 est une problématique maintenant largement étudiée [17], [18], [19], [20].

## 1.2 Lean et industrie 4.0

### 1.2.1 Brève description du concept d'industrie 4.0

le concept d'industrie 4.0 comporte de multiples définitions [17], dont on pourra retenir celle de Kohler and Weiss [21] : *"une nouvelle approche de pilotage du process de production qui fournit une synchronisation des flux en temps réel et qui permet la fabrication en pièce à pièce de produits customisés"*. Sur les technologies impliquées dans cette approche, là encore

plusieurs cadrages existent [22], [23], [24]. L'objet de ce travail de recherche est d'explorer les méthodes d'implémentation de robotique collaborative, ainsi nous ne ferons qu'une très brève description de ces technologies, dans le but de mettre en évidence les éventuelles articulations au sein du concept d'industrie 4.0 comme système organisé.

**Le cloud computing ou infonuagique** désigne les solutions de stockage de données caractérisées par un accès rapide et multi-point. Des données de production ainsi consolidées en temps réel pourraient fournir une base d'analyse améliorée pour les activités de supervision et de planification de production [25], et une meilleure justesse dans les hypothèses de simulation de production ou de maintenance prédictive [26].

**Industrial Internet of Things** désigne le moyen de communication des systèmes 'Smart', que l'on désigne des produits, des équipements ou des accessoires de réalité augmentée. Cette technologie permet la remontée de données vers le 'Cloud', comme l'accès à des informations contextuelles depuis le 'Cloud' [27]. Des solutions déjà industrielles comme le RFID (Radio Frequency IDentification) permettent de transporter et de modifier de l'information sur des puces fixées au produit. L'acquisition de données physiques de l'environnement avant leur transformation en information, utilisables dans un espace virtuel, comme un jumeau numérique, repose sur des '*CPS*' (Cyber Physical Systems), ou CPPS (Cyber Physical Production Systems). Ces systèmes font le lien entre le système de production physique et son modèle virtuel en temps réel, augmentant la qualité de la supervision et du contrôle que l'on peut lui apporter [28].

**La fabrication additive** regroupe plusieurs technologies permettant la réalisation de pièces plastiques ou métalliques, à partir de données CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Dans un contexte de production flexible, l'avantage potentiel est de pouvoir s'affranchir de la réalisation d'outillages, option peu rentable en terme de délai et de coût à la pièce dans le cas de petites séries. Ce gain de flexibilité apparent doit aussi être nuancé par l'investissement en compétences pour la maîtrise de ces process, tout comme la réponse incertaine à une augmentation de la demande [29]. Leur contribution est néanmoins vue positivement pour des solutions de prototypage rapide, pouvant intervenir lors d'activités d'amélioration continue : aménagement de poste de travail, création de supports spécifiques, et autres réalisations ne nécessitant pas de résistance mécanique ou de précision géométrique particulière.

**La réalité augmentée** permet l'affichage d'information contextuelle en temps réel, facilitant la prise de décision. On notera que d'autres technologies de type réalité projetée, où l'image est superposée directement au réel au moyen d'un projecteur sont aussi considérées dans les mêmes usages, s'affranchissant de support devant être tenu en main - tablette, ou porté (type lunette).

**Le 'Big Data'** est un terme connecté à la notion de 'Cloud'. Il désigne le stockage de quantité importantes de données, mais aussi l'exploitation qui en est faite, pour simuler ou prédire le comportement d'un système ou d'un équipement par exemple. Ceci requière que l'information soit disponible en grande quantité et en variété, accessible rapidement et réactualisée fréquemment pour que l'aide à la décision soit pertinente [30].

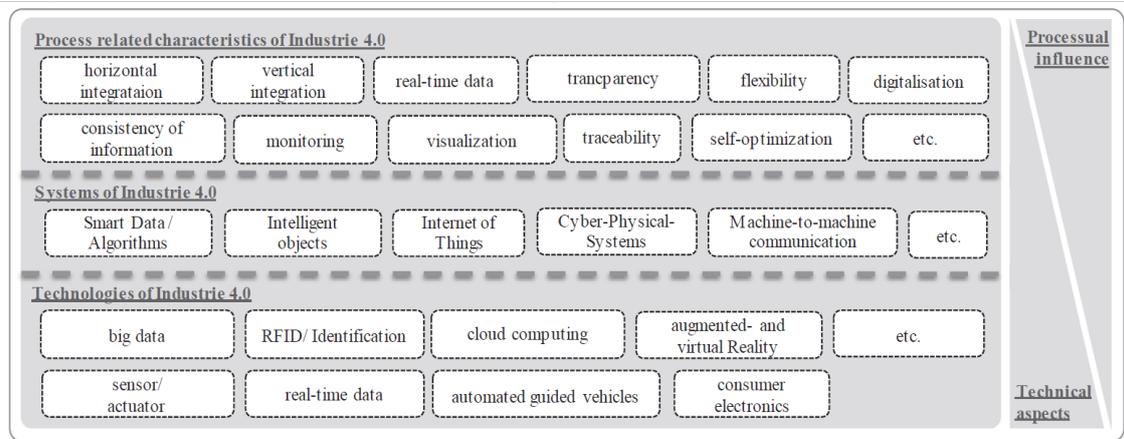


Figure 1.2 – Structure of Industrie 4.0 [2]

**La robotique collaborative** et autonome. La troisième révolution industrielle a été celle du déploiement des robots industriels, permettant des gains de cadence significatifs, ainsi que la manipulation de charges lourdes. Pour la sécurité des personnes, ce type d'installation est séparé physiquement des opérateurs, et les process organisés en conséquence. L'Industrie 4.0 considère l'introduction de robots dit collaboratifs, caractérisés par la possibilité de les faire évoluer dans un espace partagé avec les opérateurs (co-activité), voire en collaboration directe (application de type 'troisième main'). Ces outils dessinent de nouvelles possibilités dans l'automatisation des tâches, même si leur capacités de charge et de vitesse réduites ne les destinent pas aux mêmes types d'opérations que les robots dit classiques. Une analyse plus approfondie de leurs potentialités sera développée dans l'état de l'art.

**Les outils de simulation** ne constituent pas une nouvelle technologie en soi, mais avec la combinaison des CPS et du Big data, des applications sont envisagées au niveau de jumeau numérique (système de production virtuel), pour des décisions/actions en temps réel [31].

Ces technologies, liées pour certaines, sont reprises par Dombrowski [2] qui propose de les hiérarchiser selon le niveau d'impact potentiel sur le processus dans lequel elles sont intégrées, faisant apparaître une structure entre ces solutions, et donnant des indications sur la potentielle complexité de mise en œuvre, voir figure 1.2.

Les applications de ces technologies sont encore majoritairement décrites sous forme de potentialités, avec des impacts positifs plus régulièrement supposés que vérifiés [32], [19]. Les quelques exemples de mise en œuvre n'illustrent pas tant des résultats que des preuves de faisabilité, donnant une confirmation limitée de la proposition conceptuelle d'amélioration de la performance industrielle [33]. Les technologies étant inter-connectées et interdépendantes dans leur applications [34], l'industrie 4.0 est aussi décrite comme un état général transformé théorique [35], [36].

### 1.2.2 Structure du lean manufacturing

L'objectif de cette section est de donner une description synthétique du lean manufacturing, une étude plus avancée sera réalisée dans l'état de l'art pour en développer les notions clés pour ce travail

de recherche, pour décrire les mécanismes des interactions entre ce système et des technologies de production innovantes.

Le lean ou originellement TPS ('Toyota Production System') se définit comme un ensemble hiérarchisé de principes, méthodes et outils ayant pour objectif l'amélioration de la compétitivité. Cet ensemble de pratiques interdépendantes est usuellement représenté sous forme de temple ou de maison, dont les piliers représentant les principes reposent sur des fondations (pratique de l'amélioration continue, création de vision) et soutiennent eux même un toit illustrant les objectifs visés : élimination des 'muda' (gaspillages) et satisfaction client, voir figure 1.3.

Womack et Jones en ont donné cette définition : " [le lean fournit] *une approche pour en faire plus avec moins : moins d'efforts humains, moins d'équipements, moins de temps, et moins d'espace - tout en se rapprochant de plus en plus des attentes spécifiques des clients*" [37].

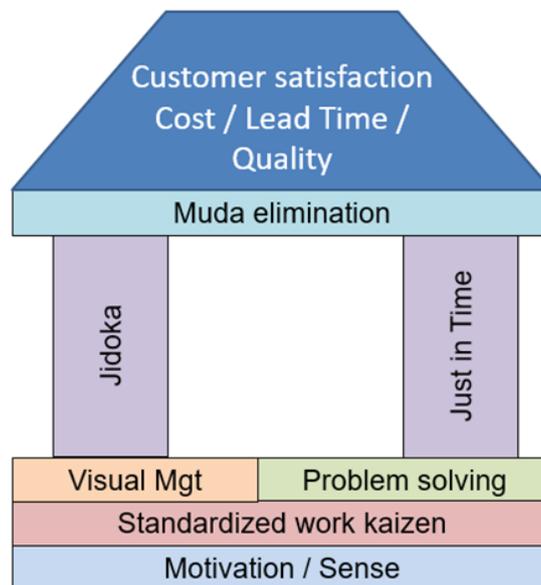


Figure 1.3 – 'Le temple du lean' - version simplifiée

Ce processus repose sur deux principes :

- **Jidoka** (Build in Quality, 'Automation'<sup>1</sup>, ou encore 'séparation homme machine').
- **Just in Time** (Juste à temps).

Le principe de **jidoka** tend à maîtriser la qualité à chaque étape du process, pour éviter la propagation de défauts aux étapes aval où la valeur est plus forte. On recherche donc la maîtrise des anomalies via des systèmes anti-erreur (Poka Yoke en japonais), ou d'alerte (andon en japonais) - activé par les opérateurs. Ces systèmes permettent de libérer les opérateurs de tâches de surveillance des équipements de production et de les affecter sur des activités à valeur ajoutée. Le principe de **juste à temps** vise à réduire le temps de parcours du produit au travers du système de production (lead time), permettant ainsi d'obtenir une flexibilité satisfaisante avec un niveau de stock et d'en-cours limité. Ceci repose sur trois techniques :

---

1. Mot valise créé à partir des termes 'Autonomie' et 'Automatisation' pour représenter le concept de machine capables de s'arrêter de produire en cas de création de défaut

- Fabrication au rythme du client (Takt Time).
- Simplification des flux (élimination des croisements, cellules flexibles multiprocess), réduction des tailles de lot.
- Production organisée en flux tiré, avec une fabrication activée par le poste aval (outil kanban).

Ces deux principes s'appuient sur des **pratiques de base** qui leur permettent de fonctionner et d'en améliorer l'efficacité. Ces pratiques ont en commun de tendre à développer les personnes dans leur compétences et leur prise de responsabilité, car elles sont considérées comme les principaux acteurs de l'amélioration de la performance :

- Le travail standardisé, qui permet de rendre les opérations répétables, donc observables afin de mettre en évidence les anormalités et/ou les gaspillages et de leur apporter des améliorations sous forme incrémentale (kaizen en japonais) Cette standardisation sert aussi de base au développement de la polyvalence des opérateurs.
- Le management visuel pour permettre une visualisation des conditions de production rapide par l'ensemble des intervenants, et permettre une prise de décision rapide et décentralisée.
- Les activités de résolution de problème, afin d'éliminer les anormalités détectées et prévenant leur réapparition en s'appuyant sur la recherche des causes d'origine des problèmes rencontrés, et en intégrant les contremesures identifiées aux standard de travail.

A la différence de l'industrie 4.0, le lean est décrit dans sa globalité, de façon empirique et conceptuelle, avec des liens établis vers la performance opérationnelle et des propositions de process d'intégration, ou de transformation, dans une approche organisationnelle [38]. L'écart de maturité entre une proposition technologique naissante et une pratique établie contribue à ce décalage dans leurs descriptions respectives, pour autant il peut y avoir un intérêt à comparer les deux propositions et leur implications sur la performance opérationnelle, en envisageant les composantes techniques, méthodologiques et humaines [39].

### 1.2.3 Des antagonismes en surface

D'un point de vue technique, l'intégration des technologies 4.0 appelle un besoin d'investissement conséquent. L'approche lean a contrario ne le considère qu'une fois les limites de l'amélioration incrémentale atteintes, et dans le cas où le gain de performance associé peut être évalué. Par exemple, les techniques de management visuel, permettent de facilement mettre en évidence les anormalités dans un système de production, constituant une sorte de langage commun entre les niveaux opérationnels et managériaux. Ceci suscite l'implication des opérateurs dans la résolution de problèmes, et donc de l'amélioration de la performance industrielle. Dans la proposition de l'industrie 4.0, l'information des fluctuations et anormalités seraient collectées et traitées par des systèmes dit 'cyber-physiques', et des contremesures testées virtuellement via des jumeaux numériques. Peut-on encore envisager une implication de même nature des opérateurs dans ce système, où les limites de leur autonomie seraient redéfinies par leur capacité à interagir avec des interfaces plus complexes.

L'approche lean s'axe sur les pratiques méthodologiques plutôt que sur l'utilisation intensive de technologies. Or ce concept date de soixante-dix ans, et on peut aussi considérer qu'il tirait le meilleur parti de l'environnement technologique alors disponible, et que les innovations technologiques au fur et à mesure de leur apparition ont été intégrées si elles présentaient un intérêt. Par exemple le système kanban lors de sa création était physiquement constitué par des cartes retournables échangées avec les fournisseurs regroupés autour des usines du groupe Toyota. Ce sont les technologies de l'information

qui ont rendu possibles des dématérialisations successives et l'utilisation de fournisseurs plus éloignés du site d'assemblage (et ainsi l'extension des supply chain). De façon analogue, les années 90 ont vu l'émergence des progiciels ERP (Entreprise Resource Planning), issus des méthodologies MRP (Material Resource Palnning) basées sur la planification donc sur des flux poussés. En apparence peu compatibles avec les principes de flux tirés issus des stratégies 'juste à temps', ils ont pu s'intégrer dans des systèmes de production lean au prix de développement de modules spécifiques, et offrir aux entreprises la puissance de calcul nécessaire pour gérer des mix produits importants [40]. Cet exemple illustre l'adaptation que l'on peut apporter à une offre technologique pour permettre son utilisation dans un environnement donné (lean dans ce cas), et y apporter des relais de performance inaccessibles autrement.

L'idée de lean est compatible avec l'intégration de technologies innovantes, à condition qu'elles soient elles même compatibles avec ses principes de fonctionnement. Il peut être aussi intéressant d'explorer si les outils méthodologiques associés sont susceptibles d'évoluer pour mieux absorber ou tirer un meilleur parti des technologies disponibles. Par exemple si le principe jidoka qui couvre les interactions homme-machine est apparu avec des machines dédiées, est-il toujours pertinent pour l'intégration de robots collaboratifs qui offrent des process significativement plus reconfigurables ?

### 1.2.4 Similitudes et complémentarités

Malgré certains points d'attention à considérer dans la mise en œuvre, il y a des similitudes sur des principes centraux. Le lean s'appuie sur le développement des opérateurs et de leur autonomie, entre autres par l'implication dans la mise sous contrôle du process et son amélioration, et les technologies 4.0 comme la réalité augmentée visent à donner l'accès à des informations contextuelles d'aide à la décision en cas d'aléas, permettant une réaction rapide et décentralisée. Ce rôle clé de l'opérateur contribue aussi à un autre principe commun : la décentralisation de la décision. Le lean propose, par de l'automatisation simple (principe d'autonomation - Jidoka), de réagir immédiatement en cas d'anormalité, évitant ainsi la génération et la propagation de défaut, l'industrie 4.0 a les mêmes visées par l'autonomie des moyens de production 'Smart' pour s'adapter à des événements extérieurs en temps réel. Des technologies comme le RFID (Radio Frequency IDentification) sont envisagées pour permettre la localisation en temps réel des stocks et en-cours, agissant comme des 'kanbans communicants', renforçant la performance et la reconfigurabilité de ces mêmes boucles kanban [41], en leur offrant la possibilité de se re-dimensionner en temps réel en fonction des fluctuations de la demande client. Cet exemple illustre comment un moyen technologique (le RFID), combiné à des moyens de calculs et des sources d'informations actualisées, permet une utilisation plus efficace d'un outil lean (le kanban), sans en remettre en cause le principe de fonctionnement (le flux tiré).

Ainsi il n'y a pas nécessairement d'opposition frontale entre les deux concepts, pas plus qu'il n'y aurait d'adéquation complète, mais plutôt probablement un **éventail de possibilités de déploiement qui généreront des interactions de nature différentes, selon qu'elles viendront comme moyen de mise en œuvre d'un outil lean existant, ou comme son extension, ou encore remise en cause d'un principe de fonctionnement, tant dans les implications techniques qu'humaines**, comme l'illustre la proposition de la figure 1.4.

En synthèse le lean peut apparaître comme cadre de mise en œuvre de technologies innovantes, mais on peut donc aussi envisager les apports technologiques comme des moyens d'en d'augmenter la portée et l'efficacité. Il existe des complémentarités de principe, où amélioration continue et innovation

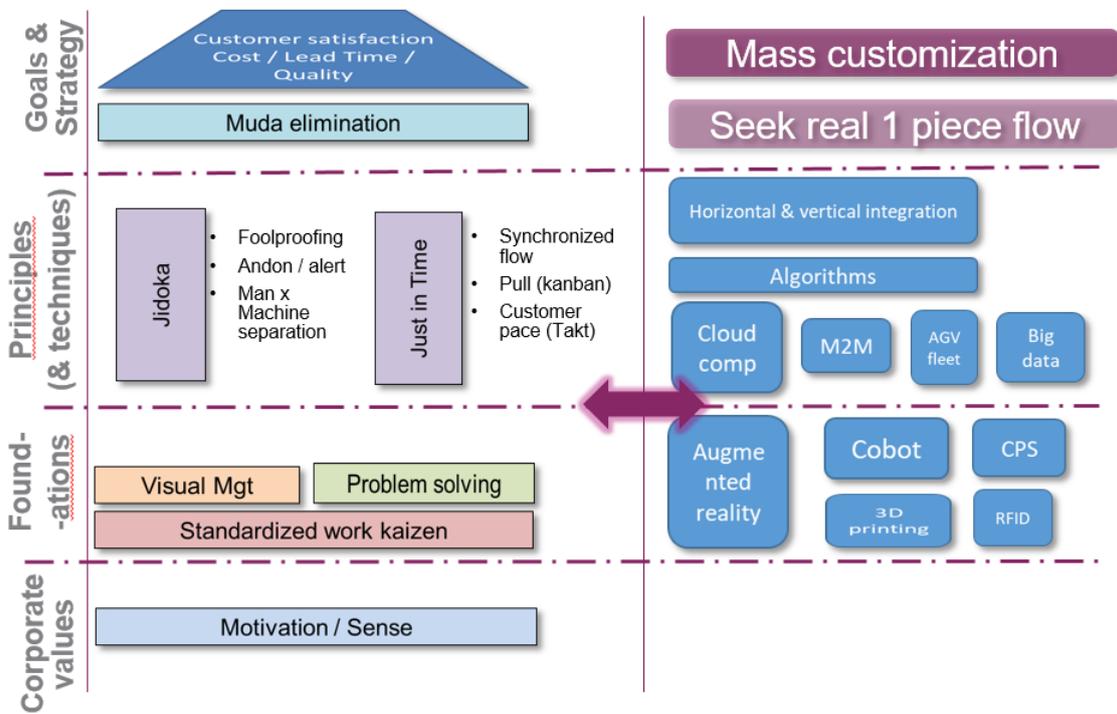


Figure 1.4 – zones d’interactions entre lean et industrie 4.0

### 1.3. OBJECTIFS DU TRAVAIL DE RECHERCHE

---

contribuent à l'amélioration durable de la performance opérationnelle, à condition que ces deux activités ne soient pas conduites séparément, mais intégrées dans une démarche où l'amélioration continue peut se développer sur une innovation technique maîtrisée, appropriée par le niveau opérationnel, pour en modifier l'usage dans la perspective d'une meilleure performance. D'une façon analogue, l'innovation est un accélérateur de performance pertinent quand il prend le relai d'activités d'amélioration qui ont atteint leur limite, donc le résultat d'une démarche stratégique qui a préalablement fixé des niveaux d'objectifs.

La littérature scientifique récente propose plusieurs scénarios d'évolutions possibles entre les deux concepts, [42], [31] :

1. Le lean est un facilitateur pour l'intégration de l'Industrie 4.0
2. L'industrie 4.0 améliore le Lean Manufacturing (le complète, le rend plus efficace).
3. Le Lean et l'Industrie 4.0 ont des contributions mutuelles.

Ces hypothèses ne s'excluent pas l'une l'autre, comme cela a été illustré dans les parties précédentes. A ce stade on pourra supposer qu'elles dépendent du niveau de pratique lean dans l'application considérée, du niveau d'impact de la technologie considérée (ciblé ou large) sur les pratiques. L'introduction d'une technologie pour un usage précis ne remettra potentiellement pas en cause le processus dans lequel il s'inscrit, et privilégiera la première hypothèse. Un saut technologique plus ambitieux dans un domaine où la pratique a atteint une limite serait éventuellement plus à même de l'enrichir. Dans une revue de littérature systématique sur les impacts des technologies de l'industrie 4.0, Rosin [19] met en évidence une prépondérance des articles portant sur le pilotage des flux ('just in time'), et des carences sur les thématiques impliquant les opérateurs (résolution de problème, 'Genshi Genbutsu' - résolution sur le terrain), fortement liées aux activités d'amélioration continue.

### 1.3 Objectifs du travail de recherche

En synthèse, si la problématique de l'implémentation de technologies innovantes dans les processus de production n'est pas nouvelle, elle reste d'actualité, notamment sur les aspects de la recherche de performance. Concernant la robotique collaborative, techniquement mature, les interactions avec certains principes et techniques lean peuvent avoir un rôle dans le niveau de succès des solutions d'implémentations, mais les approches actuelles se penchent a priori très rarement sur l'implication des utilisateurs dans leur élaboration. Vu la nature de cet écart, il n'est peut être pas judicieux à ce stade d'étudier théoriquement plus en détail ces interactions si l'on veut s'épargner un débat d'opinion. En revanche, **la question de la méthodologie d'implémentation et des gains de performance associés ouvre des pistes d'étude plus concrètes, que nous nous proposons d'aborder par l'expérimentation, centrée sur l'apport des utilisateurs comme prescripteurs de solution.**

L'ambition de ce travail est donc de développer une méthodologie d'implémentation de robot collaboratif (en situation d'interaction avec l'homme), qui présente les caractéristiques suivantes :

- Evaluation et amélioration incrémentale de la performance sur les indicateurs visés pour évaluer le succès d'implémentation.
- Adaptable selon l'usage recherché de la technologie. Exploitation des principes et techniques lean, mais aussi leur modification si nécessaire.
- Opérationnels engagés comme prescripteurs de solutions (et de leurs améliorations incrémentales), sur la base de leur compétences lean développées dans ce processus.

### 1.3. OBJECTIFS DU TRAVAIL DE RECHERCHE

---

Afin de mieux définir les travaux nécessaires à l'élaboration d'un tel outil de conception de process, un état de l'art sera réalisé pour préciser les aspects différenciants de la robotique collaborative dans les process d'assemblage, ainsi que les aspects lean associés et donc possiblement impactants en vue de leur implémentation. Les types de connaissances et leur mise en oeuvre par les opérateurs au sein de ces environnements lean seront aussi décrits. Les différentes méthodologies d'implémentations disponibles dans la littérature seront aussi étudiées, y compris dans les aspects théoriques pour cerner leurs objectifs.

### 1.3. OBJECTIFS DU TRAVAIL DE RECHERCHE

---

## Chapitre 2

# Contextualisation et définition d'un cadre théorique

### Contenu

---

<b>2.1</b>	<b>Industrie 4.0 – robotique collaborative</b>	<b>28</b>
2.1.1	Un potentiel et des attentes dans le milieu industriel	28
2.1.2	Collaboration et interaction homme-robot	28
2.1.3	Intérêt ergonomique, différents modèles disponibles	30
2.1.4	Les différentes approches de résolution	32
2.1.5	Les approches par modélisation de problème	34
<b>2.2</b>	<b>Lean Manufacturing</b>	<b>39</b>
2.2.1	L'amélioration continue	39
2.2.2	Principe d'interaction homme machine - jidoka	42
2.2.3	L'amélioration de la performance – cycle kaizen / innovation	43
2.2.4	Le type de connaissances mises en jeu – lien avec les compétences	43
<b>2.3</b>	<b>Discussion</b>	<b>44</b>

---

Ce chapitre a pour finalité de poser le cadre théorique de ce travail de recherche, en s'appuyant sur la littérature scientifique existante. Dans une première partie, nous préciserons les aspects de la robotique collaborative que nous utiliserons, notamment les interactions homme-machine. Nous sélectionnerons ensuite un modèle ergonomique exploitable pour un process d'assemblage. Ensuite nous passerons en revue les travaux disponibles sur l'optimisation des problèmes comparables au notre, c'est à dire faisant intervenir des ressources possédant des caractéristiques différentes et ayant la capacité d'interagir. Dans une deuxième partie, nous aborderons les éléments du lean manufacturing qui paraissent connectés à notre sujet, c'est-à-dire ceux liés à la séparation homme-machine, et les notions d'amélioration continue, ainsi que le rôle joué par les opérateurs et le type de connaissances qu'ils mettent en œuvre quand ils y participent.

### 2.1 Industrie 4.0 – robotique collaborative

#### 2.1.1 Un potentiel et des attentes dans le milieu industriel

Si la robotique industrielle dite classique existe depuis plusieurs années et ses principes d'implémentation sont maîtrisés, la robotique collaborative - ou robotique légère - fait partie des innovations proposées dans le cadre de l'Industrie 4.0, [43], [44], [17]. La question de son implémentation se pose de façon différente tant pour les objectifs que pour les méthodes. En effet, à l'inverse de leur homologues industriels, les robots collaboratifs peuvent évoluer - sous certaines conditions - dans un milieu ouvert, sans séparation physique avec les hommes. Ils peuvent être aussi notablement plus compacts, mais avec la contrainte de charges utiles plus faibles (quelques kilogrammes). Les vitesses de déplacement en présence d'opérateurs sont dans des plages basses au regard de leurs possibilités, car les standards (TS 15066 [45]) qui autorisent la coexistence se base sur une énergie dissipée tolérable en cas de collision.

Ces caractéristiques permettent d'envisager leur implémentation de façon nouvelle. Si l'on considère leur faible encombrement et l'absence d'infrastructure supplémentaire pour assurer les conditions de sécurité, les robots collaboratifs deviennent pertinents dans des situations où des robots industriels seraient sous exploités au regard de l'investissement nécessaire, ou simplement impossibles à intégrer. Même si cette situation présente un intérêt manifeste, ce ne sera pas l'objet de ce travail de recherche, car elle ne remet pas en cause la structure de la démarche d'implémentation de la robotique dans les process concernés. Par contre, si l'on considère les possibilités d'interaction entre opérateur et robot, on peut envisager un partage des tâches à un niveau de détail (quelques secondes de travail) inaccessible en robotique classique, et donc modifier l'organisation même des environnements où l'on intègre les robots collaboratifs, et notamment donc au niveau de process d'assemblage manuels<sup>1</sup>. Ils offrent en outre des possibilités d'amélioration de l'ergonomie par la prise en charge d'opérations délicates. L'accessibilité affichée à la programmation de certains modèles (notamment Universal Robot ®), permettrait un niveau de reconfigurabilité élevé, donc plus propice à l'amélioration continue, bien que cela soit plutôt nouveau pour les méthodologies de type lean manufacturing, où dès les premières phases de la conception de process, le partage des opérations entre opérateur et 'machine' est déjà effectué.

Ainsi la robotique collaborative suscite un intérêt de la part du secteur industriel, où les objectifs principaux cités sont efficacité opérationnelle et ergonomie [46]. Dans une étude d'implémentation de robot collaboratif sur un process d'assemblage initialement manuel, où les critères retenus sont : productivité, qualité, fatigue de l'opérateur et sécurité, la projection des industriels en charge de la production est une amélioration globale de la performance [47].

#### 2.1.2 Collaboration et interaction homme-robot

Les interactions entre homme et robot peuvent être de différentes natures, Thiemermann et Matheson en ont proposé des représentations comparables[3], [48]. Ils distinguent 4 modes d'interaction principaux, basés sur les niveaux de séparation spatiale et temporelle entre l'opérateur et le robot, voir fig. 2.1.

---

1. le terme process d'assemblage ou process désigne l'ensemble ordonné des opérations affectées à une ressource ou a un binôme homme-robot

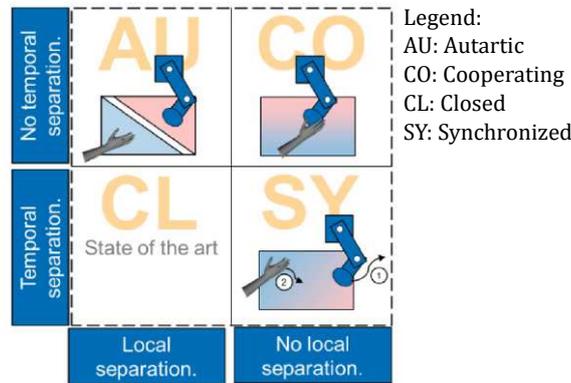


Figure 2.1 – Les catégories d’interaction homme robot, adapté de [3]

- **”Closed”**, mode fermé - séparation spatiale et temporelle. Ceci correspond à la situation de la robotique industrielle actuelle, où il n’y a pas d’interaction possible entre opérateur et robot.
- **”Autartic”**, mode autarcique - séparation spatiale mais pas temporelle. Il s’agit d’une forme de co-activité, l’opérateur et le robot partagent l’environnement, mais sans pour autant interagir.
- **”Synchronised”**, mode synchronisé - séparation temporelle mais pas spatiale. L’opérateur et le robot peuvent travailler en parallèle, mais pas sur le même objet. Cela peut être la préparation d’un sous-ensemble avant le montage sur la pièce principale par exemple, ou l’une des deux ressources exécute les dernières opérations sur une pièce alors que l’autre débute la pièce suivante.
- **”Cooperation”**, mode coopératif - pas de séparation temporelle ni spatiale. L’opérateur et le robot œuvrent simultanément sur une même pièce.

Le mode autarcique est une spécificité des robots collaboratifs, rendue possible par les capacités des robots collaboratifs à réagir à une collision, et possiblement à des moyens supplémentaires de détection de présence et de proximité des opérateurs. Pour autant, comme mentionné précédemment, il ne modifie pas la structuration des opérations à mener car elles sont dans leur intégralité effectuées par une seule des deux ressources. Les modes synchronisés et coopératifs à l’inverse permettent de partager la charge de travail et la charge ergonomique, et ouvrent de potentiels gains de performance tant économique qu’ergonomique, à condition de séquencer judicieusement les différentes opérations et de les allouer à la ressource la plus appropriée en fonction des buts recherchés. En terme de process d’assemblage, le mode dit synchronisé indique que l’opérateur et le robot travaillent en parallèle sur leur tâches respectives, à condition que le choix des tâches respecte différentes contraintes, comme les précédences, la faisabilité selon la ressource sélectionnée. Dans ce cas, la charge ergonomique est complètement retirée à l’opérateur au prix d’un temps d’exécution augmenté, car il est généralement observé que les vitesses de déplacement des robots sont inférieures à celles des opérateurs quand l’espace de travail est partagé. En ce qui concerne la coopération, le gain ergonomique dépend du partage des opérations élémentaires entre robot et opérateur, au regard du modèle ergonomique sélectionné, tout en conservant un niveau élevé de faisabilité via la dextérité de l’opérateur, et une vitesse d’exécution proche du temps manuel. Par contre ce mode mobilise les deux ressources simultanément et empêche la parallélisation des tâches.

En envisageant un usage multi-modes des robots collaboratifs, on pourrait donc dans un même

process non seulement allouer les tâches à l’opérateur ou au robot (mode synchronisé) mais aussi en proposer certaines en coopération, créant ainsi un compromis plus large, mais aussi plus complexe à exploiter pour dégager les meilleures solutions, car aucune ne domine les deux autres sur l’ensemble des critères, comme cela est synthétisé dans la table 2.1.

Table 2.1 – A qualitative comparison of collaboration modes under performance criteria

	Operator	robot	Cooperation
Economic performance	High	Low	High
Ergonomic performance	Low	High	Intermediate
Parallelisation of tasks	High	High	Low

### 2.1.3 Intérêt ergonomique, différents modèles disponibles

L’ergonomie comme approche scientifique s’attache à la compréhension des interactions entre les hommes et leur environnement, dans le but d’améliorer leur bien-être et la performance du système dans lequel ils évoluent. Ceci couvre les activités telles que l’analyse et la conception des environnements de travail et de leur contenu (les tâches à effectuer), afin qu’ils soient en adéquation avec les besoins et les capacités des opérateurs [49]. On peut répartir son champ d’application en 3 domaines :

- l’ergonomie physique, qui étudie l’activité physique d’un point de vue biomécanique (gestes et postures, manipulation de charges, répétition des mouvements), et leur impact sur la sécurité et la santé, comme les troubles musculo-squelettiques.
- l’ergonomie cognitive, focalisée sur les process mentaux tels que la perception, la mémorisation, le raisonnement et la réponse motrice. Les points d’intérêt peuvent être la charge mentale, la fiabilité des opérateurs, le stress lié aux interactions avec l’environnement de travail
- l’ergonomie organisationnelle, qui couvre l’optimisation socio-technique des structures, leur stratégies et processus associés. Les horaires de travail, modalités de travail à distance, la communication interne, les pratiques de travail en équipe sont par exemple des éléments de ce domaine.

Les aspects organisationnels ne sont pas nécessairement pertinents dans le cadre de la création de process. En effet, ils se placent à un niveau qui ne remet pas en cause le process lui-même mais plutôt la façon dont il est géré dans son environnement de production (ex : décision sur les rotations de poste, d’affectation de main d’œuvre spécifique...), et dépendent donc majoritairement de variables externes au process lui-même. Bien que la robotique collaborative puisse avoir un impact au niveau de l’ergonomie cognitive (sélection de composant optionnel, guidage de l’opérateur sur la séquence des opérations...), dans un souci de cadrage, l’ergonomie physique sera retenue dans cette étude comme critère unique. Ce dernier domaine peut s’appliquer intégralement dans la description d’un process d’assemblage. et réciproquement peut refléter les évolutions de ce dernier. Il constitue donc une mesure pertinente pour ce travail de recherche.

Les principaux phénomènes pris en compte dans l’évaluation des risques ergonomiques d’ordre physique dans les opérations d’assemblage sont liés aux déplacements de charges, aux efforts exercés,

aux vibrations ressenties (via l'utilisation d'outils rotatifs par exemple), ainsi que l'intensité, la durée et la fréquence auxquelles les opérateurs sont exposés à ces risques au cours de la période travaillée. La posture ainsi que la prolongation des stations debout ou assise impactent aussi le risque ergonomique. [50], [51], [52]

Il existe une vaste population de méthodes, dont la mise en œuvre peut relever d'une complexité élevée selon la méthodologie de mesure utilisée, allant de questionnaire subjectif à de la mesure directe appareillée. Selon Chiasson [53], la méthodologie la plus couramment utilisée dans les milieux professionnels est l'observation systématique, qui peut se réaliser à partir d'enregistrements vidéos par exemple. L'auteur propose un panel de huit méthodes réputées accessibles par des non experts, qui couvrent différents périmètres d'évaluation, allant des risques liés aux membres supérieurs jusqu'au risque accidentel. Ces méthodes d'évaluation génèrent des indices adimensionnels qui sont ensuite comparés à des valeurs seuil d'acceptabilité propres à chaque méthodologie, matérialisées éventuellement par des codes tricolores (vert, orange rouge) pour une meilleure lisibilité.

Dans une analyse sur l'intégration du risque ergonomique sur des problèmes d'équilibrage de ligne d'assemblage, Otto & Scholl [50] reprennent plusieurs de ces méthodes dans une étude multi-objectifs visant à améliorer l'indice ergonomique sans dégrader la performance économique (nombre de stations et temps de cycle) [50]. Si des techniques de résolution algorithmiques ont permis d'identifier des solutions mathématiques, les auteurs soulignent la difficulté in fine d'identifier le retour sur investissement d'une progression de l'indice ergonomique au regard de son sur-coût, comme dans le cas de la création d'une station supplémentaire par exemple. Une des pistes proposée est d'exprimer le risque ergonomique en temps de récupération, qui de fait devient de même dimension que la performance économique. Battini & al. [54], [55] proposent un modèle qui exprime des temps de récupération en fonction de l'énergie dépensée au cours de l'exécution d'une tâche. Une 'Relaxation Allowance', RA, vient corriger le temps d'opération 2.1. Elle est conditionnée par l'indice de dépense énergétique  $\dot{E}$ , qui est le ratio de la dépense énergétique moyenne E, et de la durée de l'opération T, cf. équation 2.2.

$$\hat{T} = T \times (1 + RA) \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} \dot{E} &= \frac{E}{T} \\ RA &= \frac{41 \cdot \dot{E} - 176}{100} \end{cases} \quad (2.2)$$

Pour les valeurs de  $\dot{E}$  inférieures à  $4.2927 \text{ kcal}/\text{min}$ , RA est nul (pas de nécessité de récupérer). Si l'on définit RT comme le temps de récupération additionnel ( $RT = \hat{T} - T$ ), ainsi l'équation 2.2 peut se réécrire de la façon suivante 2.3 :

$$RT = \max \{0, 0.41 \cdot E - 1.76 \cdot T\} \quad (2.3)$$

L'énergie dépensée E est la somme de l'énergie nécessaire pour maintenir la posture (debout ou assise), pour se déplacer, et à exécuter les différentes actions. Cette dernière prend en compte la charge manipulée, le type de mouvement (montée, descente, mouvement latéral, maintien), et son amplitude. Des formules et tables pour chaque type permettent de sommer l'énergie associée à chaque opération en fonction de ses opérations élémentaires et d'en déduire la valeur de RT, [54]. Ainsi il est possible par une analyse vidéo a posteriori de découper un process d'assemblage en un ensemble de tâches pour chacune desquelles sera associé un temps de réalisation TT (Task Time), et un temps de relaxation

*RT*. De cette façon, il est possible d'évaluer le risque ergonomique d'un process en comparant la valeur de temps de relaxation total ( $R_{tot}$ ) au temps de repos effectivement disponible (s'il existe), et de faire une projection économique de l'impact d'accorder un repos complet. L'applicabilité pratique d'un tel modèle pourrait être discutée. Ceci n'est pas l'objet de ce travail, par contre il possède l'avantage de permettre de comparer différentes solutions entre elles de façon directe.

### 2.1.4 Les différentes approches de résolution

Plusieurs pistes existent déjà pour proposer des solutions sur les problèmes de collaboration homme-robot dans les process d'assemblage. Certaines ont des orientations plutôt pratiques (mais pouvant intégrer des complexités techniques élevées), avec une attention particulière apportée à la faisabilité, et parfois moins sur l'optimisation de la performance. D'autres approches plus théoriques sont centrées sur la modélisation du problème comme les problème d'équilibrage de ligne (Assembly Line Balancing Problem, ou ALBP en anglais) et leur déclinaisons, ou encore les problèmes de planification à ressources contraintes (Resource Constrained Project Scheduling Problem, RCPSP). Dans le cadre d'un travail expérimental, il peut être bénéfique d'aborder ces différentes approches : les premières, centrées sur l'intégration pratique de cobot sur une station de travail, peuvent donner un éclairage sur les points clés à considérer lors de la mise en œuvre de la démarche, tandis que les deuxièmes, centrées sur le modèle théorique du problème d'affectation, peuvent donner des indications sur sa complexité et identifier les types d'outils de résolutions appropriées, quitte à adapter des moyens existants si nécessaire.

#### 2.1.4.1 Les approches centrées sur l'intégration

Elles regroupent principalement des méthodes séquentielles [56], [57], [58] [4], qui ont pour point de départ la définition du produit à assembler, et pour objectif la définition de la station de travail et du process collaboratif qui y sera réalisé, voir figure 2.2.

La première étape, **clarification des tâches** (Task Clarification) considère le produit et le process nécessaire à son assemblage. Les contraintes de précedence peuvent être identifiées à ce stade. Si cela fait partie du cadre de l'étude, les ressources à prévoir sont aussi recensées. Ensuite, vient **l'assignation des tâches** (Task assignment). Cette étape débute par une décomposition hiérarchique des tâches, en opérations, éventuellement en opération élémentaires et mouvements, qui pourront être ainsi classées dans des catégories identifiables (pick and place, assemblage, vissage, ...). Le niveau de détail choisi lors de la décomposition impactera les opportunités de collaboration lors de la sous-étape suivante : **l'allocation des tâches** [56]. Dans la plupart des cas, il s'agit de déterminer si la tâche est réalisable par une seule des ressources, ou les deux. Dans l'hypothèse d'un process initialement manuel, toutes les tâches sont naturellement réalisables par l'homme, ce qui n'est pas toujours le cas pour le robot. Les causes peuvent être un niveau élevé de dextérité requis, la nécessité d'utiliser d'un outil spécifique (vissage, soudage, sertissage...) qui ne serait pas disponible comme effecteur pour le robot, ou encore du rayon d'action nécessaire. A l'inverse, il existe certaines configurations de process dans lesquelles des tâches sont réservées au robot (manipulation de charge lourde par exemple). Dans ces situations, la performance ergonomique laisse la place à une critère de faisabilité, et l'implémentation du robot est avant tout destinée à la réalisation de ces tâches. Dans ses travaux, Malik [59] propose une alternative plus fine sous forme de grille d'évaluation semi quantitative. Cet outil considère plusieurs critères tels que les caractéristiques produit (déformable ou non, capacité des composants à être manipulé par

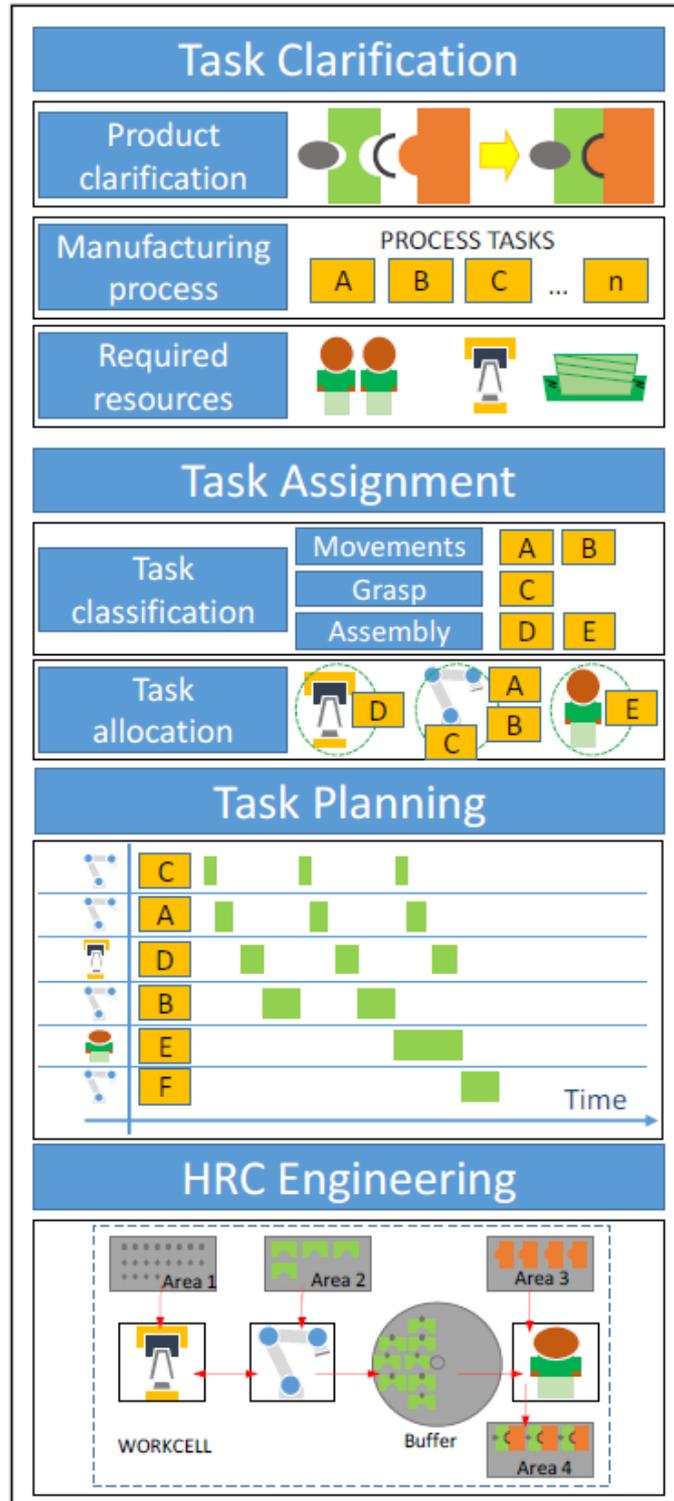


Figure 2.2 – Méthode de conception de cellule collaborative [4]

des effecteurs simples,... ), les types de tâche et/ou opérations à effectuer (précision de l'alignement, distance d'approvisionnement à parcourir, assemblage vertical ou horizontal), afin d'allouer à chaque ensemble d'opérations un potentiel d'éligibilité à l'affectation vers chacune des ressources. Indépendamment des scores proposés, ces critères seront autant d'éléments à considérer dans la définition du cadre expérimental pour générer des cas d'étude suffisamment ouverts pour ne pas contraindre la recherche de solution vers un chemin unique. Une fois chaque tâche affectée à une ressource, elles sont séquencées lors de l'étape de **planification des tâches** (Task Planning). En fonction des contraintes de précedence, et de la disponibilité des ressources les tâches sont séquencées pour former un nouveau process. Plusieurs techniques peuvent être appliquées à ce stade, allant de l'affectation à la première ressource disponible, à des solutions algorithmiques, qui pourront être basées sur la maximisation d'objectifs prédéfinis, comme le taux d'occupation des ressources [58]. Dans les exemples donnés sur ces méthodes, on peut relever dans certains cas des niveaux assez faibles de parallélisation des tâches [57], [59] et donc la génération de temps d'attente en cours de process (notamment pour l'opérateur), impactant négativement le temps de cycle obtenu. Les auteurs relèvent aussi que la qualité de la planification pourrait être améliorée par la capacité à prédire les temps d'exécution de tâche par le robot, que ce soit pour la justesse de la prédiction comme pour la décision d'allocation (homme ou robot) quand les deux sont possibles. En outre, peu proposent une boucle de rétroaction entre les étapes, et celles qui le font donnent un niveau limité de détail sur le contenu de ces feedbacks [60]. Enfin, la dernière étape, qui consiste en la **mise en œuvre de la solution**, va déterminer l'implantation, l'installation des matériels, leur programmation, ainsi que la vérification que les conditions de sécurité nécessaires sont réunies. Un des points notable de cette étape est l'attention à apporter à la gestion des points d'interaction entre homme et robot, au moment donc où deux tâches consécutives ont des allocations différentes. Pour des raisons de sécurité [45] comme de fluidité du process, les ressources doivent être capable de se synchroniser, même si l'une d'entre elle a pu fluctuer sur la durée de l'exécution d'un des prédécesseurs. Des solutions techniques avancées comme la détection de mouvement sont possibles pour signaler la fin de l'accomplissement d'une tâche par l'opérateur [58], voire l'anticiper [61]. Indépendamment des techniques utilisées, ces points d'interaction, ou phases de transition doivent être incorporées dans la conception du process collaboratif pour le rendre effectif et sûr.

**En synthèse, on pourra retenir plusieurs éléments en vue des phases expérimentales : les impacts des caractéristiques du produit sur la facilité à automatiser les tâches, la finesse du découpage du process pour ouvrir des solutions de collaboration, l'intérêt de pouvoir prévoir les temps d'exécution des tâches par le robot, ainsi que la prise en compte des phases de synchronisation entre opérateur et robot.**

### 2.1.5 Les approches par modélisation de problème

Ces approches relèvent de la résolution de problème d'allocation de tâche à des ressources (opérateur, robot, les deux simultanément), cherchent à maximiser les indicateurs de performance sélectionnés (économique et ergonomique), en incorporant diverses contraintes (précédence, faisabilité,...). La recherche de solutions s'appuie sur des méthodes mathématiques. Les solutions exactes sont recherchées quand cela est possible, sinon des solutions approchées sont recherchées via différents types d'algorithmes.

### 2.1.5.1 Les problèmes d'ordonnancement

Les problèmes d'ordonnancement ont déjà été largement étudiés, les plus appropriés au problème étudié sont les RCPSP et ceux des machines non reliées parallèles (Parallel Machine Scheduling - PMS), car les deux considèrent des ressources multiples.

**Parallel Machine Scheduling** . La principale similitude entre PMS et le problème étudié est que le temps d'exécution des tâches dépend de la ressource sélectionnée. Bien que ce problème soit moins étudié que son homologue des machines parallèles identiques, plusieurs méthodes ont été proposées pour sa résolution, comme la recherche de solutions exactes [62, 63], les méthodes heuristiques [64, 65, 66], et des métaheuristiques comme les colonies de fourmis [67], le recuit simulé [68, 69], ou les algorithmes génétiques [70, 71].

Dans les PMS, l'objectif le plus étudié est le 'makespan'. Ceci correspond au temps écoulé entre le début de la première opération et la fin de la dernière, indépendamment de leur affectation. Par contre aucune référence aux objectifs ergonomiques n'a pu être identifiée, et en outre, dans ces problèmes, les tâches ne peuvent pas être affectées aux deux ressources simultanément.

### RCPSP

Ils représentent les problèmes d'ordonnancement avec contrainte sur les ressources. Il y a aussi des contraintes de précédence entre les tâches. Les ressources - qui réalisent les tâches - sont en quantité limitée. Les hypothèses récurrentes dans les RCPSP sont les suivantes :

- Les ressources sont renouvelables : une fois leur tâche exécutée, elles sont de nouveau disponible pour une autre tâche.
- Les ressources, de plusieurs types, sont en quantité limitée.
- Les tâches ne sont pas préemptives, une fois amorcées, elles ne peuvent pas être interrompues.
- Les tâches sont sujettes à des contraintes de précédences.
- Les tâches requièrent la même quantité de ressources tout au long de leur exécution.

Plusieurs modèles existent pour les RCPSP. Le type de problème de ce travail de recherche peut être assimilé à un RCPSP multi-modes (MRCPSP). Le terme mode fait référence aux conditions d'exécution : le temps d'exécution et les ressources mobilisées. Dans un problème multi-modes, il est donc possible pour une même tâche d'avoir donc des temps d'exécution différents selon le type et la quantité de ressources mobilisées, ce qui peut être une description des modes collaboratifs synchronisés et coopératifs évoqués précédemment. les MRCPSP ont été décrits initialement par Elmaghraby [72]. Leur résolution a été étudiée par algorithme génétique [73], et un modèle mathématique a été aussi proposé par Kolish [74]. Des revues de littérature exhaustives ont été réalisées [75], [76], mais la majorité des travaux portent sur des problèmes de type mono-objectif (minimisation du makespan), et aucun ne considère d'objectif ergonomique.

### 2.1.5.2 Les problèmes d'équilibrage de ligne

Bien que cette recherche porte sur la création d'un seul poste de travail, il est possible de faire certaines analogies avec les problèmes d'équilibrage de ligne, a minima pour en estimer la complexité. En effet, si l'homme et le robot adoptent un mode synchronisé, même partiellement, il est possible

d'avoir deux produits en cours sur la station à des niveaux d'achèvement différents, opérés en parallèle par chacune des ressources disponibles. Ceci se rapproche donc d'une ligne, même s'il s'agit de sa configuration la plus minimaliste avec deux stations. Dans cette partie nous proposons donc une revue des problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage (Assembly Line Balancing Problem - ALBP) et de leurs multiples extensions, qui permettent de couvrir une variété de situations différentes. Les variantes ont été regroupées en catégories, [77], [78], qui permettent de les décrire et d'en relever les caractéristiques communes.

Les ALBP sont qualifiés de simples (SALBP) ou généraux (GALBP) selon qu'ils considèrent un seul type de produit ou plusieurs. Dans notre cas, nous limiterons la recherche à un seul produit, donc aux problèmes de type SALBP. Les types de solutions recherchées créent aussi des catégories différentes :

- Les problèmes de faisabilité ALBP-F valident si une solution d'équilibrage existe pour un temps de cycle et un nombre de stations déterminé.
- Les problèmes de type 1 recherchent les équilibrages qui minimisent le nombre de stations nécessaires pour un temps de cycle donné.
- Les problèmes de type 2 minimisent le temps de cycle pour un nombre donné de stations.

Notre cas se rapproche donc plus d'un problème de type 2. La performance économique s'exprime en temps de cycle, bien qu'il en soit une version extrêmement simplifiée (2 postes de charges regroupés au sein d'une même station de travail). Si l'on cherche à le caractériser plus finement dans les différentes catégories existantes, on considèrera les éléments suivants :

- Les ressources sont dites hétérogènes : le robot ne peut pas exécuter toutes les tâches, et son temps d'exécution est en général supérieur à celui de l'opérateur pour une tâche donnée.
- La plupart des tâches peuvent être réalisées par les deux ressources simultanément (coopération), ce qui affecte leur temps de réalisation et leur coût ergonomique.
- Les objectifs sont à la fois d'ordre économique (temps de cycle -  $CT$ ) et ergonomique (temps de relaxation -  $RT$ )

L'implémentation de robots dans les stations de travail a été étudiée dans les problèmes RALBP (Robot ALBP), où les temps de tâche dépendent du robot sélectionné. Les robots n'ont pas nécessairement la capacité de réaliser toutes les tâches [79]. Ces travaux peuvent être vus comme un cas particulier des problèmes dits 'd'assignement de ressources' (Assembly Line Worker Assignment Balancing Problem - ALWABP), qui trouvent leur application dans des structures de type ateliers protégés, employant de la main d'œuvre présentant des situations de handicap diverses, [80], [81], [82], [83]. L'opérateur et le robot peuvent être considérés comme des ressources hétérogènes, ayant des capacités et des temps nécessaires à la réalisation de tâches différentes. Toutefois, le robot étant plus lent que l'opérateur, le seul bénéfice économique de son introduction réside dans la parallélisation des tâches. Cette parallélisation dans le contexte particulier d'une même station a aussi été étudié, dans les problèmes appelés 'double sided line' ou 'variable workplace' (VWALBP). Dans ce type de problème, chaque tâche est aussi caractérisée par sa localisation sur le produit, qui sera accessible ou non selon les ressources (par exemple un côté dans le cas des 'double sided lines'), ou alors on cherchera à éviter que sur une station deux ressources interviennent sur la même localisation afin d'éviter de possibles gênes ou collision [84]. Ces cas s'appliquent essentiellement pour les produits de grande dimension, comme l'automobile, où il est d'usage de retrouver plusieurs opérateurs en co-activité sur un même pas de travail. De fait dans ce type de problèmes, la coopération n'est pas envisagée.

L'ergonomie a aussi été étudiée comme objectif des problèmes d'équilibrage, comme une extension

possible des ALWABP. Plusieurs méthodes utilisées par les praticiens ont été documentées par Otto & Scholl [50], avec différents modèles, comme évoqué en partie 2.1.3. Des travaux se basant sur le modèle PMES proposé par Battini [54], ont montré un intérêt sur un cas théorique [85] à l'introduction de robots collaboratifs sur une ligne d'assemblage initialement manuelle. Lors d'une approche comparable mais en utilisant des modèles ergonomiques différents, Pearce [86] suggère, à travers un cas réel, qu'à la fois les performances économiques et ergonomiques peuvent être améliorées par l'implémentation d'un robot collaboratif, par un partage judicieux des tâches. Dans ces deux travaux, les possibilités de répartition des tâche ne considère pas le mode coopératif.

**En synthèse, il apparaît que le mode coopératif - ou une situation comparable - a été encore peu étudié dans la littérature, d'autant plus dans des travaux où la performance est recherchée sur les axes économiques et ergonomiques. Si l'on veut évaluer la qualité des solutions trouvées par différents moyens dans le cadre de ce travail de recherche, il faudra donc créer un outil de recherche de solutions, approchées éventuellement, en s'appuyant sur les méthodes appliquées par les travaux revus dans l'ensemble de la section 2.1.5, dont on peut trouver le résumé dans la table 2.2. Les approches pratiques décrites en 2.1.4.1 fournissent quant à elle des indications sur la marche à suivre pour la mise en œuvre des solutions identifiées.**

Table 2.2 – Synthèse de la recherche bibliographique sur les approches par modélisation de problème

Paper	Category	Objective type	Constraints				Solving method	
			Ergonomics	Heterogeneous manpower	Precedence	Setup times		
Becker & Scholl (2009)	VWABLP	Single	-	✓	✓	-	Exact	
Borba & Ritt (2014)	ALWABP	Single	-	✓	✓	-	Exact	
Fanjul-Peyro	PMS	Single	-	✓	✓	-	Meta heuristic	
Herrman et al. (1997)	PMS	Single	-	✓	✓	-	Heuristic	
Kim et al. (2002)	PMS	Single	-	✓	-	-	Metaheuristic	
Lin et al. (2012)	PMS	Multi	-	✓	-	-	Metaheuristic	
Miralles et al. (2007)	ALWABP	Single	-	✓	✓	-	Exact	
Moreira et al. (2012)	ALWABP	Single	-	✓	✓	-	Heuristic & Meta Heuristic	
Moreira et al. (2015)	RALWABP	Single	-	✓	✓	-	Exact	
Nikabadi	PMS	Multi	-	✓	✓	✓	Metaheuristic	
& Reihaneh (2016)								
Otto & Scholl (2011)	Ergo ALBP	Multi	✓	-	✓	-	Heuristic	
Pearce et al. (2018)	Ergo ALBP	Multi	✓	✓	✓	-	Exact	
Quenehen et al. (2020)	-	Multi	✓	✓	✓	✓	-	
Rocha et al. (2008)	PMS	Multi	-	✓	✓	✓	Exact	
Rubinowitz et al. (1993)	RALBP	Single	-	✓	✓	-	Heuristic	
Vallada & Ruiz (2011)	PMS	Single	-	✓	✓	✓	Meta heuristic	
Van Peteghem								
& Vanhoucke (2010)	MRCPPSP	Single	-	✓	✓	-	✓	Metaheuristic
Wang & Bahram (2019)	PMS	Single	-	✓	✓	-	-	Metaheuristic
Wang & Ye (2019)	PMS	Single	-	✓	✓	-	-	Exact
Weckenborg et al. (20109)	ALWABP	Multi	✓	✓	✓	-	-	Exact

### 2.2 Lean Manufacturing

S'il est généralement accepté que l'ensemble des pratiques lean sont liées, [87], [88], la plupart des modèles les regroupe en plusieurs ensembles cohérents afin de mesurer leurs effets sur la performance opérationnelle. Dans une étude centrée sur la pratique du Juste à Temps (Just in Time - JIT) [87], Sakakibara pose aussi plusieurs autres pratiques liées à 'l'infrastructure', dans lesquelles on retrouve notamment la qualité et le développement des personnes. Dans ce modèle, l'obtention de la performance n'est pas le résultat direct de la mise en pratique des techniques du JIT, mais de l'effet structurant du JIT sur l'ensemble de l'organisation, via un niveau d'exigence accru sur les autres pratiques. Ainsi, sous la contrainte positive des exigences d'anticipation et de réactivité générées par la pratique du JIT, l'ensemble des activités Manufacturing gagnent en performance, ce qui se reflète sur la performance opérationnelle. Des conclusions analogues sont aussi tirées d'études basées sur des modèles comparables, comme celui posé par Cua [89], qui propose un ensemble de 3 pratiques : Juste à Temps (JIT), Total Quality Management (TQM), et Total Productive Maintenance (TPM), auxquelles vient s'ajouter un quatrième ensemble nommé 'Pratiques Communes', centrées sur les pratiques managériales, qui reprend un nombre significatif de composantes du 'développement des personnes'. L'étude confirme les hypothèses que les 3 pratiques (JIT, TQM, TPM) développées simultanément - dans le cadre fixé par les 'pratiques communes'- délivre la performance opérationnelle, plutôt que la promotion d'une seule des trois. Il est aussi noté que chacune des trois pratiques peut renforcer les deux autres, confirmant la notion d'interdépendance entre ces notions. Un autre référentiel bâti par Shah et Ward [90], reposant sur une synthèse de plusieurs études, propose un ensemble de 22 pratiques, regroupées en 4 ensembles : JIT, TQM, TPM, et Management des Ressources Humaines (Human Resource Management - HRM) . Ce modèle sera testé sur un panel étendu d'entreprises basées aux Etats-Unis, couvrant plusieurs secteurs d'activités. Ceci permettra, entre autres, de mettre en évidence que les entreprises utilisant des process en continu - focalisées sur l'exploitation de la capacité de production - sont plus prompt à déployer les outils liés à la TPM que les entreprises produisant en série ou par lot, qui privilégient l'implémentation du JIT, pratique prépondérante pour contenir les délais de fabrication dans un contexte de demande variée et fluctuante. Ainsi, il est posé que chaque organisation peut être amenée à développer ses pratiques Lean de façon personnalisée, suivant ses objectifs ou ses contraintes. Dans le cadre d'un programme de développement d'un système Lean, des priorités entre les pratiques peuvent aussi intervenir selon les stratégies d'implémentation choisies [15], même si les pratiques restent fondamentalement fidèles au concept de départ.

#### 2.2.1 L'amélioration continue

Dans les différentes descriptions disponibles, le principe d'amélioration continue (kaizen) occupe une place centrale, cf. figure 2.3, et s'applique à toutes les autres pratiques du système Lean Manufacturing ([87], [91], [5]). En effet, les pratiques TQM (ou Jidoka) visent à stopper les activités de production dès la détection d'un problème, afin d'en éviter la propagation, et le JIT - avec des encours de production réduits - accorde un temps de réaction volontairement faible. La réaction rapide face aux aléas et la mise en place de meilleurs standards de travail et d'organisation pour éviter leur réapparition est donc clé pour les phases de stabilisation, qui sont elles-mêmes le socle du déploiement de solutions d'améliorations de la performance, ([5], p33). Ces deux temps constituent l'amélioration continue, et ils reposent tous les deux sur l'implication des opérateurs (en prise directe avec les situations rencontrées), et la prise en compte de leurs prescriptions, d'où la nécessité de développer



Figure 2.3 – Le Toyota Production System, tiré de Liker, *the toyota Way* [5]

leurs compétences techniques, mais aussi leur capacité à résoudre les problèmes et mettre en œuvre les techniques d’amélioration continue. Dans la littérature sur l’implémentation de technologie, cette capacité à faire évoluer ses pratiques est appelée capacité dynamique, et est aussi identifiée comme un facteur essentiel de développement de la performance sur le long terme. [92], [93]. Le terme kaizen peut faire référence à l’action d’amélioration ponctuelle : ‘réaliser un kaizen’ peut décrire par exemple la modification d’un espace de travail pour rapprocher un sous composant de son point de montage, afin d’en diminuer le temps (improductif) de manutention. Mais cette appellation décrit aussi l’activité structurée et pilotée qui met en œuvre ce type d’actions, et d’autres plus vastes et plus complexes.

Imai ([6], p81) décline une segmentation en 3 parties complémentaires des activités kaizen :

- Kaizen piloté par le management
- Kaizen piloté par petit groupe
- Kaizen piloté par l’individu

**Le kaizen piloté par le management** se focalise sur les questions stratégiques, implique donc dirigeants et experts, et la mise en place des idées générées nécessite en général des investissements matériels. Cette activité vise entre autres l’amélioration de l’organisation, et a notamment pour ‘objectif parallèle’ de maintenir la dynamique et de développer l’activité kaizen des deux autres segments, par des actions de promotion portées par le management, comme des conventions récompensant les meilleures suggestions terrain ou cercles de qualité.

Les cercles de qualité (Quality Control Circles - QCC) désignent le groupe et le chantier d’amélioration mis en œuvre dans les activités de **kaizen** par petit groupe. Sa portée est moindre que le segment précédent (échelle d’un atelier), les améliorations visées sont donc plus locales et mises en place sur des durées plus courtes (quelques semaines à quelques mois). Les groupes sont majoritairement constitués d’opérateurs, supportés par des référents méthodologiques pour la structuration de l’activité, qui peuvent être des opérateurs formés et expérimentés sur cette démarche (techniques de résolution de problème), et des experts techniques si nécessaire. Il est convenu que le groupe sélectionne le thème qu’ils souhaite aborder, une fois l’intérêt justifié, car l’objectif premier de cette activité reste l’amélioration des conditions de travail, pré-requis pour déclencher l’amélioration de la performance (qui pourra elle aussi être obtenue par le concours de cercles de qualité). La troisième catégorie, les **kaizens pilotés par les individus** regroupe des actions plus ponctuelles, localisées vers un poste de travail, mais qui s’inscrivent dans la continuité des deux premières. La méthodologie est plus légère, faisant appel

significativement au bon sens des opérateurs, donc sur une somme de connaissances non formalisées (tacites), issues de l'expérience. Les investissements associés sont minimes ou inexistant, et les délais de mise en œuvre les plus courts possibles, car ce type d'action est notamment utilisé dans les phases de stabilisation, pour l'élimination des anomalies et la réduction des fluctuations.

### 2.2.1.1 Mise en œuvre des activités de kaizen

Le mécanisme de l'amélioration continue repose sur l'élimination des 'mudas' (gaspillage en japonais). Ce terme décrit l'ensemble des activités réalisées qui n'apportent pas de valeur ajoutée. Les anomalies et fluctuations en font partie, mais une partie de muda existe aussi dans les activités planifiées, qui font partie du standard. Ohno [94] classe les mudas en 7 catégories dans les activités industrielles :

1. **Surproduction** : engager des ressources pour fabriquer ce qui n'est pas commandé. Ce muda a l'inconvénient supplémentaire de favoriser l'émergence de tous les suivants.
2. **Attente** : devant une machine par exemple, pour un opérateur, ou stagnation de matières premières, d'en cours de production, de produits finis.
3. **Transport excessif** : de produits ou d'en cours, au sein du système.
4. **Transformation excessive** : actions de transformation qui n'ajoutent pas de valeur au produit ou 'Surprocessing', comme par exemple la recherche de critères d'état de surface au delà des besoins fonctionnels du produit.
5. **Stock** : détenir des niveaux de stock inutiles. Les stocks rendent les problèmes invisibles (car ils les absorbent) et bloquent donc le processus d'amélioration continue.
6. **Mouvement** : les ressources sont en action, mais effectuent des gestes inutiles (aller-retour par exemple).
7. **Produits défectueux** : les actions de tri ou remise en conformité n'apportent aucune valeur supplémentaire aux produits concernés.

Dans le cadre de la création de process, l'ensemble des mudas possibles ne se manifestent pas, notamment ceux liés à la mise en flux (surproduction, transport excessif, stock). Par contre nous serons vigilants à repérer ceux liés à l'attente (en lien avec l'application du principe Jidoka, voir section 2.2.2), aux mouvements et transports excessifs, et ce pour l'opérateur comme pour le cobot. Si des produits défectueux sont fabriqués, on s'attachera à déterminer si la cause est liée à la conception du process (pour procéder aux corrections nécessaires), ou à son exécution, auquel cas on utilisera la phase de stabilisation (voir section 2.2.3) pour les éliminer. La transformation excessive est quant à elle liée principalement à la définition des opérations, qui est une donnée d'entrée pour cette étude.

### 2.2.1.2 Application au cadre de la recherche

Le contexte étudié - la création et l'amélioration de process, est plus restreint que le champ total d'application des activités d'amélioration continue. Ainsi les spécificités des activités pilotées par le management (entretien de la dynamique) sont hors cadre, mais on pourra retenir dans la mise en œuvre de nouvelle technologie la nécessité d'apporter de l'expertise technique au groupe. Pour le reste, la méthodologie des kaizen en groupe peut s'appliquer a priori, ainsi que les suggestions d'opérateurs. La situation comporte quelques divergences avec celles rencontrées classiquement, car ici plutôt qu'un problème à résoudre, il s'agit d'une opportunité à exploiter dans la phase de création, qui nécessi-

## 2.2. LEAN MANUFACTURING

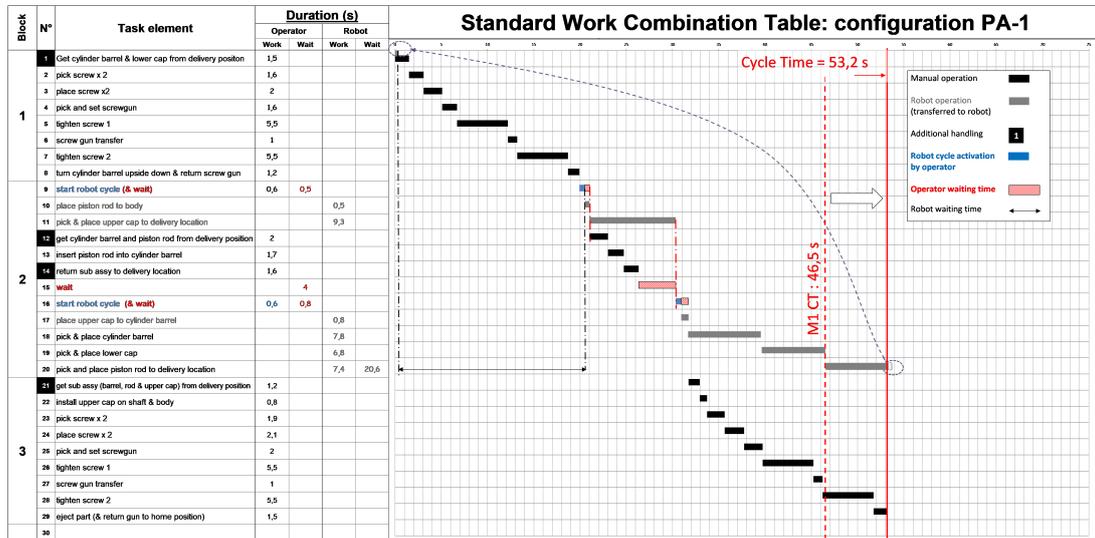


Figure 2.4 – Exemple de table de combinaison

tera potentiellement un support méthodologique particulier, cette étape n'étant pas habituellement attribuée à ce type de groupe.

Ainsi, les différents modèles se rejoignent sur les points suivants :

- Le lean est composé de pratiques liées mais que l'on peut distinguer.
- L'amélioration continue (ou kaizen), est un principe centré sur la participation active des opérateurs dans l'amélioration de la performance industrielle.
- Le kaizen est un principe central qui s'applique à toutes les pratiques du lean.

### 2.2.2 Principe d'interaction homme machine - jidoka

Le principe de Jidoka (automatisation 'intelligente', traduit aussi par le terme 'autonomation'), propose que les activités des opérateurs soient séparées de celles des machines, dans le sens où les actions de ces premiers ne doivent pas être cadencées par ces dernières, provoquant temps d'attente et donc inefficacité. Le deuxième bénéfice attendu de ce principe d'interaction est que si des améliorations (kaizen) sont apportées sur des opérations manuelles, ces gains sont immédiatement reflétés sur le temps de cycle (dans le cas contraire, elles augmentent potentiellement le temps d'attente de l'opérateur, ce qui ne génère aucune amélioration). Dans cette approche, le temps alloué à la machine est modifiable à la marge, et ne peut que très rarement être augmenté pour que des opérations préalablement manuelles lui soient réaffectées (ex : équilibrage de point de soudure entre une cellule robotisée et manuelle). Ainsi le temps d'attente de la machine n'est pas nécessairement perçu comme un potentiel à exploiter en priorité, alors qu'avec des 'machines' comme les cobots, beaucoup plus versatiles, ce temps disponible peut être directement ciblé pour le transfert d'opérations manuelles supplémentaires, améliorant ainsi les indicateurs ergonomiques et économiques. Un des outils de visualisation pour ces process est la 'table de combinaison', qui représente sur une échelle de temps les actions respectives de l'opérateur (en noir) et de la (ou les) machines impliquées dans le process (en gris), comme illustré sur la figure 2.4.

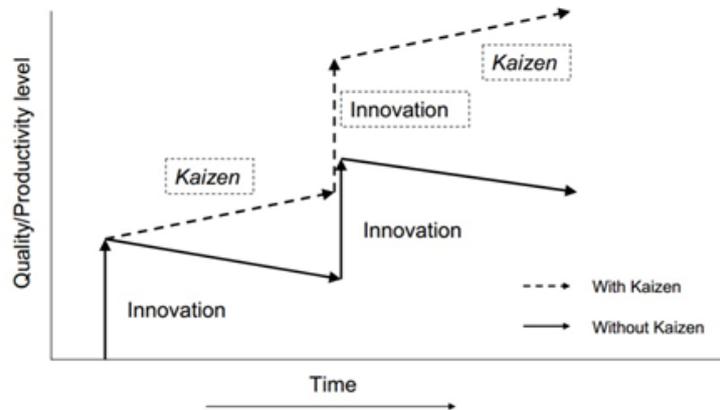


Figure 2.5 – Kaizen et innovation - Imai [6]

### 2.2.3 L'amélioration de la performance – cycle kaizen / innovation

La relation entre amélioration incrémentale et l'innovation se manifeste aussi dans la proposition technologique de l'industrie 4.0. La 'synchronisation' de ces deux moments est à la source d'une performance durable, cf. figure 2.5. L'introduction de l'innovation est suivie d'une phase de stabilisation (ou maintenance), c'est pendant cette phase que la maîtrise se développe (et les compétences opérationnelles), et une fois les processus sous contrôle, ils deviennent répétables, lisibles, donc améliorables. C'est le début des phases d'améliorations incrémentales, qui procureront l'amélioration de la performance (à distinguer donc de la mise sous contrôle) jusqu'à la prochaine 'rupture' d'innovation. Les capacités d'une organisation qui permettent à ces cycles d'exister sont appelées capacités dynamiques, car elles n'agissent pas au niveau d'une performance spécifique, mais plutôt au niveau de la compétence de l'organisation à générer de la performance de façon régulière. La capacité à combiner exploitation et exploration est appelée ambidexrité, que la littérature décrit comme nécessaire pour la génération de connaissances organisationnelles [95, 96]. Sur ce point elle rejoint les principes lean qui placent le développement de méthodologies/techniques propres comme facteur de compétitivité, car difficilement adoptables par les concurrents sur des temps courts, à l'inverse de moyens de productions mis à disposition par leurs fabricants à l'ensemble du marché par exemple.

### 2.2.4 Le type de connaissances mises en jeu – lien avec les compétences

Plus spécifiquement sur les phases même d'implémentation de technologie de production, de stabilisation et d'amélioration, les connaissances mises en jeu peuvent être à la fois personnelles (savoir-faire, expérience, ...) et collectives (méthodologiques, techniques...), et avoir des aspects tacites (informels, en majorité pour les connaissances personnelles) ou explicites (formels, plutôt pour les connaissances collectives) [97]. Les méthodologies lean qui encadrent ces activités (Cercles de Qualité, chantier kaizen) s'appuient sur les processus d'externalisation et d'internalisation des connaissances pour développer ses compétences et générer de l'amélioration robuste dans le temps. Nonaka [7] pose un modèle de création de connaissance appelé 'SECI' (Socialisation, Externalisation, Combinaison, Internalisation), qui en décrit les différentes phases et les types de connaissances mises en jeu par les individus (cf. figure 2.6). Dans le cadre de l'amélioration continue, les suggestions sont encadrées par les principes

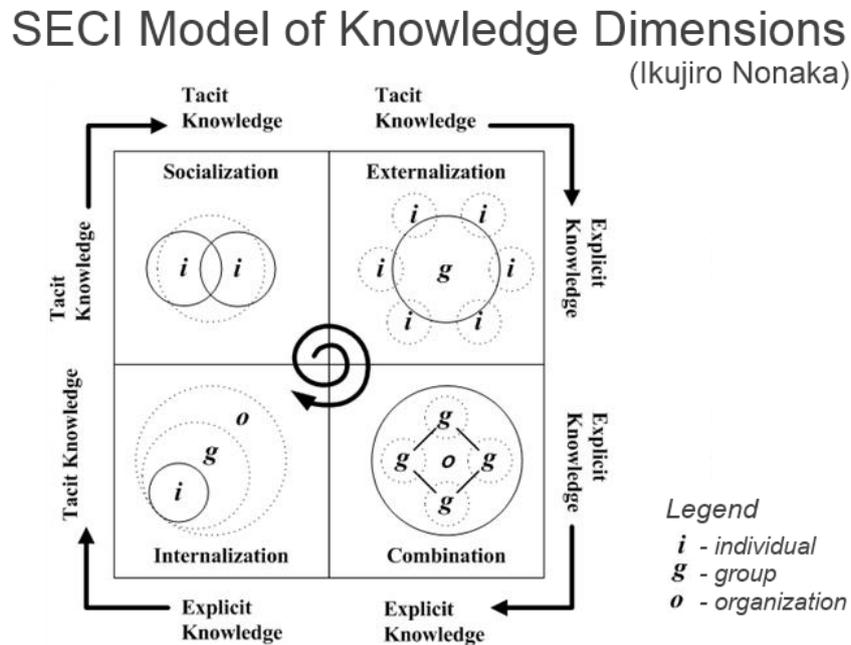


Figure 2.6 – Le modèle SECI [7]

lean, dont ceux évoqués plus haut, mais une part essentielle est laissée à la créativité des opérateurs dans la proposition de solution, dont on vérifiera la faisabilité et l'intérêt le plus rapidement possible, au besoin par du prototypage. Lors de ces phases, une part importante est aussi laissée à l'approche essai-erreur, et on recherche l'accumulation d'actions - même de faible bénéfice - au plus vite, plutôt que d'idées plus ambitieuses et complexes, dont le délai de mise en œuvre plus long retarde la captation des bénéfices associés (ce type d'idée se rapproche plus d'une phase d'innovation).

Ainsi, dans ce contexte d'activité d'amélioration, il est admis qu'une partie des connaissances contribuant à l'amélioration échappent aux représentations ou modèles théoriques existants. Donc si l'on souhaite les exploiter dans une approche théorique comme vu dans la partie 2.1.5, il est nécessaire de passer par une phase d'explicitation qui permettra de les inclure dans le modèle souhaité. Réciproquement, on peut aussi considérer que ces propositions de solutions théoriques sont aussi potentiellement pour les utilisateurs des occasions d'internaliser des méthodologies de résolution et de faire évoluer leur représentations du process qu'ils cherchent à améliorer.

## 2.3 Discussion

Les modalités d'interaction homme-robot sont redéfinies par l'introduction de robotique collaborative. Si cette dernière ouvre de nouvelles perspectives de performance opérationnelle, la situation plus ouverte nécessite de reconsidérer les méthodes d'intégration de ces moyens technologiques. Plusieurs approches sont déjà disponibles, mais selon qu'elles soient à vocation pratique ou théoriques, elles affichent des limites soit à la recherche d'optimalité, ou à la prise en compte de la complexité du réel. Pour le cas d'une utilisation multi-modes du cobot dans la recherche de compromis entre performance

## 2.3. DISCUSSION

---

économique et risque ergonomique, nous n'avons pas pu identifier de travaux de recherche couvrant l'ensemble des critères pris en compte dans cette étude. Il faudra donc en considérer le développement dans la suite de ce travail, afin d'avoir une référence théorique. En outre, le développement de la performance dans la durée passe par la capacité de remise en cause des solutions implémentées via un processus d'amélioration continue. Cette activité repose sur l'appropriation des technologies par leurs utilisateurs, et la mise en œuvre par ces derniers d'un certain nombre de principes méthodologiques issus du lean manufacturing. Or ces principes ne sont pas non plus nécessairement à jour face à la complexité inhérente aux technologies de production innovantes, notamment la robotique collaborative. De plus, s'il est toujours possible d'intégrer un cobot dans un environnement de production, la recherche de sa meilleure exploitation possible par rapport aux indicateurs visés est une activité en soi.

L'ambition de ce travail est d'identifier une méthode d'implémentation qui prenne en compte ces phénomènes, et notamment l'appropriation des process par les utilisateurs comme facteur d'amélioration de la performance. Ainsi la proposition scientifique de ce travail inclue la création d'un protocole d'expérimentation mettant à contribution ces utilisateurs, car dans ce contexte **les outils lean sont considérés comme la mise en œuvre de compétences acquises et non pas comme l'application directe de principes**. Par un cadrage adapté, la capacité de ce protocole à intégrer des éléments reproductibles pourra le définir comme base pour un processus d'implémentation en environnement réel.

Les approches de recherche collaborative comme la recherche orientée conception, ou l'ingénierie didactique proposent ce type de cadre [98]. Elles s'appuient sur un enrichissement mutuel des propositions théoriques et de la pratique, par des cycles de mise en situation, évaluation, modification, qui constituent une construction itérative de l'outil méthodologique visé. Une revue plus détaillée de ces approches sera proposée dans la partie suivante, ainsi que leur mise en œuvre dans le cadre de l'objectif de ce travail de recherche. En outre, la recherche de solutions théoriques optimales pourra servir à évaluer la qualité des améliorations incrémentales, mais éventuellement aussi à la stimuler par la suggestion de solutions nouvelles. Il sera aussi intéressant d'en évaluer l'applicabilité.

**Ainsi, la proposition de ce travail est de construire une méthode d'implémentation de robots collaboratifs dans des process d'assemblage, en se basant sur des pratiques lean mises en œuvre en conditions réelles, mais aussi sur les altérations qui pourront leur être apportées pour en améliorer l'efficacité dans ce contexte, tout en conservant la capacité d'amélioration continue qui garantie une performance durable.**

### 2.3. DISCUSSION

---

## Chapitre 3

# Proposition de méthodologie

### Contenu

---

<b>3.1</b>	<b>La recherche orientée conception</b>	<b>48</b>
3.1.1	Principes	48
3.1.2	Modélisation du processus de résolution : le cycle de Blum	51
3.1.3	Mise en œuvre de la phase de résolution dans la conception de méthode	54
<b>3.2</b>	<b>Algorithme de résolution</b>	<b>59</b>
3.2.1	Modélisation du problème	59
3.2.2	Principe de fonctionnement	61
<b>3.3</b>	<b>Synthèse sur la proposition</b>	<b>68</b>

---

Ce chapitre vise à formaliser la proposition scientifique de ce travail, afin de poser un cadre qui permettra d'exploiter les expérimentations qui suivront. Notamment une première partie (3.1) s'attachera à décrire un protocole d'essais basé sur les approches de **recherche orientée conception**, qui devront permettre de mettre en œuvre les objectifs de ce travail de recherche, c'est à dire la proposition d'une méthode d'implémentation de robotique collaborative s'articulant sur des techniques lean. Dans ce type d'approche, l'expérimentation n'est pas qu'une étape de validation de la proposition théorique, mais, comme ce sera détaillé ensuite, une étape de construction de la méthode envisagée. Une deuxième partie 3.2 portera sur la résolution théorique de l'utilisation de cobot à des fins d'amélioration de performance économique et de réduction du risque ergonomique. L'outil envisagé est un algorithme de type méta heuristique, dont nous détaillerons la structure et le principe de fonctionnement.

## 3.1 La recherche orientée conception

La recherche orientée conception est une approche collaborative, dont la visée est un enrichissement réciproque des éléments pratiques et théoriques d'un même domaine. En effet, si une approche expérimentale exclusivement basée sur la pratique peut délivrer des 'objets' (méthodes, produits, séquences pédagogiques par exemple) performants, l'absence de cadre théorique qui en explique la logique interne ainsi que les raisons de la performance obtenue rend ces objets très peu transférables hors de leur environnement d'origine. Cette incapacité à généraliser les résultats obtenus obligerait donc à re-développer autant de 'copies' d'objets que de problèmes à résoudre, en plus d'un intérêt scientifique inévitablement très limité. A l'opposée, une approche d'origine uniquement théorique, dont la phase d'expérimentation ne pourrait se dérouler que dans un cadre d'hypothèses figées se priverait d'informations importantes sur la capacité de mise en œuvre en contexte réel de son modèle, ainsi que de l'opportunité d'enrichir sa proposition théorique des pratiques déjà installées dans son domaine d'application. Ainsi, Cobb [98] propose que la qualité d'une théorie s'évalue aussi par sa capacité à produire des résultats dans la réalité. Cette démarche qui réunit donc scientifiques et praticiens s'est développée notamment dans les sciences de l'éducation, dans le but de développer des dispositifs pédagogiques favorisant l'apprentissage des étudiants (qui participent de fait aux expérimentations successives). Elle est le fruit de l'évolution qui prend sa source dans la **recherche-action** (type de recherche visant la production de connaissance et la modification de l'environnement étudié), avant d'être identifiée comme '**ingénierie didactique**' (production de modèles éprouvés en conditions dites écologiques). La recherche orientée conception viendra se positionner dans cette continuité, en intégrant un processus itératif de conception de dispositifs pédagogiques, d'où son utilisation accentuée dans les sciences de l'éducation [99]. Un élément différenciant de cette approche est la prise en compte de la complexité de l'environnement étudié par la conduite de travaux dans des conditions volontairement représentatives, même si les conditions réelles ne peuvent pas systématiquement être mise en jeu, du moins dans les premières phases d'étude. Ce positionnement est particulièrement intéressant pour notre travail de recherche, car il offre un environnement de recherche sensible aux actions d'améliorations impliquant les opérateurs, qui est une caractéristique forte des stratégies lean. On pourra retenir la définition de Loiseau et Harvey [100] qui pose cette démarche comme "**l'analyse systématique du processus de développement de l'objet (matériel pédagogique, stratégies, modèles, programmes) incluant la conception, la réalisation et les mises à l'essai de l'objet, en tenant compte des données recueillies à chacune des phases de la démarche de recherche et du corpus scientifique existant**".

### 3.1.1 Principes

La mise en œuvre d'expérimentations s'appuie sur des lignes directrices qui permettent d'atteindre les objectifs visés, et notamment d'obtenir des modèles exploitables hors de leur environnement d'origine. Cobb et al. [98], Wang [101] et McKenny [102] en identifient certaines qui s'expriment dans les sciences de l'éducation :

- **Leur but est d'identifier des théories sur les mécanismes d'apprentissage et de concevoir des moyens qui les facilitent.** L'expérimentation nécessite donc des analyses à plusieurs niveaux, tant sur les interprétations des étudiants que les interventions visant à l'acquisition de compétences. Cet aspect sera repris dans la prochaine section 3.1.2, où seront explicitées les différentes stratégies de résolution selon le modèle de Blum. Les livrables majeurs de ce type d'étude sont

des méthodologies de conception d'interventions, qui s'appuient sur les connaissances générées pendant la phase d'expérimentation.

- **Leur nature est hautement interventionniste.** Les premiers artefacts sont conçus principalement sur des bases théoriques et cela est nécessaire pour poser un cadre d'analyse sur les observations réalisées. Or il n'est pas possible d'anticiper tous les phénomènes qui vont se présenter lors des expérimentations. Il est donc important de distinguer les éléments ciblés, de ceux qui seront accidentels ou périphériques. Il est aussi important d'établir une relation de confiance entre les participants, qu'ils s'agissent des praticiens (enseignants par exemple), des chercheurs ou des étudiants, car la collecte de données peut prendre des aspects plus ou moins formels, dont la qualité repose non seulement sur les types de support mais aussi sur la qualité des échanges et l'engagement des participants. Les rôles entre les participants peuvent d'ailleurs évoluer au cours du projet, sans que cela ne pose a priori de problème sur la qualité du processus. La structure complète de l'équipe qui prendra part aux expérimentations sera détaillée dans le prochain chapitre.
- **Ils sont à la fois prospectifs et réflexifs.** Les conceptions posent nécessairement des hypothèses sur les comportements des participants, qu'il convient de vérifier pour bâtir le modèle recherché. Mais il est tout aussi important dans ce type de travail de capter des phénomènes d'apprentissage inattendus et de capitaliser sur ces découvertes pour les versions futures des objets pédagogiques. Mc Kenny [102] souligne que l'analyse d'une phase d'essai consiste à mesurer les écarts entre : l'intention de départ, ce qui a été réellement implémenté, et ce qui a été atteint, au moyen d'évaluations qui peuvent être de nature formative (voir figure 3.1).
- **Les conceptions sont itératives.** En lien avec le point précédent, les conclusions intermédiaires qui émergent pendant les expérimentations nécessitent d'être incorporées à des versions itérées des objets proposés, afin d'être elles-mêmes testées, voir figure 3.1. A une échelle macro, trois stades sont recommandés :
  1. Stade prototype, qui vise à cadrer la cohérence générale et la validité interne de la proposition, il confirme aussi la faisabilité et cadre les éléments de contexte nécessaires.
  2. Stade fonctionnel, qui mettra en œuvre la version prototype validée sur un groupe cible "calibré", ou "éprouvette", aux caractéristiques connues, mais pas nécessairement représentatives des utilisateurs finaux. Elle sera développée et modifiée jusqu'à l'atteinte des résultats envisagés, qui donneront lieu à des évaluations préférentiellement sommatives.
  3. Stade de déploiement, où les méthodes sont utilisées avec le public cible, modulo des ajustements contextuels, en général nécessaires selon la représentativité du groupe de participants du stade précédent.
- **Les théories formées sont 'modestes'.** L'exigence d'applicabilité et de précision sur les méthodes proposées, ainsi que la recherche d'efficacité dans la situation d'étude créent une limite naturelle à une généralisation à grande échelle des principes formulés. Il n'en reste pas moins que les modèles proposés sont le résultat d'analyses et de vérifications, qui les distinguent de 'recettes' qui seraient exclusivement évaluées à l'aune de leurs résultats, et les mécanismes ainsi identifiés restent transposables dans d'autres environnements où ils seraient pertinents.

En synthèse intermédiaire, l'approche proposée par la recherche orientée conception apparaît appropriée pour aborder la question de recherche. Son principe de mise en œuvre centré sur l'apprentissage et l'expérimentation reflète assez justement l'implication des utilisateurs dans les propositions de solutions en environnement lean. L'aspect itératif correspond aussi aux cycles kaizen qui supportent l'amélioration des solutions. Dans ce cadre l'approche réflexive va même plus loin car au delà de la

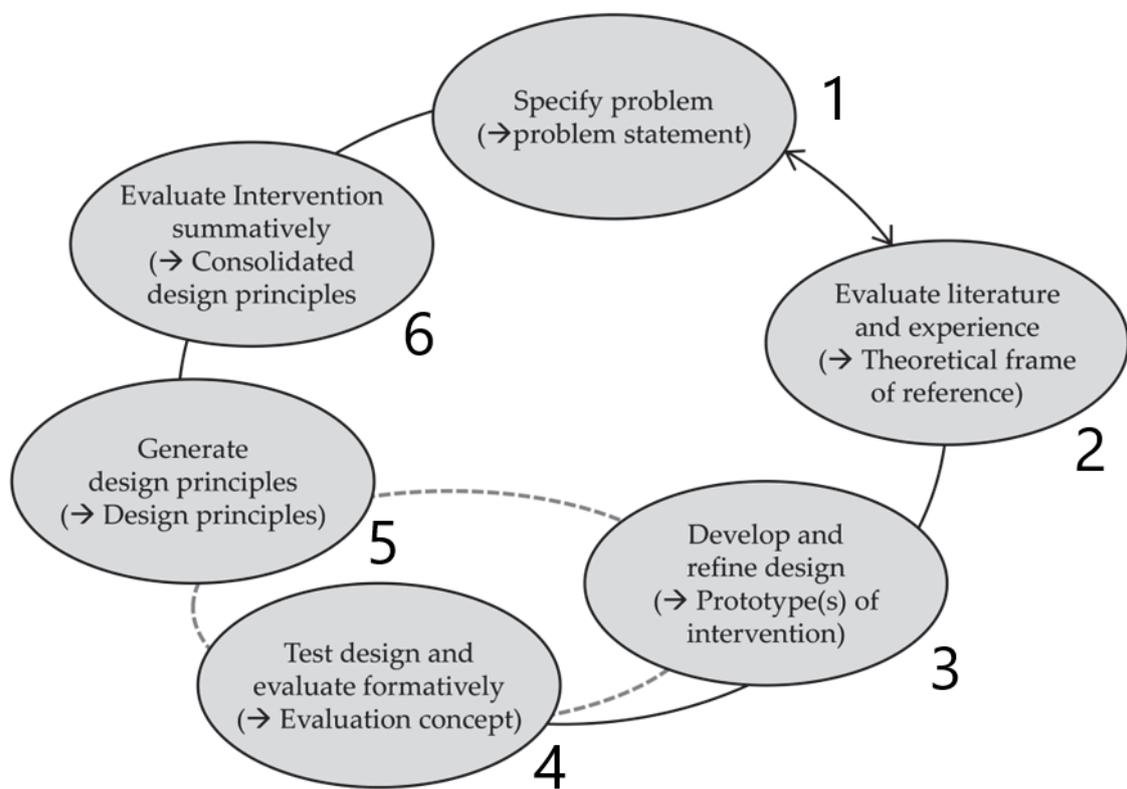


Figure 3.1 – Cycle de développement dans un contexte de recherche orientée conception, [8]

### 3.1. LA RECHERCHE ORIENTÉE CONCEPTION

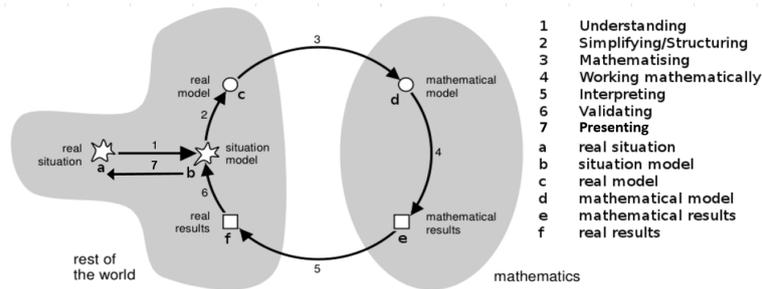


Figure 3.2 – Le cycle de modélisation par Blum et Leiß, [9]

solution elle-même (le process d’assemblage), elle propose d’améliorer le processus de création de ces process d’assemblage. La nature des livrables recherchés - une méthodologie exploitable vers l’apprentissage d’un ensemble de notions- est lui aussi en ligne avec la question de recherche. Ce point est toutefois à nuancer par le fait que dans notre travail de recherche, le niveau des résultats obtenus (la performance des process d’assemblage) reflète la qualité de la séquence ‘pédagogique’ conçue, mais est aussi borné par la capacité intrinsèque des cobots à dégager un avantage compétitif. Cet élément restant une question encore ouverte. L’utilisation d’un algorithme pour identifier les meilleures solutions possibles théoriques pourra servir de référence, à nuancer là aussi par la qualité du justesse du modèle sur lequel l’algorithme se basera. Ayant validé le principe général, la suite de cette section portera sur les mécanismes de résolution de problèmes qui sous-tendent l’apprentissage, et leur déclinaison dans le cadre de cette recherche, puis sur une première proposition de séquence d’expérimentation qui servira à la construction d’une méthode d’implémentation de cobots.

#### 3.1.2 Modélisation du processus de résolution : le cycle de Blum

Outre les aspects techniques, la re-conception d’un process d’assemblage avec l’ajout d’un cobot peut s’apparenter à la résolution d’un problème mathématique, dont la complexité dépend du nombre de variables et des objectifs visés (simples ou multiples). Si l’on adopte le point de vue des participants qui vont mettre en œuvre une stratégie pour résoudre le problème posé - comme c’est le cas dans ce travail de recherche - il est nécessaire d’avoir un cadre de référence qui permette de décrire les stratégies employées, les comparer et dégager donc l’intérêt des techniques lean ainsi que leurs limites. Ce cadre de référence, appelé ‘cycle de modélisation’ est utilisé dans les approches de recherche orientée conception et peut se présenter sous différentes formes [103]. Nous retiendrons le cycle de modélisation proposé par Blum, [9], représenté sur la figure 3.2.

Le principe de ce cycle de modélisation (et de ses variantes) est que la résolution d’un problème repose sur une succession d’étapes, qui se répartissent sur deux environnements : réel et mathématique. L’étape 1, dite de compréhension, permet aux participants de créer une représentation de la situation réelle (a), qui sera appelée situation modèle (b). Le modèle proprement dit (c), va être le résultat de l’étape de structuration (2), qui va identifier les variables et les règles qui régissent la situation modèle. Cette phase peut être comparée à la phase d’externalisation du modèle SECI (voir figure 2.6), durant laquelle les connaissances tacites (la compréhension du problème) vont être explicitées pour pouvoir être traitées, notamment en groupe. Le modèle va comporter un certain nombre de simplifications de la situation modèle. Il va ensuite être traduit en un modèle mathématique (d), qui est le pendant du

### 3.1. LA RECHERCHE ORIENTÉE CONCEPTION

---

modèle réel dans l'environnement mathématique, c'est à dire que les relations entre les variables sont maintenant exprimées en langage mathématique. Cette phase est appelée mathématisation (3). Le problème mathématique va d'abord être résolu dans son environnement mathématique (4), éventuellement à l'aide de moyen informatiques pour fournir un premier résultat mathématique (e), qui aura besoin d'être interprété (5) pour être traduit en termes réels (f). La qualité de ce résultat peut être impactée par la qualité du modèle ou de la résolution mathématique. Ainsi la phase de validation (6) permet d'adapter au besoin la solution à la situation modèle. Cette phase fait appel à des éléments de compréhension de la situation, et peut être comparée à une phase d'internalisation du modèle SECI. Si l'applicabilité est jugée insuffisante, une nouvelle itération du cycle de résolution peut être décidée. Il est aussi admis que des allers-retours peuvent être nécessaires entre les étapes. La dernière étape concerne la communication de la solution (7), ce qui dans notre étude pourra s'apparenter à l'implémentation réelle.

Nous utiliserons ce cycle de modélisation comme trame sur laquelle projeter les différentes approches articulées autour du lean manufacturing, et ainsi les comparer dans leurs mécanismes de mise en œuvre par les étudiants. Ceci correspondra au 'cadre de référence théorique' décrit en deuxième étape du cycle de conception, voir figure 3.1. Les prochaines sections expliciteront les différentes déclinaisons considérées, l'organisation des étapes 3 à 5, ainsi que les différents cas d'études qui serviront de support aux expérimentations.

#### 3.1.2.1 Adaptation du cycle de Blum

Un des objectifs de ce travail est d'évaluer l'apport des techniques lean sur l'implémentation de cobot. Afin d'avoir un élément de comparaison, **il est nécessaire d'avoir une référence méthodologique qui n'incorpore pas ces techniques**. Nous appellerons donc le cycle '*0 méthode*' les tentatives de résolution qui seront réalisées sans aucun apport méthodologique préalable, en se basant simplement sur des principes d'essais et erreurs pour atteindre les objectifs fixés. Nous anticipons que ce type de démarche fera peu ou pas appel à la modélisation (étape 2 du cycle de Blum), et tentera d'altérer les situations modèles et réelles par des actions guidées par des intentions (à clarifier pendant les expérimentations), à défaut de démarche structurée. L'évaluation et l'analyse des résultats par les participants donnera lieu à un cycle de même nature. Cette variante de la démarche de résolution est représentée sur la figure 3.3.

Si l'on envisage maintenant **l'application des techniques lean** pour implémenter un cobot (dans un cas d'étude identique), une démarche en plusieurs étapes va être mise en place. La première va consister au découpage de process en opérations élémentaires par chrono-analyse (ou découpage vidéo). Pour s'affranchir des anormalités et fluctuations lors de l'exécution, plusieurs cycles sont relevés et la valeur moyenne des temps sans anormalité est conservée comme valeur de référence. La situation modèle est donc constituée d'une séquence de tâches élémentaires dont la durée est connue. La modélisation du problème (3) est supportée par l'outil 'table de combinaison', qui représente les tâches sur un chronographe, permettant de visualiser les possibilités de parallélisation des tâches et leur impact sur le temps de cycle résultant. Le passage dans l'environnement mathématique est limité, car il n'y a pas de technique lean permettant de tester de façon systématique les différents choix d'affectation possibles. Les machines sont usuellement dédiées à une tâche ou un type de tâche. Toutefois il est possible d'avoir une prédiction de résultat réel (f), ce qui permettra d'avoir une analyse critique du résultat obtenu

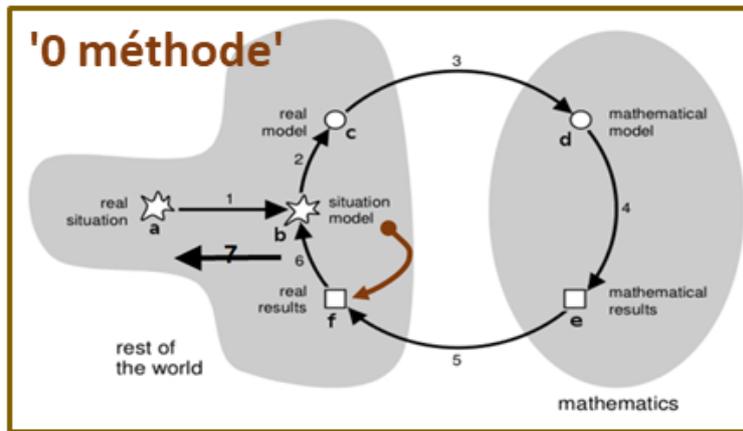


Figure 3.3 – Cycle de blum - version '0 méthode'

lors du retour à la situation réelle (7) en cas d'écart significatif avec la prédiction. Cette démarche est représentée sur la figure 3.4.

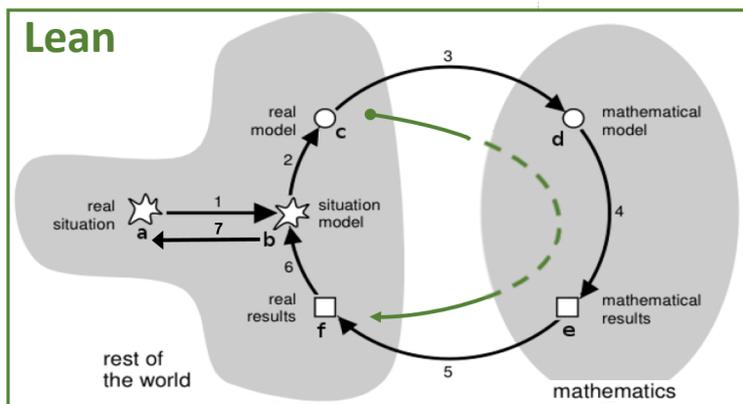


Figure 3.4 – Cycle de blum - version *lean*

Si les méthodes lean sont potentiellement limitées dans les recherches de solution dans le domaine mathématique, on peut **envisager l'utilisation d'outils algorithmiques pour réaliser l'étape de résolution mathématique** (4). Par contre cette démarche - que nous appellerons *lean modifiée*- impose plus de contraintes sur le modèle réel (c), car il doit être décrit de façon complètement explicite. Par exemple les contraintes de précedence doivent être intégralement représentées, alors que dans la démarche lean il suffit de vérifier ponctuellement qu'elles ne sont pas enfreintes lors de la proposition de nouvelles affectations, ce qui peut être traité de façon tacite. L'avantage est la confiance que l'on peut avoir dans la solution mathématique proposée (e) comme étant la meilleure possible, dans la limite des conditions prises en compte par le modèle établi. Cette qualité de modèle impactera aussi le retour au réel (5), et la validation de la solution (6), dont on vérifiera qu'elle n'enfreint pas les principes lean (comme la séparation homme-machine, ou Jidoka) avant de l'implémenter (7). Cette démarche pose la question de l'équilibre entre l'effort d'explicitation à réaliser pour mettre en œuvre des outils

### 3.1. LA RECHERCHE ORIENTÉE CONCEPTION

de résolution puissants et le bénéfice associé en terme de qualité de solution, qui prend en compte le niveau de performance prédit mais aussi son applicabilité (et donc la possible dégradation de la prédiction lors du retour au réel). Le modèle de cette démarche est représenté sur la figure 3.5, où les étapes impactées par les outils algorithmiques sont représentées en **bleu**, et celles impactées par les techniques lean en **vert**.

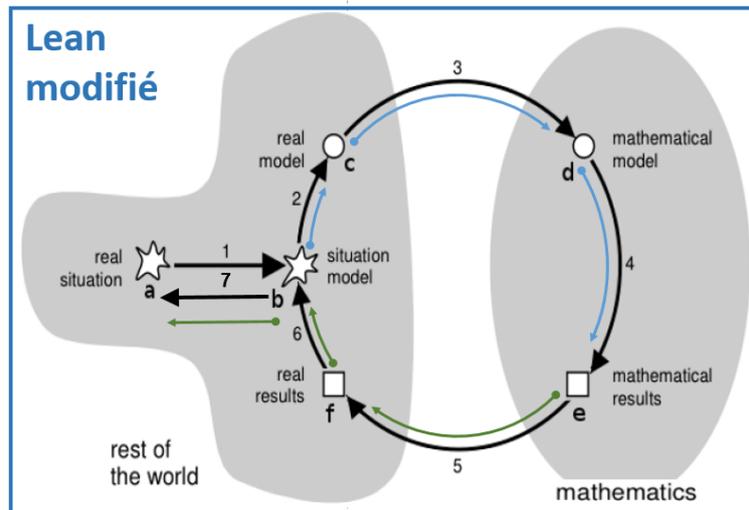


Figure 3.5 – Cycle de blum - version *lean modifié*

#### 3.1.3 Mise en œuvre de la phase de résolution dans la conception de méthode

Cette section décrit la mise en œuvre d'une étape de résolution (voir les figures 3.3, 3.4, 3.5) dans le cycle de conception de la méthodologie d'implémentation. Cette démarche a pour objectif de pouvoir analyser la phase de résolution pendant son déroulement, mais aussi a posteriori, pour évaluer le processus emprunté aussi bien que les résultats obtenus, dans le but de préparer des interventions qui permettront aux participants en charge de la résolution de modifier la méthode utilisée pour le prochain cycle. On divisera ce cycle en trois phases principales (voir figure 3.6).

- A) **Conception-réalisation** du process cobotisé, mesure de la performance obtenue et observations des actions des participants.
- B) **Diagnostic**. En mettant en regard les résultats obtenus et les observations, on cherchera à identifier les facteurs limitant la performance de la solution proposée.
- C) **Intervention**. Sur la base des causes identifiées dans la phase de diagnostic, une intervention est préparée et réalisée auprès des participants pour leur permettre d'actualiser leurs compétences et lancer une nouvelle phase de conception réalisation.

Pour répondre aux objectifs de la recherche, i.e. la capacité à créer des solutions performantes, mais aussi à les améliorer de façon incrémentale, la phase A (conception réalisation) est elle même constituée de plusieurs étapes :

0. **Process manuel**. Cette première étape consiste à réaliser l'assemblage du produit concerné manuellement, de façon répétable afin de créer une base de référence chronométrique (resp. ergo-

### 3.1. LA RECHERCHE ORIENTÉE CONCEPTION

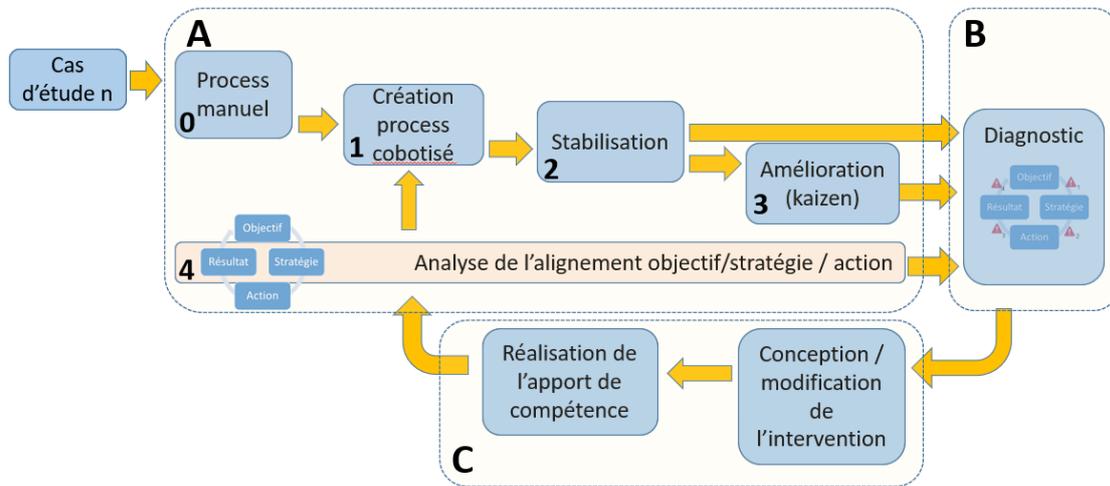


Figure 3.6 – Proposition de cycle de conception de création de process d'assemblage cobotisé

nomique) pour chaque tâche du process d'assemblage, et d'obtenir un temps de cycle (resp. une charge ergonomique) de référence pour quantifier les améliorations futures. Cette étape n'a pas besoin d'être répétée tant que le produit reste identique.

1. **Création du process.** Cette étape couvre l'ensemble des actions de planification, de programmation, de tests, d'agencement de l'espace de travail qui permettront d'avoir un process d'assemblage capable de réaliser les opérations nécessaires. Le contenu de cette étape dépendra de la méthode employée (*'0 méthode', lean* ou *lean modifiée*).
2. **Stabilisation.** Cette étape consiste à répéter le process dans le but d'obtenir des cycles répétables, qui pourront donc être utilisés pour mesurer la performance du process selon les critères visés. Cette phase doit permettre aux participants de se familiariser avec les opérations qu'ils ont créé, mais aussi d'apporter les ajustements nécessaires sur le cobot ou l'espace de travail pour fiabiliser le process. La première mesure de performance interviendra à la fin de cette étape.
3. **Amélioration.** Afin de répondre à la question de la possibilité d'amélioration incrémentale, il est demandé aux participants de proposer des améliorations visant à améliorer la performance qui vient d'être obtenue, sans qu'il y ait d'intervention qui permette de modifier l'approche utilisée.
4. **Relevé - analyse.** Cette étape se déroule en fait en parallèle des 3 précédentes. Par l'observation et l'enregistrement des stratégies et de leur mise en œuvre, des difficultés rencontrées, on préparera la phase de diagnostic.

La phase B (diagnostic) réunit les observateurs, les référents techniques et méthodologiques, ainsi que les participants (pour confirmer les observations). Elle a pour but d'évaluer l'alignement entre les objectifs recherchés par les participants, des stratégies sélectionnées pour les atteindre (en lien avec les interventions qu'ils ont reçues), de la mise en action de ces stratégies et des résultats obtenus. Cette étape vise à pointer les discontinuités entre ces éléments (stratégie non pertinente pour l'objectif, stratégie pertinente mais non mise en œuvre) pour les corriger lors de l'intervention à venir (voir figure 3.7).

La phase C (intervention). Cette phase est fortement liée à la précédente, car certains éléments d'intervention peuvent avoir lieu pendant la phase de diagnostic si les participants sont présents, afin

### 3.1. LA RECHERCHE ORIENTÉE CONCEPTION

---

de donner un retour à chaud sur lequel ils peuvent aussi rapidement réagir. Par principe, on distinguera quand même cette phase du diagnostic, même si elles peuvent intervenir dans la même séquence. Afin de déterminer le type d'intervention à apporter, il est nécessaire d'identifier à quel stade la discontinuité est intervenue. Plusieurs cas de figure peuvent se présenter (voir figure 3.7).

1. La continuité est effective entre les objectifs et les résultats atteints. Dans ce cas le processus est considéré comme un succès. Pas de nécessité d'une intervention additionnelle.
2. Rupture entre les objectifs et la stratégie adoptée. On recherchera dans les principes lean ou dans des altérations de ces principes des éléments susceptibles de corriger les choix stratégiques infructueux. Une nouvelle tentative pourra avoir lieu une fois ces principes transmis.
3. Rupture entre la stratégie et les actions mises en œuvre. La stratégie annoncée par les participants est cohérente par rapport à l'objectif, mais les actions prises ne permettent pas sa mise en œuvre. L'intervention pourra porter sur l'apprentissage des outils lean ou de compétences associées à la maîtrise technique des actions envisagées.
4. Rupture entre les actions et les résultats obtenus. En théorie une série d'actions pertinentes réalisées de façon conforme atteignent le résultat attendu. Aussi, si ce cas de figure se présente, il faudra d'abord vérifier qu'il ne s'agit pas en fait d'un des deux cas de figure précédents dans lesquels la rupture n'aurait pas été détectée.



Figure 3.7 – Différents points de rupture entre objectifs et résultats

#### 3.1.3.1 Séquencement des différentes méthodes dans le plan d'expérimentation

Les trois trames méthodologiques qui viennent d'être présentées vont être appliquées dans différents cas d'étude, afin d'évaluer les points suivants par comparaisons successives :

- L'intérêt des techniques lean par différence entre les résultats de cette méthode par rapport à la résolution de type '0 méthode'.
- Les bénéfices éventuels apportés par les solutions recherchées par un algorithme sur celles pro-

duites uniquement grâce aux techniques lean.

Afin que les comparaisons soient valides, il faut que les conditions d'obtention des résultats soient comparables. Tout d'abord elles doivent porter sur les mêmes cas d'étude (même complexité, même champ de solutions possibles), ce point sera détaillé dans la partie suivante. Ensuite il faudrait idéalement que les expérimentations portent sur des grands groupes, afin de moyenniser les capacités individuelles des participants. Cette configuration très consommatrice de ressources n'est pas applicable pour une première campagne d'essais fonctionnels, ainsi nous prendrons l'option que chaque groupe de participants applique successivement les trois méthodes sur le même cas d'étude. A chaque fois que cela sera réalisable, nous essaierons au moins de dupliquer les expérimentations sur plusieurs équipes pour que les conclusions puissent être croisées et avoir ainsi une capacité de généralisation, même potentiellement limitée. Pour que les croisements entre équipes soient pertinents, il faudra que les équipes soient elles-mêmes issues de populations homogènes en terme de compétences au départ.

Pour un groupe, le déroulement des expérimentations prendrait donc la forme d'une succession de mises à l'essai d'un cas d'étude, au début sans guidage particulier ('0 méthode'), puis avec la méthode dite lean, puis enfin la méthode dite lean modifiée. L'utilisation de chacune des méthodes repose sur des séries d'itérations sur deux niveaux : la recherche d'améliorations incrémentales (étape 'Amélioration' de la figure 3.6) représente le premier niveau, et le deuxième est généré par l'ajustement de la méthode suite aux interventions successives. Les cycles pouvant s'entretenir, il faudra donc déterminer des critères de bascule pour passer de l'utilisation d'une méthode à la suivante. Une première proposition est de basculer (d'une méthode à l'autre) lorsque la méthode exploitée ne fournit plus d'amélioration de résultat malgré les interventions successives, ou que les équipes n'arrivent pas à mettre en œuvre leur stratégie avec les outils fournis par cette méthode. Les bascules pourront prendre la forme d'interventions, dont l'objectif sera l'introduction de la nouvelle méthode. Le synoptique de cette démarche est représenté sur la figure 3.8.

#### 3.1.3.2 Choix des cas d'étude et organisation des expérimentations

Ce travail a pour objet d'étudier l'intérêt des robots collaboratifs sous plusieurs aspects : diminution simultanée du temps de cycle et du risque ergonomique, et utilisation pour des opérations à valeur ajoutée (via des effecteurs spécifiques). Un cas d'étude qui incorporerait l'ensemble de ces composantes serait probablement difficile d'accès pour les participants de part sa complexité, et aussi difficile à analyser du fait des possibles effets croisés entre ces mêmes composantes. Ainsi nous envisagerons un plan d'expérimentation proposant des niveaux de complexité croissants pour chacun des groupes pour atteindre les configurations visées. Ceci devrait permettre d'atteindre des conclusions intermédiaires pour chaque niveau, et de dissocier autant que possible les effets des différentes composantes. Les trois cas d'étude sélectionnés sont donc les suivants :

1. Réduction du temps de cycle.
2. Réduction du temps de cycle et utilisation d'effecteurs spécifiques pour les opérations à valeur ajoutée.
3. Réduction simultanée du temps de cycle et du risque ergonomique.

Avec trois méthodes distinctes sur trois cas d'étude, cela laisse en théorie 9 couples 'cas x méthode' à passer en revue (voir figure 3.9). Nous proposons en première instance d'exclure les couples 4 et 7 (voir figure 3.10), en faisant l'hypothèse que les difficultés respectivement technique pour le premier

### 3.1. LA RECHERCHE ORIENTÉE CONCEPTION

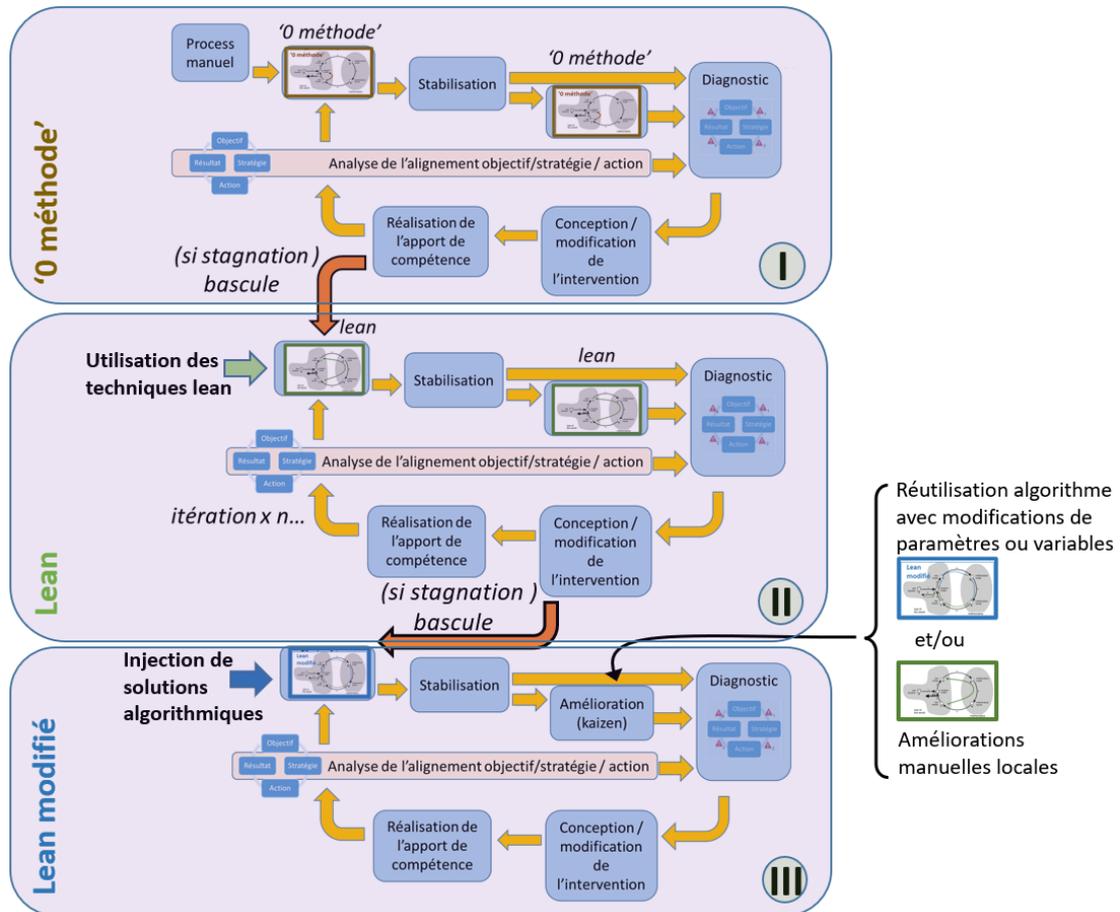


Figure 3.8 – Continuité entre objectifs et résultats atteints

couple, et méthodologique pour le deuxième, ne permettent pas d'obtenir des résultats probants avec une approche de type '0 méthode'. Cette hypothèse sera vérifiée à l'issue des essais sur le couple 1, si dans ce cas de figure il est déjà difficile d'améliorer les process obtenus par exemple.

La mise en oeuvre de l'utilisation successive des trois méthodes de résolution (cf. 3.1.3.1) pose une contrainte particulière, car chaque méthode représente en fait un ensemble de compétences acquises, et un retour en arrière méthodologique n'est donc pas réaliste. Par exemple une équipe qui aura déjà utilisé une méthode de type lean sur un cas de figure ne peut pas prétendre à reprendre ce cas (ou un autre) avec une approche de type '0 méthode'. Ainsi on dédiera une équipe sur chaque cas d'étude afin d'éviter cette situation. Pour respecter la progressivité recherchée pour la complexité liée aux cas, les trois équipes initieront la démarche sur le couple 1. Cette proposition de plan d'expérimentation est illustrée sur la figure 3.10.

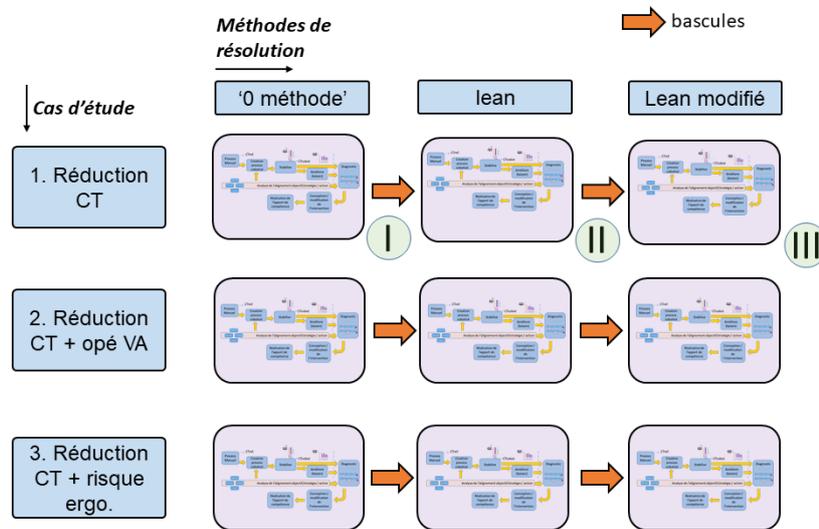


Figure 3.9 – Plan d’expérimentation général

## 3.2 Algorithme de résolution

Comme cela a été abordé au cours de l’état de l’art, pour les cas de résolution les plus complexes (objectifs économiques et ergonomiques), il est nécessaire de créer un outil qui permettra d’identifier des solutions, même approchées. Cet algorithme pourra être utilisé pour évaluer les solutions trouvées par les méthodes lean, et servir aussi d’aide à la décision pour les enrichir dans les essais *'lean modifié'*.

### 3.2.1 Modélisation du problème

Le problème étant de type multi-objectifs, nous utiliserons une fonction de coût  $H$  pour exprimer la qualité des solutions identifiées. Une solution  $S$  correspond à une suite ordonnée de tâches affectées à l’opérateur ou au cobot (mode synchronisé), ou aux deux (mode coopératif). L’ordre d’exécution des tâches et leur affectations doivent satisfaire les contraintes de précedence ainsi que la capacité de chaque ressource à les réaliser. Cette solution  $S$  fournit des temps de cycles pour l’opérateur et pour le cobot, respectivement  $CT_o(S)$  et  $CT_c(S)$ , qui correspondent à l’instant où le cobot (respectivement l’opérateur) achève sa dernière opération. Dans une première approche, nous définirons le coût économique  $C_{eco}(S)$  de la solution trouvée comme étant la durée totale de l’assemblage concerné, donc l’instant où la dernière ressource mobilisée achève sa dernière tâche. De façon analogue, le coût ergonomique  $C_{ergo}(S)$  sera défini comme la fraction du temps de relaxation total  $R_{tot}$  résiduelle en fin de cycle. On considèrera que l’opérateur ne prend pas de récupération entre deux tâches (même si un temps d’attente existe), d’une part pour des questions de complexité (on prendra soin de vérifier dans les premières expérimentations que ces temps ne deviennent pas significatifs), et d’autre part car d’un point de vue pratique les opérateurs ont plutôt tendance naturellement à allonger le temps d’exécution dans cette situation pour se resynchroniser avec le cobot. Trois configurations peuvent

### 3.2. ALGORITHME DE RÉOLUTION

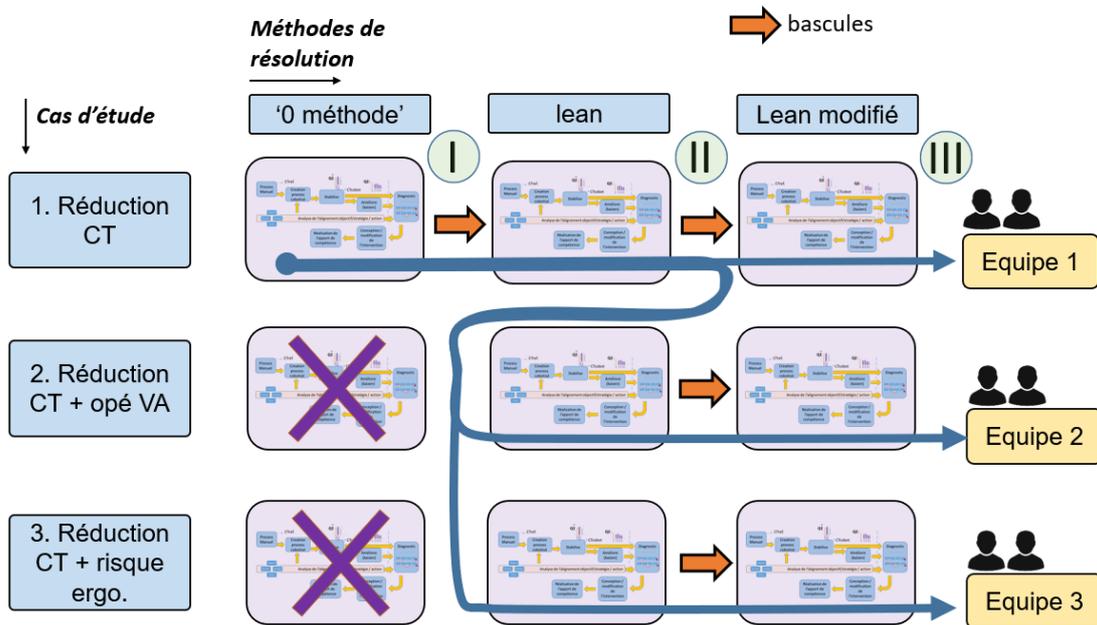


Figure 3.10 – Synoptique complet de parcours d'un cas d'étude

alors se présenter, voir figure 3.11 :

1. L'opérateur termine après le cobot ( $CT_o > CT_c$ ), il ne peut donc pas prendre de repos avant la fin du cycle. Dans ce cas  $C_{ergo} = R_{tot}$ .
2. L'opérateur termine avant le cobot, ( $CT_o < CT_c$ ), avec suffisamment d'avance pour prendre l'intégralité du repos nécessaire. Dans ce cas  $C_{ergo} = 0$ .
3. L'opérateur termine avant le cobot, ( $CT_o < CT_c$ ), mais son avance est inférieure au repos nécessaire. Dans ce cas  $C_{ergo} = R_{tot} - (CT_c - CT_o)$ .

On peut donc exprimer de façon synthétique les coûts associés à une solution avec l'équation 3.1 :

$$\begin{cases} C_{eco}(S) = \max \{CT_o(S), CT_c(S)\} \\ C_{ergo}(S) = \max \{0, R_{tot}(S) - (C_{eco}(S) - CT_o(S))\} \end{cases} \quad (3.1)$$

la fonction de coût associée peut maintenant être exprimée de la façon suivante 3.2 :

$$H_\alpha(S) = (1 - \alpha).C_{eco}(S) + \alpha.C_{ergo}(S) \quad (3.2)$$

où  $\alpha \in [0, 1[$  représente le niveau de compromis recherché entre la performance économique et ergonomique. La valeur 1 est exclue pour  $\alpha$  pour éviter des ensembles de solutions triviales pour lesquelles un coût de 0 serait atteint en se plaçant dans le cas n°2 de la figure 3.11, sans avoir à considérer de contrepartie sur  $C_{eco}$ . La valeur 0 pour  $\alpha$  représente un problème purement économique.

Afin de rechercher les solutions approchées pour minimiser cette fonction de coût  $H$ , nous avons développé un algorithme en s'appuyant sur certains travaux traités en revue de littérature, et en y ajoutant les nécessaires altérations pour résoudre le problème considéré.

## 3.2. ALGORITHME DE RÉOLUTION

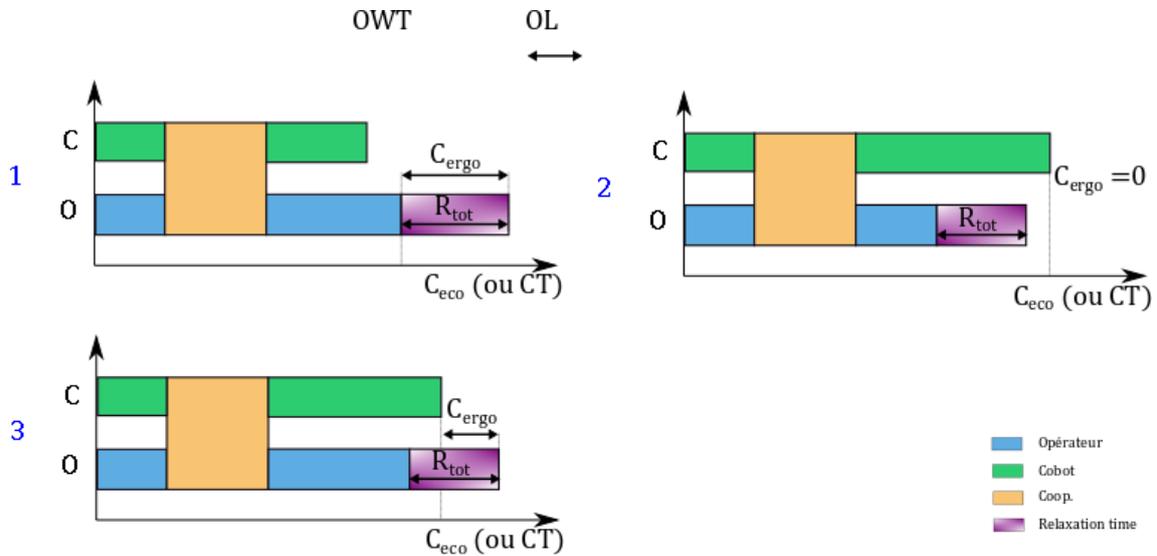


Figure 3.11 – Configurations possibles du process collaboratif et représentations des coûts économiques et ergonomiques associés

### 3.2.2 Principe de fonctionnement

L'algorithme s'articule sur deux étapes qui seront détaillées dans les sections suivantes. La première se repose sur une méthode heuristique (de type COMSOAL [104]) pour générer une liste ordonnée de tâches. La deuxième consiste à optimiser la solution obtenue par des permutations de proche en proche de l'ordre des tâches. L'ensemble constitue une méthode méta-heuristique.

#### 3.2.2.1 Génération de liste et affectation des tâches

**Les données d'entrée** nécessaires à l'algorithme pour établir des solutions viables et en calculer le coût associé sont les **contraintes de précédences**, **durées ( $TT$ )** et **temps de relaxation ( $RT$ )** pour chaque tâche pour chaque affectation disponible (opérateur, cobot, coopératif). Les contraintes de précédences spécifient quelle tâche ou ensemble de tâches - les prédécesseurs - doivent être exécutées pour qu'une ou plusieurs autres - les successeurs - puissent être réalisées. Ces relations de précédence peuvent être représentées sous forme de graphe, voir en exemple la figure 3.12 et la table associée 3.1.

Plus les liens de précédences sont nombreux pour une quantité donnée de tâches  $N$ , moins il y a de degrés de liberté possible pour créer des solutions, [105], et potentiellement elles deviennent plus dure à identifier par les algorithmes [106]. On utilisera comme indicateur 'l'order strength'  $OS$ , qui est défini par le ratio du nombre de relations de précédences présentes  $Q$  par le nombre maximal de relations possibles  $P$ . Il est exprimé par la formule suivante 3.3 :

$$\begin{cases} P &= \frac{N \times (N-1)}{2} \\ OS &= \frac{Q}{P} \end{cases} \quad (3.3)$$

Afin de pouvoir être exploité par un code informatique, le graphe de précédence est retranscrit en une matrice  $M$  carrée de taille égale au nombre de tâches. Si une tâche  $i$  est prédécesseur de  $j$ ,

### 3.2. ALGORITHME DE RÉOLUTION

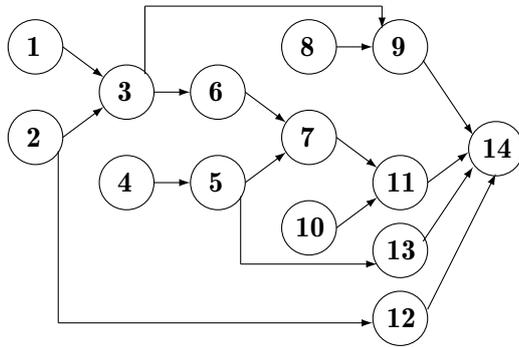


Figure 3.12 – Exemple de graphe de précedence.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0

Figure 3.13 – Matrice associée au graphe de précedence de la figure 3.12

alors  $m_{ij} = 1$ , dans le cas contraire  $m_{ij} = 0$ . La table de temps ne nécessite pas de remise en forme particulière, simplement les valeurs  $\infty$  qui spécifient qu'une tâche n'est pas réalisable dans un mode donné (par exemple dans le tableau 3.12 la tâche 3) seront arbitrairement évaluées à 10000 s, afin d'éliminer les solutions qui les auraient sélectionnées lors du calcul de la valeur de la fonction objectif.

**Une liste de départ**  $Y$ , respectant les précédences est générée, puis les ressources sont affectées selon l'algorithme 1, au moyen d'un tirage probabiliste. Un nombre aléatoire  $R$  est tiré entre 0 et 1, et selon sa valeur par rapport aux deux bornes  $L1$  et  $L2$ , la tâche sera affectée comme suit :

- Si  $R < L1$  la tâche est affectée à l'opérateur.
- Si  $L1 \leq R < L2$  la tâche est affectée au cobot.
- Si  $R \geq L2$  la tâche est assignée au mode coopératif (les deux ressources sont mobilisées simultanément).

Après avoir affecté l'ensemble des tâches de  $Y$  aux différentes ressources, on obtient une nouvelle liste  $X$  dont on pourra calculer le coût  $H$  à l'aide de la fonction objectif 3.2. Le choix des paramètres  $L1$  et  $L2$  influence possiblement la qualité de la solution obtenue, aussi plusieurs couples de valeurs

### 3.2. ALGORITHME DE RÉOLUTION

Table 3.1 – Table des temps de tâche (TT) et de relaxaion (RT) pour chacun des modes d’exécution (le symbole  $\infty$  représente une tâche non réalisable dans le mode proposé)

Task N°	Task Name	Manual mode	Cobot mode	Cooperation mode
		TT/RT	TT	TT/RT
0	Pick and place main body	1.2 / 1	6.8	$\infty$ / $\infty$
1	Pick and place lower plate	2.31 / 2.2	13.6	$\infty$ / $\infty$
2	Tigthen M10 bolts lower plate	14.3 / 9.7	$\infty$	12.3 / 1.5
3	Pick piston rod	1.5 / 0.2	8.9	1 / 0.3
4	Pick upper plate	2.1 / 1.6	12.4	1.8 / 0.4
5	Insert piston rod	2 / 1.2	11.8	1.8 / 0.4
6	Tigthen M10 bolts upper plate to body	14.3 / 9.7	$\infty$	12.3 / 1.5
7	Pick and set lower bracket	10.2 / 3.4	60.2	10 / 2
8	Tighten lower bracket	11 / 7.3	64.9	11 / 3
9	Pick and set upper bracket	10.2 / 12.8	60.2	10 / 2
10	Tighten upper bracket	11.0 / 17	64.9	11 / 3
11	Pick and hand tighten connector 1	3.5 / 2.4	$\infty$	3.5 / 0.6
12	Pick and tighten connector 2	3.5 / 2.4	$\infty$	3.5 / 0.6
13	Eject part	1.3 / 1.9	7.7	$\infty$ / $\infty$

$L1$  et  $L2$  seront testés lors des validations initiales de l’algorithme.

### 3.2. ALGORITHME DE RÉOLUTION

---



---

**Algorithm 1:** Heuristic  $L$  to assign task to resources

---

**Data:** List of task, precedence matrix, task time and recovery time according to the resource

```

1 while All tasks are not assigned do
2   for Each task in a list do
3     if All the precedence tasks have previously be done then
4       Let  $R$  randomly and uniformly generated between 0 and 1
5       if  $R < L1$  then
6         | Assign this task to the operator
7       else if  $L1 \leq R < L2$  then
8         | Assign this task to the robot
9       else
10        | Assign this task to the cooperative mode
11     else
12        | Put this task at the end of the list

```

---

#### 3.2.2.2 Amélioration de la représentativité des valeurs de $C_{eco}$ et $C_{ergo}$ dans le calcul de la fonction objectif

Si les configurations présentées dans la figure 3.11 sont valides dans le cas de l'assemblage d'une seule unité, elles sont moins représentatives qu'un enchaînement d'assemblages. En effet, dans le cas où une ressource achève ses opérations avant l'autre, il est naturel qu'elle commence l'assemblage de l'unité suivante si l'ordre des opérations le lui permet, et ce jusqu'au premier point de resynchronisation avec l'autre ressource. Ceci aura pour conséquence de potentiellement améliorer le temps de cycle résultant,  $CT$ , améliorant ainsi  $C_{eco}$ , possiblement au détriment de son temps de relaxation  $RT$ , dégradant donc  $C_{ergo}$ . Un autre phénomène à prendre en compte est la possibilité que l'opérateur prenne son temps de relaxation au début du cycle suivant, à condition qu'il ne soit pas mobilisé dès le début du process d'assemblage.

Dans cette partie, nous listerons les différents cas de figure possibles, ainsi que la reformulation des valeurs des variables  $C_{eco}$  et  $C_{ergo}$  qui rentrent dans le calcul de la fonction objectif  $H$ . Le temps disponible en fin de cycle de l'opérateur (respectivement du cobot) sera appelé 'Operator waiting time' ( $OWT$ ) (respectivement 'Cobot waiting time' ( $CWT$ )) cf. équation 3.4. Le décalage au démarrage du cycle du cobot (respectivement de l'opérateur) sera appelé 'Cobot lag' ( $CL$ ), (respectivement 'Operator lag' ( $OL$ ), voir figure 2 pour le principe général. On notera que  $OWT$  et  $CWT$  ne peuvent pas être simultanément non nuls, de même pour  $OL$  et  $CL$ . On distingue donc trois configurations principales :

- A)  $OWT > 0$
- B)  $OWT \& CWT = 0$
- C)  $CWT > 0$

$$\begin{cases} OWT = CT - CT_o \\ CWT = CT - CT_c \end{cases} \quad (3.4)$$

Plusieurs cas de figure se distinguent ensuite en fonction des valeurs de  $CL$  et  $OL$ , et de leur durée

### 3.2. ALGORITHME DE RÉOLUTION

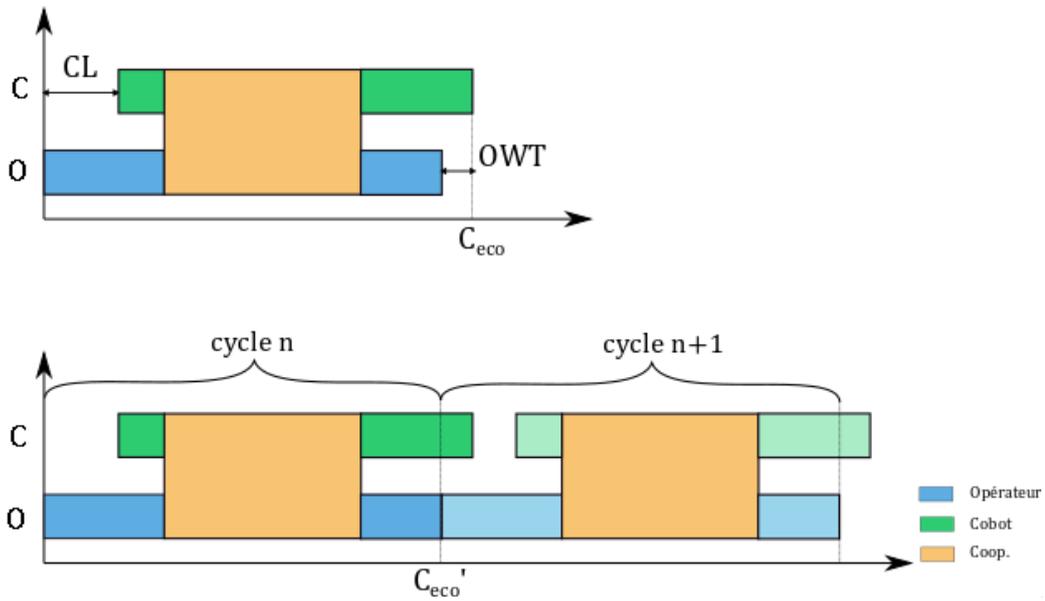


Figure 3.14 – Principe de recouvrement entre les cycles

par rapport à  $CWT$  et  $OWT$ , avec certaines symétries dans l'altération de  $C_{eco}$  et  $C_{ergo}$ , qui seront notés respectivement  $C'_{eco}$  et  $C'_{ergo}$ . La synthèse des cas de figure et de leur impact est représentée sur la figure 3.15. L'objet de cette représentation est de parcourir l'ensemble des cas possibles, et on constate qu'il existe certaines redondances entre les cas de figure dans les formulations de  $C'_{eco}$  et  $C'_{ergo}$  : B1 et B2 peuvent se formuler de façon identique, ce dernier étant une extension du cas B1 pour  $OL = 0$ .

Ce principe de recouvrement entre les cycles et l'altération qu'il génère sur les solutions est représenté dans le pseudo code 2, qui sera appelé par l'algorithme d'optimisation des solutions qui sera décrit dans la section suivante.

### 3.2. ALGORITHME DE RÉSOLUTION

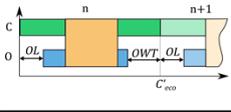
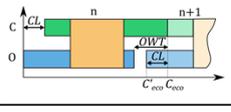
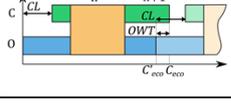
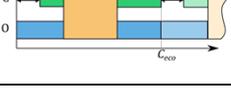
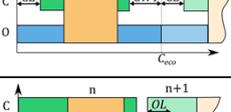
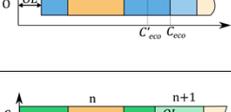
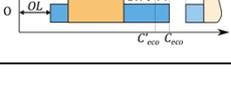
WT	CL	OL	Waiting time vs Lag	Schéma	$C'_{eco}$	$C'_{ergo}$
$OWT > 0$ ( $CWT = 0$ )	$0 = TL$	$0 \geq TO$	$OWT > CL$		$C'_{eco} = C_{eco}$	$C'_{ergo} = \max\{0, R_{tot} - (OWT + OL)\}$
	$0 > TL$	$0 = TO$	$OWT \geq CL$		$C'_{eco} = C_{eco} - CL$	$C'_{ergo} = \max\{0, R_{tot} - (OWT - CL)\}$
		$0 = TO$	$OWT < CL$		$C'_{eco} = C_{eco} - (CL - OWT) = CT_o$	$C'_{ergo} = R_{tot}$
$OWT = 0$ & $CWT = 0$	$0 = TL$	$0 \geq TO$	$CWT \leq OL$		$C'_{eco} = C_{eco}$	$C'_{ergo} = \max\{0, R_{tot} - OL\}$
	$0 > TL$	$0 = TO$	$OWT \leq CL$		$C'_{eco} = C_{eco}$	$C'_{ergo} = C_{ergo} = R_{tot}$
$CWT > 0$ ( $OWT = 0$ )	$0 > TL$	$0 = TO$	$CWT > OL$		$C'_{eco} = C_{eco}$	$C'_{ergo} = C_{ergo} = R_{tot}$
		$0 \geq TO$	$CWT > OL$		$C'_{eco} = C_{eco} - OL$	$C'_{ergo} = R_{tot}$
	$0 > TL$	$0 > TO$	$CWT \leq OL$		$C'_{eco} = C_{eco} - (OL - CWT) = CT_c$	$C'_{ergo} = \max\{0, R_{tot} - (OL - CWT)\}$

Figure 3.15 – Cas de figure possibles avec impact du recouvrement sur  $C_{eco}$  et  $C_{ergo}$

### 3.2. ALGORITHME DE RÉSOLUTION

---

**Algorithm 2:** Algorithme d'altération des indicateurs de performance  $C_{eco}$  et  $C_{ergo}$  sous l'effet du recouvrement

---

**Data:**  $C_{eco}, C_{ergo}, CL, OL, R_{tot}, OWT, CWT, H, \alpha$

- 1 Record solution  $H := \alpha \times C_{eco} + (1 - \alpha) \times C_{ergo}$
- // **config. A**
- 2 **if**  $OWT > 0$  **then**
  - // **cas A1**
  - 3 **if**  $CL = 0$  **then**
    - 4  $C'_{eco} := C_{eco}$
    - 5  $C'_{ergo} := \max \{0, R_{tot} - (OWT + OL)\}$
  - // **cas A2**
  - 6 **else if**  $CL > 0$  **and**  $OWT \geq CL$  **then**
    - 7  $C'_{eco} := C_{eco} - CL$
    - 8  $C'_{ergo} := \max \{0, R_{tot} - (OWT - CL)\}$
  - // **cas A3**
  - 9 **else**
    - 10  $C'_{eco} := C_{eco} - OWT$
    - 11  $C'_{ergo} := R_{tot}$
- // **config. B**
- 12 **else if**  $OWT$  **and**  $CWT = 0$  **then**
  - 13  $C'_{eco} := C_{eco}$
  - 14  $C'_{ergo} := \max \{0, R_{tot} - OL\}$
- // **config. C**
- 15 **else**
  - 16  $CWT > 0$  // **cas C1**
  - 17 **if**  $CL > 0$  **then**
    - 18  $C'_{eco} := C_{eco}$
    - 19  $C'_{ergo} := C_{ergo}$
  - // **cas C2**
  - 20 **else if**  $CL = 0$  **and**  $CWT > OL$  **then**
    - 21  $C'_{eco} := C_{eco} - OL$
    - 22  $C'_{ergo} := C_{ergo}$
  - // **cas C3**
  - 23 **else**
    - 24  $C'_{eco} := C_{eco} - CWT$
    - 25  $C'_{ergo} := \max \{0, R_{tot} - (OL - CWT)\} R_{tot}$
- 26 Record new value for solution  $H' := \alpha \times C'_{eco} + (1 - \alpha) \times C'_{ergo}$

---

#### 3.2.2.3 Optimisation du score de la solution par meta-heuristique

L'utilisation de l'heuristique va fournir une solution approchée, mais de meilleures listes peuvent être générées par un couplage avec un autre algorithme de type meta-heuristique qui explorera des solutions proches de la liste d'origine de façon itérative, et conservera à chaque itération la nouvelle solution si elle est meilleure que la précédente, jusqu'à obtenir une solution optimale, comme proposé par Gourgand [107]. La recherche de solutions se fait en trois étapes :

1. Permutation de deux tâches voisines dans la liste  $Y$  pour créer une nouvelle liste  $Y'$
2. Assignment de ressources via l'algorithme 1, pour créer une nouvelle solution  $X'$ .
3. Calcul du coût  $H'$  de la solution  $X'$ .

Les nouvelles listes  $Y'$  sont obtenues par permutations de tâches voisines dans la liste, et pour éviter d'enfermer les solutions dans des optimum locaux. La meta-heuristique utilisée est un recuit simulé, qui laisse une probabilité de conserver une nouvelle solution de qualité inférieure pour explorer des espaces de solutions supplémentaires. Cette probabilité, liée à un paramètre de 'température'  $T$  décroissant au fur et à mesure des itérations, tend elle aussi vers 0 alors que la température s'approche de 0. Le processus est décrit dans l'algorithme 3.

---

**Algorithm 3:** Algorithme de principe du couplage en l'algorithme de liste et le recuit simulé

---

**Data:** Temperature  $T_0$ , decreasing factor  $\beta$ , Maximum number of iterations  $IterMax$ , Initial solution  $Y \in \Omega'$

```

1   $iter := 0, T := T_0$ 
2   $X := L(Y)$  : apply the list algorithm to the list  $Y$ 
3  Record solution  $RY := Y, RX := X$ 
4  while  $iter < IterMax$  do
5      Choose randomly and uniformly  $Y' \in V(Y)$ 
6       $X' := L(Y')$ 
7      if  $H(X') < H(RX)$  then
8           $RY := Y'$ 
9           $RX := X'$ 
10     else if  $H(X') \leq H(X)$  then
11          $Y := Y'$ 
12          $X := X'$ 
13     else
14          $Y := Y'$  and  $X := X'$  with the probability  $e^{-\frac{H(X')-H(X)}{T}}$ 
15      $iter := iter + 1$ 
16     Generate a new temperature  $T := \beta \times T$ 

```

---

### 3.3 Synthèse sur la proposition

Ce chapitre a permis de développer une trame d'expérimentation basée sur les méthodologies issues de la recherche orientée conception, dans le but de développer une stratégie d'implémentation

### 3.3. SYNTHÈSE SUR LA PROPOSITION

---

de robots collaboratifs, elle-même basée sur des techniques issues du lean, et ce dans différents cas de figures : opérations à valeur ajoutée, objectif de minimisation du risque ergonomique... La nature collaborative et interventionniste de cette méthodologie présente des similitudes importantes avec les activités kaizen de groupe, ce qui la rend a priori valide pour envisager son application en milieu industriel. Le chapitre suivant portera sur la mise à l'épreuve de cette proposition, par l'identification des participants, et de leurs rôles respectifs, ainsi que la sélection d'un cas d'application (un produit à assembler), et des premiers cycles d'expérimentation dits 'prototypes', qui serviront à calibrer le cas d'application et la méthodologie avant des essais fonctionnels à plus grande échelle dont les résultats devront permettre de définir des principes de conception. Afin d'évaluer la qualité de ces résultats de façon externe, un algorithme a été développé pour identifier des solutions théoriques au problème posé dans ses différents cas de figure. Cet outil sera non seulement utilisé dans ce cadre de validation, mais aussi comme partie intégrante de la méthodologie d'implémentation de robot, en tant que support à la recherche de solutions dans la méthode dite 'lean modifiée'. Avant cette phase d'exploitation de l'algorithme, le prochain chapitre validera d'abord sa capacité à converger (notamment en raison de sa nature probabiliste), en réalisant des validations initiales sur des instances théoriques structurellement proches du cas d'étude sélectionné.

### 3.3. SYNTHÈSE SUR LA PROPOSITION

---

## Chapitre 4

# Construction de l'environnement d'expérimentation

### Contenu

---

<b>4.1</b>	<b>Dispositif expérimental initial . . . . .</b>	<b>72</b>
4.1.1	Choix du produit support du cas d'étude . . . . .	72
4.1.2	Caractérisation du process d'assemblage . . . . .	72
4.1.3	Constitution de l'équipe . . . . .	75
<b>4.2</b>	<b>Phase d'essais prototypes et validation de l'algorithme . . . . .</b>	<b>76</b>
4.2.1	Phase prototype et cadrage du protocole . . . . .	76
4.2.2	Validation de l'algorithme de résolution . . . . .	90
<b>4.3</b>	<b>Synthèse partielle . . . . .</b>	<b>97</b>

---

Ce chapitre décrit la préparation de la phase d'expérimentation proprement dite (phase dite fonctionnelle). L'objectif de cette phase initiale est d'assurer que les phénomènes recherchés pourront être observés pendant la phase fonctionnelle. Il est donc nécessaire de sélectionner un produit support et de le décrire dans le référentiel de la proposition scientifique. S'agissant d'un travail collaboratif, les rôles des intervenants seront posés, en fonction de leur compétences respectives. Ensuite, le scénario d'expérimentation sera mis à l'épreuve, afin d'évaluer si ses différentes composantes sont accessibles aux participants (niveau de difficulté technique, pertinence des concepts théoriques transmis), et arrivent à s'articuler entre eux. Cette phase de test pourra aussi révéler des phénomènes non anticipés par le modèle initial, dont il faudra arbitrer l'inclusion ou non dans le référentiel de la phase expérimentale selon leur intérêt pour la problématique étudiée. Une deuxième partie sera consacrée à la validation de l'algorithme créé, c'est à dire sa capacité à converger vers des solutions approchées de qualité suffisante pour être exploitées dans les dernières phases d'expérimentations. Pour cela il sera préalablement testé sur des instances fictives avant de l'être sur le produit support des différents cas d'étude.

### 4.1 Dispositif expérimental initial

#### 4.1.1 Choix du produit support du cas d'étude

Le produit à assembler doit comporter différents types d'opérations, plus ou moins faciles à cobotiser, sans pour autant que la difficulté technique soit rédhibitoire ou même devienne un aspect prépondérant de l'expérimentation, au détriment des aspects méthodologiques qui sont aussi visés (équilibre de l'écosystème d'expérimentation). En se basant sur les critères évoqués par Malik [59], on privilégiera donc des assemblages de composants comportant des faces planes et parallèles, certains incorporant des parties flexibles, ainsi que des liaisons par vissage pour générer des temps significatifs d'opérations à valeur ajoutée cobotisables. Le temps de cycle manuel ne devra pas excéder une ou deux minutes d'assemblage pour que le process puisse être rapidement assimilé par les participants. Le choix s'est donc porté sur un vérin pneumatique, représenté sur la figure 4.1, comportant 8 sous-composants principaux, et 6 vis pour lier certains d'entre eux. Une nomenclature est disponible en annexe C. Les contours extérieurs de la majorité des pièces sont a priori simples à saisir avec un effecteur pince deux doigts, et les faces supérieures et inférieures comportent un épaulement de centrage sur le corps de vérin qui tolère un écart de positionnement à la dépose avant les opérations de liaison par vissage. La tige piston comporte un joint déformable et nécessite une trajectoire combinant translation et rotation (dextérité plus élevée en cas de montage manuel, précision et programmation complexe en cas de cobotisation). L'opération de vissage des pattes de fixation nécessite un maintien en position pendant le vissage (utilisation des deux mains), et représente donc aussi une problématique supplémentaire pour la cobotisation. Enfin les raccords pneumatiques se fixent dans un plan orthogonal aux autres composants, ce qui peut amener à repositionner le sous ensemble.



Figure 4.1 – Vérin pneumatique, support d'expérimentations

#### 4.1.2 Caractérisation du process d'assemblage

##### 4.1.2.1 Assemblage manuel

La première étape de caractérisation consiste en l'assemblage intégralement manuel du process, dont l'enregistrement vidéo est disponible sur ce lien <sup>1</sup>. L'analyse vidéo permet d'établir un découpage initial constitué de 33 opérations élémentaires, pour un temps de cycle total de 88.4s. La table de combinaison associée est représentée sur la figure 4.2. Une fois cette étape réalisée, il reste à caractériser la charge ergonomique du process dans le modèle PMES proposé par Battini [54] (voir section

---

1. <http://bit.ly/2w8Iwf0>

#### 4.1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL INITIAL

2.1.3). Chaque opération élémentaire est associée à un mouvement, pour lequel on calcule la dépense énergétique associée en fonction de sa nature (élévation de la charge, déplacement latéral, etc..), de la charge impliquée (outil ou sous-composant), et de sa durée. Ceci permet de déterminer si un temps de relaxation (relaxation time - RT) est nécessaire, et le cas échéant calculer sa durée. L'énergie dépensée comporte une composante posturale, que nous normaliserons pour ce cas à un sujet masculin de 80kg se tenant debout sur l'intégralité du process. Afin de faire apparaître des temps de relaxation plus importants qui exacerbent l'intérêt d'utiliser différents modes de collaboration, les masses de certains composants et outils ont été sur-évaluées dans le calcul (tout en veillant à respecter les charges utiles du robot collaboratif utilisé). Le temps de relaxation total obtenu est de 73s (voir annexe A).

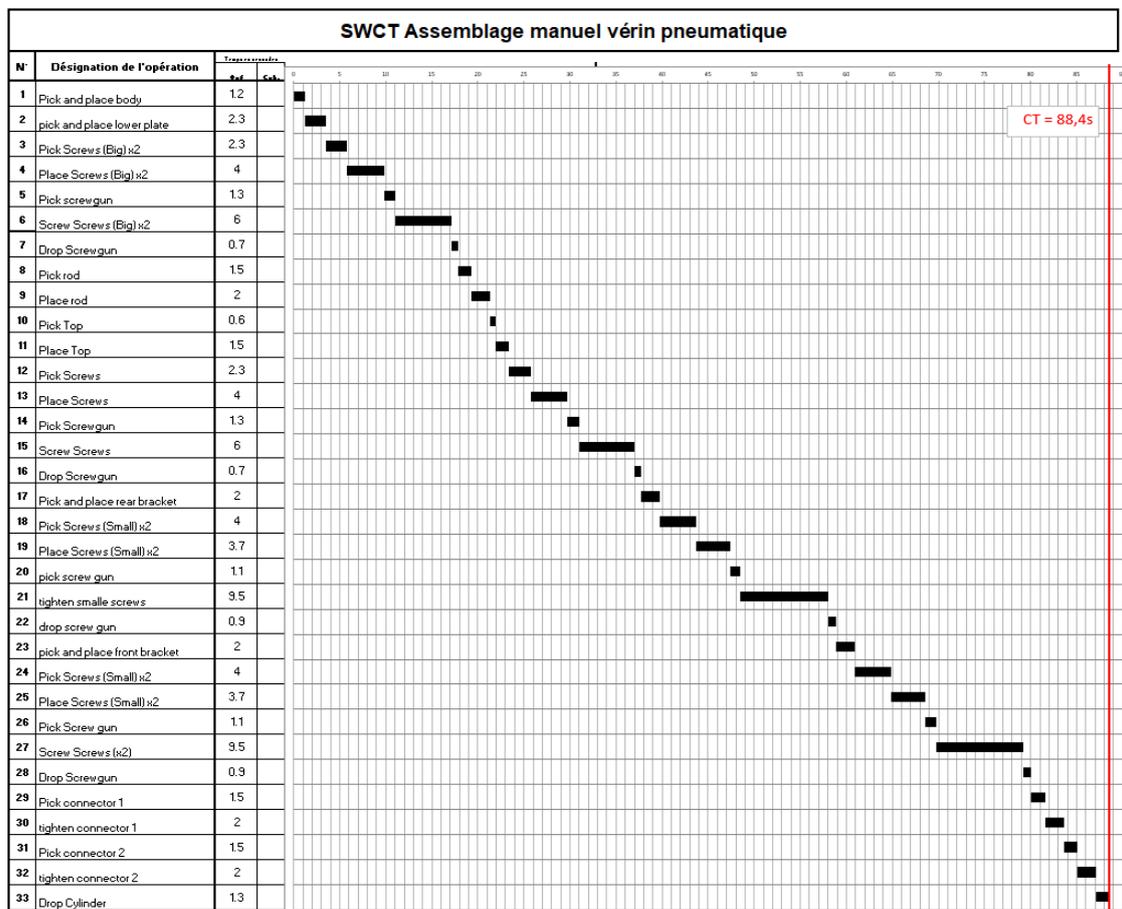


Figure 4.2 – SWCT du process d'assemblage manuel du vérin pneumatique

#### 4.1.2.2 Assemblage coopératif

Afin de caractériser les durées des tâches et les temps de relaxation associés pour le mode coopératif, nous avons recréé une séquence d'assemblage aussi proche que possible de la séquence manuelle d'origine, mais pour laquelle le mode coopératif sera utilisé dès que cela est possible et pertinent. A titre d'exemple, le déplacement d'un composant n'a pas de sens en mode coopératif, l'opérateur n'ayant aucun intérêt à accompagner la trajectoire du cobot, qui peut réaliser l'opération avec la même célé-

## 4.1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL INITIAL

---

rité pour un coût ergonomique nul. L'enregistrement vidéo du process crée est disponible sur ce lien <sup>2</sup>. En cas de coopération, la charge la plus importante est systématiquement affectée au cobot afin de minimiser le coût ergonomique. Les temps de relaxation associés à chaque opération sont évalués par la même méthode que précédemment, en excluant donc les charges manipulées par le cobot. Le temps de cycle obtenu est de 78.2s, pour un temps de relaxation total de 15.33s (voir annexe B).

Afin de finir de décrire le process dans les différents modes, il est encore nécessaire de réaliser l'ensemble des opérations avec le cobot. Cette activité représentant une charge de travail particulièrement élevée (cette option peut difficilement constituer une méthode réaliste de construction de process), nous nous appuyons sur la phase d'essais prototypes de création de process collaboratif, dont nous déduirons a posteriori un rapport de proportionnalité générique entre une tâche réalisée par l'opérateur et le cobot. Cette hypothèse de travail, acceptable pour des calculs théoriques, sera revisitée lors des phases de retour au réel.

### 4.1.2.3 Simplification de la description du process, détermination des relations de précedence

Pour cette dernière étape de caractérisation du process d'assemblage, il est nécessaire en théorie de considérer l'intégralité des couples d'opérations. Cependant, certaines opérations sont liées (par exemple le vissage et le transfert de la visseuse), donc sont en relation de précedence directe et n'ont pas d'intérêt à être affectées à des ressources différentes (ou exécutées dans des modes différents). On regroupera donc ces opérations en tâches, ce qui permettra de diminuer le nombre d'éléments à considérer pour générer les graphes de précedence sans contraindre notablement les possibilités d'affectations (voir table 4.1). On isolera au final 14 tâches, auxquelles on pourra associer le graphe de précedence représenté en figure 4.3. La finesse de découpage des tâches ou opérations étant un facteur significatif pour générer de l'amélioration continue, cette proposition pourra être remise en cause pour les phases d'amélioration de process lors des essais fonctionnels.

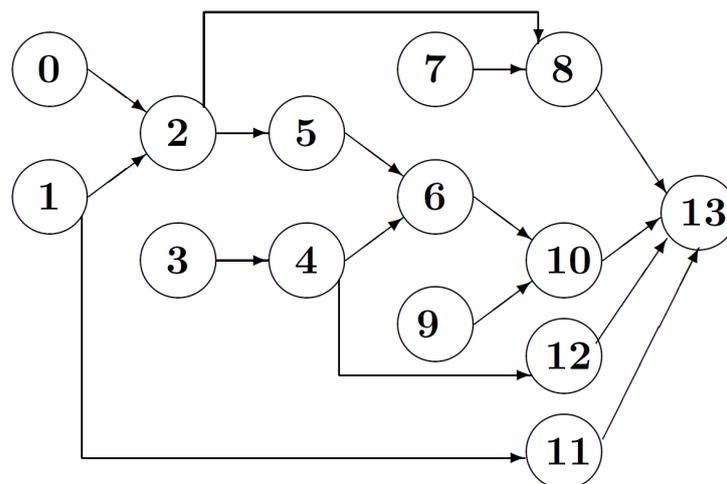


Figure 4.3 – graphe de précedence

---

2. <http://bit.ly/2w8Iwf0>

#### 4.1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL INITIAL

Table 4.1 – Résultat du regroupement des opérations en tâches. (TT = Task Time, RT = Relaxation Time). La valeur  $\infty$  est appliquée sur les tâches où la coopération n'est pas pertinente.

Task N°	Task Name	Manual mode (TT / RT)	Cooperation mode (TT / RT)
0	Pick and place main body	1.2 / 1	$\infty$ / $\infty$
1	Pick and place lower plate	2.31 / 2.2	$\infty$ / $\infty$
2	Tighten M10 bolts lower plate	14.3 / 9.7	12.3 / 1.5
3	Pick piston rod	1.5 / 0.2	1 / 0.3
4	Pick upper plate	2.1 / 1.6	1.8 / 0.4
5	Insert piston rod	2 / 1.2	1.8 / 0.4
6	Tighten M10 bolts upper plate to body	14.3 / 9.7	12.3 / 1.5
7	Pick and set lower bracket	10.2 / 3.4	10 / 2
8	Tighten lower bracket	11 / 7.3	11 / 3
9	Pick and set upper bracket	10.2 / 12.8	10 / 2
10	Tighten upper bracket	11.0 / 17	11 / 3
11	Pick and hand tighten connector 1	3.5 / 2.4	3.5 / 0.6
12	Pick and tighten connector 2	3.5 / 2.4	3.5 / 0.6
13	Eject part	1.3 / 1.9	$\infty$ / $\infty$

#### 4.1.3 Constitution de l'équipe

Les activités de recherche orientée conception réunissant par nature plusieurs pratiques, il convient à ce stade d'appointer une équipe et de définir les rôles des différents membres. La distribution des rôles peut être amenée à évoluer au fil des expérimentations, et certains membres peuvent donc aussi assumer plusieurs missions au sein des expérimentations. On peut réaliser un découpage des rôles de la façon suivante :

- Expert des pratiques lean (adéquation en notions lean et problématiques rencontrées).
- Expert programmation algorithme (le codage ne fait pas partie des compétences à développer dans le cadre de l'expérimentation).
- Expert utilisation robot collaboratif (animation des formations et support sur le développement des solutions).
- Coordination et animation des expérimentations (définition des protocoles, relevés en continu, diagnostics et échanges avec les participants).
- Participants (création des process, évaluation des solutions).

Les experts des pratiques lean seront représentés par MM. Nicolas Casier, Manager du département 'Operation Management Development' pour Toyota Motors Manufacturing France, en responsabilité du déploiement du TPS (Toyota Production System) au sein du site, et Anthony Quenehen. Les interventions successives seront réalisées par ce dernier, Nicolas Casier participant à des revues a posteriori sur les travaux réalisés, avec des ré-orientations éventuelles pour un meilleur alignement avec les problématiques industrielles associées. Le codage de l'algorithme a été réalisé par  $M^{me}$  Nathalie Klément, sur la base de ses travaux de recherche précédents, et des altérations pour faciliter l'exploitation des résultats seront apportées par MM. Stéphane Thiery (Maître de conférence en Mathématiques appliquées) et Vincent Deschodt, développeur informatique au sein du LISPEN. Concernant la formation à

l'utilisation des robots collaboratifs, l'analyse de risque préalable, M. Adrien Florit, Ingénieur développement de solutions robotique au sein du LISPEN accompagnera les participants via des interventions collectives et actions de support ad hoc avec les différents groupes. La coordination des expérimentations sera effectuée par Anthony Quenehen, avec l'aide de M. Jérôme Pocachard (Enseignant agrégé en Sciences Industrielles de l'Ingénieur) pour la supervision et l'analyse des phases prototypes.

Le choix des participants revêt une importance particulière, car leurs compétences d'origine doivent être suffisamment homogènes pour ne pas devenir un facteur déterminant des résultats obtenus. Pour des phases prototypes et fonctionnelles d'expérimentation (l'objet de ce travail), ces compétences n'ont pas à être représentatives du public final (des opérateurs et techniciens du milieu industriel). Nous avons donc sélectionné des étudiants de 2<sup>e</sup> année du cycle ingénieur de l'ENSAM (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers). Ce choix est supporté par le fait que leurs compétences sont connues, et qu'au moment des expérimentations ils n'avaient pas de connaissance préalable du lean. On peut aussi supposer que ce public possède un a priori positif au regard de la technologie et des problématiques industrielles. L'engagement des différentes équipes sera vérifié en début de cycle d'expérimentations fonctionnelles. L'ensemble des participants étaient évidemment volontaires pour participer à ces différentes participations, dont les principes généraux leur ont été partagés, sans dévoiler les objectifs précis et les points de vérifications attendus pour ne pas biaiser les résultats.

## 4.2 Phase d'essais prototypes et validation de l'algorithme

### 4.2.1 Phase prototype et cadrage du protocole

L'objectif de la phase d'essais prototypes est de vérifier plusieurs aspects du protocole expérimental et y faire les ajustements nécessaires pour éviter des blocages éventuels lors de la phase d'essais fonctionnels. Il s'agit donc de valider que l'écosystème construit permet de tester la proposition scientifique, i.e. que les résultats (succès ou échec) ne sont pas la conséquence de facteurs externes à l'étude (compétences spécifiques dans la programmation de cobot, complexité de développement d'effecteur de préhension spécifique...). A l'inverse il s'agit aussi d'identifier des potentiels phénomènes impactant qui n'auraient pas été envisagés lors de la première définition du protocole. Pour cela à la fois le produit, le cas d'étude et le protocole seront simplifiés :

- Le vérin sera ramené à sa partie centrale (soit 4 sous-composants et 4 vis de fixation pour les faces supérieures et inférieures), ce qui pourra accélérer les phases de découpage de process (voir figure 4.4), et faciliter la proposition de solutions d'ordonnancement et d'affectation des tâches, quitte à ce que les solutions puissent apparaître évidentes, ce qui n'est pas problématique à ce stade.
- Les mises en situations seront limitées aux essais '*0 méthode*' et '*lean*' sur l'objectif '*réduction du CT*', ce qui constitue l'enchaînement le plus simple à mettre en œuvre (voir figure 4.5). L'objectif reste à ce niveau de tester l'applicabilité et la pertinence des techniques lean et de leur outils associés (tables de combinaison pour représenter les solutions obtenues). Concernant le fonctionnement et l'intérêt potentiel des méthodes de résolution algorithmique, une validation séparée du fonctionnement et de la performance sera effectuée dans la section 4.2.2.
- La mise en œuvre cycle de conception d'un process cobotisé est la partie qui fait intervenir le plus grand nombre d'éléments de nature différente : programmation cobot, assemblage manuel, amélioration continue, réalisation d'interventions... Afin de pouvoir tester séparément ces différentes

## 4.2. PHASE D'ESSAIS PROTOTYPES ET VALIDATION DE L'ALGORITHME

composantes et d'en isoler les effets respectifs, le cycle de conception sera altéré, et certaines étapes seront mises en parallèle sur plusieurs équipes de participants afin de mieux utiliser le temps disponible ainsi que les ressources d'encadrement.

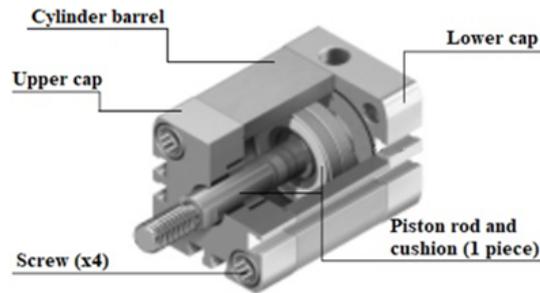


Figure 4.4 – Vérin simplifié utilisé pour la phase prototype

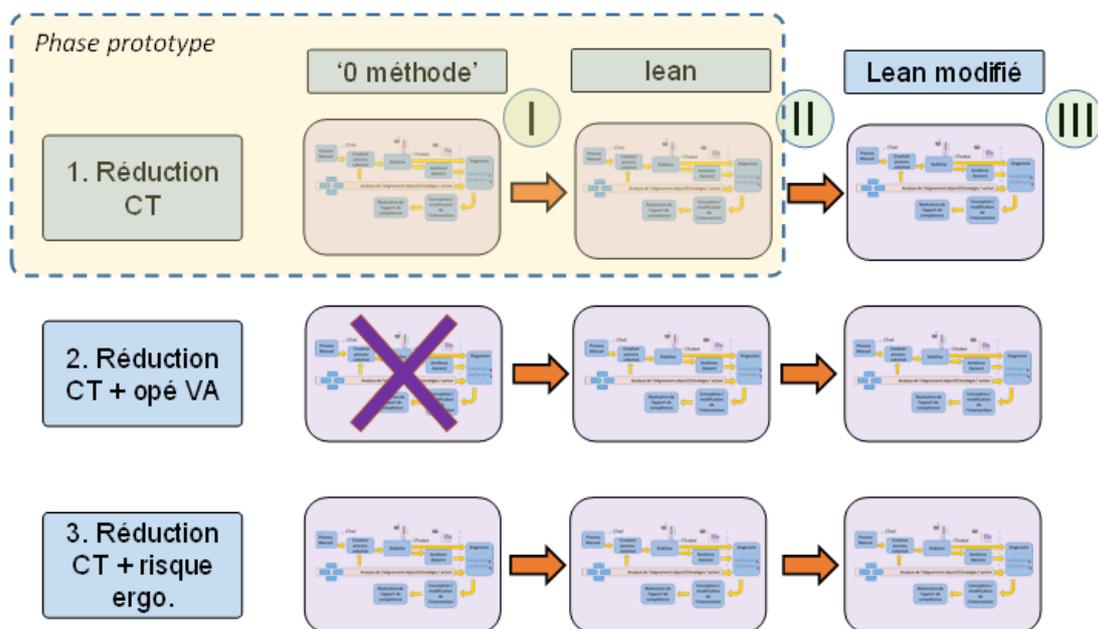


Figure 4.5 – cas d'étude sélectionné pour la phase prototype

Ainsi nous procéderons avec 2 équipes de participants en parallèle qui auront chacun une station de travail et un cobot à disposition. L'une des deux équipes (équipe A) sera laissée libre pour la création d'un premier process cobotisé avec pour seule consigne l'amélioration du temps de cycle (création type '*0 méthode*'). L'autre équipe (B), une fois le process manuel maîtrisé, sera par contre directement guidée vers la mise en œuvre d'actions d'améliorations continue, au moyen d'une formation dédiée. L'objectif est de tester isolément la possibilité de réaliser des altérations sur cet environnement d'assemblage. Une fois seulement ce cycle d'amélioration effectué, la cobotisation du process sera proposée à ce groupe. Le synoptique de ce protocole simplifié est représentée sur la figure 4.6.

4.2. PHASE D'ESSAIS PROTOTYPES ET VALIDATION DE L'ALGORITHME

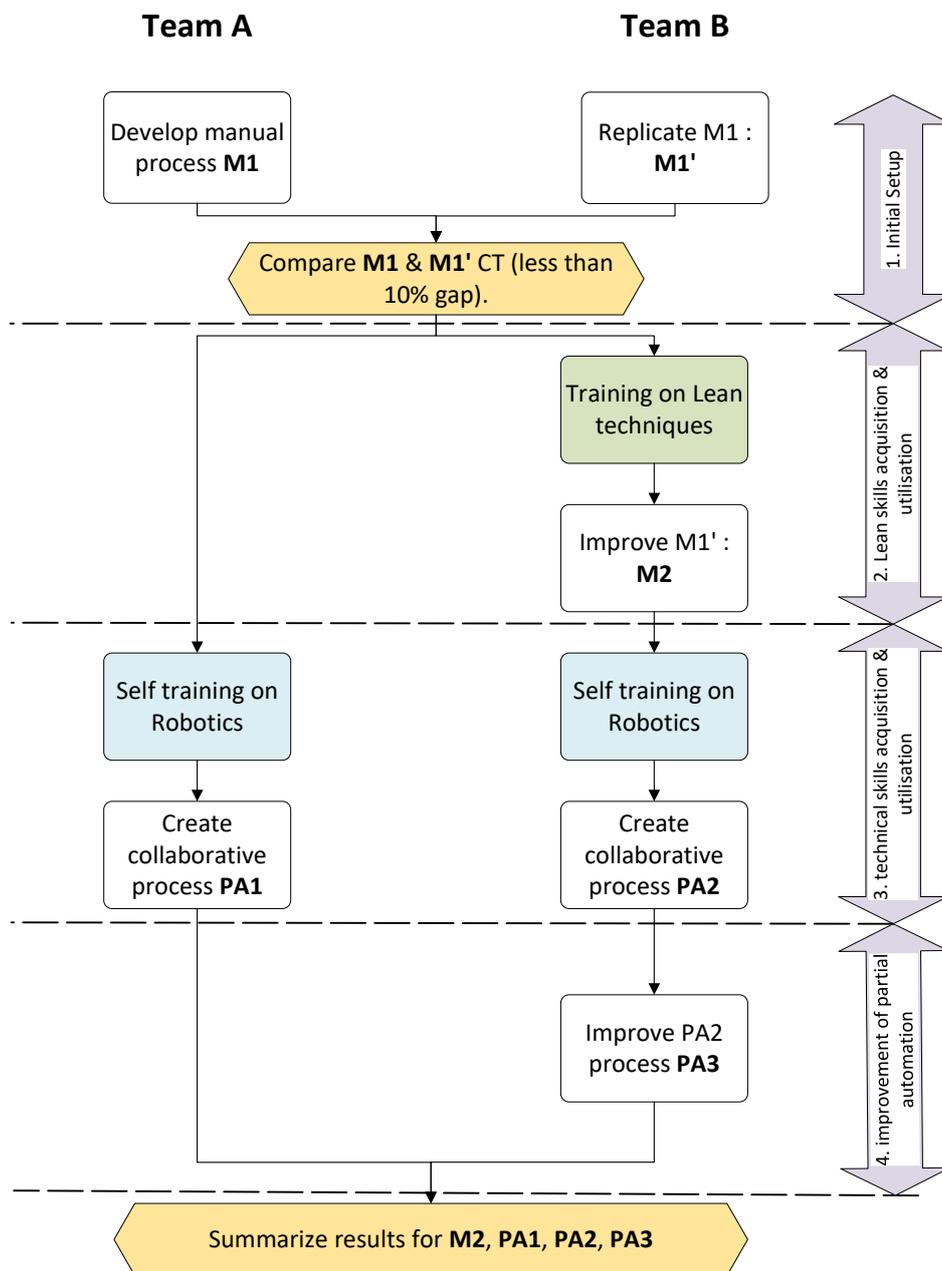


Figure 4.6 – Protocole de conception de la phase prototype

### 4.2.1.1 Description détaillée du protocole simplifié

#### 1. Initialisation du process - création d'un process manuel

- **Objectif** : Créer un process manuel ( $M1$ ) similaire pour les 2 équipes, comme base commune à l'introduction du cobot. Cette étape est aussi l'occasion pour les participants de se familiariser avec les opérations d'assemblage (jusqu'à stabiliser le temps de cycle pour la prise de mesure de temps).
- **Méthode** : L'équipe  $A$  développe le process manuel  $M1$ , en décidant de l'ordre des opérations et l'implantation du poste de travail. Ce process est ensuite répliqué par l'équipe  $B$  (process  $M1'$ ), en se basant sur des enregistrements vidéo de l'équipe  $A$ .
- **Validation** : Par comparaison des temps de cycle (CT) respectifs des process  $M1$  et  $M1'$ . Les process sont réputés similaires s'ils répondent aux critères de séquence et implantation identiques, et présentent moins de 10% d'écart sur le CT une fois stabilisés. Cette valeur a été fixée empiriquement pour tolérer de légères différences d'allure entre les équipes.

#### 2. Acquisition et mise en œuvre des techniques lean

- **Objectif** : Développer les compétences sur les techniques lean en vue de leur application dans le développement d'un process cobotisé lors de l'étape suivante.
- **Méthode** : L'équipe  $B$  a reçu une formation de 2 heures. Une sélection a été opérée dans l'ensemble des techniques et outils disponibles. Seules celles relatives à l'organisation d'une station de travail ont été retenues, avec une priorité sur les réductions de temps opératoires (réduction & élimination des mouvements inutiles, relocalisation des composants). Concernant l'utilisation des cobots, les principes de base de la séparation homme-machine ont été abordés (jidoka). A ce stade la ligne directrice proposée est que l'opérateur ne soit pas observateur du robot en fonctionnement au cours du process. Ceci génère un muda d'attente, et dévalue l'intérêt d'améliorer les temps de tâches manuelles. Les opérations cobotisées doivent donc pouvoir se réaliser sans l'intervention de l'opérateur[108]. Si 2 tâches sont menées en parallèle par l'opérateur et le cobot, avec pour successeur commun une tâche manuelle, on préférera les configurations où le cobot termine en premier pour éviter un temps d'attente opérateur entre ses deux tâches<sup>3</sup>.
- **Validation** : A la fin de la formation, l'équipe  $B$  a eu l'opportunité d'appliquer ces techniques sur le process manuel  $M1'$  qu'ils avaient créé (création du process  $M2$ ). Ceci constitue une validation partielle de l'acquisition des compétences lean, car les points relatifs au jidoka ne seront visibles qu'à l'étape de réalisation des process cobotisés. Toutefois, elle permet de vérifier la capacité des équipes à identifier des opportunités d'amélioration et à les implémenter. Une mesure de performance pourra être faite grâce à différence de CT entre les deux process.

#### 3. Acquisition et mise en œuvre des compétences techniques en robotique - création des process cobotisés

- **Objectif** : Développer les compétences nécessaires à l'utilisation du cobot sur le cas d'étude. Observer si les techniques lean acquises par l'équipe  $B$  à l'étape précédente permettent une amélioration sensible sur le CT obtenu lors de la création du process cobotisé.
- **Méthode** : Les deux équipes ont reçu l'opportunité de se former sur le module d'auto-

---

3. Ce dernier point a été discuté avec Nicolas Casier, car il est possible qu'une solution comportant un temps d'attente opérateur obtienne un meilleur CT au final, et elle ferait sens industriellement. Il a été convenu de ne pas introduire cette dernière notion par souci de clarté pour une première formation, et de suivre au cas par cas les configurations générées lors des essais.

formation en ligne Universal Robot Academy<sup>®</sup> pendant 4 heures. A l'issue de la session, les étudiants doivent être capables de programmer à la fois les trajectoires désirées du bras robotisé, ainsi que les activations de l'effecteur pince. Chaque équipe a toute latitude pour décider de l'utilisation du cobot pour altérer le process manuel, avec l'objectif exprimé de réduire le temps de cycle. Si les temps de développement sont laissés libres pour ne pas peser sur les choix des participants, on vérifiera à la fin qu'ils sont comparables entre les deux équipes. La sécurité est aussi abordée par une analyse préalable du poste avec l'expert robotique - Adrien Florit. Les implantations sont revues pour mettre en évidence les zones de coincement possibles du poste de travail (et en interdire l'accès), et les équipes sont sensibilisées sur les pratiques de base concernant les trajectoires (60mm de distance minimale entre le point de passage du composant en mouvement et tout autre élément de l'espace de travail). Les composants ayant été choisis pour ne pas présenter d'arête coupante ou surface contondante, nous avons choisi d'appliquer les recommandations de la norme ISO TS 15066 [45] pour les paramètres de vitesse et d'accélération des cobots, comme indiqué sur la table 4.2.

	Vitesse	Accélération
Linéaire	250mm/s	1200mm/s <sup>2</sup>
Angulaire	60°/s	80°/s <sup>2</sup>

Table 4.2 – Réglages des robots collaboratifs pour les phases expérimentales

- **Validation :** Les process ainsi obtenus, respectivement *PA1* et *PA2* pour les équipes *A* et *B*, sont comparés sur les temps de cycle obtenus, qui sont ensuite analysés qualitativement par des tables de combinaisons (SWCT) pour mettre en évidence les causes des écarts, et les relier éventuellement à la mise en œuvre des techniques lean. Les outils d'analyse comme les SWCT sont en général mis en œuvre par les participants eux-mêmes dans le cadre des chantiers d'amélioration. Afin de contenir le temps de cette phase prototype, les chrono-analyses et la préparation des SWCT ont été réalisées par Anthony Quenehen. En effet, la capacité de mise en œuvre de ces outils par des élèves-ingénieurs de 2<sup>ème</sup> année n'est pas considérée comme un point à risque, ces outils étant utilisés par des superviseurs et techniciens en milieu industriel. Pour les phases d'essais fonctionnels, cette activité sera sous la responsabilité des participants, sous la supervision des formateurs pour garantir la cohérence des données. Afin que les participants puissent tout de même avoir un retour sur leur réalisation, notamment en vue des améliorations ultérieures (kaizen, en étape 3), les SWCT leur ont été présentés et un échange libre a eu lieu autour des résultats. Comme pour les étapes précédentes, les temps de développement des solutions seront mesurés pour s'assurer de leur homogénéité entre les deux équipes.

#### 4. Amélioration des process cobotisés

- **Objectif :** Evaluer la possibilité de réaliser des améliorations (kaizen) sur un process déjà cobotisé (pertinence de l'intervention de l'étape 2). Identifier aussi si un type d'amélioration est privilégié dans ce nouvel environnement.
- **Méthode :** Après un échange libre sur les résultats du process *PA2*, et sans aucun guidage additionnel, l'équipe *B* peut tenter d'améliorer le CT en créant un process *PA3*. L'équipe pourra librement modifier l'utilisation faite du cobot, que ce soit sur les tâches affectées ou

les trajectoires utilisées. Elle pourra aussi faire le choix d'agir uniquement sur les opérations manuelles si cela lui semble pertinent.

- **Validation :** Comme pour l'étape 2, les temps de cycle obtenus sur ce nouveau process (*PA3*) seront comparés au CT précédent (*PA2*), et le déroulement des opérations sera visualisé sur une table de combinaison pour une dernière discussion avec l'équipe sur les résultats obtenus.

### 4.2.1.2 Analyse des résultats expérimentaux de la phase prototype

Cette partie détaille les réalisations des équipes pour chacune des étapes du protocole de la phase prototype, en tentant de mettre en évidence les points de validation et de nouveaux éléments à intégrer éventuellement pour permettre un déroulement satisfaisant des expérimentations de la phase suivante. Les process créés lors de ces expérimentations peuvent être visionnés sur les liens suivants : process M1, M1', M2, PA1, PA2<sup>4</sup>, process PA3<sup>5</sup>.

Afin d'avoir une grille de lecture des résultats obtenus, nous proposerons d'utiliser un modèle simplifié d'un process collaboratif homme robot. Nous le comparerons à un équilibrage de charge entre deux ressources, dont le temps de cycle résultant correspond à celui de la ressource la plus chargée des deux (voir figure 4.7). En prenant l'hypothèse que le cobot est  $k$  fois plus lent que l'opérateur pour exécuter une même tâche, tout en relâchant les contraintes de précedence et de faisabilité des tâches par le cobot, on peut exprimer un temps de cycle idéal ( $CT_{ideal}$ ), pour lequel les deux ressources ont une charge égale. Nous définirons un ratio dit de transfert  $R$ , la proportion de tâches manuelles affectées au cobot :  $R = 0$  correspondant à un process uniquement manuel, et  $R = 1$  représentant un process complètement automatisé. En appelant  $CT_1$  le temps de cycle manuel, on peut exprimer les temps de cycle selon l'équation 4.1.

$$CT_{operator} = CT_1 \times (1 - R) \quad (4.1)$$

$$CT_{cobot} = k \times CT_1 \times R \quad (4.2)$$

Le meilleur équilibrage ( $CT_{ideal}$ ) est obtenu pour  $CT_{operator} = CT_{cobot}$ , et donc pour la valeur de  $R$  qui vérifie l'équation 4.3.

$$CT_1 \times (1 - R) = k \times CT_1 \times R \quad (4.3)$$

$$R = \frac{1}{1 + k} \quad (4.4)$$

Le temps de cycle  $CT_{ideal}$  associé peut donc s'exprimer selon l'équation 4.5,

$$CT_{ideal} = \frac{CT_1}{1 + \frac{1}{k}} \quad (4.5)$$

Les techniques pour améliorer le temps de cycle sont de deux natures (voir figure 4.8) :

---

4. <https://tinyurl.com/4tmwm7fn>

5. <https://youtu.be/BwyKXFvG7IA>

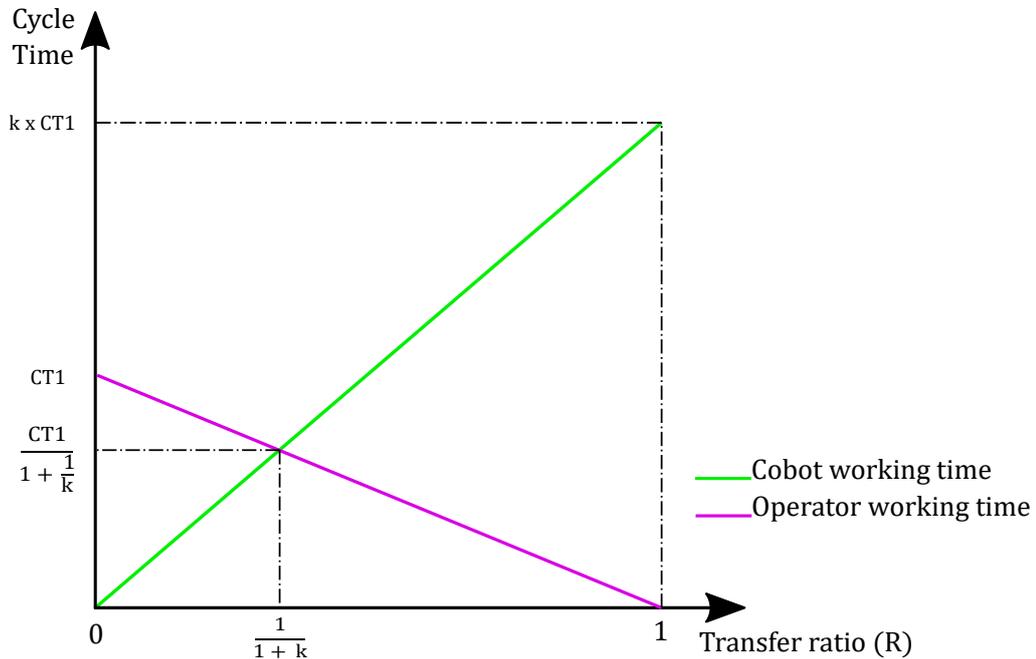


Figure 4.7 – Relation entre le temps de cycle et le ratio de transfert, modèle simplifié, tiré de [10]

1. Transfert des opérations manuelles vers le cobot
2. Implémentation de kaizen sur les tâches manuelles pour en réduire la durée

Si l'on considère le temps d'attente potentiel de chaque ressource, on retrouve de manière évidente la manifestation du principe jidoka : il n'y a pas d'intérêt à transférer des opérations vers le cobot au delà de la valeur de  $R$  correspondant à  $CT_{ideal}$ , ni même à réduire les opérations manuelles, car le seul effet en serait l'augmentation du temps d'attente de l'opérateur, cf figure 4.8.

#### 1. Initialisation du process - création d'un process manuel

Les process créés sont représentés sur la table de combinaison de la figure 4.9. Le temps de cycle obtenu est de  $46.5s$  pour  $M1$ , et sa réplcation par l'équipe  $B$  a atteint le temps de cycle de  $47.2s$ . L'objectif de proximité a été rempli, et pour la suite de cette phase d'expérimentation la valeur de  $46.5s$  sera retenu pour décrire ce process pour les deux équipes. Les allures des opérateurs des deux équipes ont aussi été confirmées sur quelques opérations prises aléatoirement pour s'assurer de la consistance des résultats. Les temps de vissage (tâches 6, 8, 17, 19) ont été normalisés à  $5.5s$ , car au fil des essais les temps de vissage ont tendance à augmenter, la décharge des visseuses électriques impactant leur vitesse de rotation.

## 4.2. PHASE D'ESSAIS PROTOTYPES ET VALIDATION DE L'ALGORITHME

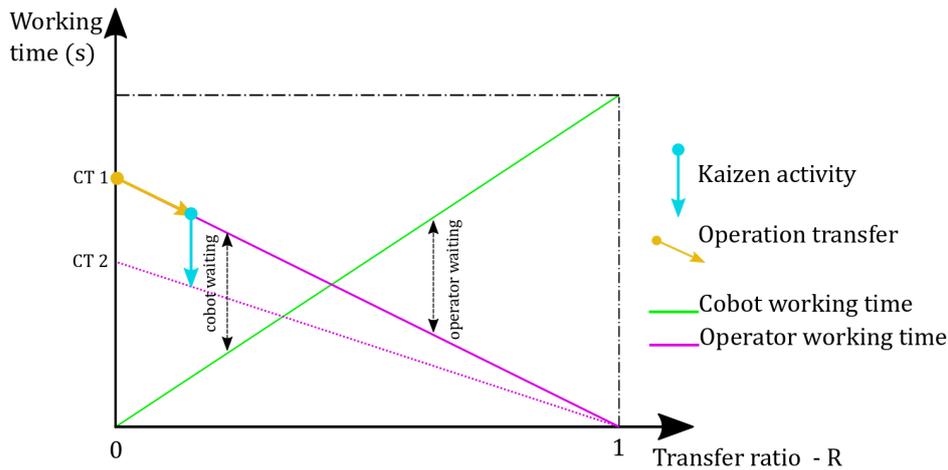


Figure 4.8 – Impact des transferts et kaizen sur le temps de cycle [10]

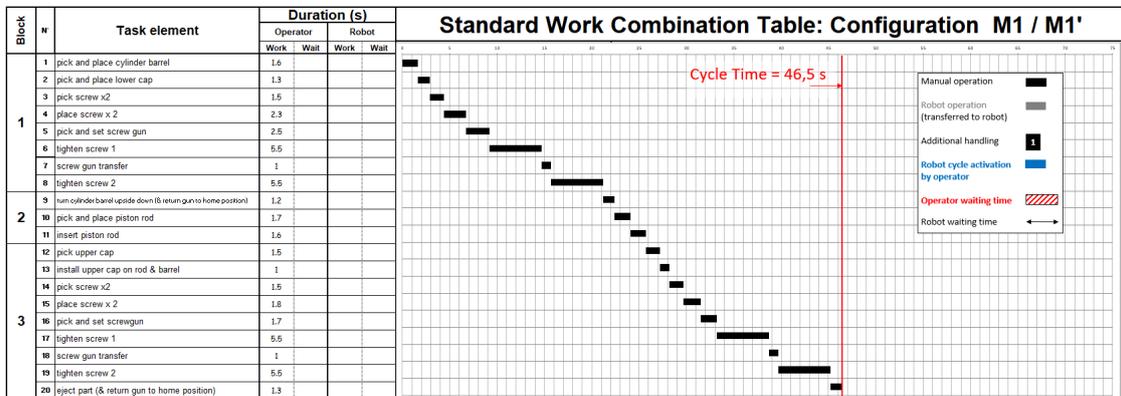


Figure 4.9 – SWCT pour les process M1 et M1'

### 2. Acquisition et mise en œuvre des techniques lean

A l'issue de l'intervention sur les techniques de réduction de temps de cycle, l'équipe B a pu s'exercer pour améliorer le temps de cycle du process M1, mais sans faire intervenir le cobot. Une réduction de 2s a pu être obtenue à travers la relocalisation de certains composants (réduction des mouvements de bras), et de l'utilisation simultanée des deux mains pour réaliser les tâches liées au passage de la tige à travers la face supérieure (tâches 10 à 14), comme représenté sur la figure 4.10.

## 4.2. PHASE D'ESSAIS PROTOTYPES ET VALIDATION DE L'ALGORITHME

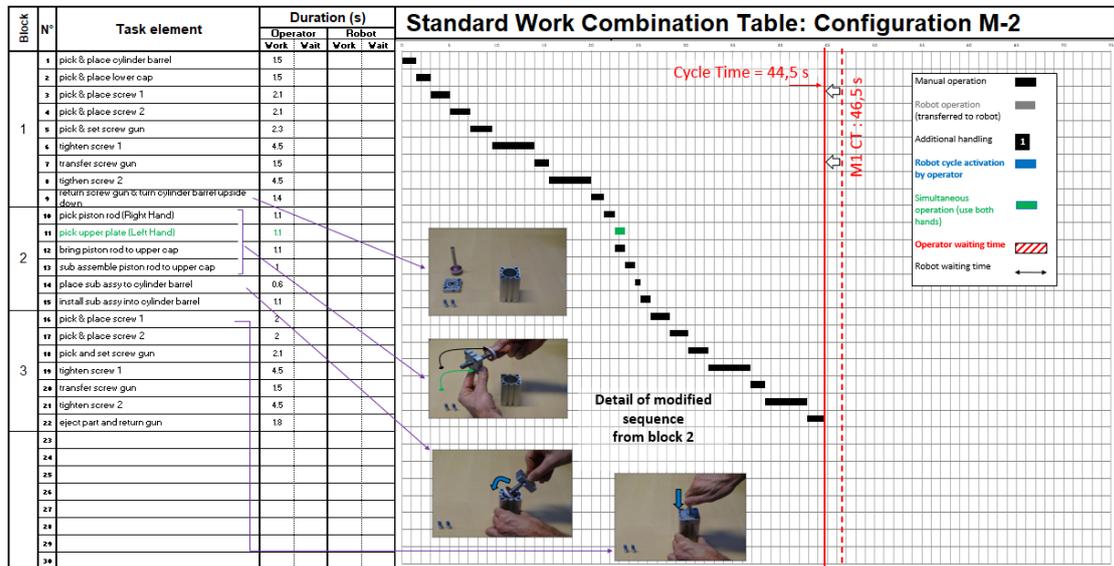


Figure 4.10 – SWCT pour les process  $M1$  et  $M1'$

### 3. Mise en œuvre des compétences techniques en robotique - création des process cobotisés

A l'issue des 4 heures de formation, les deux équipes étaient en capacité d'utiliser le cobot pour des opérations de 'pick and place' sur les composants liés au cas d'étude. Cette étape a naturellement mis en évidence le besoin de positionner chaque composant suffisamment précisément pour que le cobot puisse les saisir à chaque cycle. Si les premières solutions ont été de caler les pièces contre des supports ad hoc, les participants ont ensuite conçu et réalisé avec l'aide d'Adrien Florit des supports à l'aide des moyens de fabrication additive afin de mieux contrôler les positions relatives des différents composants. Cette activité s'inscrit relativement bien dans la démarche kaizen, qui cherche à obtenir des solutions rapides et simples aux problèmes rencontrés. A l'issue de cette phase prototype, les supports les plus adaptés seront reproduits et directement proposés à l'ensemble des participants des essais fonctionnels. La capacité à développer des supports adaptés n'est pas en effet un des éléments essentiels dont on cherche à évaluer l'impact sur la qualité du process. D'autre part une différence de qualité de support entre les groupes pourrait être la cause de difficultés techniques dans la mise en œuvre des process, indépendamment des compétences elles-mêmes. L'option retenue sera donc de figer a priori ce paramètre en mettant à disposition des moyens identiques, tout en relevant si des développements additionnels ont lieu. Concernant les performances respectives obtenues, l'équipe  $A$ , malgré un temps de développement supérieur à l'équipe  $B$  (14 heures comparées à 10 heures, soit le temps pour  $B$  de réaliser les process  $M2$  et  $PA2$ ), le temps de cycle obtenu par le process  $PA1$  est supérieur à  $PA2$  (voir les figures 4.11 4.12 et la table 4.3).

## 4.2. PHASE D'ESSAIS PROTOTYPES ET VALIDATION DE L'ALGORITHME

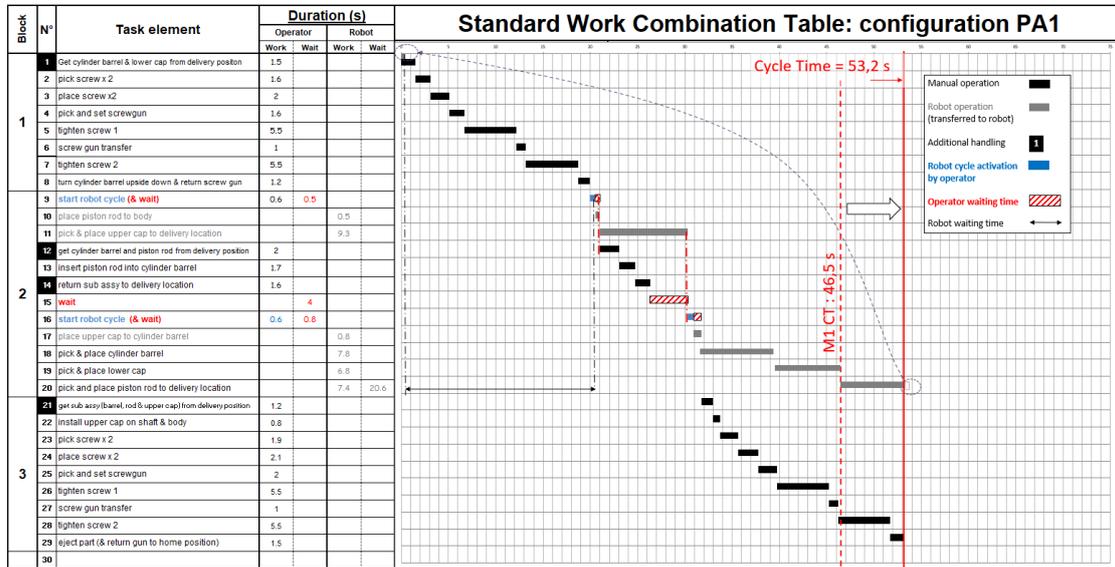


Figure 4.11 – SWCT pour le process PA1

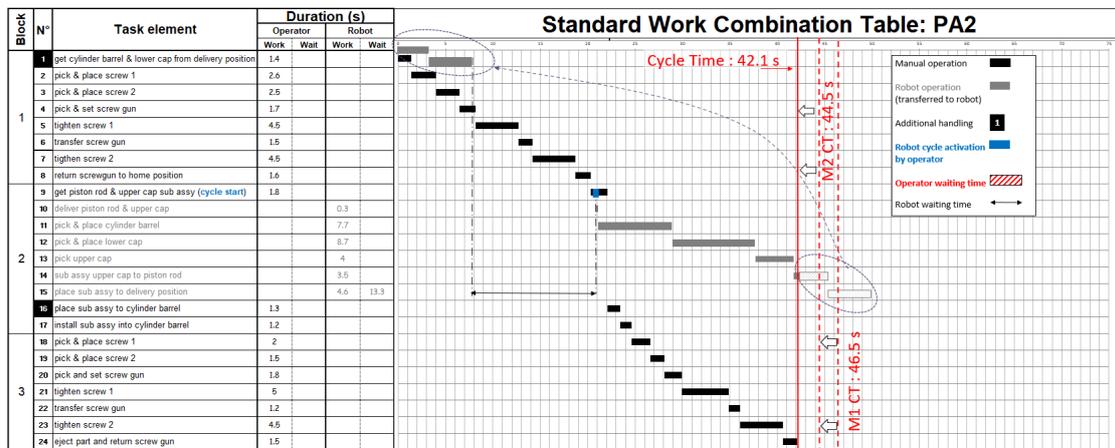


Figure 4.12 – SWCT pour le process PA2

Si l'on procède à une analyse succincte des phénomènes qui ont sous-tendu les évolutions des temps de cycle respectif des deux process (représentés sur la figure 4.13), on observe des éléments proches comme le temps d'opérations manuelles transférées au robot ('transfer to robot'), de l'ordre de 5s, par contre le process PA1 est impacté par deux événements : le temps d'attente de l'opérateur entre les tâches 14 et 16 ('operator waiting time', voir figure 4.11), et la double activation du robot pour chaque cycle. Le temps d'attente opérateur peut être mis en perspective directement avec l'absence de prise en compte du besoin de séparation homme-machine (principe jidoka). La deuxième activation du cobot (après dépose de la face supérieure sur la tige) a pu être évitée par l'équipe B car elle a affecté au robot le sous-ensemble de ces deux composants, reproduisant ainsi l'amélioration portée par le process M2 sur le process PA2. Même si le robot ne dispose pas de deux bras comme l'opérateur, l'opération de sous-ensemble reste rentable (au

## 4.2. PHASE D'ESSAIS PROTOTYPES ET VALIDATION DE L'ALGORITHME

sens du temps de cycle) car elle minimise le déplacement total pour ces deux tâches. A travers ces premières observations, on notera que cet environnement expérimental permet de mettre en évidence les phénomènes recherchés, et d'en évaluer l'impact de façon quantitative.

Certains éléments de cadrage sont aussi apparus durant cette phase : le temps additionnel lié à l'activation du robot ('additional handling time'), qui nécessite de valider une boîte de dialogue sur l'écran tactile de la console déportée du robot, est relativement élevé en comparaison d'opérations à valeur ajoutée, et représente même la moitié du temps d'opération transféré au cobot. Cet élément n'a pourtant pas vocation à être significatif, car il s'agit d'une contrainte liée au matériel disponible (ce n'est ni un point technique ni un point méthodologique). Pour les phases d'essais fonctionnels, l'ergonomie de cette action sera améliorée par l'introduction d'un boîtier dédié qui permettra une action plus rapide (de l'ordre de la seconde), et qui occupera moins de surface sur le plan de travail. La position relative du cobot par rapport à l'opérateur et au plan de travail est aussi apparue comme une caractéristique impactante : l'équipe *A* a pu choisir l'emplacement et l'a localisé à droite du plan de travail, ce qui a provoqué l'allongement du temps de la tâche 11, qui est la prise d'une pièce située à gauche de l'opérateur. Ce point est aussi évidemment lié à la disposition des composants sur le plan de travail (aussi un choix des participants), qui dans ce cas n'a pas été judicieux non plus. L'implantation du plan de travail (et sa réimplantation) reste un point d'observation, mais il a été convenu qu'en ce qui concerne la position du cobot, la configuration recherchée sera (autant que possible) d'avoir le cobot en vis à vis de l'opérateur, afin que les temps de trajectoires cobot puissent être a priori globalement homogènes quels que soient les composants. L'implantation des composants sur le poste de travail reste quant à elle complètement libre. Cette position de cobot offre aussi l'avantage de rendre la station de travail compatible avec une intégration sur une ligne d'assemblage, ce qui est un des développements envisagé pour ce travail. Un des freins à la ré-implantation exprimé par les équipes est le temps de re-programmation associé. En effet, les coordonnées de chaque pièce unitaires ont été apprises au cobot pour la construction de son cycle de travail. Afin de rendre cette opération plus efficace, et fluidifier ainsi les activités d'amélioration continue, les participants recevront une formation spécifique (une heure environ) sur une fonction *UniversalRobot* appelée 'palette', qui permet de définir les coordonnées d'un ensemble de composants distribués régulièrement dans un espace donné. Cette boucle une fois définie et insérée dans le programme, la relocalisation d'un groupe de composant est réduite au déplacement du point d'entrée de la 'palette' ainsi définie.

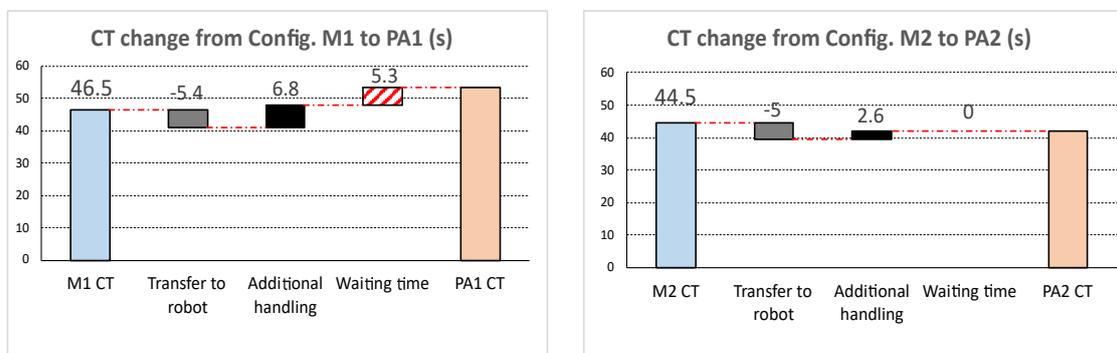


Figure 4.13 – évolutions respectives des process *M1* et *M2* lors de la phase d'introduction du cobot

4. Amélioration des process cobotisés

Pour cette étape, aucune consigne supplémentaire n'a été fournie à l'équipe *B*, qui a donc le choix entre 2 pistes principales : transférer des tâches supplémentaires vers le cobot ou réduire les temps d'exécution des opérations manuelles. Les participants ont finalement décidé d'effectuer des kaizens sur les opérations manuelles. Encore une fois, c'est à travers l'utilisation simultanée des deux mains (tâches 2,3,4) que cette réduction a eu lieu (voir figure 4.14). Au final une réduction de 2.2s a pu être appliquée sur le process *PA2* (voir 4.3). Le suivi de l'équipe *B* et son débriefing ont mis en évidence plusieurs points de la stratégie appliquée : le temps disponible du robot dans le process *PA2* est de 13.2s, donc en se basant sur les rapports de temps de tâche globaux observés précédemment (cf. facteur *k* dans la table 4.9) de l'ordre de 5.8, cela permet d'envisager le transfert vers le cobot d'environ 2.2s de temps manuel, à la condition de ne pas générer une activation supplémentaire du cobot, dont la durée est du même ordre de grandeur. Les tâches candidates à ce stade sont 16 et 17 (insertion du sous assemblage face supérieure & tige piston dans le corps de vérin). Les participants ont anticipé une complexité élevée pour automatiser cette tâche qui demande une dextérité élevée (précision et combinaison de mouvement de translation et rotation de la tige). Donc par souci de faisabilité et d'utiliser efficacement le temps de développement, l'équipe a préféré apporter des kaizens sur les opérations manuelles de début de cycle, dont l'idée leur est venue au cours de cycles réalisés sur le process précédent.

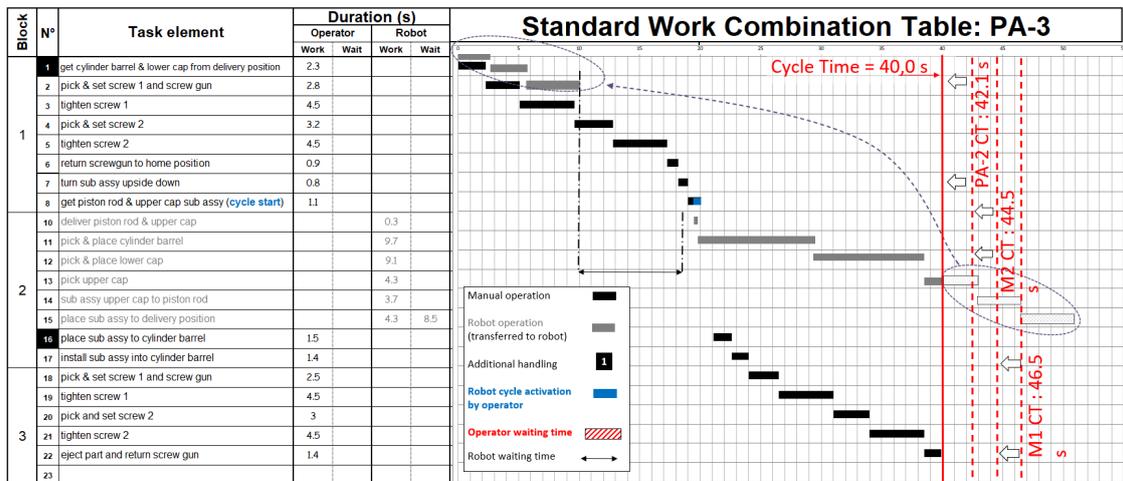


Figure 4.14 – SWCT pour le process *PA3*

Afin d'identifier d'autres pratiques ou tentatives qui n'auraient pas été révélées par ces deux groupes de participants, des groupes supplémentaires ont été engagés dans ce protocole. Leurs résultats n'ont pas été exploités de façon exhaustive, mais ils ont permis de cadrer les expérimentations futures. Un des axes apparu est l'utilisation du temps disponible du cobot non pas pour transférer de nouvelles opérations, mais pour répéter celles déjà automatisées sur un autre vérin en temps masqué. Ceci résulte en une production par lot (la vidéo est disponible sur ce lien<sup>6</sup>). Si cette option permet de diminuer le temps de cycle ramené à la pièce produite, elle a l'inconvénient de dégrader la flexibilité de la solution (production par lot), et d'empêcher son

6. <https://youtu.be/4rQbFPFNvVY>

## 4.2. PHASE D'ESSAIS PROTOTYPES ET VALIDATION DE L'ALGORITHME

---

intégration efficace dans une cellule de production. De plus elle ne représente que difficilement une amélioration du process existant. Pour toutes ces raisons, ce type de modification sera exclu des prochaines expérimentations. Le nombre maximum de produits en cours d'assemblage sur la station sera donc porté à 2, ce qui correspond à des phases du process où l'opérateur et le cobot travaillent en parallèle sur 2 produits consécutifs.

Table 4.3 – Synthèse des performances de la phase d'essais prototypes

Process	Team	Temps dvpt (heures)	CT (s)	Opérateur		Transferred time (s)	Ratio de transfert - R	Cobot		Rapport de vitesse - k
				travail	attente			travail	attente	
M1	A	-	46.5	46.5	N/A <sup>7</sup>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PA1	A	14	53.2	47.9	5.3	5.4	0.12	32.6	20.6	6.04
M2	B	5	44.5	44.5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PA2	B	5	42.1	42.1	0	5	0.11	28.8	13.3	5.76
PA3	B	5	40	40	0	5	0.11	28.8	11.2	N/A

A l'issue de l'ensemble des essais, les deux équipes ont eu l'occasion de s'exprimer librement sur l'expérience vécue. L'objectif de cette séquence est d'obtenir une première image des compétences que les participants ont eu le sentiment d'avoir développées. La synthèse est reportée en table 4.4. Nous avons pu confirmer que des compétences techniques comme la programmation robot, et la maîtrise de techniques et outils lean (pour l'équipe *B*), ont été acquises pour l'essentiel dans un cadre 'learning by doing', validant ainsi l'équilibre et la fonctionnalité de l'écosystème d'expérimentation. De façon intéressante, un certain nombre de compétences comportementales ont été aussi mentionnées spontanément, comme le travail d'équipe ou l'engagement personnel sur les objectifs, qui sont aussi en connexion avec les principes managériaux du lean exprimées par Liker [5].

---

7. Non Applicable

## 4.2. PHASE D'ESSAIS PROTOTYPES ET VALIDATION DE L'ALGORITHME

Table 4.4 – Retour de perception des participants sur les compétences développées

Compétences développées	Equipe A	Equipe B
Robotique	Programmation trajectoire robot Amélioration de trajectoire robot Compréhension des limites du cobot	Programmation trajectoire robot Amélioration de trajectoire robot
Conception de process	Amélioration de l'implantation de poste Séquencement des tâches	Amélioration de l'implantation de poste Chrono-analyse Elimination des temps d'attente (muda)
Comportementales	Gestion du temps et des priorités Travail en équipe	Répartition des tâches Travail en équipe Engagement sur les objectifs

### 4.2.1.3 Conclusions sur la phase d'expérimentation prototype

La performance obtenue représente une amélioration de 6.5s sur le process initial, soit 14% de réduction du temps de cycle. Deux secondes sont directement imputables aux actions kaizen sur la durée des opérations manuelles, et 2.5s de réduction supplémentaires lors de transfert de tâches vers le cobot. 2s ont finalement été aussi retranchées au  $CT$  après cette étape par de nouvelles réductions de temps d'opérations. Le ratio de transfert obtenu est de 0.11, inférieur à la valeur de  $R$  pour  $CT_{ideal}$  de 0.14<sup>8</sup>, si l'on prend un facteur  $k$  de 5.8 (valeur moyenne observée entre les deux équipes). La solution est donc restée du côté efficace et améliorable du point d'équilibre théorique entre opérateur et cobot. On peut aussi tracer des relations qualitatives entre les compétences mises en œuvre pendant les différentes phases de la création de process et l'effet obtenu sur la performance (voir figure 4.15) :

- La maîtrise des techniques lean permet plus d'efficacité pour les transferts de tâche (comparaison entre  $PA1$  et  $PA2$ ), en évitant notamment de générer des temps d'attente.
- La réduction de la durée des opérations manuelles est évidemment elle aussi liée à l'application de techniques lean.
- L'utilisation combinée des compétences techniques (robotique) et lean permettent d'estimer et de mieux approcher le point d'équilibre pour les activités de transfert de tâches entre homme et cobot.
- Même si cela n'a pu être testé, on peut faire l'hypothèse que les compétences techniques permettent d'améliorer de façon générale la durée des tâches cobotisées (réduction de  $k$ ), déplaçant ainsi le point d'équilibre vers des valeurs de  $R$  plus grande, et offrant donc la possibilité de transférer un plus grand nombre de tâches pour réduire encore le temps de cycle.

En conclusion de cette première phase d'essai, un protocole simplifié a permis de confirmer la validité de l'environnement d'expérimentation proposé. En effet les participants ont pu mettre en œuvre (et développer) leurs compétences avec les moyens techniques et méthodologiques à leur disposition et les résultats obtenus sont exploitables (mesurables et interprétables) avec les outils d'analyse et de visualisation utilisés. Des premières conclusions sur l'apport des techniques lean pour l'intégration

8.  $R = \frac{1}{1+5.8} = 0.14$

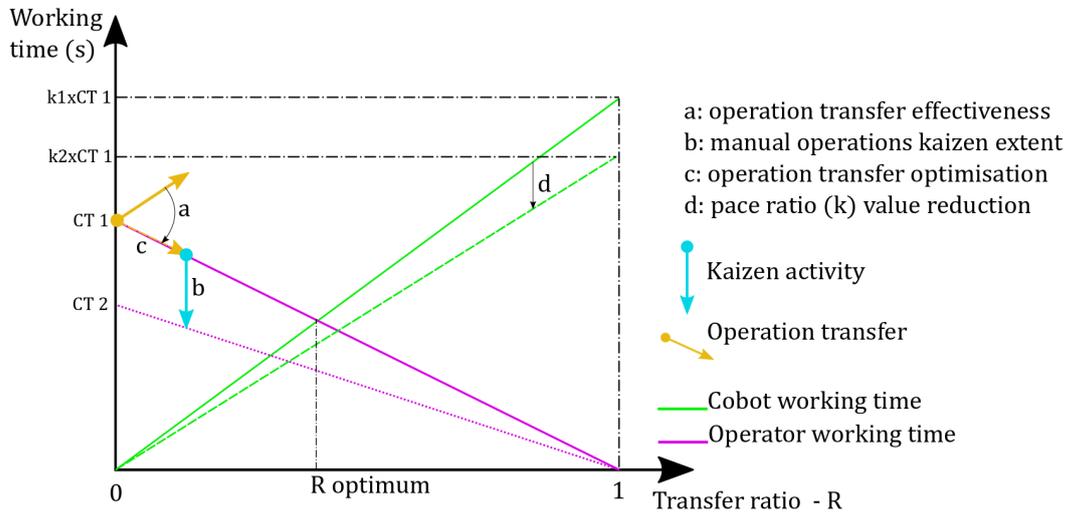


Figure 4.15 – Relation entre compétences et réduction de temps de cycle

de cobots sont disponibles, et nécessiteront d'être confirmées sur les cas d'études prévus. Certains éléments de cadrage concernant la production pièce à pièce, l'utilisation de fonctions dédiée à la dépalettisation des composants, le recours à la fabrication additive pour le prototypage rapide de supports de positionnements vont aussi permettre plus d'efficacité dans le déroulement des prochaines étapes. Une articulation est aussi apparue entre le recours aux compétences techniques et méthodologiques pour atteindre les objectifs fixés.

#### 4.2.2 Validation de l'algorithme de résolution

Cette partie a pour objet la vérification de la capacité de l'algorithme de résolution à converger vers des solutions approchées de qualité suffisante pour évaluer les solutions obtenues par différentes méthodes dites manuelles, ainsi que pour leur proposer des alternatives dans l'approche dite 'lean modifiée'.

##### 4.2.2.1 Méthode de validation

Une méthode de validation appropriée doit permettre de mettre en évidence la capacité de l'algorithme à obtenir des solutions performantes sur le cas à l'étude, mais aussi - dans un souci de généralisation - à en obtenir dans d'autres cas, de nature comparable. Dans cette perspective, et ne disposant pas de jeux de données possédant les caractéristiques économiques et ergonomiques recherchées, nous créerons des instances fictives dérivées du cas d'étude. Le nombre d'instance à créer a été fixé à 12 pour avoir une diversité acceptable des cas à résoudre.

Table 4.5 – Instances de validation

	Order strength	
	$\in [0.1; 0.3]$	$\in [0.3; 0.5]$
[15 – 20] tasks	SosSt1	BosSt1
	SosSt2	BosSt2
	SosSt3	BosSt3
[20 – 25] tasks	SosBt1	BosBt1
	SosBt1	BosBt1
	SosBt1	BosBt1

Plusieurs caractéristiques significatives ont été retenues pour concevoir les instances de test :

1. Nombre de tâches
2. Order strength
3. Durée des tâches (pour chaque mode).
4. Coût ergonomique des tâches (pour chaque mode).
5. Nombre de prédécesseurs maximum par tâche
6. Proportion de tâches impossible à réaliser par le cobot seul, ou sans intérêt pour le mode coopératif.

Les caractéristiques 1 et 2 étant a priori les plus impactantes sur la complexité, nous tenterons de catégoriser les instances par rapport aux valeurs prises par ces deux paramètres. La complexité de résolution augmentant avec l'accroissement des valeurs des caractéristiques 1 et 2, les plages recherchées seront positionnées au delà des valeurs observées. Pour les autres, on déterminera des frontières ou plages communes à toutes les instances. Les valeurs de ces plages sont déterminées de façon empirique, autour des valeurs observées lors de l'analyse du cas d'étude présenté en 4.1.1, parfois modifiées pour proposer des résolutions plus ouvertes que le cas d'étude.

**Le nombre de tâches** retenu pour le cas d'étude est de 14. Nous avons donc créé 2 plages pour générer les instances de test.

- "Small task" (St) 15-20 tâches
- "Big task" (Bt) 20-25 tâches

La valeur de **l'order strength** du cas d'étude est de 0.16. Les 2 plages considérées sont donc :

- "Small order strength" (Sos)  $0.1 \leq OS \leq 0.3$
- "Big order strength" (Bos)  $0.3 \leq OS \leq 0.5$

L'order strength est une résultante de la création de la matrice de précedence, et dépend donc en partie du nombre maximal de prédécesseurs autorisés par tâche (caractéristique 5). Les instances seront donc filtrées par rapport à ce critère une fois générées, et ne seront conservées que celles qui présentent les OS visés pour chacune des familles.

Ainsi, on peut identifier 4 familles de 3 individus chacune en combinant les plages des paramètres 1 et 2, comme illustré sur la table 4.5

**La durée des tâches** du mode opérateur est le résultat d'un tirage aléatoire entre 1 et 15 secondes, comme observé sur le cas d'étude. La phase d'essai prototype a permis d'automatiser un certain nombre

## 4.2. PHASE D'ESSAIS PROTOTYPES ET VALIDATION DE L'ALGORITHME

de tâches sélectionnées par les participants, et il a été observé sur deux groupes distincts qu'en moyenne la durée d'une tâche affectée au robot était 5.8 fois plus longue que la tâche d'origine (exécutée par l'opérateur). Ces premières expérimentations ayant laissé peu de place à l'amélioration des opérations automatisées, nous assimilerons cette valeur à une limite supérieure, et proposerons pour ce facteur une plage de 4 à 6. Les durées des tâches en mode 'robot' seront donc déduites de celles du mode opérateur via un facteur de proportionnalité tiré aléatoirement dans cette plage. Pour le mode 'coopératif', nous nous sommes basés sur l'essai prototype qui consistait à exécuter le plus grand nombre d'opérations possible en mode coopératif afin d'avoir des valeurs de référence. Nous avons mis en évidence une plage allant de 0.7 à 1 pour exprimer un rapport de proportionnalité entre les modes 'opérateur' et 'coopératif', qui servira de base pour générer les durées de tâche du mode 'coopératif'.

**Le coût ergonomique** (exprimé en temps de récupération) des tâches en mode manuel varie sur une amplitude assez importante sur le cas d'étude, dans un rapport de 0.1 à 1.5 par rapport à sa durée. Cette amplitude a été conservée et une fois la durée de la tâche générée, un temps de récupération lui est associé pour le mode 'opérateur' par un tirage aléatoire à l'intérieur de cette plage. Le coût ergonomique pour le mode 'robot' est évidemment nul. Concernant le mode dit 'coopératif', on constate qu'à l'exception d'une tâche de faible RT, l'ensemble des temps de récupération se trouvent dans un rapport allant de 0.15 à 0.6. Les RT du mode 'coopératif' seront donc ainsi dérivés de ceux du mode 'opérateur' via un tirage aléatoire d'un facteur de proportionnalité compris dans la plage constatée.

**Le nombre maximum de prédécesseur** est déterminant pour la valeur de l'order strength, qui est lié aux nombre de précédences entre les tâches. Le cas d'étude possède un maximum de 4 prédécesseurs par tâche, mais cette valeur demeure insuffisante pour générer des order strength supérieures, ou à maintenir le nombre de tâches augmentant. Ainsi ce paramètre sera altéré comme indiqué sur la table 4.6 afin de pouvoir peupler les familles d'instances désirées. Lors de la création de la matrice de précédence, l'outil de génération affectera aléatoirement sur les autres tâches des relations de précédence, matérialisées par des 1 dans la matrice. La quantité de prédécesseurs désignés sera lui-même fonction d'un tirage aléatoire entre la valeur 0 et le maximum autorisé pour l'instance concernée.

Table 4.6 – Nombre maximal de prédécesseurs par tâche pour chaque famille d'instance

	Order strength	
	$\in [0.1; 0.3]$	$\in [0.3; 0.5]$
[15 – 20] tasks	4	5
[20 – 25] tasks	6	8

**Les tâches impossibles à réaliser par le robot** représentent une proportion d'environ 30% de l'ensemble des tâches, et les tâches sans pertinence pour le mode coopération environ 20%. Afin de repérer ces caractéristiques, une fois l'instance de test complètement générée, des tâches seront tirées au hasard et rendues incompatibles avec le mode 'robot' (valeur de durée portée à 1000 secondes), à concurrence de 30% des tâches. Un processus analogue et indépendant sélectionnera des tâches incompatibles avec le mode 'coopération'.

Un programme dédié a été codé par Mohamed Amine Abdeljaouad afin de générer les 12 instances selon les paramètres définis, générant pour chacune d'elle un fichier de temps et coût ergonomique pour chaque mode et une matrice de précédence. Ces instances maintenant disponibles, il est nécessaire de définir un protocole d'essai pour tester la capacité de l'algorithme à identifier des solutions en utilisant

Table 4.7 – Couples de paramètres  $L1$   $L2$

	L1	L2	Opérateur	Cobot	Coopération
3 modes	0.25	0.5	25%	25%	50%
	0.5	0.75	25%	25%	50%
	0.33	0.66	33%	33%	33%
	0.6	0.7	60%	10%	30%
2 modes	0.66	1	66%	33%	-
	0.75	1	75%	25%	-
	0.85	1	85%	15%	-

les différents modes de collaboration.

L'algorithme a été codé par Nathalie Klément, comme extension d'un code existant développé par le même auteur, [107]. De part sa nature probabiliste, des répliques seront nécessaires pour identifier des solutions suffisamment bonnes, c'est-à-dire soit l'obtention de répétition du meilleur résultat, soit à défaut des résultats suffisamment proches, afin que l'écart entre les meilleures solutions proposées ne soit pas significatif au regard de la fluctuation naturelle d'un process en condition réelle (quelques %). On procédera initialement à 5 répliques, avec la possibilité d'étendre si les conditions de convergence qui viennent d'être posées n'étaient pas vérifiées. Le tirage probabiliste est lui-même potentiellement influencé par les paramètres  $L1$  et  $L2$  définis en 3.2.2.1. Il conviendra donc de tester plusieurs couples  $L1, L2$  pour chaque lot de réplique. Les différents couples testés ont pour but de couvrir des probabilités de sélection plus ou moins importantes pour chaque mode. La liste des couples initialement sélectionnés est indiquée sur la table 4.7. Un des objectifs de ces tests est aussi d'évaluer l'intérêt du mode coopératif comparativement à l'allocation exclusive opérateur ou cobot, utilisation dite '2 modes'. Dans ce but l'ensemble des test est reproduit avec la valeur de  $L2$  égale à 1 pour prévenir l'utilisation du mode coopératif, comme indiqué sur la partie basse de la table 4.7.

Le problème à résoudre est de nature multi-objectifs, dont le compromis entre performance économique et risque ergonomique s'exprime par le facteur  $\alpha$ . De fait, l'ensemble des tirages précédemment décrits seront aussi reproduits pour différentes valeurs de  $\alpha$ , comprises entre 0 et 0.9 (la valeur 1 étant exclue pour éviter un ensemble de solutions qui une fois atteint le coût ergonomique de valeur 0 fourniraient quantité de coûts économiques plus ou moins important sans les hiérarchiser). Dans ce travail, nous sélectionnerons donc pour  $\alpha$  les valeurs suivantes : 0, 0.25, 0.5, 0.75, 0.9.

Concernant la phase de recuit simulé, les paramètres à figer sont : le nombre d'itération maximum ( $IterMax$ ), la température initiale ( $T$ ), et le facteur de décroissance de la température  $\beta$ . Les valeurs ont été sélectionnées sur la base des travaux de [109], pour obtenir  $IterMax = 10000$ , et la température initiale a été déterminée au cas par cas en fonction du nombre de tâches, selon la méthode proposée par Kirkpatrick [110]. Le coefficient  $\beta$  a été fixé à 0.999.

#### 4.2.2.2 Résultats obtenus

L'objectif de cette phase de validation sur des instances de test est de vérifier que l'outil de résolution est fonctionnel, et délivre des résultats théoriques de qualité suffisante pour représenter des

Table 4.8 – synthèse sur la convergence de l'algorithme

$\alpha$	2 Modes (15 tirages par instance)			3 Modes (20 tirages par instance)		
	multi hit TOP 1	écart relatif TOP 5	écart type relatif TOP 5	multi hit TOP 1	écart relatif TOP 5	écart type relatif TOP 5
0	66.7%	0.6%	0.3%	16.7%	2.7%	1.1%
0.25	75.0%	0.3%	0.2%	0.0%	1.8%	0.7%
0.5	41.7%	1.9%	0.8%	0.0%	3.0%	0.2%
0.75	33.3%	2.7%	1.2%	0.0%	6.0%	2.5%
0.9	41.7%	2.2%	1.0%	0.0%	5.3%	2.1%

références pertinentes pour l'évaluation et l'amélioration des solutions établies de façon manuelle. Les instances de test ayant été construites afin d'être plausibles pour des cas réels, les résultats obtenus pourront aussi alimenter la discussion sur l'intérêt d'utiliser plusieurs modes de collaboration (les hypothèses sur les coûts économiques et ergonomiques impactent l'efficacité de chacun des modes par rapport aux objectifs économiques et ergonomiques).

Concernant l'aspect fonctionnel de l'algorithme, chaque instance - quel que soit son niveau de complexité - a pu être résolue en quelques secondes de calcul avec un processeur cadencé à 2.5 GHz. Ce temps de résolution est amplement suffisant pour une utilisation des résultats lors de phases de conception de process. Le niveau général de complexité des instances n'a donc pas d'effet perceptible sur le temps de résolution. Dans les différents couples  $L1$  &  $L2$  retenus, dans le cas d'une utilisation 3 modes (incluant la coopération), aucun n'a dominé les autres pour l'atteinte des meilleures solutions, quelles que soient les valeurs de  $\alpha$ . Même si des tendances sont observables, il n'y a pas de conclusion générale évidente qui tendrait à privilégier un couple pour alléger le protocole d'évaluation sans dégrader la qualité des résultats. Les classements relatifs des couples  $L1$  &  $L2$  pour les différentes valeurs de  $\alpha$  sont représentés sur la figure 4.16, qui détaille sur l'ensemble des instances testées (12 pour chaque valeur de  $\alpha$ , soit 60 pour le cas où les 5 valeurs de  $\alpha$  sont combinées) le nombre d'instances pour lesquelles chaque couple a obtenu respectivement la 1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> place dans le classement des meilleurs scores.

On peut noter que de façon assez prévisible, pour les valeurs de  $\alpha$  les plus faibles (0 et 0.25), prépondérance de la composante économique), les couples offrant à la fois les plus grandes probabilités au mode coopératif et des probabilités identiques aux modes 'opérateur' et 'cobot' (couples  $L1 = 0.33$  &  $L2 = 0.66$  et  $L1 = 0.25$  &  $L2 = 0.5$ ) obtiennent les moins bons scores. En effet le mode coopératif est assez peu pertinent pour les objectifs économiques. Et comme vu dans la section 4.2.1.3, le rapport d'affectation judicieux entre le cobot et l'opérateur est relié à la proportion entre leurs vitesses d'exécutions respectives (ici en rapport de 1 à 6). De façon quelque peu symétrique, pour les valeurs de  $\alpha$  élevées (0.75 et 0.9), les couples les moins performants sont ceux qui laissent les plus fortes probabilités d'affectation au mode 'opérateur', avec en outre un recours limité au mode coopératif (couples  $L1 = 0.6$  &  $L2 = 0.7$  et  $L1 = 0.5$  &  $L2 = 0.75$ ).

Quant aux essais sans le mode coopératif ( $L2$  fixé à 1), les différentes valeurs de  $L1$  sont moins déterminantes sur le résultat final, (voir figure 4.17). On observe même que les meilleures solutions peuvent être obtenues avec différentes valeurs de  $L1$  pour une même instance.

Pour chacune des valeurs de  $\alpha$  sélectionnées, chaque instance a subi 15 tirages pour l'évaluation en 2 modes, et 20 en 3 modes. Pour chacun des modes, on reportera pour l'ensemble des 12 instances le nombre d'occurrences où la meilleure solution a été trouvée de façon répétée, ainsi que l'écart relatif moyen entre la meilleure solution et la cinquième (par ordre décroissant du score obtenu). Les résultats sont disponibles sur la table 4.8. Pour les process en version 2 modes (respectivement 3 modes), les meilleures solutions ont régulièrement été répétées, parfois avec des valeurs de  $L1$  (respectivement  $L1$  &  $L2$ ) différentes, procurant un niveau de confiance élevé dans la qualité des solutions approchées identifiées, à défaut de pouvoir se comparer à des solutions exactes, le problème n'étant pas résolu à notre connaissance. En outre, l'écart relatif entre la meilleure et cinquième solution de moins de 2% (respectivement 3%) pour  $\alpha = 0.5$  (valeur qui sera utilisée pour les expérimentations fonctionnelles) est faible comparé à la fluctuation d'un cycle à l'autre lors de l'exécution du process (de l'ordre de 5%). En outre les solutions exprimées par l'algorithme sont encore du domaine théorique, et le retour au réel peut y apporter des altérations indispensables à leur implémentation, ce qui ajoute une inévitable dispersion des résultats au cours de cette phase. Une partie de ces altérations vient du fait que certains temps de tâche robot sont estimés par souci pratique (programmer l'ensemble des tâches réalisables par un robot pour ne finalement pas les utiliser étant une approche peu réaliste de la conception de process). En d'autres termes, si l'exploitation des solutions algorithmiques est la proposition de solutions réalisables de bon niveau d'optimalité, le fait de tirer une des meilleures solutions à défaut de la meilleure à lui seul ne crée pas un écart qui sera significatif une fois la solution mise en place. Ces conclusions sur l'exploitabilité des résultats pour les phases de retour au réel seront vérifiées lors des phases d'essais fonctionnels avec les groupes participants.

Maintenant que nous avons pu confirmer que le niveau de qualité des solutions proposées par l'algorithme de résolution était suffisant pour l'exploitation envisagée, nous pouvons chercher à caractériser l'intérêt potentiel du mode coopératif, selon les objectifs économiques et ergonomiques recherchés. La table 4.9 reprend les meilleures solutions, pour l'ensemble des instances et des valeurs de  $\alpha$ . Les solutions avec et sans utilisation du mode coopératif sont aussi mises en comparaison directe. L'avantage relatif lié la coopération est lui aussi renseigné, s'il existe. Dans le cas où le process utilisant le mode coopératif est moins bon, l'avantage relatif est ramené à 0. On peut noter qu'une limite de cet outil de résolution, lorsque utilisé en 3 modes pour  $\alpha = 0$  (condition pour laquelle le mode coopératif n'est pas particulièrement intéressant), est qu'il affecte quand même des tâches au mode coopératif, et n'arrive pas à proposer les solutions les plus performantes qui se reposent exclusivement sur l'affectation 'opérateur' ou 'cobot'.

Si l'on synthétise l'amélioration relative sur les 12 instances de test pour chaque valeur de  $\alpha$ , on observe que dès  $\alpha = 0.25$ , les solutions utilisant le mode coopératif deviennent théoriquement plus intéressantes encore avec l'augmentation de la pondération ergonomique, voir figure 4.18. Si l'amélioration moyenne constatée pour  $\alpha = 0.5$  de 4% reste elle aussi dans un ordre de grandeur de la fluctuation de process, avec une dispersion notable d'une instance à l'autre (de 0 à 11%). Pour autant il est difficile de dégager avec cet ordre de grandeur une tendance significative par famille d'instance.

Une fois le même processus théorique appliqué à l'instance du cas d'étude, voir table 4.10, on observe le même phénomène, mais avec une amplitude plus importante, avec 30.8% d'amélioration théorique pour  $\alpha = 0.5$ . Sur ce cas, le mode coopératif est largement privilégié quand il est disponible, voir figure 4.19. l'opération 13, qui correspond à l'évacuation de la pièce finie est affectée au cobot du

## 4.2. PHASE D'ESSAIS PROTOTYPES ET VALIDATION DE L'ALGORITHME

Table 4.9 – Résultats comparatifs pour les instances de test

$\alpha$	0			0.25			0.5			0.75			0.9		
Modes	3	2	IR <sup>9</sup>	3	2	IR	3	2	IR	3	2	IR	3	2	IR
<b>Instance</b>	<b>BosBt1</b>														
<i>H</i>	123.3	121.9	0.0%	112.75	114.1	1.2%	89.8	94.00	4.5%	45.975	46.875	1.9%	18.45	19.01	2.9%
<i>C<sub>eco</sub></i>	123.3	121.9		125.7	125.2		172.8	184.50		183.9	186.9		184.5	190.1	
<i>C<sub>ergo</sub></i>	90.8	92.2		73.9	80.8		6.8	3.50		0	0.2		0	0	
<b>Instance</b>	<b>BosBt2</b>														
<i>H</i>	127.5	126.4	0.0%	121.4	121.7	0.2%	100.8	104.45	3.5%	53.75	53.075	0.0%	20.22	21.5	6.0%
<i>C<sub>eco</sub></i>	127.5	126.4		129.8	126.4		171.9	208.60		215	206.6		202.2	215	
<i>C<sub>ergo</sub></i>	102.2	107.6		96.2	107.6		29.7	0.30		0	1.9		0	0	
<b>Instance</b>	<b>BosBt3</b>														
<i>H</i>	139	138.2	0.0%	119.6	128.625	7.0%	99.35	105.55	5.9%	49.75	52.925	6.0%	20.69	21.17	2.3%
<i>C<sub>eco</sub></i>	139	138.2		135.7	139.1		155.9	211.10		199	211.7		206.9	211.7	
<i>C<sub>ergo</sub></i>	84.3	100.5		71.3	97.2		42.8	0.00		0	0		0	0	
<b>Instance</b>	<b>BosSt1</b>														
<i>H</i>	105.8	105.8	0.0%	104.125	104.15	0.0%	86.35	93.35	7.5%	43.05	46.075	6.6%	17.23	18.7	7.9%
<i>C<sub>eco</sub></i>	105.8	105.8		108.2	106		172.7	186.70		172.2	184.3		172.3	187	
<i>C<sub>ergo</sub></i>	107.6	107.6		91.9	98.6		0	0.00		0	0		0	0	
<b>Instance</b>	<b>BosSt2</b>														
<i>H</i>	112.1	113.1	0.9%	99.75	102.575	2.8%	79.75	84.15	5.2%	40.05	42.475	5.7%	16.05	17.1	6.1%
<i>C<sub>eco</sub></i>	112.1	113.1		116.9	113.9		159.5	160.60		157.8	167.5		160.5	171	
<i>C<sub>ergo</sub></i>	77.5	73.5		48.3	68.6		0	7.70		0.8	0.8		0	0	
<b>Instance</b>	<b>BosSt3</b>														
<i>H</i>	124.6	123.6	0.0%	119.825	119.225	0.0%	98.05	103.00	4.8%	50.975	51.5	1.0%	19.61	20.6	4.8%
<i>C<sub>eco</sub></i>	124.6	123.6		127	125		196.1	206.00		203.9	206		196.1	206	
<i>C<sub>ergo</sub></i>	120.3	110		98.3	101.9		0	0.00		0	0		0	0	
<b>Instance</b>	<b>SosBt1</b>														
<i>H</i>	158.4	151.2	0.0%	143.75	138.875	0.0%	115.7	111.90	0.0%	60.075	56.775	0.0%	23.83	22.65	0.0%
<i>C<sub>eco</sub></i>	158.4	151.2		164	151.2		207.7	223.80		240.3	227.1		238.3	226.5	
<i>C<sub>ergo</sub></i>	94.1	101.9		83	101.9		23.7	0.00		0	0		0	0	
<b>Instance</b>	<b>SosBt2</b>														
<i>H</i>	125.1	124.1	0.0%	110.625	114.925	3.7%	93.25	96.65	3.5%	46.5	47.8	2.7%	18.57	19.56	5.1%
<i>C<sub>eco</sub></i>	125.1	124.1		123.1	124.1		158.9	189.40		186	191.2		185.7	195.6	
<i>C<sub>ergo</sub></i>	90.1	87.4		73.2	87.4		27.6	3.90		0	0		0	0	
<b>Instance</b>	<b>SosBt3</b>														
<i>H</i>	161.9	155	0.0%	148.15	148.425	0.2%	132.5	129.95	0.0%	63.025	75.325	16.3%	27.9	40.11	30.4%
<i>C<sub>eco</sub></i>	161.9	155		161.3	156.8		168.4	224.30		252.1	245.8		279	392.1	
<i>C<sub>ergo</sub></i>	117.6	119.7		108.7	123.3		96.6	35.60		0	18.5		0	1	
<b>Instance</b>	<b>SosSt1</b>														
<i>H</i>	102.9	100.4	0.0%	94.6	91.65	0.0%	75.45	70.55	0.0%	37.45	37.475	0.1%	14.97	14.86	0.0%
<i>C<sub>eco</sub></i>	102.9	100.4		106	100.5		150.2	139.90		149.8	149.9		149.7	148.6	
<i>C<sub>ergo</sub></i>	61.6	75.7		60.4	65.1		0.7	1.20		0	0		0	0	
<b>Instance</b>	<b>SosSt2</b>														
<i>H</i>	134.5	132.8	0.0%	124.05	125.6	1.2%	101.6	104.30	2.6%	50.625	53.575	5.5%	20.48	21.43	4.4%
<i>C<sub>eco</sub></i>	134.5	132.8		134.4	132.8		201.7	191.40		198.6	214.3		204.8	214.3	
<i>C<sub>ergo</sub></i>	99.4	104		93	104		1.5	17.20		1.3	0		0	0	
<b>Instance</b>	<b>SosSt3</b>														
<i>H</i>	98.6	102.2	3.5%	90.775	97.9	7.3%	70.85	79.60	11.0%	35.1	40.8	14.0%	14.96	16.32	8.3%
<i>C<sub>eco</sub></i>	98.6	102.2		101.5	101.8		136.7	153.50		140.4	163.2		149.6	163.2	
<i>C<sub>ergo</sub></i>	71.6	88.1		58.6	86.2		5	5.70		0	0		0	0	

### 4.3. SYNTHÈSE PARTIELLE

---

Table 4.10 – Synthèse des résultats pour le cas d'étude réel

$\alpha$	0			0.25			0.5			0.75			0.9		
Modes	3	2	IR	3	2	IR	3	2	IR	3	2	IR	3	2	IR
Instance	Real case study														
H	77.3	81.3		66.8	75.6		49.0	72.2		24.7	44.7		9.9	18.8	
$C_{eco}$	77.3	81.3	<b>4.9%</b>	80.2	81.3	<b>11.6%</b>	95.0	113.0	<b>30.8%</b>	98.6	117.0	<b>44.9%</b>	98.6	138.8	<b>47.4%</b>
$C_{ergo}$	49.6	67.8		26.5	53.8		3.0	31.3		0.0	16.5		0.0	2.9	

fait de sa charge ergonomique importante due à la masse de la pièce complètement assemblée.

### 4.3 Synthèse partielle

Cette partie a permis d'effectuer une première évaluation de principe de la proposition méthodologique. Elle a été majoritairement validée, notamment sur les apports des techniques lean dans la recherche de performance en phase d'intégration d'un robot collaboratif. Cette étape a aussi permis de mieux préciser l'environnement d'expérimentation qui sera utilisé lors de la prochaine phase d'essais dits 'fonctionnels', c'est à dire incluant les différents cas d'études et portant sur un nombre de groupes plus important. Dans un développement parallèle, nous avons testé la capacité de l'algorithme à converger vers des solutions de qualité suffisante sur les cas d'étude envisagés, ce qui permettra d'alimenter la recherche de solutions lors de ces essais fonctionnels.

### 4.3. SYNTHÈSE PARTIELLE

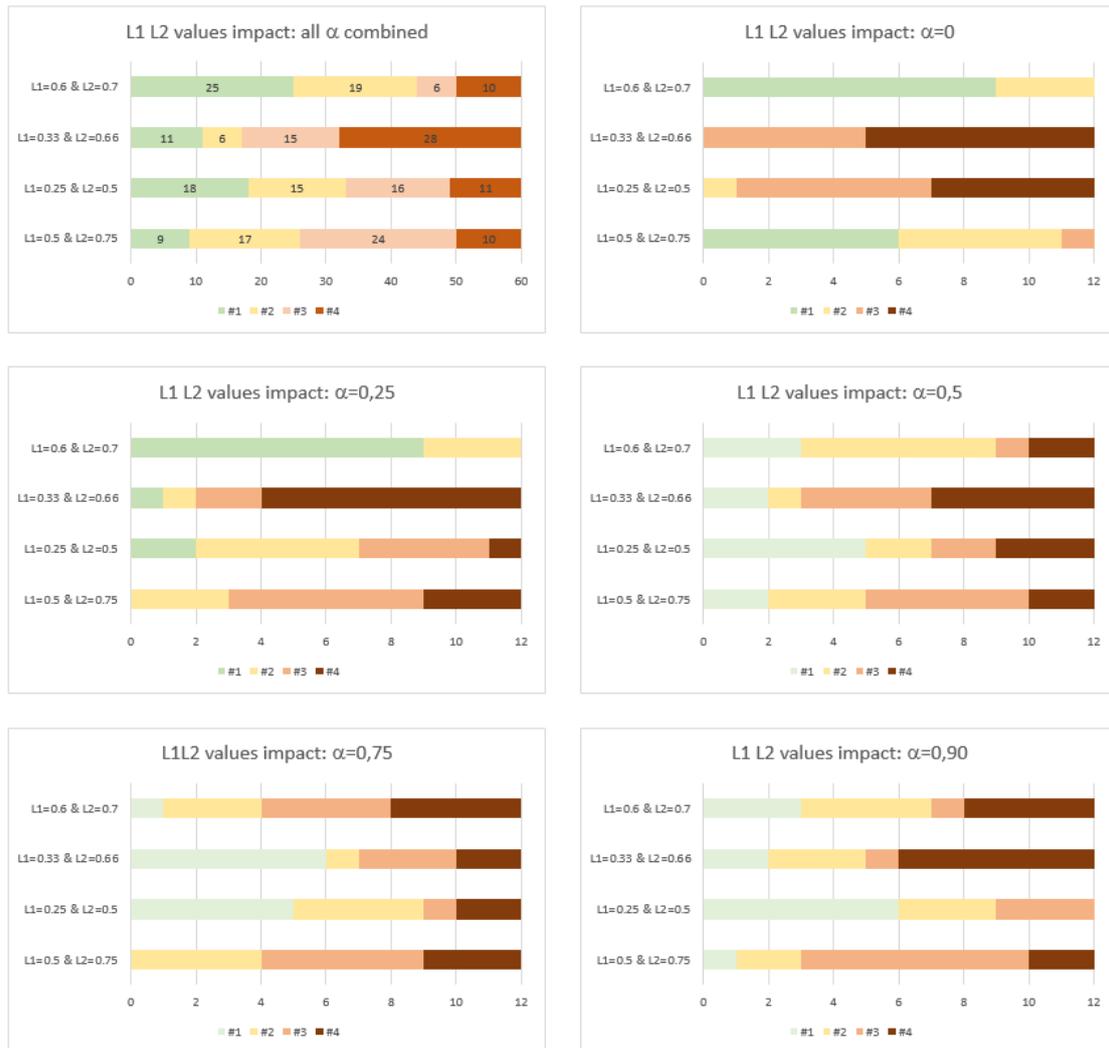


Figure 4.16 – classement des scores obtenus par les différents couples  $L1$  &  $L2$  pour différentes valeurs de  $\alpha$ , en version 3 modes

### 4.3. SYNTHÈSE PARTIELLE

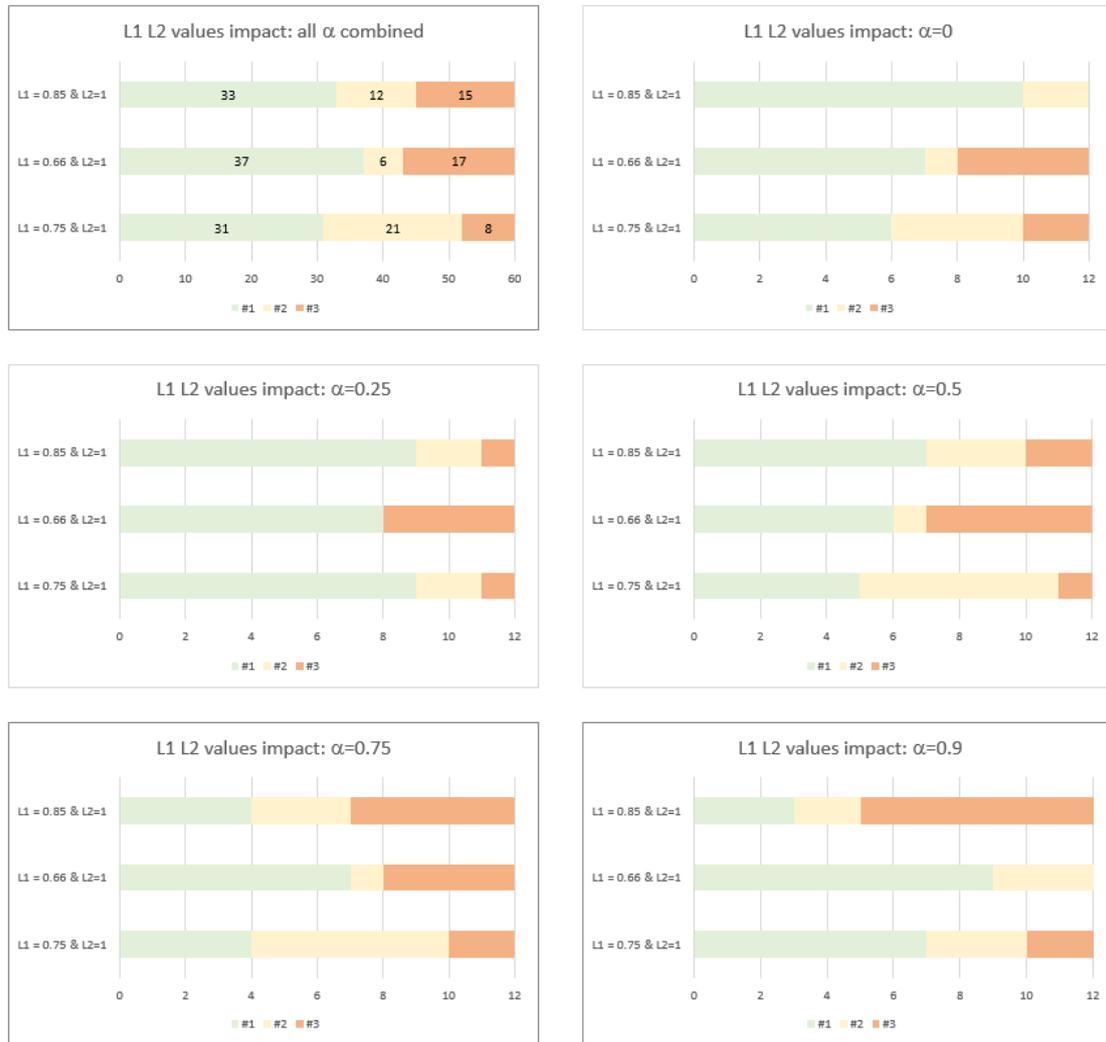


Figure 4.17 – classement des scores obtenus par les différents couples  $L1$  &  $L2$  pour différentes valeurs de  $\alpha$ , en version 2 modes

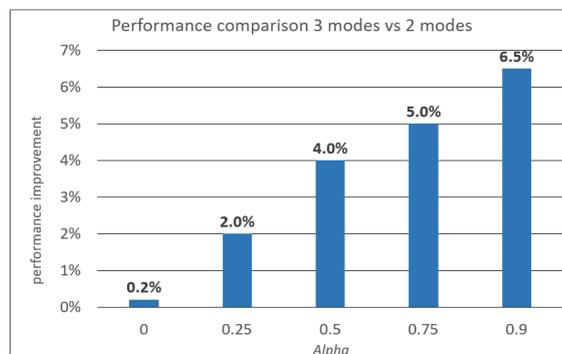


Figure 4.18 – Amélioration relative moyenne apportée par l'utilisation du mode coopératif pour différentes valeurs de  $\alpha$  pour les 12 instances de test.

### 4.3. SYNTHÈSE PARTIELLE

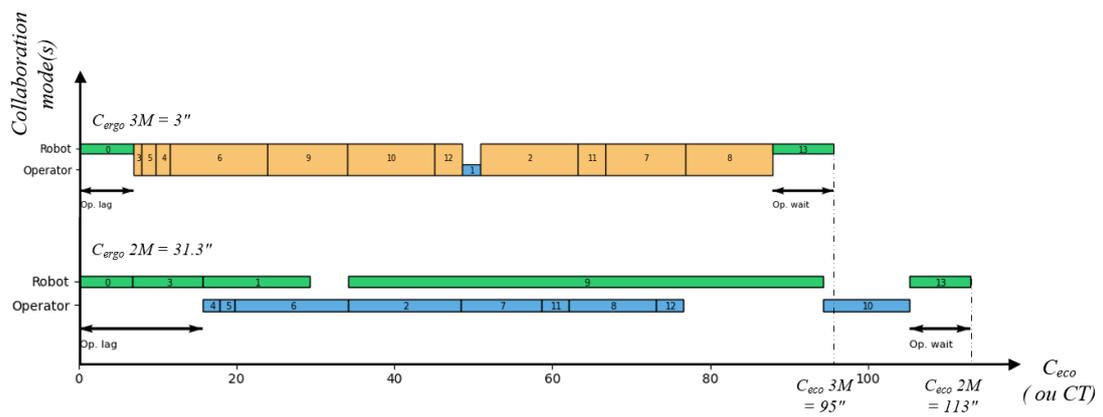


Figure 4.19 – Visualisation des meilleures solutions avec et sans coopération pour  $\alpha = 0.5$

## Chapitre 5

# Expérimentations des situations de co-intégration de la cobotique et des techniques lean

### Contenu

---

<b>5.1 Organisation générale</b>	<b>103</b>
<b>5.2 Phase '0 méthode'</b>	<b>103</b>
5.2.1 Création de process	104
5.2.2 Amélioration de la solution proposée	109
<b>5.3 Phase d'application des techniques lean</b>	<b>111</b>
5.3.1 Intervention sur les techniques lean	111
5.3.2 Cas d'étude : réduction du temps de cycle	112
5.3.3 Cas d'étude : intégration d'un effecteur double (vissage et préhension)	117
5.3.4 Cas d'étude : double objectif économique et ergonomique	120
5.3.5 Conclusion sur l'utilisation des techniques lean	121
<b>5.4 Recours à la méthode lean modifié</b>	<b>122</b>
5.4.1 Intervention	123
5.4.2 Initialisation	123
5.4.3 Premier cycle d'essais	124
5.4.4 Résultats du deuxième cycle d'itération : temps cobot modifiés	126
5.4.5 Discussion sur la phase d'utilisation de l'outil de résolution algorithmique ('lean modifié')	136
<b>5.5 Conclusion générale sur la campagne d'expérimentation</b>	<b>136</b>

---

Cette partie décrit le déroulement et les conclusions relatives à chaque cas d'étude, afin de répondre aux questions de recherche. Chaque cas sera brièvement décrit ainsi que ses objectifs. Les résultats obtenus par l'ensemble des équipes participantes seront ensuite explicités. La performance obtenue sera analysée au regard de la stratégie mise en place par chaque équipe, afin de déterminer les éventuels axes d'améliorations à apporter via des interventions appropriées. Des conclusions intermédiaires seront proposées pour chaque situation, avant une synthèse générale sur ce cycle d'expérimentation. Dans

---

la dernière phase relative à l'aide de la résolution mathématique du problème posé, nous effectuerons une analyse des apports et limites de l'outil développé à cette fin, avec des directions d'améliorations à envisager.

## 5.1. ORGANISATION GÉNÉRALE

Table 5.1 – Répartition des équipes sur les différentes mises en situation

Groupe	0 méthode'		Techniques lean						Support algorithme					
	Réduction CT		Réduction CT		Vissage		Ergo. et eco.		Réduction CT		Vissage		Ergo. et eco.	
	Créa.	Amélio.	Créa.	Amélio.	Créa.	Amélio.	Créa.	Amélio.	Créa.	Amélio.	Créa.	Amélio.	Créa.	Amélio.
A	•													
B	•													
C	•													
D	•	•												
E	•		•	•			•	•					•	•
F	•		•	•	•	•					•	•		
G	•		•	•					•	•				
total	7		3						3					

### 5.1 Organisation générale

Ces expérimentations ont eu lieu avec 7 groupes de 3 participants, auquel nous ferons référence par les lettres A à G. Chacun des groupes n'a pas nécessairement réalisé le même parcours expérimental, pour répondre à des contraintes de disponibilité. Les premières mises en situation étant nécessaires aux suivantes, mais étant aussi les plus ouvertes, elles regroupent le plus grand nombre de participants (voir table 5.1).

Les durées des sessions d'expérimentations étaient d'environ 4h chacune, et si certaines mises en situations se sont étendues sur plusieurs sessions, nous avons veillé à ce que les durées totales soient proches pour chacun des groupes participants aux mêmes mises en situation afin que les résultats restent comparables. Les sessions ont eu lieu sur la plateforme pédagogique et de recherche du LISPEN sur le campus de Lille, dans laquelle 3 stations de travail ont été installées. Les expérimentations ont porté sur un volume total de 192 heures sur l'ensemble des groupes, sur la période de Décembre 2020 à Mai 2021.

Ce chapitre sera structuré par l'application successive des 3 méthodes de résolution :

1. Essai non guidé ou '0 méthode', sur le cas d'étude de réduction de temps de cycle.
2. Application des techniques lean, sur l'ensemble des cas d'études.
3. Utilisation des solutions fournies par l'algorithme, sur l'ensemble des cas d'étude.

### 5.2 Phase '0 méthode'

Cette première phase reprend le même périmètre que les essais prototypes, présentés en section 4.2.1. Elle vise à clarifier les stratégies employées par les différentes équipes en l'absence de guidage, ce qui permettra de cerner les besoins d'interventions pour le second temps des expérimentations : le recours à la méthode lean (cette intervention avait été donnée a priori dans la phase prototype).

#### Initialisation

Les participants sont réunis en trinômes, les 7 équipes prennent part à cette phase. Trois d'entre elles (A, B, et C) sont constituées de jeunes ingénieurs de divers cursus (hors ENSAM) en formation continue (Master Spécialisé en robotique collaborative) au moment des expérimentations. Cet élargissement volontaire tente de proposer un premier élément de généralisation quant aux populations concernées. Les compétences et expériences dans les domaines lean et robotique ont été testées par un

questionnaire préliminaire suivi d'un entretien de confirmation. Il apparaît qu'un membre de l'équipe A a exercé en maintenance et possède une expérience de plusieurs années dans la programmation des robots industriels et a participé à plusieurs chantiers d'amélioration continue. Un des membres de l'équipe B possède lui aussi une expérience dans la programmation des robots industriels, mais aucune par contre dans l'utilisation des techniques lean. Les 4 autres équipes sont constituées d'élèves ingénieurs de deuxième année du cursus ingénieur de l'ENSAM (comme pour la phase d'expérimentation prototype), et ne possèdent pas encore de compétences sur les techniques lean au moment de commencer ce cycle d'essais.

Chaque équipe est positionnée sur un poste de travail (robot éteint), reçoit les outils et les composants nécessaires au montage du vérin, ainsi que des supports permettant de localiser les faces inférieures, supérieures, corps de vérin et tige piston. Les autres éléments sont fournis en vrac dans des boîtes dédiées. Les participants sont libres de disposer les composants sur l'espace de travail comme ils le souhaitent.

### 5.2.1 Création de process

La première phase consiste à assembler le vérin manuellement sans anomalie, après avoir visionné une vidéo de démonstration. Chaque équipe est laissée en autonomie le temps nécessaire (en général moins d'une heure), et quand elle estime que le process est stabilisé, elle réalise un premier enregistrement vidéo de 3 cycles consécutifs.

Les participants reçoivent ensuite une formation de 45' dispensée par l'expert robotique - Adrien Florit, pour couvrir les fonctions élémentaires de la programmation de trajectoires en point par point, le contrôle des effecteurs et les éléments de sécurité à considérer. À l'issue de la formation, l'ensemble des équipes est capable de réaliser une opération de 'pick and place' avec les composants à disposition. Un temps d'expérimentation libre leur est laissé afin de se familiariser avec les moyens à disposition, puis une deuxième formation leur est donnée sur la fonction de palettisation qui leur permettra d'enchaîner les cycles sans avoir à saisir la position de chaque composant.

L'étape de création du process collaboratif commence alors, et les participants sont laissés libres de choisir la stratégie qui leur semble pertinente. Les observations sont réalisées en continu par Anthony Quenehen, des questions ouvertes peuvent être posées aux participants pendant cette phase pour valider l'interprétation des éléments observés. Au cours de la création du process, les équipes reçoivent un questionnaire en lien avec leur ressenti sur l'efficacité de leur démarche et leur niveau de confiance sur l'obtention d'une solution performante. Ce questionnaire vérifie, même sommairement, que les équipes sont engagées sur l'objectif qui leur est fixé, afin d'écarter l'hypothèse d'une absence de motivation ou de découragement comme explication des performances obtenues (voir Annexe D). Un deuxième questionnaire sur leur évaluation des difficultés et des succès rencontrés (voir Annexe E) sera aussi utilisé en complément des observations pour interpréter les éléments de stratégie mis en place.

Une étape d'amélioration de la solution trouvée est ensuite proposée, sans guidage méthodologique supplémentaire, afin de déterminer si les participants arrivent à altérer les process qu'ils ont créés et en dégager une performance supérieure.

Table 5.2 – Synthèse des résultats obtenus pour la création des premiers process collaboratifs

Group	Overall Cycle Time (s)			Collaborative process breakdown					
				Operator			Cobot		
	Manual	Collab.	Evolution	Work (s)	Wait (s)	Transferred time (s)	Transfer ratio	Work (s)	Wait (s)
A	97.3	102.4	5.1	90.4	12	5.5	0.06	14.6	87.8
B	101.1	92.2	-8.9	92.2	0	3	0.03	9.4	82.8
C	114.9	114.4	-0.5	109.4	5	4.7	0.04	24	90.4
D	102.4	110.9	8.5	96.5	14.4	8	0.08	27.2	83.7
E	110.9	100.5	-10.4	97	3.5	3.3	0.03	8	92.5
F	92.4	101.4	9.0	88.9	12.5	5.1	0.06	16.6	84.8
G	76.5	72.9	-3.6	72.9	0	3.6	0.05	19.2	53.7

### Résultats, observations et analyse

A l'issue de l'étape de création de process, les réalisations des 7 groupes ont été analysées par des moyens vidéo et comparées (voir table 5.2). Leur performance globale (Overall Cycle Time - Temps de Cycle) compare le temps de cycle du process collaboratif (Collab. dans le tableau) du process réalisé au process manuel de départ (Manual) pour caractériser l'évolution obtenue. Pour permettre une analyse plus fine, les temps d'activité (Work) et d'attente (Wait) sont mesurés pour chaque ressource<sup>1</sup> Le temps de transfert (Transferred time) évalue le temps total d'opération manuelles affectées au cobot, et le transfer ratio (ratio de transfert) compare ce temps au temps de cycle manuel du process. Les temps de cycles obtenus pour les process cobotisés sont assez contrastés. En effet, certaines réalisations montrent des améliorations du temps de cycle, mais comportent des temps d'attente cobot (groupes B et E). Ces process sont ceux qui affichent les temps de cycle les plus élevés, notamment à cause d'un temps élevé consacrée aux tâches demandant une dextérité plus élevée (assemblage vissage des pattes de fixation), et qui ont pris comme stratégie le recours au mode coopératif sur ces tâches pour lever cette difficulté.

Cinq process affichent des temps d'attente opérateurs qui contribuent à l'allongement du temps de cycle. La majorité des groupes (5 sur les 7) ont adopté une stratégie décrite par la figure 5.1, c'est à dire sans tenter de créer un modèle de la situation réelle.

Deux stratégies appartenant à cette catégorie ont émergé : la première est une recherche de parallélisation des tâches entre l'opérateur et le robot, la deuxième est la recherche de diminution du temps de chacune des tâches par l'utilisation du cobot en mode coopératif pour en retirer une partie du contenu. Le groupe D concevra un process qui fait appel aux deux approches de façon concurrente.

Le mode synchronisé est naturellement sollicité sur le premier type de stratégie, dès que la tâche est estimée réalisable par le cobot. Il n'y a pas de considération à ce stade sur la durée des tâches dans le mode manuel, ni de projection de leur durée pour le mode cobot, la faisabilité occupant a priori l'essentiel des considérations. La séquence générale du process d'origine n'est pas remise en cause. L'intention exprimée par les participants est : *"si on retire des tâches à l'opérateur pour les donner au cobot, il finira plus vite son process, donc le temps de cycle sera réduit"*. Ce verbatim illustre qu'à ce stade, la notion de précedence n'est pas envisagée comme une contrainte. Elle n'influence a priori

1. en mode coopératif, le cobot est réputé en attente lorsqu'il est immobile, même si il tient un composant ou un sous ensemble.

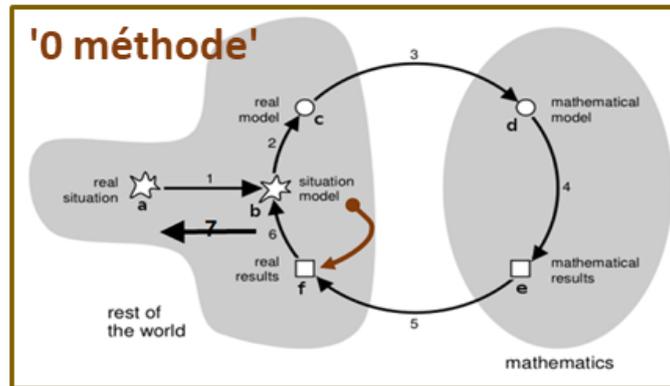


Figure 5.1 – Adaption du cycle de Blum '0 méthode'

pas le choix des opérations à cobotiser, pour pouvoir conserver des tâches à réaliser par l'opérateur pendant le travail du cobot.

Concernant la séparation homme-machine, 2 groupes se sont confrontés à des situation pénalisantes, par exemple avec une activation du cobot placée au début de sa séquence plutôt qu'à la fin (voir figure 5.2, cas 1), générant un temps d'attente pour l'opérateur n'ayant pas de tâche à réaliser (voir séquence sur la première partie de ce lien<sup>2</sup>). Un deuxième dysfonctionnement 'symétrique' est le lancement simultané de tâches pour l'opérateur et le cobot, sans qu'un point de validation de fin de tâche pour l'opérateur lui permette de donner l'information au cobot qu'il peut enchaîner sur son opération suivante (voir figure 5.2, cas 2). Dans ce cas l'opérateur doit nécessairement achever la sienne avant le cobot pour éviter qu'un composant soit par exemple lâché dans le vide par exemple par le cobot qui poursuit sa partie de process (voir la séquence concernée sur la deuxième partie de ce lien<sup>3</sup>). Un meilleur compromis sur cette séquence pouvait être obtenu par le cas 3 de la figure 5.2, qui en dissociant les 2 tâches du cobot permet une activation plus tardive et un temps d'attente réduit. On remarquera aussi une faible utilisation du cobot, et donc in fine un faible niveau de parallélisation (voir inexistant dans certains cas). Le temps d'attente du cobot est augmenté par le fait que l'on n'observe pas de recouvrement entre les cycles pour certains process, c'est à dire qu'il n'y a qu'une pièce en cours de réalisation tout au long de l'activité d'assemblage. Ce point est possiblement lié à la stratégie linéaire de départ de substitution en l'état des opérations initialement manuelles, sans qu'il soit prévu de zone dédiée où le cobot puisse enchaîner les opérations.

Pour la stratégie visant à diminuer la durée des tâches par l'utilisation du mode coopératif, les participants ne cherchent pas à évaluer le gain sur chaque tâche par une mesure. Les tâches n'étant pas mises en parallèle (l'opérateur et le cobot travaillent simultanément sur la même tâche), les contraintes de précédence et le besoin de séparation homme-machine ne se manifestent pas. Par contre, l'impossibilité a priori de paralléliser les tâches génère des temps d'attente pour l'opérateur lors de certains mouvements du cobot (présentation du corps de vérin à hauteur d'opérateur), que l'opérateur remplit avec des double manipulations de pièce, qui remplace un muda d'attente par un muda de mouvement

2. <https://youtu.be/6PYTqgOjaJs>

3. <https://youtu.be/6PYTqgOjaJs>

## 5.2. PHASE '0 MÉTHODE'

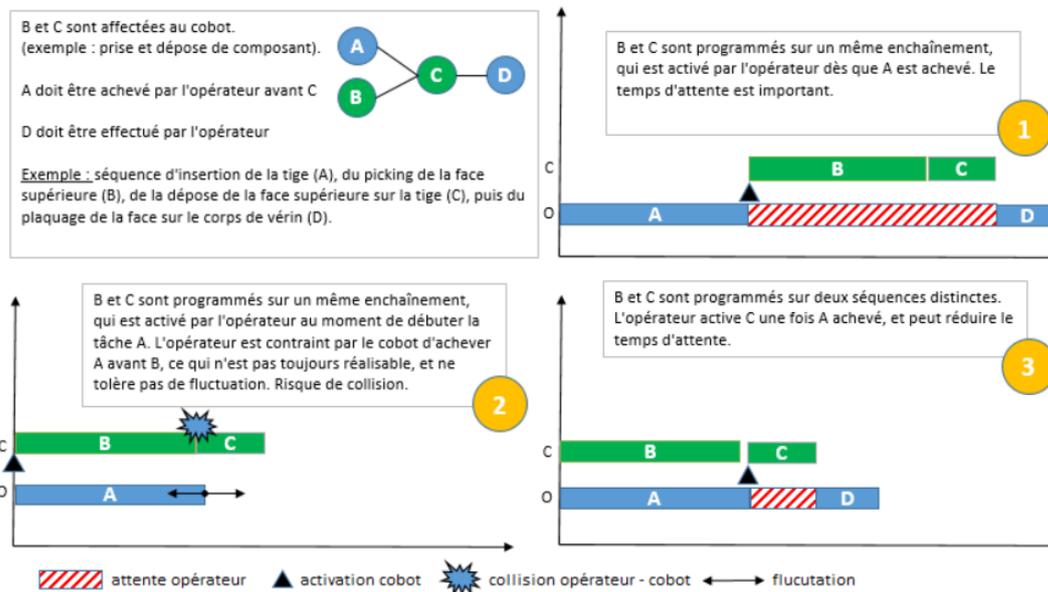


Figure 5.2 – Différents choix de séparation homme-machine et leur impact sur le temps d'attente opérateur.

excessif (voir la première partie de ce lien vidéo<sup>4</sup>). Ce cas de figure n'est pas systématique et on constate aussi que le groupe B qui a adopté cette stratégie met ce temps à profit pour réaliser un sous assemblage de connecteur pneumatique pendant que le corps de vérin est manipulé par le cobot<sup>5</sup>. (voir la deuxième partie du même lien vidéo<sup>6</sup>).

Pour les deux dernier groupes (C et G), on observe une tentative de modélisation de la situation réelle, toujours couplée avec la stratégie annoncée de paralléliser les tâches. Dans ces deux cas, le process manuel va être découpé en tâches, sur la base d'enregistrement vidéos réalisés par les participants eux-mêmes. Cette activité va être la première de cette phase pour ces groupes, qui commenceront à manipuler les cobots plusieurs heures après les autres. Dans les deux cas, les groupes prendront l'hypothèse que les temps de tâches sont identiques pour l'opérateur et le cobot. Malgré cette simplification, on peut noter que la stratégie de parallélisation est cette fois-ci mise en oeuvre en tenant compte de l'intégralité du process et la possibilité d'envisager plusieurs chemins de solution. Le groupe C identifiera les contraintes de précédence, et tentera de les visualiser sous un diagramme de type PERT (voir figure 5.4), en faisant donc appel à des connaissances externes au cadre d'expérimentation<sup>7</sup>. Ce groupe tentera aussi une visualisation du résultat final sur un chronogramme, qui présente des similitudes avec les tables de combinaison (voir figure 5.3). On constate une correspondance très relative entre la conception et le process réel, reconnue par les équipes elles-mêmes, qui témoigne de difficultés

4. <https://youtu.be/JvnLPeR8b-o>

5. Le questionnaire préalable à cette séquence a révélé qu'un membre de ce groupe était familier des activités d'amélioration continue, et avait notamment eu l'occasion d'effectuer des campagnes de réduction de temps de cycle sur des process de robotique industrielle

6. <https://youtu.be/JvnLPeR8b-o>

7. Il s'agit d'un groupe d'un des groupes issus du Master Spécialisé, dont un des membres possédait des connaissances sur cette technique qu'il a jugé opportunes pour ce cas.

## 5.2. PHASE '0 MÉTHODE'

à exploiter les valeurs numériques du modèle. Selon les participants, ce modèle a principalement servi à confirmer les choix d'affectation et d'enchaînement de tâches pour former une solution qui paraissait satisfaisante, sans avoir de confiance a priori que son implémentation permettrait d'atteindre l'objectif de réduction de temps de cycle.

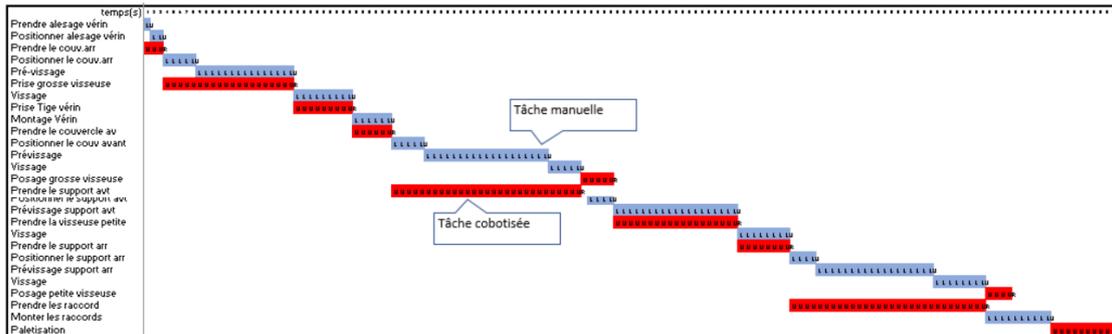


Figure 5.3 – tentative de représentation temporelle du process cobotisé lors de sa phase de création - groupe C

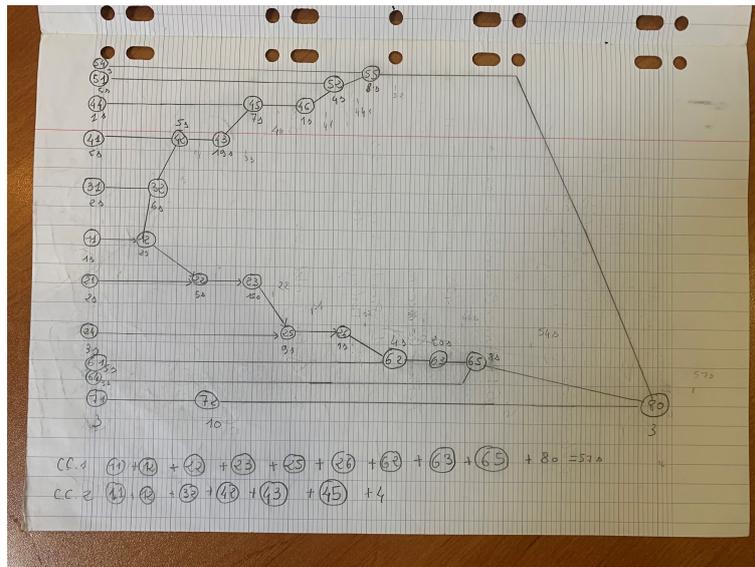


Figure 5.4 – Tentative de visualisation d'un process cobotisé en tenant compte des précédences - groupe C

Le questionnaire rempli par les 7 équipes participantes à cette mise en situation a mis en évidence une prédominance des préoccupations techniques sur les considérations méthodologiques lors de cette phase<sup>8</sup> (voir figure 5.5). Une explication pourrait être la nouveauté de prise en main du cobot

8. Les retours libres des participants ont été répartis dans chaque catégorie en fonction de mots clés. Pour la partie "technique", nous avons retenu les termes : "programmation", "trajectoire", "positionnement", "palettisation", "syntaxe", "logiciel", "réglage", "potentiel du cobot". Pour la catégorie "méthodologie", ont été retenus comme mots-clés : "parallélisation de tâches", "efficacité opérationnelle", "agencement du poste", "méthode de découpage (des tâches)".

qui occulte les aspects méthodologiques de la construction de process. Une autre possibilité est une faible appréhension de ces aspects dans la construction de process. C'est pourquoi un des groupes (*D*) sera détaché pour tenter d'itérer sur le process pour déterminer si en l'absence d'intervention spécifique, l'augmentation de la pratique seule permet d'identifier des opportunités d'améliorations d'ordre méthodologique.

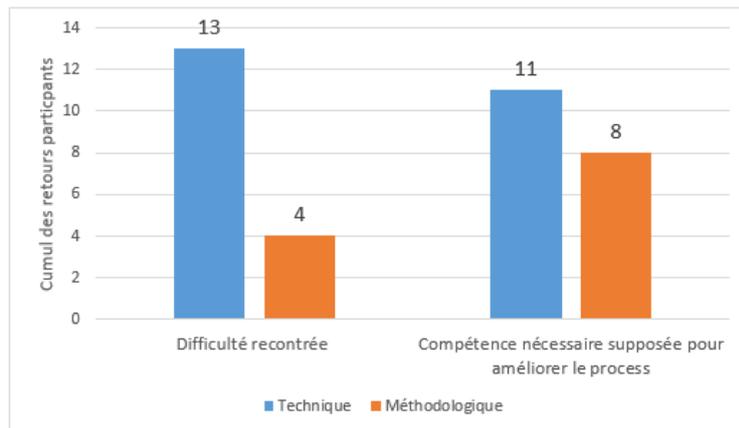


Figure 5.5 – Synthèse du retour de perception sur la création du premier process cobotisé (phase '0 méthode'). Décompte des commentaires mentionnant les aspects techniques ou méthodologiques à l'issue de la création de process

### 5.2.2 Amélioration de la solution proposée

L'étape d'amélioration du process créé a été proposée à un des groupes de participants. Quatre versions additionnelles du process d'origine ont été créées, toujours dans l'objectif de réduire le temps de cycle. La synthèse des résultats est disponible sur la table 5.3, et les enregistrements vidéo sur ce lien<sup>9</sup>. Au final les itérations n'ont pas apporté d'amélioration et ont même dégradé le temps de cycle. Nous avons réalisé des observations analogues à la phase précédente de création de process : les temps d'attente opérateur ont été occupés par des opérations elles-mêmes sans valeur ajoutée, alors que le principe d'amélioration continue préconise plutôt d'éliminer la source de l'attente, ou de l'utiliser pour paralléliser une tâche vers l'opérateur ce qui lui permettra de redevenir menant sur le process. Aussi, de façon comparable à l'étape précédente, le temps d'attente opérateur en début de cycle n'est pas modifié alors que des solutions simples sont disponibles, comme le transférer la tâche d'approvisionnement des vis vers l'opérateur. Une autre constatation est que les améliorations simples ne sont pas toujours considérées, comme de rapprocher les sous-composants de leur point de montage, afin de diminuer leur temps de transport, qu'il soit effectué par le cobot ou l'opérateur. Si l'équipe arrive à générer des améliorations ergonomiques (non recherchées à ce stade), on constate en proportion moins de tentatives de réduire le temps de cycle pour lesquelles on peut supposer que l'évaluation du résultat est plus difficile à établir. Les dernières itérations (V4 et V5, voir annexe F) semblent toutefois converger vers une démarche plus structurée : des retours en arrière sont effectués sur des améliorations finalement non fructueuses, et des recherches d'optimisation de trajectoire robot

---

9. <https://youtu.be/1u327rDeHRM>

## 5.2. PHASE '0 MÉTHODE'

Table 5.3 – Synthèse des itérations sur le premier process cobotisé du groupe D

Iteration	overall result		Collaborative process breakdown					
			Operator			Cobot		
	Collab.	evolution	work (s)	wait (s)	transfer time (s)	transfer ratio	work (s)	wait (s)
Version 1	110,9	N/A	96,5	14,4	8	0,08	27,2	83,7
Version 2	110,9	0	96,5	14,4	10,9	0,11	33,4	77,5
Version 3	112,8	1,9	96,9	15,9	10,9	0,11	34,08	78,72
Version 4	112,8	0	96,9	15,9	11,9	0,12	37,08	75,72
Version 5	112,8	0	96,9	15,9	10,9	0,11	34,08	78,72

sont réalisées afin de réduire la durée des tâches associées. L'équipe commence donc à développer des compétences techniques, même si elle rencontre des difficultés à les transcrire en amélioration de performance, plutôt par un déficit de méthodologie à ce stade des expérimentations.

### Synthèse intermédiaire sur la phase '0 méthode'

Pour l'ensemble des groupes, le choix de la méthode de mesure du temps de cycle était libre pour cette première série d'essais. La plupart des équipes ont divisé le temps de réalisation des 3 assemblages par 3, établissant ainsi une valeur moyenne, sans refléter les fluctuations de chaque cycle. Ainsi plusieurs équipes déclareront avoir amélioré le temps de cycle entre la phase manuelle et cobotisé, alors qu'une analyse des temps d'opérations répétables montrent une dégradation. L'amélioration perçue étant due à une moindre fluctuation des opérations manuelles lors de l'exécution du process cobotisé (sans lien avec sa conception).

D'autre part, il se confirme que les tentatives de modélisation ne sont pas systématiques pour résoudre le problème posé. On peut faire l'hypothèse que la croyance que l'adjonction d'une ressource technique comme le cobot porte l'idée que son implémentation technique est une condition suffisante à l'amélioration de son environnement. Dans ces cas si l'idée de parallélisation (majoritaire) est judicieuse, la stratégie et les actions mises en œuvre ne sont pas en cohérence, car de nature trop 'pas à pas' pour s'affranchir de la complexité du problème, ce qui se manifeste par des problèmes de séparation homme-machine, qui empêchent une synchronisation efficace des ressources, et du recouvrement entre les cycles. D'une façon prévisible, les mudas ont du mal à être identifiés et traités, faute de connaissance associées.

Pourtant des tentatives de production de situations modèles peuvent aussi être observées, cernant correctement les contraintes de mise en œuvre de la stratégie visée, et centrées sur l'objectif à atteindre. A ce stade ces stratégies ne se révèlent pas systématiquement plus performantes, faute de capacité de mise en œuvre.

Aucun groupe ne témoigne de difficulté technique liée à l'utilisation du cobot, ce qui est aligné avec les réalisations. La difficulté se manifeste en effet sur le plan méthodologique, où la plupart des équipes adoptent spontanément une méthode pas à pas, sous-tendue par une hypothèse sur l'apport bénéfique du cobot (parallélisation des tâches ou réduction de leur durée). On peut supposer que ce comportement est le résultat d'une situation trop ouverte, où les participants n'ont pas la capacité de

traiter les nombreuses incertitudes liées au problème posé. Ce déséquilibre, au sens de Brousseau [111], représente un frein significatif au processus d'apprentissage en situation de résolution de problème. Ces points d'observations seront donc pris en compte pour élaborer une intervention auprès des participants pour structurer un cadre méthodologique qui leur permettra de prendre conscience des limites de leur réalisations, et d'intégrer des lignes directrices basées sur les techniques lean, qui permettront de développer une meilleure efficacité sur les phases de création et d'amélioration de process.

## 5.3 Phase d'application des techniques lean

Cette phase d'expérimentation va porter sur les 3 cas d'études, qui ont en commun l'utilisation des techniques lean :

- Réduction de temps de cycle (3 équipes participantes,  $E, F, G$ )
- Intégration d'un effecteur de vissage (1 équipe,  $F$ )
- Amélioration économique et ergonomique du process (1 équipe,  $E$ )

Afin de respecter une progressivité dans la difficulté, les groupes concernés par les cas d'études plus complexes ( $F$  et  $G$ ), effectueront d'abord, comme le groupe  $E$ , une mise à l'essai de la méthode lean sur le cas d'étude le moins complexe, qu'ils viennent de tenter de résoudre sans cadre méthodologique.

### 5.3.1 Intervention sur les techniques lean

La première étape de cette phase est une intervention réalisée pour apporter aux participants les connaissances sur les techniques lean les plus à même de leur permettre de résoudre le problème auquel ils viennent d'être exposés. L'intervention a porté sur les concepts détaillés dans les chapitres précédent, en s'appuyant sur des exemples vidéos tirés des situations rencontrées par les participants. Les points abordés ont été les suivants :

- Déterminer un temps de cycle exploitable : chrono-analyse (outil associé : feuille d'enregistrement).
- Visualiser les temps de travail et d'attente de chaque ressource (outil associé : table de combinaison).
- Principe jidoka et séparation homme-machine :
  - Le robot doit réaliser sans arrêt l'ensemble des tâches d'une séquence ne nécessitant pas l'intervention de l'opérateur.
  - L'opérateur doit éviter d'être en situation d'observateur du cobot (attente).
- Techniques de réduction de temps de cycle : élimination ou réduction des mouvements et opérations sans valeur ajoutée.

L'objectif est de donner un cadre qui permette aux participants de systématiquement créer une situation modèle du problème qui leur est posé (feuilles d'enregistrement et table de combinaison), et qui leur offre un retour objectif donc exploitable sur les effets de leur actions (par anticipation et/ou vérification). Concernant la recherche de solutions, nous formons l'hypothèse que les principes d'action génériques (jidoka, réduction des déplacements) réduiront le niveau des d'incertitudes présentes dans le problème posé.

### 5.3.2 Cas d'étude : réduction du temps de cycle

#### 5.3.2.1 Etape de création de process.

##### Initialisation

Les participants sont invités à caractériser leur process avec les outils proposés (feuille d'enregistrement process et tables de combinaisons). Une fois cette visualisation disponible, les participants essaient de mettre en œuvre les principes vus pour réaliser un process plus efficace. Cette étape de conception se déroulera sur une plage de 4 à 6 heures selon les groupes, en incluant la réalisation du nouveau process et son évaluation au moyen des mêmes outils.

##### Résultats et observations

Sur la sous-étape de visualisation du process, qui crée la situation modèle, 2 groupes sur 3 ont manifesté des difficultés à se représenter le phénomène de recouvrement. En effet, leur table de combinaison n'indiquait pas la fin du temps de cycle comme la fin de la dernière opération manuelle (alors qu'à cet instant le robot travaille déjà sur la pièce suivante), mais à la fin des tâches du cobot, postérieure à l'opérateur. On peut interpréter cette difficulté pour ces deux groupes par le fait que leurs process respectifs n'exploitaient pas le recouvrement, avec une seule pièce présente sur le poste. Cette difficulté a été levée en visualisant le second cycle d'une vidéo d'un process exploitant ce principe, où l'on voit distinctement qu'au début des opérations manuelles (début du décompte du temps de cycle), le robot est déjà actif sur d'autres tâches, et qu'à la fin du cycle manuel, le robot est déjà en action sur des tâches liées à la pièce suivante. Cette visualisation a été ressentie comme efficace par les étudiants, qui ont pu grâce à elle se faire une représentation mentale de la table de combinaison<sup>10</sup>.

D'une façon générale, les process ont été améliorés sur l'objectif de réduction de temps de cycle. Si l'on considère les critères de temps d'attente opérateur, de ré-agencement du poste de travail, de l'amélioration des déplacements, et du taux d'utilisation du cobot, on peut constater une amélioration sur l'ensemble des groupes (voir table 5.4). Les enregistrements vidéos sont disponibles sur ce lien<sup>11</sup>. Certains temps d'attente opérateurs ont persisté (groupe *F*), même si ils ont pu être réduits. Ceci renvoie à l'observation de la phase précédente, où il peut être difficile pour les participants de revenir sur la conception de séquences cobotisées, au regard du travail de programmation déjà réalisé. On notera aussi des situations où les équipes envisagent les améliorations à apporter de façon moins linéaire, en mettant donc en concurrence plusieurs approches. Par exemple le groupe *F* a exprimé le souhait de réduire le temps de vissage des pattes de fixation. Cette opération a un enjeu de dextérité, car il faut maintenir en position la patte de fixation pendant le pré-vissage des deux vis. La première piste envisagée a été d'utiliser le robot en mode coopératif pour le maintien de la patte, solution qui a du être abandonnée pour des problèmes d'encombrement de la partie effecteur qui empêche le vissage simultané. L'équipe a alors conçu et réalisé un support en prototypage rapide pour réaliser la même fonction, et ainsi réduire la fluctuation de cette séquence.

On constate aussi que les manipulations inutiles sont maintenant reconnues comme telles (notam-

---

10. cette méthode de transmission s'est révélée efficace et constitue une amélioration de l'intervention que nous nous efforcerons d'intégrer dans de futures interventions

11. <https://youtu.be/SaKt6GabUtA>

### 5.3. PHASE D'APPLICATION DES TECHNIQUES LEAN

Table 5.4 – Synthèse des process recréés après l'intervention lean

Group	Overall Cycle Time (s)			Collaborative process breakdown					
	'0 méthode'	Lean	Evolution	Operator			Cobot		
				Work (s)	Wait (s)	Transferred time (s)	Transfer ratio	Work (s)	Wait (s)
E	100.5	90.7	-9.8	87.7	3	7.9	0.07	10.9	79.8
F	101.4	87.7	-13.7	71.1	16.6	12.8	0.14	37.4	50.3
G	74.4	71.3	-3.1	71.3	0	6.7	0.09	23.2	48.1

ment pour le groupe *E*), et que des tentatives sont faites pour inclure des tâches additionnelles dans le temps d'attente de début de cycle, plutôt que de tenter d'anticiper les tâches à venir par des double manipulations qui se révèlent finalement inefficaces.

#### Synthèse intermédiaire sur la phase de création de process

Il apparaît qu'au delà des outils techniques et méthodologiques mis à disposition, la démarche d'amélioration se structure autour de l'objectif à atteindre, les considérations sur les moyens à employer arrivent dans un second temps, et sont mises en concurrence. On peut faire l'hypothèse que ce phénomène est le résultat du rééquilibrage au sens de Brousseau [111] du niveau d'incertitude (identique à celui de la section précédente) : les participants ont les moyens de mesurer les impacts de leurs actions, et en comprennent l'importance à travers les outils qui permettent de créer une situation modèle. Ils sont donc incités à persévérer si une amélioration leur paraît essentielle, ce qui réduit le champ des options à explorer. Les retours des participants confirment de façon qualitative cette situation (voir figure 5.6) : les compétences mises en jeu spontanément citées à l'issue de cette étape sont à la fois d'ordre technique (maîtrise du cobot) et méthodologiques (recherche d'optimalité dans le process). De façon cohérente, on observe que les préoccupations des participants se focalisent sur les aspects méthodologiques, plus fréquemment cités pour les améliorations apportées et les difficultés rencontrées.

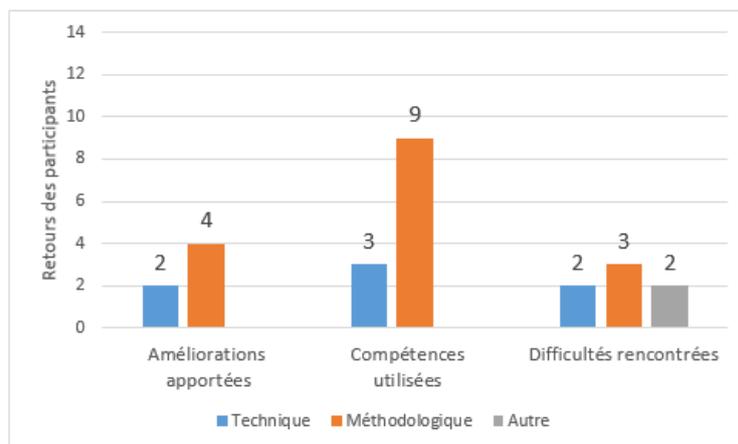


Figure 5.6 – Synthèse du retour de perception de la création de process cobotisé suite à l'intervention sur les techniques lean

### 5.3.2.2 Phase d'amélioration du process cobotisé

Cette phase a été conduite par 2 groupes ( $E$  et  $G$ ), le dernier groupe ( $F$ ) étant détaché sur la préparation de l'intégration de la visseuse pour sa mise en situation suivante. Sans guidage additionnel, ils ont pu réaliser des modifications sur les process qu'ils venaient de réaliser.

#### Résultats et observations

Les 2 équipes ont réussi à améliorer la performance de leur process respectifs, et à annuler les temps d'attente opérateur s'il y en avait (voir table 5.5). Sur cette phase différentes dimensions de l'amélioration ont été être mises en œuvre : ré-implémentation du poste de travail, transfert d'opérations supplémentaires vers le cobot, et amélioration de trajectoire. Pour le groupe  $G$ , notamment, la dimension itérative de la démarche s'est manifestée sur l'exploitation progressive du temps d'attente du cobot (voir figure 5.7), qui a été mise à profit pour le pré-positionnement des vis sur les faces supérieures et inférieures. Ce groupe a reconstitué un objectif sur le temps de cycle, identique au 'temps de cycle idéal' décrit dans le chapitre précédent, pour lequel l'opérateur et le cobot sont également chargés. Pour cela ils ont formulé une hypothèse sur le facteur  $k$ , en le fixant arbitrairement à la valeur 2, pour estimer la quantité d'opérations transférables depuis l'opérateur vers le cobot. On voit à ce stade les prémices de tentative de résolution mathématique, au sens du cycle de Blum. Le ré-agencement du poste de travail est adapté au fil de l'eau dans cette activité de transfert pour minimiser les déplacements du cobot pour chaque nouvelle configuration. Ainsi les différentes composantes de l'amélioration continue semblent s'organiser de façon cohérente et complémentaire, et permettent l'amélioration de la performance.

#### Synthèse intermédiaire sur l'étape d'amélioration de process

Des actions d'amélioration ont pu être mises en place dans les 2 équipes testées. Globalement elles font appel à l'ensemble des outils et principes partagés pendant l'intervention, et valident la possibilité de reprendre des cycles d'amélioration itérative sur un process qui répond mieux aux critères lean. Les effets sont visibles sur la performance obtenue. D'un point de vue du processus de résolution mis en place par les participants, les outils proposés permettent visiblement de créer une situation modèle. On note aussi à travers cette étape que les participants commencent à élaborer des méthodes de résolution qui visent à formuler des résultats théoriques, avant leur implémentation réelle, et pour cela ils identifient certaines des variables impactantes. En effet, pour la première fois il est fait référence à l'estimation du temps d'exécution de tâche par un cobot, en fonction de sa durée en mode manuel.

Table 5.5 – Résultat des phases d'amélioration de process pour les groupes E et G

Group	Overall result		Collaborative process breakdown						
			Operator			Cobot			
	CT	Evolution	Work (s)	Wait (s)	Transfer time (s)	transfer ratio	work (s)	wait (s)	
E	original	90.7		87.7	3	7.9	0.07	10.9	79.8
	iteration	87.7	-3	87.7	0	6	0.05	8.5	79.2
G	original	71.3		71.3	0	6.7	0.09	23.2	48.1
	iteration	70.3	-1	70.3	0	7.7	0.10	30.7	39.6

### 5.3. PHASE D'APPLICATION DES TECHNIQUES LEAN

Verrin C19 - Montage : hybride*3 N°4 - Vitesse 100% - 10/03/2021										
Ordre	Étape	Réalisateur	Étape	N°pièce	Pièce 1	Pièce 2	Pièce 3	Pièce 4 factice	Moyenne temps	Gain (%) / relevé précédent
Cobot	Positionnement corps verrin		Début	n+1	00:00:08	00:00:04	00:00:35	00:02:07	00:03:34	00:00:07
			Fin		00:00:12	00:00:04	00:00:41	00:02:14	00:03:41	00:00:07
Cobot	Chape inférieure		Début	n+1	00:00:12	00:00:06	00:00:41	00:02:14	00:03:41	00:00:06
			Fin		00:00:18	00:00:06	00:00:46	00:02:19	00:03:47	00:00:06
Cobot	Donner tige verrin		Début	n+1	00:00:18	00:00:06	00:00:46	00:02:19	00:03:47	00:00:06
			Fin		00:00:24	00:00:06	00:00:52	00:02:25	00:03:53	00:00:06
OP	Start OP			n		00:00:18	00:01:52	00:03:18		
			Positionnement							
			Début	n	00:00:19	00:00:03	00:01:53	00:03:19	00:00:02	00:00:02
			Fin		00:00:22	00:00:03	00:01:55	00:03:21		
			Visage	n						
			Début	n	00:00:23	00:00:10	00:01:56	00:00:09	00:03:23	00:00:09
			Fin		00:00:33	00:00:10	00:02:05	00:03:32		
			Tige verrin	n	00:00:35	00:00:03	00:02:06	00:00:03	00:03:34	00:00:02
			Fin		00:00:38	00:00:03	00:02:09	00:03:36		
			Chape supérieure	n	00:00:39	00:00:02	00:02:09	00:00:02	00:03:38	00:00:01
			Fin		00:00:41	00:00:02	00:02:11	00:03:39		
			Positionnement							
			Début	n	00:00:42	00:00:02	00:02:12	00:00:02	00:03:41	00:00:04
			Fin		00:00:44	00:00:02	00:02:14	00:03:45		
			Visage	n						
			Début	n	00:00:46	00:00:11	00:02:16	00:00:09	00:03:47	00:00:09
			Fin		00:00:57	00:00:11	00:02:25	00:03:56		
			Équerre 1	n	00:00:59	00:00:01	00:02:26	00:00:01	00:03:57	00:00:01
			Fin		00:01:00	00:00:01	00:02:27	00:03:58		
			Positionnement							
			Début	n	00:01:01	00:00:06	00:02:28	00:00:05	00:03:59	00:00:05
			Fin		00:01:07	00:00:06	00:02:33	00:04:04		
			Visage	n						
			Début	n	00:01:09	00:00:09	00:02:35	00:00:08	00:04:05	00:00:08
			Fin		00:01:18	00:00:09	00:02:43	00:04:13		
			Équerre 2	n	00:01:18	00:00:02	00:02:44	00:00:02	00:04:17	00:00:02
			Fin		00:01:20	00:00:02	00:02:46	00:04:21		
			Positionnement							
			Début	n	00:01:21	00:00:07	00:02:47	00:00:04	00:04:25	00:00:04
			Fin		00:01:28	00:00:07	00:02:51	00:04:31		
			Visage	n						
			Début	n	00:01:28	00:00:09	00:02:53	00:00:11	00:04:34	00:00:11
			Fin		00:01:37	00:00:09	00:03:04	00:04:40		
			Embouts	n	00:01:38	00:00:11	00:03:06	00:00:10	00:04:47	00:00:10
			Fin		00:01:49	00:00:11	00:03:16	00:04:57		
			End OP			00:01:50	00:03:17	00:04:43		
			Temps process robot	n		00:00:16	00:00:17	00:00:19	00:00:18	00:00:18
			Tps attente robot	n+1			00:01:15	00:01:09	00:01:12	00:01:12
			Tps OP=Temps de cycle	n		00:01:32	00:01:25	00:01:25	00:01:27	00:01:27
			Gain de temps potentiel	n			00:00:38	00:00:35	00:00:36	00:00:36
			Temps de cycle idéal	n			00:00:48	00:00:51	00:00:49	00:00:49

Le temps d'attente robot (1'15"), est divisé par 2 pour établir le gain de temps potentiel (38")

Figure 5.7 – Feuille de découpage de temps de l'équipe G, avec exploitation du temps d'attente du cobot

Enfin, les compétences acquises sont utilisées de façon concurrente, et cela amène à reconsidérer en partie le modèle proposé au chapitre précédent (cf. section 4.2.1.3) : pour maintenir le facteur  $k$  à un niveau bas, les participants ont non seulement eu recours à leurs connaissances techniques, mais ont aussi altéré l'espace de travail pour minimiser la longueur des nouveaux déplacements à effectuer par le cobot (voir figure 5.8 - itérations 1 à 3). D'autre part, le transfert des opérations vers le cobot (initialement associé aux compétences lean), est aussi rendu possible par une élévation des compétences techniques, comme l'illustre l'opération de dépose des vis dans les faces supérieures et inférieures. En effet, cette opération nécessite une combinaison de fonctions de pallétisation (une pour les vis, une pour la face) qui représente une augmentation de la complexité du programme à réaliser.

### 5.3. PHASE D'APPLICATION DES TECHNIQUES LEAN

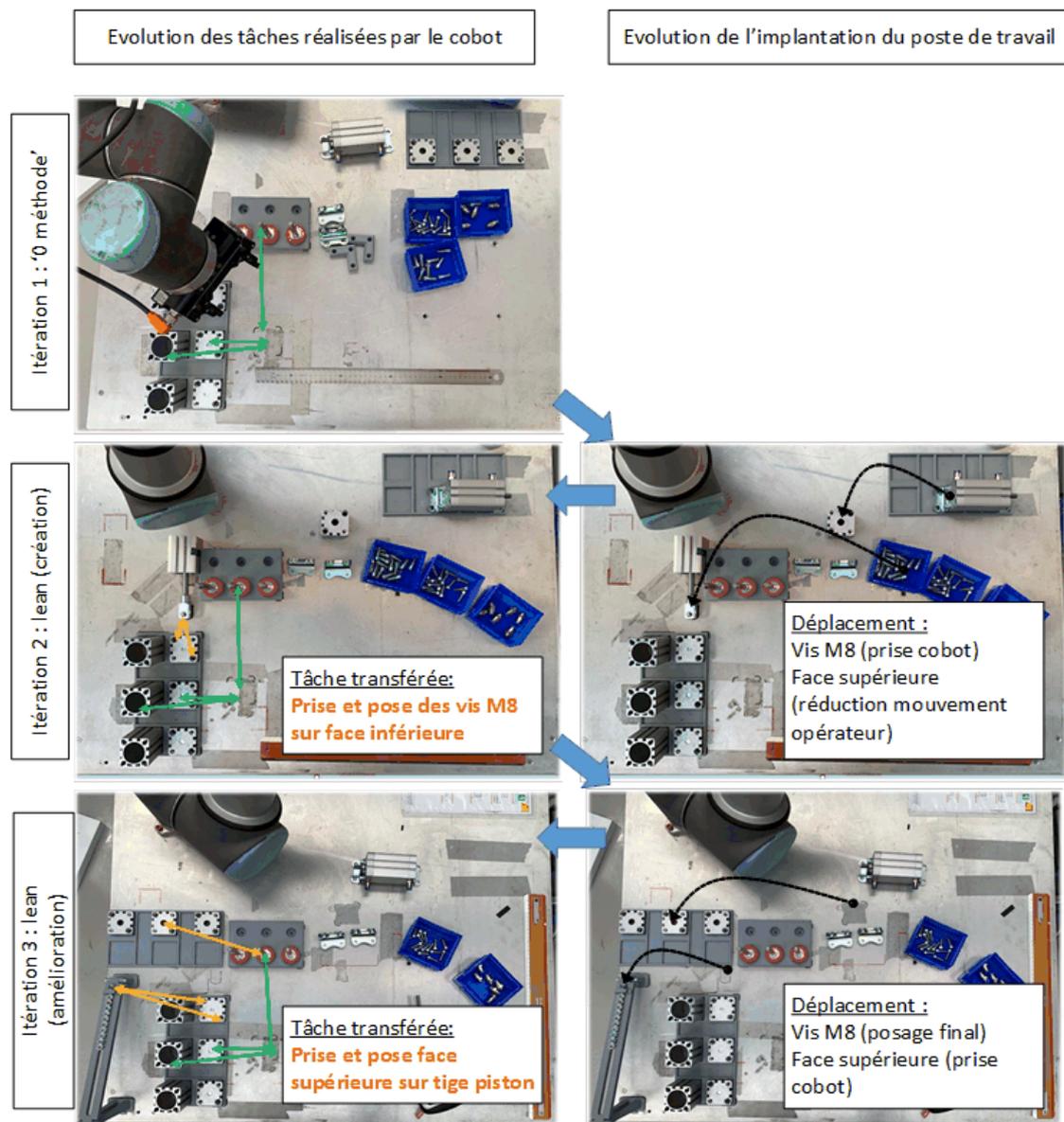


Figure 5.8 – Evolution de l'implantation du poste de travail du groupe  $G$  suite à l'évolution de la séquence de tâches transférées au cobot

### 5.3.3 Cas d'étude : intégration d'un effecteur double (vissage et préhension)

Dans le but de tester l'intérêt de pouvoir transférer des opérations à valeur ajoutée au cobot, et les spécificités d'implémentation qui pourraient y être liées, un effecteur double de préhension et de vissage a été prototypé pour être utilisé dans cette phase d'expérimentation (voir figure 5.9).

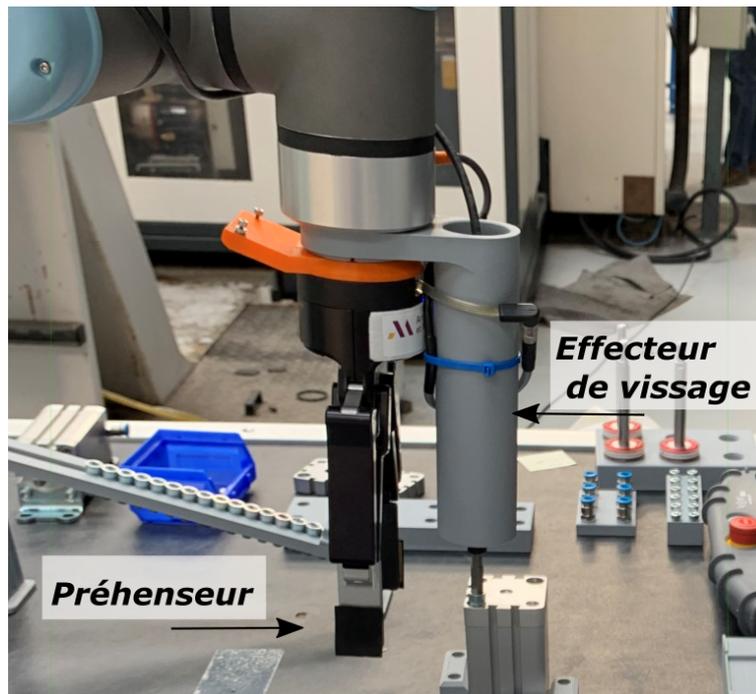


Figure 5.9 – Effecteur double réalisé pour permettre de transférer certaines opérations de vissage au cobot (groupe F)

#### Initialisation

L'équipe *F* a été sélectionnée pour cette mise en situation. Ayant exprimé l'intérêt potentiel d'utiliser le robot pour les opérations de vissage, nous avons supposé qu'elle montrerait un niveau d'engagement élevé pour développer ce type de solution. Un temps additionnel a été dédié à la prise en main de l'effecteur de vissage, (pilotage du contrôleur, création d'une boucle type de vissage, prototypage des embouts magnétiques et du rail d'approvisionnement des vis), phase durant laquelle ils ont bénéficié du support d'Adrien Florit, expert en moyens robotiques. L'objectif de cette phase est d'éviter que les expérimentations futures soient polluées par les difficultés de mise en œuvre de l'effecteur, et que les résultats obtenus soient biaisés par ce phénomène. Même si il est délicat de fixer une limite à cette prise en main, nous l'avons estimée achevée quand l'équipe avait réussi à réaliser une opération de vissage complète (prise de vis, positionnement et serrage sur le corps de vérin) et s'est déclarée prête à reprendre la phase de conception de process.

De façon analogue à la précédente phase de création de process cobotisé, l'équipe est laissée libre dans la conception et la réalisation du process.

### 5.3. PHASE D'APPLICATION DES TECHNIQUES LEAN

#### Résultats et observations

La stratégie employée par l'équipe *F* a été de commencer par automatiser en l'état les opérations de vissage des faces supérieures et inférieures, jugées plus faciles que le vissage des pattes de fixation, car pouvant se réaliser en position verticale sans nécessiter de maintien de l'élément à visser. La stratégie utilisée a été de conserver l'intégralité du dernier process créé, et de remplacer les vissages concernés par des opérations cobotisées. L'enregistrement vidéo du process réalisé est disponible sur ce lien<sup>12</sup>. Au final le temps cycle s'est amélioré, mais le process présente des temps d'attente générés pendant les opérations de vissage (voir figure 5.10).

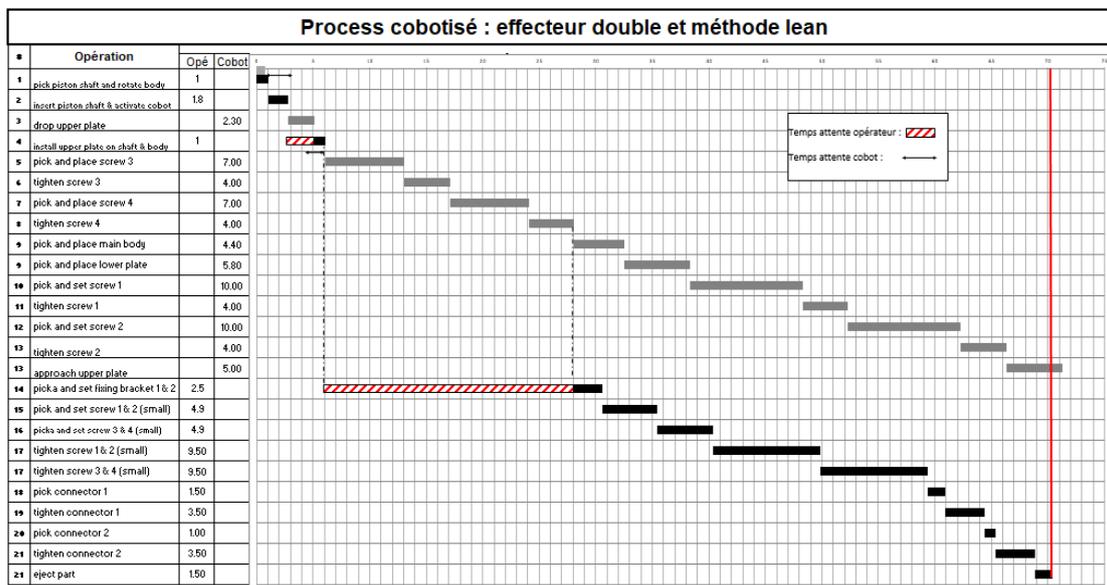


Figure 5.10 – Table de combinaison du process réalisé lors de l'intégration de l'effecteur double (groupe F)

La première tentative de cobotisation a en effet provoqué une situation où le cobot est plus chargé que l'opérateur, générant inévitablement un temps d'attente pour l'opérateur (voir table 5.6. Le niveau de séparation homme-machine a aussi reculé. en effet, on peut voir l'opérateur maintenir le sous-assemblage pour figer sa position à l'approche de l'effecteur de vissage. La cause technique est le besoin d'une meilleure précision de positionnement du sous-assemblage, qui apparemment n'a pas été considéré lors de l'automatisation<sup>13</sup>. Ainsi le temps d'attente n'apparaît pas manifestement aux équipes. Mais on peut aussi trouver des contributeurs d'ordre méthodologique à cette inefficacité relative, car en effet les techniques lean ont été moins mises à contribution que lors de la phase précédente : la séquence robotisée aurait pu être raccourcie par un regroupement des composants saisis par le cobot, et permettre ainsi un rééquilibrage de charge entre les deux ressources (voir figure 5.11).

On observe aussi un élément de nouveauté qui n'a pas été exploité : l'effecteur double permet de

12. <https://youtu.be/iVgQxzdBUNw>

13. Les plateaux de positionnement des composants fournissent une précision suffisante pour le vissage, ce point avait été testé par l'équipe d'encadrement avant la mise à disposition de l'effecteur de vissage.

### 5.3. PHASE D'APPLICATION DES TECHNIQUES LEAN

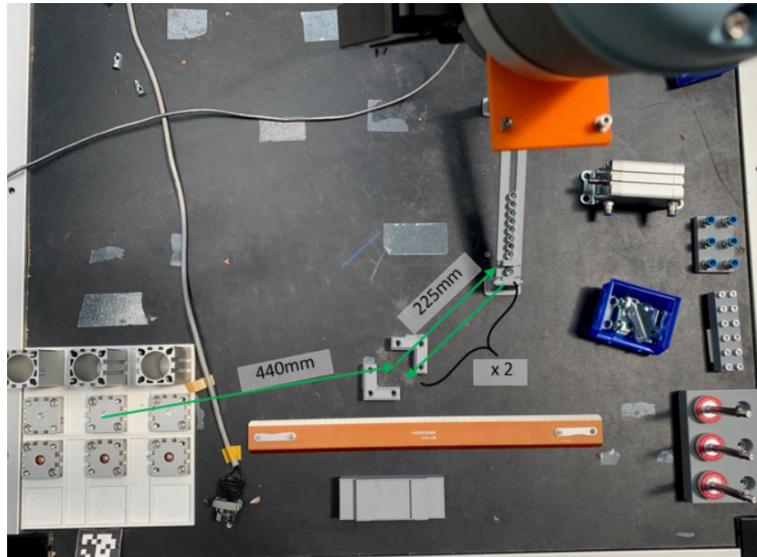


Figure 5.11 – Poste de travail du groupe F avec tracé de la trajectoire des tâches de dépose et vissage de la face inférieure

Table 5.6 – Décomposition du process obtenu après introduction de l'effecteur double - groupe F

Iteration	Collaborative process breakdown							
			Operator			Cobot		
	CT	evolution	work (s)	Wait (s)	Transfer time (s)	Transfer ratio	Work (s)	Wait (s)
Single effector	87.7		71.1	16.6	12.8	0.14	37.4	50.3
Double effector	70.5	-17.2	46.1	24.4	32	0.35	67	3.5

transporter un sous composant en plus d'une vis, offrant la possibilité de réduire le nombre aller-retours relatifs à cette séquence de travail. Des essais de faisabilité préalables dans des conditions comparables avaient montré que des ratios de cadence  $k$  de l'ordre de 1.6 pouvaient être atteints sur ce type de séquence (cf. extrait vidéo disponible sur ce lien <sup>14</sup>).

A l'issue de cette séquence, les participants n'ont pas identifié de piste claire d'amélioration et n'ont pas souhaité poursuivre vers l'étape de kaizen du process créé, préférant passer à l'utilisation de solution algorithmique pour améliorer la performance économique de leur dernier process. Si cette mise en situation a permis de réduire de façon sensible le temps de cycle, il est important de considérer le degré d'optimalité relatif de la solution obtenue pour évaluer l'efficacité de la démarche : le temps d'attente opérateur a augmenté sous l'effet des longues séquences de travail du cobot, qui elles-mêmes n'ont pas été réduites par un remaniement du poste de travail.

#### Synthèse partielle sur l'intégration de l'effecteur double

Cette mise en situation avait pour objectif de tester l'intérêt d'opérations à valeur ajoutée (vissage) pour le cobot, et d'appréhender les éléments de méthodologie à intégrer. La séquence d'intégration de

14. <https://youtu.be/jf8M5UMtvkU>

### 5.3. PHASE D'APPLICATION DES TECHNIQUES LEAN

---

l'effecteur de vissage pourrait être discuté : dans ce travail, il a été introduit dans un second temps, alors que s'agissant d'un outil spécifique, on peut penser que dans un cadre réel il serait intégré dès le départ pour refléter une intention préalable de vissage cobotisé. Néanmoins on peut tenter de formuler quelques hypothèses et recommandations suite à cette séquence. Tout d'abord la modification du problème et l'augmentation de la difficulté technique semblent avoir diminué la capacité de l'équipe à utiliser ses connaissances méthodologiques (techniques lean). On peut formuler l'hypothèse que l'équilibre des niveaux de maîtrise a été modifié avec l'introduction de la fonction de vissage, même avant le temps supplémentaire de familiarisation. Un autre équilibre, toujours selon Brousseau, qui a pu être modifié est celui entre les efforts consentis (le développement du process) et le niveau de récompense (l'obtention d'un process efficace). Dans cette mise en situation, les efforts sont plus importants, et la récompense moindre. Ceci explique potentiellement l'envie diminuée des participants à retenter une amélioration ou plus vraisemblablement une re-conception du process. Par contre, il peut être intéressant de considérer que lors de l'introduction d'un nouvel élément technique, il peut aussi être important de **renforcer les apports d'ordre méthodologiques, car les difficultés rencontrées risquent de se manifester sous des aspects différents, et les équipes n'auront pas nécessairement la capacité de transférer naturellement leur connaissances et savoir faire dans cet environnement modifié.** Ces conclusions et recommandations auront besoin bien évidemment d'être validées sur un plus grand nombre de groupes dans la perspective d'une généralisation.

#### 5.3.4 Cas d'étude : double objectif économique et ergonomique

L'ergonomie représente une exploitation potentielle des robots collaboratifs. L'objectif de cette mise en situation est d'évaluer si les connaissances acquises sont suffisantes pour proposer des process qui répondent à des attentes d'amélioration ergonomique et de performance économique.

#### Initialisation

Le groupe *E* a été sélectionné pour réaliser ce cycle d'expérimentation. Etant donné que le process créé par ce groupe utilisait déjà de façon importante le mode collaboratif, ce choix a l'avantage de privilégier la continuité dans l'application des méthodes. Le modèle ergonomique a été présenté aux participants, notamment le principe de temps de relaxation. Pour faciliter la représentation mentale, le facteur de pondération  $\alpha$  entre temps de cycle et temps de relaxation a été fixé à 0.5, pour qu'une seconde de gain sur le temps de cycle soit équivalente à une seconde de gain sur le temps de relaxation. Afin d'éviter de répéter la cotation complète du process, après visionnage du process collaboratif réalisé par ce groupe, nous avons vérifié que les choix de partage de charge étaient cohérents avec ceux réalisés lors de la phase prototype, et ainsi nous avons choisi d'appliquer les mêmes temps de relaxation aux opérations et tâches correspondantes. Ces données ont été communiquées aux participants, avec la consigne qu'elles servaient de référence pour la charge ergonomique.

Comme pour les autres mises en situation de cette partie, le groupe a été laissé libre d'altérer ou de créer un nouveau process à partir du nouvel objectif fixé.

#### Résultats et observations

Après avoir considéré les nouvelles contraintes, l'équipe *E* a proposé une seule modification : la réalisation de l'éjection de la pièce finie par le robot à la place de l'opérateur (tâche 13). Les participants ont mis en balance le coup ergonomique de manipuler la masse maximale avec le temps plus long du cobot pour réaliser l'éjection. Lors de l'entretien qui a eu lieu à la fin de ce cycle pour expliciter la stratégie adoptée, les participants ont évoqué avoir comparé tâche à tâche le dernier process qu'ils avaient créé avec les cotations ergonomiques des mêmes tâches dans les différents modes possibles, le tout dans la séquence de leur process. Ce choix méthodologique a été fait dans une recherche de simplification. En effet, le nombre de variables à prendre en compte pour une résolution globale du problème semble trop important pour les participants, qui se tournent donc vers une approche plus séquentielle qui consiste à évaluer les tâches de façon séquentielle. En revanche, la comparaison deux à deux des affectations empêche de reconsidérer les possibilités de parallélisation des tâches, et les possibles améliorations associées.

#### Analyse des résultats

Au final, il y a eu peu de remise en cause du développement précédent, et les participants ont partagé avoir fait preuve d'un engagement moindre sur ce stade, à cause d'une appropriation plus difficile du problème ainsi formulé. En effet, le modèle ergonomique est basé sur la réduction de la fatigue (qui se manifeste avec l'accumulation des cycles), qui ne correspond pas aux difficultés ergonomiques au sens large ressenties par les participants. Le choix de ce modèle a été motivé par une facilité supposée de s'approprier les variables de sortie (temps de récupération), mais il ne correspond pas au ressenti des participants, qui ont plutôt perçu la difficulté ergonomique de façon qualitative, au niveau de la dextérité nécessaire pour les opérations de vissage des pattes de fixation par exemple (voir figure 5.12), ce qui était à l'origine du recours au mode coopératif, même quand l'ergonomie ne faisait pas partie des objectifs. Cette mise en situation a été discutée avec Nicolas Casier (Expert des pratiques lean en milieu industriel). Lors d'un chantier d'amélioration continue, il est en effet fréquent de traiter des points ergonomiques. Ces points sont pris en compte suite aux remontées des opérateurs, parfois confirmées par des mesures réalisées par des ergonomes pour une cotation globale du process. En se projetant sur l'implémentation d'un cobot pour fournir une amélioration simultanée, un des scénarios envisagés serait donc plutôt de figer sur une affectation cobot ou mode coopératif une ou plusieurs tâches ressenties comme pénibles, en tentant de réaliser des gains sur le reste du process. En condition réelle, le problème à résoudre se pose donc dans des termes différents avec un nombre donné d'opérations dont le mode est fixé, et une activité d'amélioration économique (sans dégradation ergonomique préférentiellement) sur les autres. Des activités plus vastes d'améliorations ergonomiques peuvent avoir recours à des cotations quantitatives, où la recherche de solution se poserait dans les mêmes termes que le problème que nous avons défini.

#### 5.3.5 Conclusion sur l'utilisation des techniques lean

Comme cela avait été mis en évidence par les phases d'expérimentations prototypes, après une intervention sur les techniques lean, les résultats s'améliorent de façon générale, même s'il arrive que des temps d'attente de l'opérateur persistent (groupe *F*). Les contraintes de précédences sont prises en compte de façon tacite, et des modélisations simples ont été créées pour estimer les temps cobot.

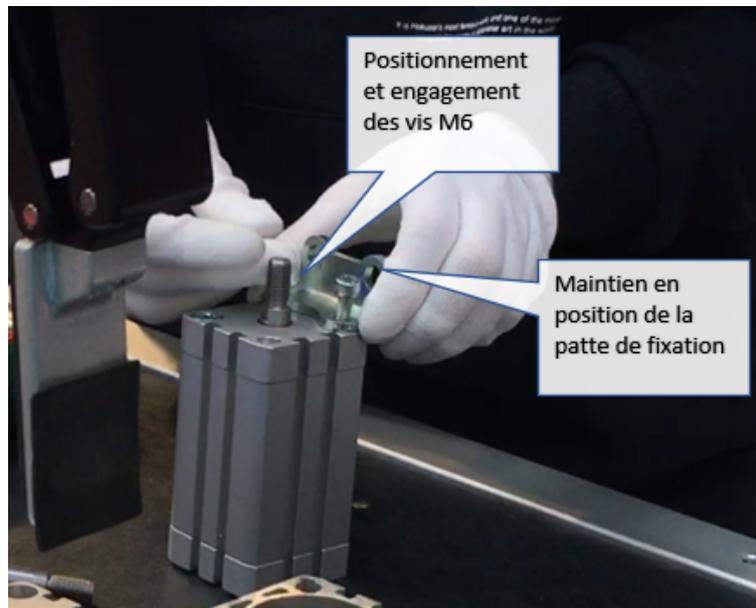


Figure 5.12 – Détail de l'opération de préparation de vissage des pattes de fixation

Concernant les temps robots, là aussi ils ne sont pas estimés a priori, sauf pour une des équipes (l'équipe G) qui utilise un coefficient empirique, ce qui constitue les premiers éléments de création de modèle. En revanche pour contenir la durée d'une tâche qui doit être cobotisée, les équipes n'hésitent pas à revoir l'implantation du poste de travail pour privilégier la réduction de mouvement du cobot. Quand la mise en situation se complexifie, il apparaît plus difficile de maintenir les aspects lean du nouveau process créé, avec une perte d'efficacité possible. Nous allons déterminer dans la section suivante si les outils algorithmiques permettent de rétablir de l'efficacité dans les différentes mises en situations.

### 5.4 Recours à la méthode lean modifié

Afin d'étudier de possibles voies d'amélioration dans l'identification de solutions de meilleure qualité, notamment pour les cas d'étude les plus complexes. L'outil de résolution algorithmique a été développé dans la perspective d'augmenter l'efficacité de la phase de résolution mathématique (étape 4 sur le cycle de Blum, voir figure 5.1) et la proposition de solution réelle qui en découle. Il est aussi important de considérer que l'efficacité de cette phase est liée à la précédente : le modèle mathématique, et cette partie sera l'occasion d'évaluer la qualité du modèle proposé, et d'y apporter des modifications éventuelles. Le critère d'évaluation de la qualité des solutions réelles proposées sera leur capacité à être implémentée dans la situation réelle, pour cela elles seront soumises à l'appréciation des participants qui possèdent l'expérience de la réalisation de process.

Dans cette partie nous nous attacherons aussi à décrire l'appropriation de cet outil par les équipes. Ceci concernera l'évaluation des solutions du point de vue des participants, et l'analyse des éléments qui motivent ces évaluations, mais aussi de l'utilisation que les participants font de l'outil mis à leur disposition pour tenter d'identifier des solutions de meilleure qualité que celles qu'ils ont obtenus précédemment.

## 5.4. RECOURS À LA MÉTHODE LEAN MODIFIÉ

---

Trois mises en situation se sont déroulées en parallèle avec les groupes  $E$ ,  $F$ ,  $G$ , respectivement sur les trois cas d'étude de réduction de temps de cycle, d'introduction d'un effecteur de vissage, et de la prise en compte d'objectifs à la fois ergonomiques et économiques. Chaque groupe va pouvoir reprendre le dernier cas d'étude qu'il a tenté de résoudre avec les outils lean avec les solutions générées par l'algorithme.

### 5.4.1 Intervention

Une intervention est préalablement réalisée pour expliquer le principe de fonctionnement de l'algorithme, ainsi que les informations à renseigner pour permettre les calculs :

- La durée de chaque tâche manuelle (selon le dernier découpage réalisé par les participants).
- Les tâches réalisables par le cobot, et le temps associé (pour les tâches dont le temps en mode 'cobot' ne sont pas connus, le facteur  $k = 5.8$  est préconisé).
- La matrice de précedence associée au découpage des tâches.

Pour le groupe  $G$ , qui travaille sur la résolution multi-objectifs, des informations supplémentaires sont requises :

- Durée des tâches en mode 'coopératif' (le ratio de 0.7 est préconisé pour les tâches dont la durée n'est pas connue dans ce mode, sur la base des mesures réalisées lors des essais prototypes).
- Les tâches non pertinentes en mode coopératif.
- Les coûts ergonomiques des tâches dans les modes 'opérateur' et 'coopératif'. Comme pour la mise en situation précédente, les valeurs établies lors de la première évaluation ergonomique du process seront utilisées. Si le découpage de tâche diffère, les coûts ergonomiques de chaque tâche seront aussi divisés ou regroupés, afin que le coût ergonomique total reste inchangé.

### 5.4.2 Initialisation

Un processus identique sera ensuite mis en place pour chaque équipe, voir figure 5.13. La première étape consiste à générer les données nécessaires à l'algorithme (modèle mathématique). Ensuite chaque équipe exécutera les tirages avec les paramètres  $\alpha$ ,  $L1$ ,  $L2$  qui correspondent à sa mise en situation (au vu des tests réalisés sur l'algorithme en section 4.2.2), le mode coopératif ne sera pas sollicité pour les 2 premières mises en situation). Ensuite les 3 à 5 meilleurs résultats sont conservés sur base du temps de cycle (ou de la valeur de la fonction objectif pour le cas d'étude 'ergonomie et économie'), en s'efforçant d'avoir des solutions de structures différentes quand cela est possible. Les solutions sont ensuite discutées dans le groupe. L'échange est guidé par un questionnaire sur la pertinence des solutions identifiées par l'algorithme (voir annexe H). Une synthèse a ensuite lieu avec Anthony Quenehen, pour confirmer et motiver l'intérêt exprimé des solutions sur une échelle à 3 niveaux :

1. Solution inexploitable : ne peut pas être mise en œuvre, ou sans intérêt par rapport à la dernière solution trouvée.
2. Solution partiellement exploitable : la solution comporte certaines séquences qui pourraient, si elles étaient intégrées à la solution existante, présenter une opportunité d'amélioration.
3. Solution pleinement exploitable : l'équipe est prête à l'implémenter en étant confiante qu'elle représente une amélioration de la solution existante.

Ensuite, l'équipe est invitée à formuler des propositions d'amélioration sur le modèle utilisé et à



Figure 5.13 – Principe d'utilisation de l'outil de recherche de solution algorithmique

les mettre en place si cela lui semble réalisable, puis une nouvelle itération du cycle décrit en figure 5.13 est lancée.

### 5.4.3 Premier cycle d'essais

#### 5.4.3.1 Résultats généraux

Le premier retour de l'ensemble des équipes est que les premières solutions paraissent majoritairement inexploitable. La raison invoquée unanimement est la surestimation des temps cobots (recours à l'utilisation du facteur  $k = 5.8$ ). Des incohérences sur les précédences ont aussi été relevées par l'équipe *F*, qui l'ont conduite à reconsidérer sa matrice de précedence (ce point sera détaillé ultérieurement).

#### 5.4.3.2 Modification du modèle de calcul des temps cobot

La proposition d'utiliser un coefficient de proportionnalité entre les opérations réalisées par l'opérateur et le cobot (et de le fixer à une valeur de 5.8) est issue de la première phase d'expérimentation prototype où on avait pu observer qu'entre deux équipes indépendantes, les ratios entre les temps totaux des tâches cobotisées et les opérations manuelles correspondantes étaient relativement proches pour les deux équipes. La conclusion sur l'existence d'un rapport de proportionnalité entre les temps de tâches cobotisées et manuelles sur la seule constatation de 2 valeurs proches est naturellement une simplification très forte (même si cette hypothèse est utilisée dans la littérature, [85]). Sa principale faiblesse est qu'elle ne rend pas compte du processus utilisé par les équipes lors des phases de création de process cobotisé. En effet, lors des phases fonctionnelles l'implantation du poste de travail peut évoluer, notamment pour regrouper les composants manipulés par le cobot (voir figure 5.8). Si cela a peu d'impact pour la durée des tâches manuelles car la vitesse de déplacement est de l'ordre de  $1m/s$ , il est plus significatif pour un cobot dont la vitesse nominale est de  $250mm/s$ . L'objectif est donc de tenter de refléter de la façon la plus simple possible la contribution de l'implantation sur la durée des tâches. Par simplicité nous entendons maintenir au niveau le plus bas possible le nombre de données supplémentaires à intégrer dans le modèle pour prendre en compte ce critère. Une limite assumée de cette amélioration de modèle est qu'elle repose sur le principe que l'implantation prise en référence est supposée invariante pendant la recherche de solution. Donc si une tâche devait passer de l'état manuel à l'état opérée par le cobot, les composants concernés ne seraient pas relocalisés (alors que la cobotisation est justement un facteur de relocalisation). Elle garde tout de même un intérêt car les positions de dépose de sous-ensemble et de travail restent identiques en général au fil des itérations.

## 5.4. RECOURS À LA MÉTHODE LEAN MODIFIÉ

Le nouveau calcul des temps théoriques de tâches en mode cobot s'articule donc autour des étapes suivantes :

1. Créer la représentation de l'implantation (en 2 dimensions).
2. Sur la base du dernier process connu, estimer le parcours à réaliser par le cobot pour chaque tâche.
3. Calculer le temps de parcours associé.

La représentation de l'implantation est réalisée par une capture photo du plan de travail en vue de dessus avec une mire qui permettra de définir l'échelle à utiliser pour les étapes futures. Tous les points d'intérêt sont repérés (pour les palettes, le milieu de la deuxième pièce est pris pour référence) par une lettre. Les distances point à point sont mesurées pour les liaisons exécutées par le cobot ou l'opérateur (voir figure 5.14). Le trajet associé à chaque tâche est ensuite décrit en terme de nombre de points d'intérêts et de distance à parcourir.

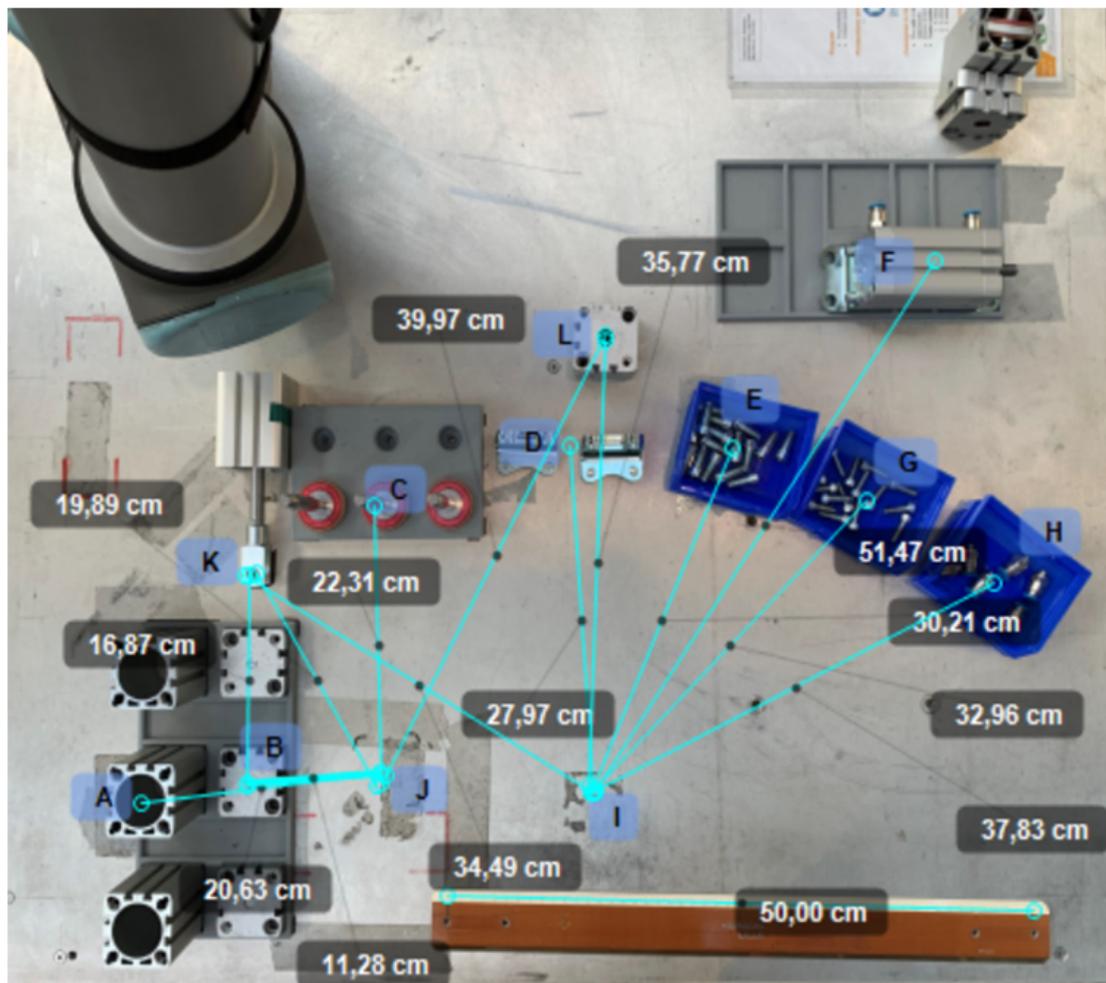


Figure 5.14 – Maillage d'un poste de travail (groupe G) pour l'estimation des temps de trajectoire cobot

## 5.4. RECOURS À LA MÉTHODE LEAN MODIFIÉ

L'estimation du temps de parcours est basée sur plusieurs variables : le profil (estimé) de la trajectoire dans un plan vertical, le profil de vitesse du cobot, et l'existence d'opérations supplémentaires, comme des ouvertures / fermetures de pinces, ou des rotations du poignet<sup>15</sup>. Les hypothèses de trajectoire, les lois de vitesses et les formules de calcul des temps de parcours résultants (cf. annexe G) ont été renseignés dans un tableur qui a été remis aux étudiants afin de leur permettre d'obtenir les temps de tâches estimés rapidement une fois qu'ils ont exécuté les deux premières étapes. Une corrélation succincte a été réalisée entre des valeurs réelles de tâches cobotisées et les prédictions issues de ce nouvel élément de modèle. Une amélioration significative a pu être confirmée et cette méthode a été retenue pour les essais suivants (voir figure 5.15). Notamment, le coefficient directeur de la droite de régression linéaire se rapproche de 1, ce qui devrait permettre une meilleure exploitation des temps projetés.

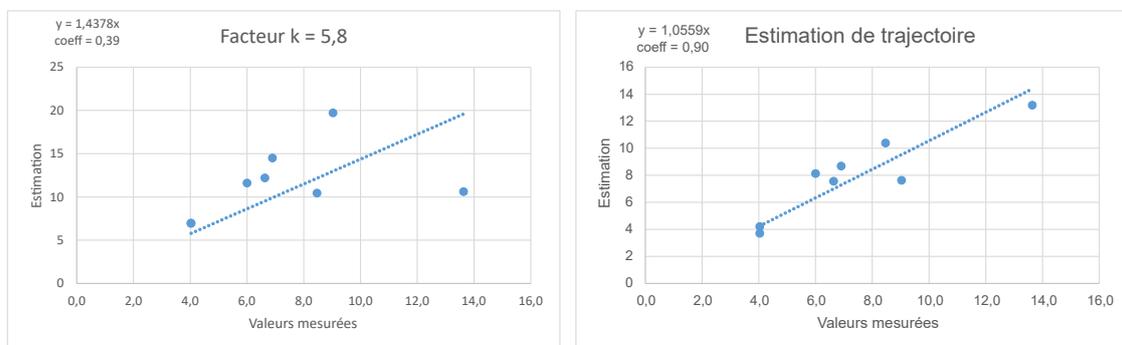


Figure 5.15 – Comparaison des corrélations obtenues entre les différentes méthodes d'estimation des temps de tâche cobot

Une limite de cette méthode est que les points de départ et d'arrivée pour chaque trajectoire associée à une tâche est tributaire des tâches encadrant la tâche évaluée. Donc la durée estimée de la tâche est influencée par la séquence du process pris en référence. Ce point constitue un biais dans l'estimation, qui à ce stade sera considérée comme acceptable si les solutions trouvées sont jugées pertinentes par les participants. Des développements futurs pourraient être considérés pour corriger cette erreur de justesse, si elle nuisait à la capacité de produire des décisions sur la base des solutions proposées.

### 5.4.4 Résultats du deuxième cycle d'itération : temps cobot modifiés

Pour ce deuxième cycle, chaque équipe a donc re-estimé les temps des tâches cobotisées avec la méthode décrite ci-dessus, afin de générer de nouvelles valeurs pour la modélisation de leurs process respectifs. Ensuite, ils ont pu relancer des tirages de l'algorithme et en évaluer de façon qualitative

15. Pour éviter qu'au moment de l'arrivée au point de destination l'objet transporté soit dans son orientation finale (et éviter un possible endommagement de composants voisins), la loi de commande ralentit le cobot dans son déplacement linéaire, si nécessaire, pour que la rotation puisse être effectuée avant la fin du déplacement. Par exemple, une rotation de 180 degrés requiert un temps de 3.75s ; si elle doit être effectuée sur une trajectoire rectiligne de 200mm - qui dure en théorie 2.4s, la translation sera ralentie pour atteindre 3.75s et assurer que le retournement sera complètement réalisé une fois la destination atteinte.

## 5.4. RECOURS À LA MÉTHODE LEAN MODIFIÉ

Table 5.7 – Retour général sur les solutions algorithmiques

Groupe	Solutions évaluées	Inexploitable	Partiellement exploitable	Pleinement exploitable
E	3	3	0	0
F	3	3	0	0
G	4	3	1	0

les solutions proposées. Les résultats globaux montrent une légère progression de la pertinence perçue des solutions proposées (voir table 5.7), et mettent en évidence de nouvelles pistes d'amélioration pour l'outil de résolution.

### 5.4.4.1 Application au cas d'étude : réduction du temps de cycle

Les élèves ont décomposé leur process en 25 tâches, suite à la dernière mise en situation qui utilisait les techniques lean. La matrice de précédence a été remplie conjointement avec Anthony Quenehen, le groupe *G* étant le premier à se prêter à l'exercice. Un premier triplet de solutions a été évalué, dont une jugée partiellement pertinente, puis quatre tentatives successives ont été effectuées par cette équipe en modifiant les variables d'entrée de l'algorithme.

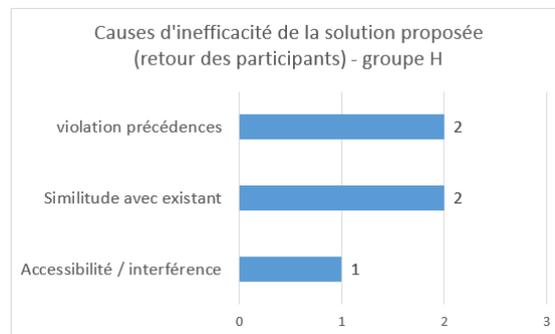


Figure 5.16 – Décomposition par causes d'inefficacités des solutions algorithmiques perçues par les utilisateurs : Groupe G

Sur le premier jeu de solutions (voir figure 5.16), les limites identifiées concernaient le modèle de l'algorithme : la première portait sur la séquence qui proposait de visser la patte de fixation juste après le serrage de la première face. Selon les participants, cet enchaînement "génère un sous assemblage qui ne possède plus de base plane, donc difficile à remettre en position pour les phases suivantes". L'effort de création d'un support adapté n'a pas paru 'rentable' par rapport à un gain 'incertain', puisqu'a priori l'enchaînement en question ne permet pas de paralléliser plus de tâches. Le deuxième élément limitant identifié par le groupe concernait le montage des raccords pneumatiques en deux étapes non consécutives (chaque embout étant vissé juste après l'assemblage de la face correspondante sur le corps du vérin). En effet, selon les participants, quand les deux raccords sont montés consécutivement, les deux pièces sont prises en un seul mouvement, effectuant ainsi l'économie d'une opération de picking.

## 5.4. RECOURS À LA MÉTHODE LEAN MODIFIÉ

Table 5.8 – Décomposition du process créé par le groupe G après réflexion sur les propositions de l’algorithme

Iteration	Collaborative process breakdown							
	Cycle Time	Evolution	Operator				Cobot	
			Work (s)	Wait (s)	Transfer time (s)	Transfer ratio	Work (s)	Wait (s)
Lean (amélio.)	70.3	-5.4	70.3	0	7.7	0.10	30.7	39.6
Suggestion algorithme	64.9		64.9	0	16	0.21	41.3	23.6

Ces deux éléments seraient relativement complexes à modéliser dans l’algorithme, car ils introduisent des variables supplémentaires. Des solutions consistant à regrouper la fixation des deux raccords en une seule tâche dont on modifierait la durée serait plus simple à implémenter mais au détriment de degrés de libertés sur l’ensemble du process.

La solution qui a présenté un intérêt selon les participants est celle qui propose la cobotisation des vis de la face supérieure de façon comparable à la solution précédente qui avait cobotisé la même opération pour la face inférieure (voir figure 5.18). L’enregistrement vidéo de la solution mise en place est disponible sur ce lien<sup>16</sup>. L’implémentation de cette solution a permis de générer un gain de temps de cycle de 5.1s (voir table 5.8). Cette modification a pu se réaliser sans modification supplémentaire de l’implantation du poste de travail, car la face supérieure avait déjà été transférée dans la partie gauche lors de l’itération précédente pour pouvoir la sous-assembler avec la tige via le cobot (voir figure 5.17, itération 4).

Pour la recherche de solutions supplémentaires, l’équipe a voulu ‘figer’ certaines séquences du process en introduisant des relations supplémentaires dans la matrice de précédence, ce qui a eu pour conséquence d’augmenter l’order strength et refermer les solutions disponibles (voir figure 5.19). Après plusieurs itérations sur la matrice, on peut constater que les solutions proposées deviennent similaires au process de départ en terme de séquence, le nombre (volontairement) surévalué de relations de précédences limitant les possibilités de parallélisation. La seule tâche proposée pour le cobot reste l’éjection de pièce. La parallélisation se fait grâce au recouvrement avec le cycle suivant, dont les opérations sont exécutées par l’opérateur.

Cette mise en situation a permis d’identifier une extension à la solution déjà proposée, même si on peut nuancer cette proposition par le fait que s’agissant de la répétition d’une séquence déjà existante cette variante aurait pu aussi être mise en place de façon itérative par la méthode lean. Il est à noter que même si lors de la mise en place d’une solution a priori réalisable en l’état, les participants ont repris les techniques lean déjà utilisées pour privilégier de futures itérations, montrant ainsi la transposition de compétences acquises précédemment dans une situation plus ouverte. Dans une deuxième phase, ils ont tenté d’utiliser la matrice de précédence pour orienter la recherche de solution, sans succès. L’utilisation à contre-emploi de la matrice témoigne d’un processus de recherche qui s’apparente plus à une validation de choix qu’une recherche ouverte de solutions (ce pour quoi l’outil a été développé). Pour ce type de recherche, une table de combinaison serait potentiellement un outil de visualisation suffisant. Ce point nécessiterait d’être testé lors d’expérimentation futures, à travers des interventions orientées vers cet objectif.

16. <https://youtu.be/w-pInwoYY2s>

## 5.4. RECOURS À LA MÉTHODE LEAN MODIFIÉ

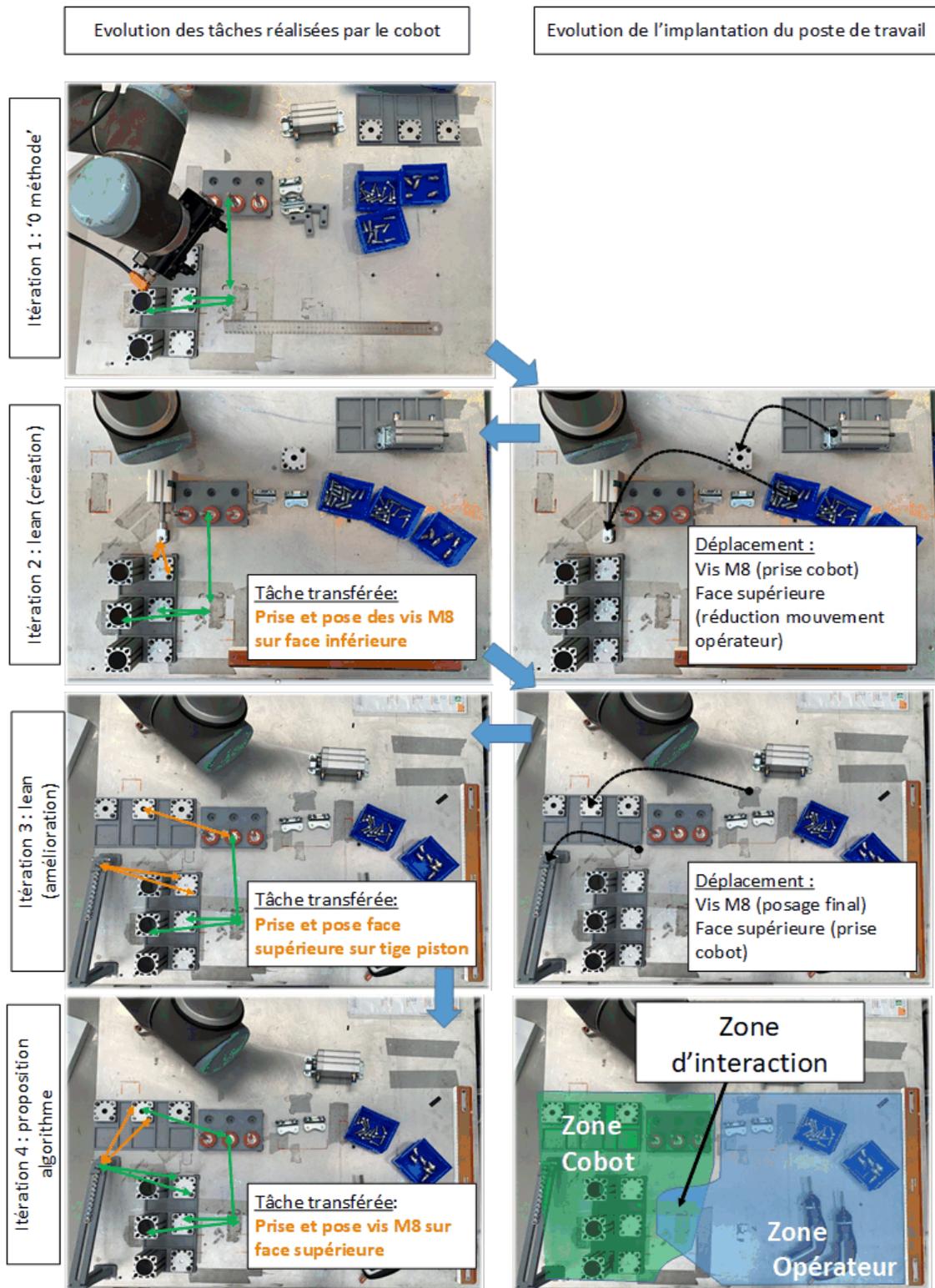


Figure 5.17 – Evolution de l'implantation du poste de travail du groupe G suite à l'évolution de la séquence de tâches transférées au cobot, incluant la dernière itération

## 5.4. RECOURS À LA MÉTHODE LEAN MODIFIÉ

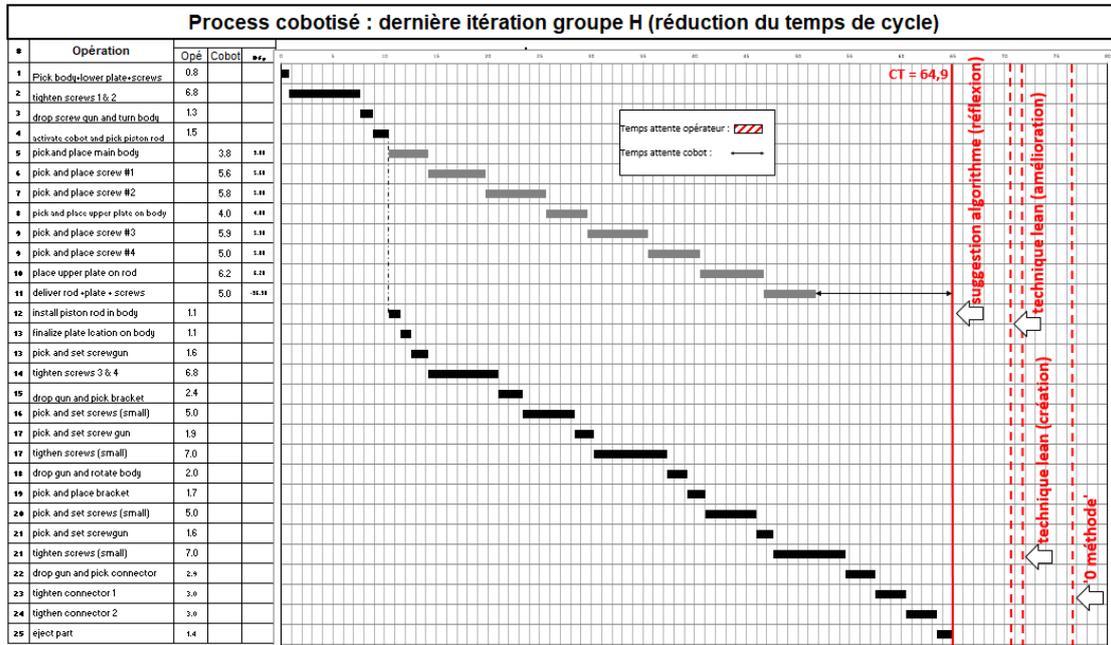


Figure 5.18 – Table de combinaison de la dernière itération du groupe G et synthèse des résultats précédents

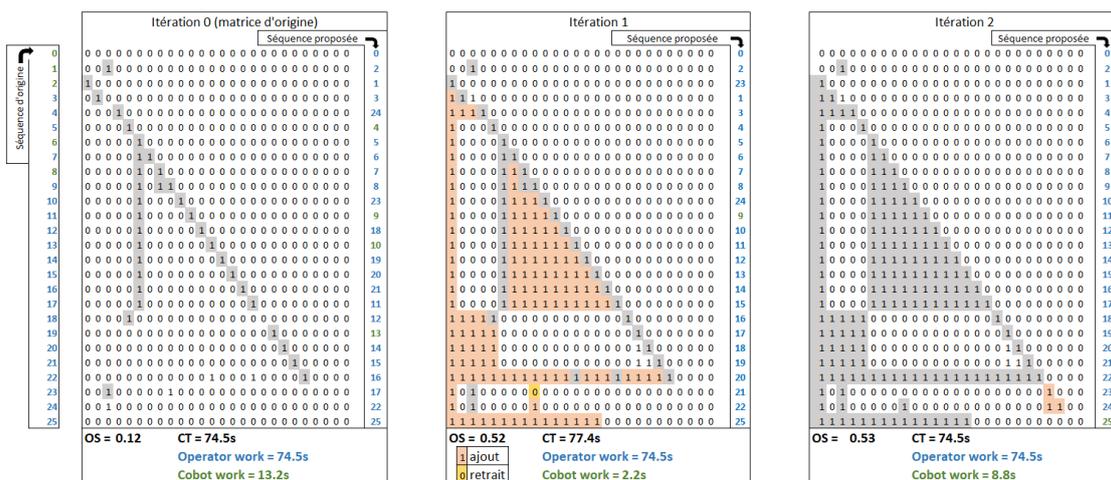


Figure 5.19 – Evolution de la matrice de précedence et impact sur les solutions identifiées (groupe G).

### 5.4.4.2 Application au cas d'étude : intégration d'un effecteur de vissage

Dans cette mise en situation, les participants ont décomposé le process en 23 tâches, ce qui correspond au découpage utilisé avec la méthode de résolution précédentes. Sur les 4 tirages retenus, aucun n'a paru au moins partiellement pertinent (voir table 5.7), mais pour des causes apparentes diverses (voir figure 5.20). Deux solutions ont été jugées non-réalisables. La cause en étaient des erreurs sur le remplissage de la matrice de précedence, ou certaines relations étaient manquantes<sup>17</sup>. Les deux autres solutions évaluées l'ont été après correction des erreurs.

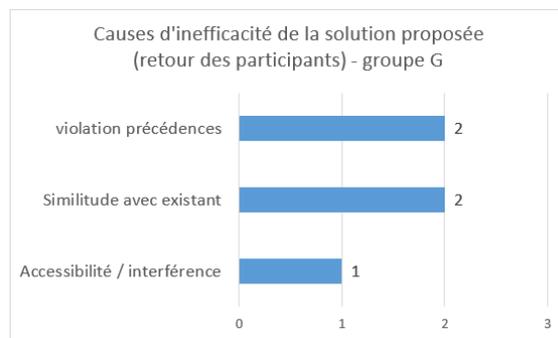


Figure 5.20 – Décomposition par causes d'inefficacités des solutions algorithmiques perçues par les utilisateurs - groupe F

Une première solution qui consistait à faire visser simultanément les deux faces du vérin par l'opérateur et le robot (voir figure 5.21) a dû être écartée pour des raisons de faisabilité (mise à part toute considération sur la sécurité), l'effecteur de vissage ne pouvant opérer à l'horizontale pour laisser l'opérateur visser la face opposée. Dans ce cas il s'agit d'une limite du modèle qui n'inclue pas de représentation de l'environnement. Devant la complexité d'une telle modification du modèle par rapport au bénéfice estimé, cette difficulté a été contournée en affectant arbitrairement l'opération de vissage des faces au robot, le temps de l'opérateur a été fixé de façon fictive à 1000s. Cette disposition reflète aussi le choix d'orientation du groupe qui souhaite maximiser l'utilisation de l'effecteur de vissage. Une fois cette modification effectuée, de nouveaux tirages ont pu être effectués.

Les solutions évaluées ensuite ont été jugées de peu d'intérêt car trop proches de la solution déjà existante, dans la séquence et les affectations. Cette constatation peut avoir deux origines : soit la solution existante est en effet un optimum, soit la proposition issue de l'algorithme est sous-performante. Même en l'absence de connaissance de la solution exacte au problème réel, au vu des temps d'attente existant sur le process il semble que la première option soit peu probable. Nous proposons donc d'étudier la deuxième. Concernant la sous-optimalité de la solution, les causes racines possibles sont une faible performance du processus d'optimisation, ou des contraintes excessives qui limiteraient les pistes de solutions à explorer. Concernant la première éventualité, dans la partie 4.2.2, nous avons testé l'algorithme sur des instances fictives. Les résultats obtenus étaient suffisamment proches les uns des autres pour conclure que la performance de l'algorithme est satisfaisante dans ce contexte d'utilisation. Reste donc à analyser les données d'entrées utilisées par l'algorithme. Le diagramme de

17. d'autres erreurs du même ordre avaient eu lieu à l'étape précédente : des relations de précedence circulaires avaient été saisies, empêchant l'algorithme d'affecter les tâches impliquées.

## 5.4. RECOURS À LA MÉTHODE LEAN MODIFIÉ

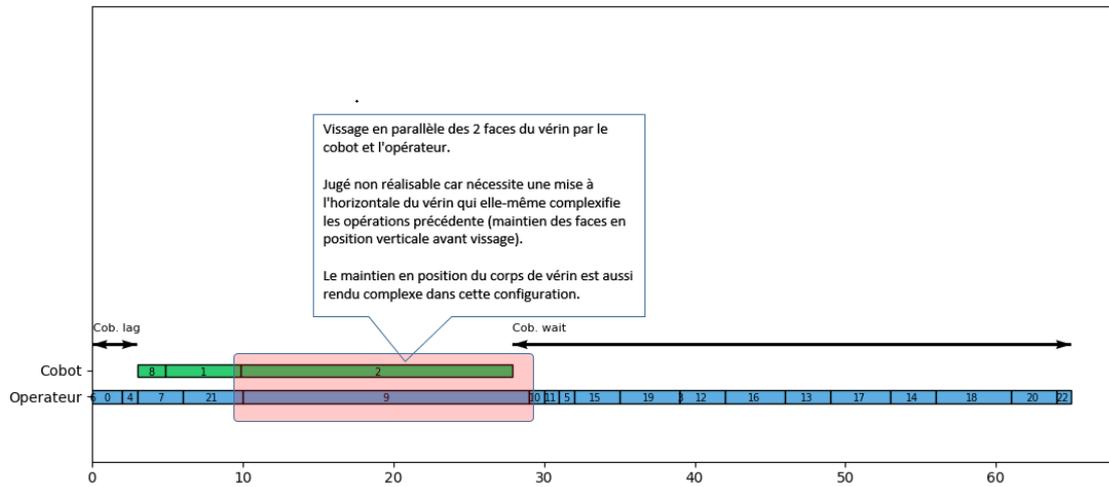


Figure 5.21 – Illustration de la solution retournée par l'algorithme proposant un vissage simultané des deux faces du vérin.

précédence (représentation graphique de la matrice de précédence), révèle une structure très linéaire (voir figure 5.22). Les chaînes de précédence présentes empêchent la parallélisation des tâches qui les composent (par exemple les opérations 0 à 11). Ceci est l'illustration d'une matrice de précédence de structure essentiellement 'diagonale' (une diagonale décalée d'une ligne vers le bas).

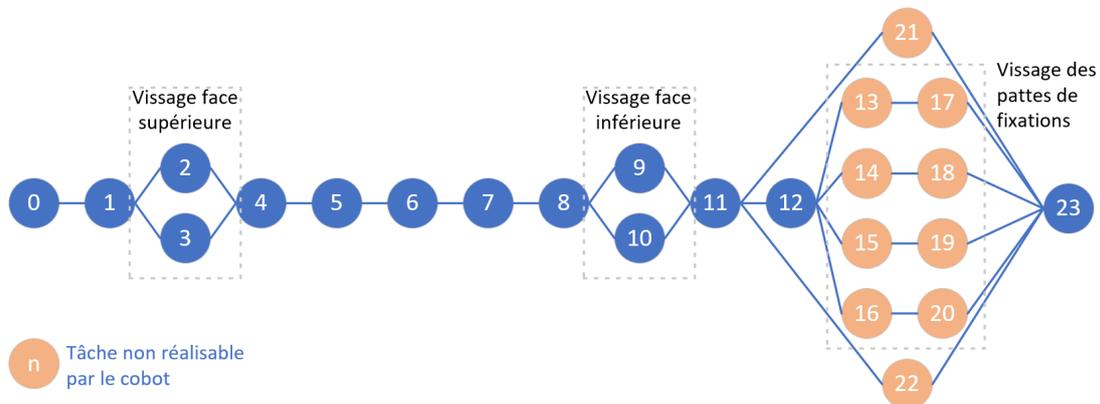


Figure 5.22 – Représentation graphique de la matrice de précédence réalisée par le groupe F

Un échange a alors eu lieu avec l'équipe qui avait créé cette matrice, qui a affirmé avoir eu des difficultés à se représenter "l'ensemble des possibilités dans la séquence de montage", sans avoir conscience d'avoir reproduit de façon préférentielle la description du process tel qu'ils l'avaient conçu précédemment, en ajoutant par endroit des variations sur la structure quand elles leur paraissaient évidentes. La matrice a ensuite été reprise avec Anthony Quenehen, et des degrés de liberté supplémentaires ont pu être identifiés pour obtenir un graphe de précédence moins linéaire<sup>18</sup> (voir figure 5.23). A l'issue

18. les tâches 4 et 6 ont été retirées (leurs temps transférés aux tâches suivantes), car dépendant de la séquence choisie.

## 5.4. RECOURS À LA MÉTHODE LEAN MODIFIÉ

de cette séquence, on peut interpréter que l'exercice de constitution d'une matrice de précédence possède un caractère systématique, centré sur la conception du produit considéré. Ceci reste éloigné de l'activité de recherche de process que les équipes ont pratiquée jusqu'à cette étape, et il est probable qu'un certain degré de confusion a existé entre les deux. En outre, la recherche de parallélisation entre les tâches requiert un découpage plus fin du process, et le nombre de tâches augmentant, la matrice de précédence devient naturellement plus complexe à renseigner.

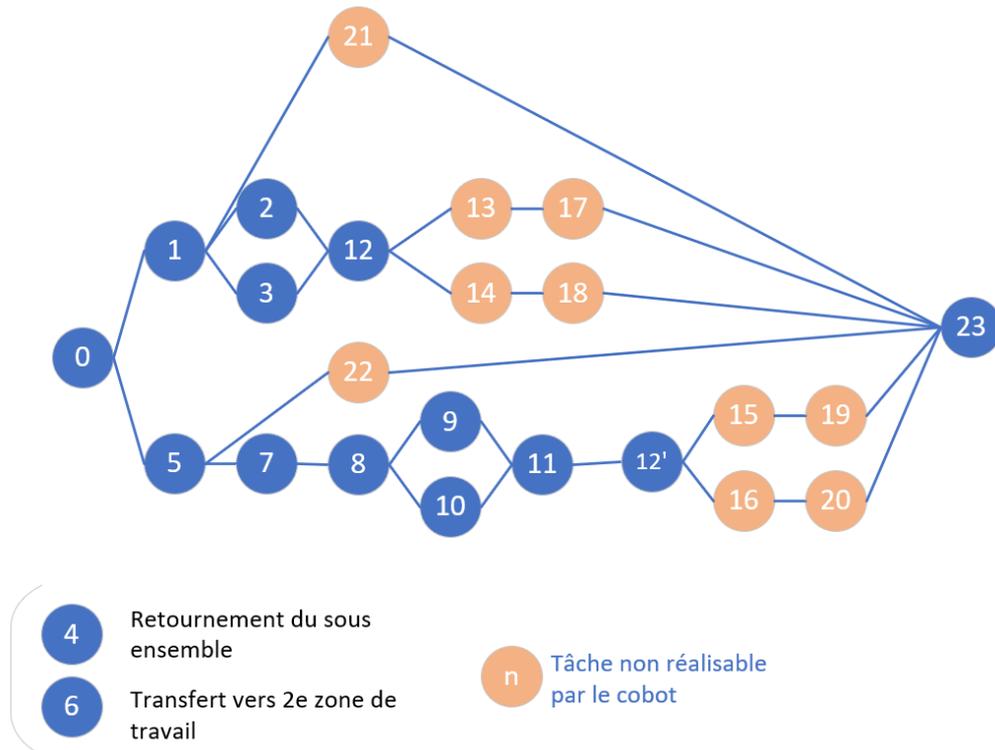


Figure 5.23 – Représentation graphique de l'amélioration de la matrice initialement proposée par le groupe F (figure 5.22)

### 5.4.4.3 Application au cas d'étude : objectif ergonomique et économique

Pour cette mise en situation, les participants ont souhaité utiliser le découpage original en 14 tâches pour re-utiliser en l'état les calculs de temps de relaxation disponibles. Une limite potentielle de cette décision est qu'elle réduit les chances de parallélisation de tâches, mais étant donné que les meilleures solutions théoriques sur ce cas d'étude n'avaient finalement que peu recours au mode synchronisé, nous avons estimé qu'il était potentiellement viable de poursuivre dans cette voie si elle montrait des résultats probants.

Si l'équipe a repris le découpage original, les temps de tâche dans le mode manuel ont été déduits du dernier process obtenu, les temps robots ont été estimés via la méthode de prédiction décrite en section

La tâche 12 d'installation des 2 pattes de fixation a été scindée en deux tâches distinctes car chaque patte peut être montée indépendamment

## 5.4. RECOURS À LA MÉTHODE LEAN MODIFIÉ

---

5.4.3.2. Pour les temps de tâche en mode coopératif non connus, nous leur avons proposé d'utiliser un ratio de 80% du temps manuel correspondant, valeur moyenne vérifiée lors de leur construction de process collaboratif. La matrice de précédence a été créée par les participants.

Au total trois des solutions retournées ont été étudiées, sur la base de leur score obtenu sur la fonction objectif, et sur le fait qu'elles présentent des structures relativement distinctes. Aucune n'a été jugée partiellement pertinente ou intégralement pertinente. Les causes apparentes évoquées sont a priori spécifiques au mode coopératif (voir figure 5.24), et mettent principalement en évidence des limites au niveau du modèle utilisé par l'algorithme.

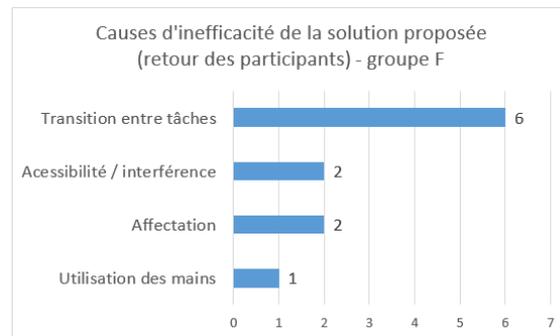


Figure 5.24 – Décomposition par causes d'inefficacités des solutions algorithmiques perçues par les utilisateurs - groupe E

Le point le plus souvent cité par les participants dans leur restitution des solutions proposées est la nécessité de refléter l'impact des changements de mode entre deux tâches (transition). En effet, dans la section précédente, sur le même cas d'étude, les meilleures solutions théoriques faisaient presque exclusivement appel au mode coopératif (hors zones de recouvrement en début et fin de process). Les temps cobots de durée plus faibles obtenus par le nouveau mode de calcul offrent des possibilités de paralléliser les tâches (mode synchronisé) entre deux séquences en mode coopération sans générer des temps d'attente opérateur qui seraient trop pénalisant pour le score global de la solution. Ainsi, pour les meilleures solutions proposées, on observe maintenant entre une et deux séquences ou cobot et opérateur travaillent en parallèle, hors zones de recouvrement entre les cycles (voir figure 5.25).

Le problème posé par un enchaînement de deux tâches du type : mode cobot - mode coopératif est que le cobot devra, dans la plupart des cas, effectuer une opération supplémentaire pour prendre le sous-ensemble en cours d'assemblage et le mettre en position favorable à la coopération. Comme il n'est pas systématiquement possible pour l'opérateur d'effectuer une opération en parallèle pendant ce laps de temps, cet enchaînement est en fait plus long que la somme de la durée des deux tâches impliquées. Un problème analogue se pose avec des enchaînements de type : mode opérateur - mode coopératif, et les enchaînements inverses. Ainsi les solutions proposées sous-estiment généralement les temps de cycle aux yeux des participants quand ils tentent de visualiser le process à travers la solution proposée. Cette limite du modèle actuel introduirait une complexité accrue de l'algorithme de calcul, surtout si l'on souhaite différencier les durées de ces transitions en fonction de la tâche et de l'enchaînement des modes. Néanmoins, au vu de la manifestation fréquente de phénomène, ce développement apparaît comme un axe prioritaire de développement pour notre outil de recherche de solution.

De façon analogue, les participants détectent un problème d'accessibilité à la face inférieure en

## 5.4. RECOURS À LA MÉTHODE LEAN MODIFIÉ

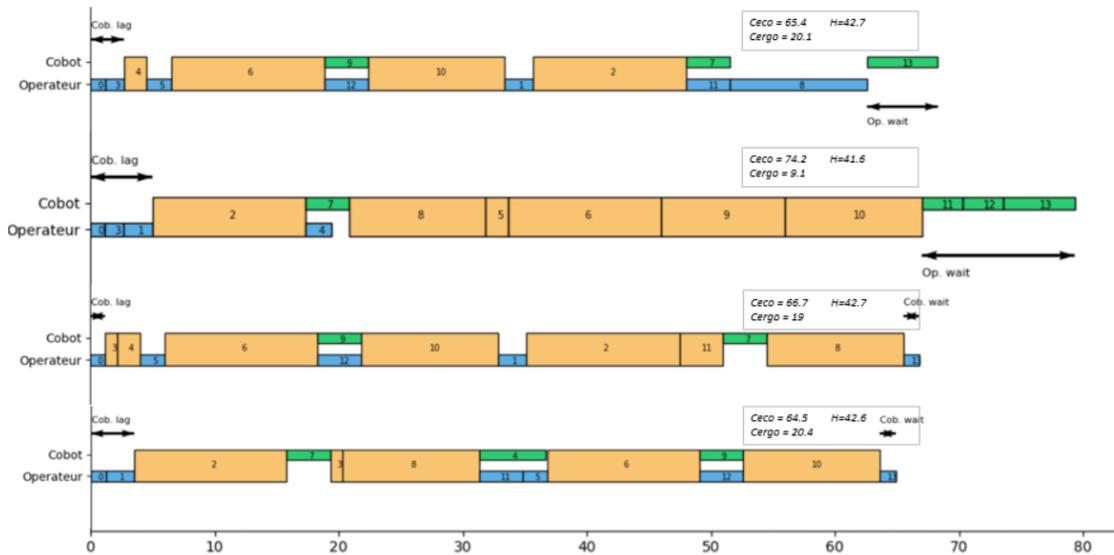


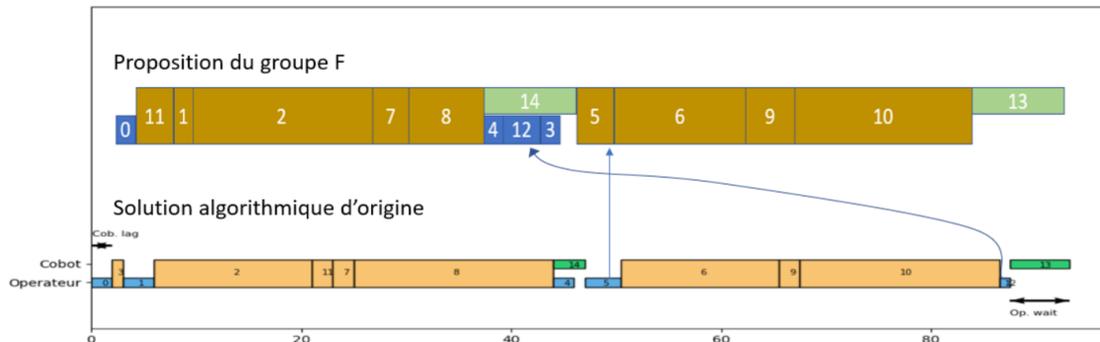
Figure 5.25 – Illustration des solutions proposées par l’outil de résolution algorithmique pour le cas d’étude ‘amélioration de la performance économique et ergonomique’ - groupe E

mode coopératif. Dans un process qui utilise principalement le mode coopératif, cette opération est naturellement effectuée par le cobot, puisqu’il tient déjà le sous-ensemble une grande partie du temps. Cette opération nécessaire sera donc formalisée par une tâche supplémentaire dite de retournement (tâche 14), exécutable uniquement par le cobot, dont la durée est estimée à 3.75s, au vu des profils de vitesse angulaire du cobot.

Cette altération des données d’entrées va in fine dessiner un profil de solutions qui va s’organiser autour de l’articulation suivante, sur les propositions des participants : l’opération d’éjection, avec son coût ergonomique élevé, est affecté au cobot. Pendant l’opération de retournement 14, l’opérateur effectue les tâches relatives à la préparation de la face supérieure qui ont un faible coût ergonomique (insertion de la face sur la tige, et connexion du raccord pneumatique), car le sous-ensemble est léger (tâches 4, 12 et 3). Le reste des opérations est réalisé en mode coopératif, pour éviter les transitions (voir figure 5.26). Si l’on projette cette solution en terme de performance, on obtient  $C_{eco} = 86s$  et  $C_{ergo} = 18.1$ , soit une valeur pour la fonction objectif  $H = 52.5$ . Ce niveau de performance est en dessous des meilleures prédictions de l’algorithme, mais ces dernières nécessiteraient d’être corrigées par des temps de transition à chaque changement de mode afin de pouvoir être comparées de façon plus juste. Si l’on prend arbitrairement une valeur de 3s pour chaque transition (pose ou dépose de sous ensemble), il faudrait corriger les valeurs de  $C_{eco}$  d’environ 12 à 15 secondes sur l’ensemble du process, ce qui les rapprocherait à quelques secondes (pour un  $C_{ergo}$  comparable) de la solution proposée par l’équipe E.

Il est intéressant que cette tentative de résolution se rapproche des cas réels décrit par Nicolas Casier, où certaines tâches sont pré-affectées au cobot en raison de leur ergonomie pénalisante, et la recherche de solution s’organise autour de ces points invariants. Ici encore, la table de combinaison apparaît comme un outil suffisant pour gérer ce niveau de complexité, pourtant l’équipe n’y a pas eu recours, comme pour la mise en situation visant à la réduction de temps de cycle. Pour de prochaines expérimentations, il peut être intéressant de concevoir des interventions liées à cet outil en le présentant

## 5.5. CONCLUSION GÉNÉRALE SUR LA CAMPAGNE D'EXPÉRIMENTATION



comme un moyen de recherche de solutions par permutations, afin qu'il puisse être utilisé sur les dernières phases de conception de process.

### 5.4.5 Discussion sur la phase d'utilisation de l'outil de résolution algorithmique ('lean modifié')

Différents éléments apparaissent à l'issue de cette phase. En premier lieu, le modèle de la situation se complexifie quand il s'agit de décrire le mode coopératif (gestion des interférences et accessibilité aux différentes zones de la pièce, temps de transition entre les tâches). Si certaines configurations problématiques peuvent être résolues ponctuellement par un ajustement de certaines variables d'entrée, la remise en cause de la structure de l'outil de résolution est parfois nécessaire, entraînant potentiellement une moindre accessibilité pour les utilisateurs lors de l'étape de renseignement des variables d'entrée.

On constate déjà ce type de difficulté sur le renseignement de la matrice de précédence. Même si ce point devra faire l'objet de confirmation avec un nombre de groupes plus important et des interventions spécifiques supplémentaires, il constitue une première approche systématique pour les participants, qui n'avaient travaillé jusque là que de façon itérative et rétro-active, sur la base d'une structure de process existante. Cette difficulté d'appréhension (outre les erreurs commises) est également reflétée par l'utilisation de cet outil comme un moyen d'orienter la recherche de solutions, ce qui n'est pas sa fonction, et les échecs rencontrés lors de cette tentative. De façon générale, l'outil de résolution est rapidement utilisé comme outil de validation des solutions déjà existantes plutôt que comme un outil de recherche ouverte. Encore une fois, cette séquence mérite d'être ré-évaluée avec des groupes moins expérimentés sur les techniques lean (donc moins à même de trouver des solutions de bonne qualité), ou sur des cas d'études plus complexes pour vérifier si dans ces situations l'apport de l'algorithme n'est pas supérieur à ce qui a été observé dans cette campagne d'expérimentation.

## 5.5 Conclusion générale sur la campagne d'expérimentation

Cette campagne avait pour but d'évaluer l'intérêt de différentes méthodes de résolution pour parvenir à concevoir des process collaboratifs homme-robot dans des situations de nature et de complexité

## 5.5. CONCLUSION GÉNÉRALE SUR LA CAMPAGNE D'EXPÉRIMENTATION

---

différente. Au delà des seuls résultats, nous avons recherché, dans une démarche itérative, à identifier et interpréter les différents phénomènes déterminants pour l'amélioration de la performance. Cette démarche a donc aussi pour finalité de définir une méthode reposant sur la montée en compétences des utilisateurs du process afin qu'ils puissent participer activement à l'élaboration des solutions, et garantir ainsi la possibilité de les améliorer de façon régulière.

Plusieurs éléments ont pu être mis en évidence à différents niveaux :

1. D'un point de vue des méthodes utilisées, les outils algorithmiques développés dans ce travail permettent de proposer des solutions dans les cas d'études les plus ouverts, même si leur mise en œuvre est limitée par les contraintes de la situation réelle, notamment celles liées à l'utilisation du mode coopératif. Des pistes d'améliorations ont été identifiées, dont il faudra peser les bénéfices par rapport à l'accroissement de la complexité d'utilisation.
2. L'algorithme a majoritairement servi de moyen de suggestion aux participants qui ont ensuite utilisé leurs compétences sur les techniques lean pour les transformer en solutions réelles, plutôt que d'identifier des solutions nouvelles grâce à un balayage plus exhaustif que les recherches effectuées avec les outils lean. Les techniques lean, efficaces pour gérer un retour au réel par la prise en compte efficace de la complexité de mise en œuvre, apparaissent complémentaires de la recherche de solution mathématique, comme nous en avons fait l'hypothèse lors de la proposition de modèle. Ce point méritera quand même d'être testé dans des cas d'études plus riches où les limites des techniques lean seraient proportionnellement plus marquées par rapport aux possibilités de l'algorithme. En revanche, on observe aussi que la tendance naturelle est d'utiliser l'outil de résolution algorithmique comme un outil de validation, ou encore de simulation, dans le but de visualiser l'effet de nouvelles séquences envisagées. Cette fonction est a priori remplie par la table de combinaison. Il faudrait envisager, pour des expérimentations à venir, des interventions ciblées sur cet outil pour en stimuler l'utilisation, et cerner les modifications éventuelles à lui apporter pour l'adapter à la situation rendue plus ouverte par la versatilité du cobot.
3. L'algorithme est peu efficace si le process sur lequel il s'applique n'est pas lui-même efficace au sens du lean (implantation sous optimale par exemple). Puisque celui-ci conditionne les variables du modèle utilisé par l'outil de résolution, ce dernier ne peut les remettre en cause, et va donc transposer les inefficiences du process de départ vers les solutions qu'il va identifier. Ainsi, il y a une similitude entre la phase de d'introduction du cobot et celle de l'introduction de recherche de solutions algorithmiques. Nous avons vu dans le chapitre précédent qu'un process cobotisé peut être plus performant quand le process manuel de départ a déjà fait l'objet d'amélioration selon les techniques lean. Dans cette partie un phénomène similaire se produit : une fois le cobot introduit, un process qui aura le mieux conservé ses caractéristiques lean sera plus à même de se voir proposer des solutions algorithmiques performantes pour des améliorations potentielles.

## 5.5. CONCLUSION GÉNÉRALE SUR LA CAMPAGNE D'EXPÉRIMENTATION

---

## **Chapitre 6**

# **Conclusions et perspectives**

### 6.1 Conclusions

Ce travail propose des approches méthodologiques adaptées qui permettent de contourner certains écueils liés à l'intégration de robotique collaborative, tout en inscrivant cette phase dans une démarche plus globale d'amélioration continue et d'accompagnement de la montée en compétence des opérateurs et de leur encadrement.

Nous avons proposé et mis à l'épreuve un protocole expérimental qui permet d'accompagner la construction de process collaboratifs fonctionnels et améliorables, tout en s'appuyant sur les suggestions des utilisateurs. Ce protocole a en outre permis de confirmer l'apport des techniques lean et de proposer un séquençement pour leur mise en œuvre dans ce processus de création.

Un algorithme a aussi été conçu dans la perspective d'identifier des solutions au problème de recherche de performance économique et ergonomique, en incluant le recours simultané aux différents modes d'interaction entre l'opérateur et le cobot. Ce développement a permis de mettre en évidence l'apport du mode coopératif pour de meilleurs résultats théoriques. Si le retour au réel des solutions proposées pose encore certains problèmes notamment sur la modélisation du mode coopératif, le protocole expérimental dans lequel il a été évalué a permis d'identifier des pistes pour augmenter sa pertinence.

**Nous pouvons retirer de ce travail que l'idée de co-concevoir un process collaboratif avec les utilisateurs est une stratégie viable.** Il conviendra de les adapter aux compétences initiales disponibles, et pour cela nous avons proposé une trame d'interventions successives. Nous avons pu aussi valider certains principes de conception, comme l'introduction progressive de la complexité, afin de permettre l'internalisation des compétences par les utilisateurs, ainsi que la nécessité de renforcer les compétences méthodologiques même quand la complexité technique augmente.

Le recours à des outils algorithmiques présente un intérêt plus en terme de validation de proposition que de de recherche initiale, et l'amélioration de leur pertinence passe par une complexification de l'outil et du modèle utilisé, dont il faudra peser la balance bénéfice - coût, notamment pour la prise en compte de mode coopératif. L'outil actuel, bien que reposant sur un modèle relativement simple met déjà en difficulté les participants sur la représentation des précédences face à l'augmentation du nombre de tâche, qui est elle même une nécessité pour accéder à de meilleures solutions. Ainsi, il pourrait être intéressant d'étudier les possibilités offertes par des outils numériques existants pour accompagner les éventuels utilisateurs sur ces étapes.

### 6.2 Perspectives

- Le modèle ergonomique testé a pour objet la charge manipulée par l'opérateur, mais d'autres modèles qui prennent en compte d'autres paramètres comme les positions angulaires des articulations des membres supérieurs, les efforts de pression exercés, peuvent décrire des process d'assemblage et surtout voir leur valeurs de sortie impactées par l'ajout d'un cobot au sein du process d'assemblage. Ce type d'expérimentation permettrait d'explorer l'intérêt des cobots sur un spectre plus large, en considérant toujours l'utilisation des différents modes de collaboration. Pour la partie de résolution théorique, des modifications mineures sont évidemment à envisager car les coûts ergonomiques ne s'expriment pas forcément se secondes (score adimensionnel, pallier de pénibilité...) , mais le recours à la fonction objectif permet de les incorporer malgré

tout.

- Cette proposition de méthode de conception reste encore à tester sur des populations plus larges, avec des compétences de départ différentes pour être adaptée au besoin de chaque utilisateur. Pour aller plus loin et confirmer la validité d'une approche de recherche développement pour intégrer des technologies de production avancées à l'aide de méthodologies lean, cette trame pourrait être utilisée sur d'autres technologies. Dans ce sens des travaux ont été initiés pour étudier les apports de la simulation sur le lissage de production et la prédiction de performance. Pour supporter cette ligne de recherche sur l'intégration de technologies 4.0, une cellule de production flexible à l'échelle 1 a été créée sur le campus, afin de servir d'environnement de développement des études à venir, ainsi que des séquences pédagogiques associées. Les concepts lean relatifs au juste à temps y sont déjà enseignés, ce travail de recherche permettra d'intégrer bientôt des process homme-cobot au sein du flux de production.
- D'un point de vue pratique, la phase d'essais fonctionnels, si elle permet de dégager des principes efficaces de conception de process cobotisés, pourrait donner lieu à des essais finaux en environnement industriel réel, avec de véritables équipes d'opérateurs et de superviseurs. Cela serait l'occasion de tester entre autre l'apport des solutions algorithmiques comme accélérateur de montée en compétence pour des populations encore débutantes dans la pratique des techniques lean.
- Nous avons aussi pu voir que les compétences liées aux technologies, aux techniques lean et la connaissance du process fonctionnent efficacement quand elles sont réunies sur une même personne, car en effet chaque participant des expérimentations avait la capacité de tenir plusieurs rôles. Il faudrait tester en milieu réel, où les opérateurs n'ont peut-être pas l'occasion de développer le même niveau de compétences sur les technologies. Potentiellement un déficit de compétences sur l'utilisation des cobots pourrait limiter l'étendue de leurs représentations des solutions possibles. Auquel cas le management de l'équipe, notamment au niveau des phases d'explicitation et de combinaison devient potentiellement un point clé dans le succès du développement de solutions efficaces.
- Une direction de développement de ces travaux est d'intégrer ces stations de travail collaboratives au sein d'une cellule flexible de production, qui est leur environnement lean naturel. Ceci pose de façon plus ouverte la question de l'efficacité opérationnelle et de l'ergonomie (élimination du goulot d'étranglement, déport des opérations à forte pénibilité vers le poste cobotisé), avec la complexité accrue du nombre de poste plus élevé et potentiellement d'une production variée. C'est dans ce sens que l'auteur a initié l'implantation d'une ligne flexible au sein du campus, comme support d'expérimentation et d'enseignement. Si la ligne est aujourd'hui fonctionnelle, l'intégration de robot collaboratif flexible et reconfigurable, toujours basée sur les principes lean, est en cours de développement.
- Une autre application de ces principes de collaboration homme-robot aux visées économiques et ergonomiques peut porter sur l'intégration d'opérateurs possédant des restrictions liées à une situation de handicap sur une ligne taktée standard. Une fois les restrictions de l'opérateur intégrées dans le modèle, des principes de solutions collaboratives peuvent être identifiés, respectant ces restrictions mais atteignant aussi les valeurs cibles de temps de cycles requises. Ce type d'activité repose évidemment sur la capacité pratique d'intégrer des cobots sur les postes de travail (voir point plus haut), mais permettrait de ré-inclure potentiellement des personnes en situation de handicap dans des environnements de production flexible (plutôt que des lignes adaptées et dédiées), maintenant ainsi leur polyvalence et offrant une meilleure fluidité de l'ensemble des

ressources humaines.

- Enfin, dans une vue plus vaste des couplages entre principes lean et d'autres technologies innovantes, un autre travail a été initié sur une hybridation entre le lissage de production (principe heijunka) et les outils de simulation de flux de production. En effet, pour des productions variées, les différences de charge d'un produit à l'autre pour certains postes nécessitent une gestion de l'avance retard par rapport au takt time de la ligne. Le séquençement des produits sur la ligne (heijunka) est donc en général altéré manuellement pour éviter l'accumulation de retard ou d'avance, et des stocks intermédiaires d'en cours sont disposés entre les postes pour absorber les variations de charge. Des outils de simulation pourraient permettre de prédire le comportement de ce système complexe et ainsi affiner le séquençement pour une meilleure efficacité globale. Ce sujet est en cours de construction, et s'il ne comporte pas d'expérimentation pour son développement, il pourra être testé en situation réelle sur la ligne flexible du laboratoire.

# Bibliographie

- [1] A. Roth, “Industrie 4.0–hype oder revolution ?” dans *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*. Springer, 2016, p. 1–15.
- [2] U. Dombrowski, T. Richter et P. Krenkel, “Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems : A Use Cases Analysis,” *Procedia Manufacturing*, vol. 11, p. 1061–1068, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978917304250>
- [3] S. Thiemermann, *Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter*, 2005.
- [4] F. Pini, F. Leali et M. Ansaloni, “A systematic approach to the engineering design of a hrc workcell for bio-medical product assembly,” dans *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETF A)*. IEEE, 2015, p. 1–8.
- [5] J. K. Liker, *The toyota way*. Esensi, 2005.
- [6] M. Imai, *Kaizen*. Random House Business Division New York, 1986, vol. 201.
- [7] I. Nonaka, H. Takeuchi et K. Umemoto, “A theory of organizational knowledge creation,” *International journal of technology management*, vol. 11, n<sup>o</sup>. 7-8, p. 833–845, 1996.
- [8] D. Euler, “Design research-a paradigm under development,” 2014.
- [9] W. Blum et D. Leiß, “Deal with modelling problems,” *Mathematical modelling : Education, engineering and economics-ICTMA*, vol. 12, p. 222, 2007.
- [10] A. Quenehen *et al.*, “Lean techniques application towards efficient collaborative robot integration : an experimental study,” *Production*, vol. 31, 2021.
- [11] S. K. Andersson *et al.*, “Exploring the capabilities of industrial collaborative robot applications,” dans *The 9TH Swedish Production Symposium, 7-8 October 2020 Jönköping, Sweden*, 2020.
- [12] C. A. Voss, “Implementation : A key issue in manufacturing technology : The need for a field of study,” *Research policy*, vol. 17, n<sup>o</sup>. 2, p. 55–63, 1988.
- [13] C. Voss, “Successful innovation and implementation of new processes,” *Business strategy review*, vol. 3, n<sup>o</sup>. 1, p. 29–44, 1992.
- [14] D. Samuel, P. Found et S. J. Williams, “How did the publication of the book the machine that changed the world change management thinking? exploring 25 years of lean literature,” *International Journal of Operations & Production Management*, 2015.
- [15] T. Netland, “Exploring the phenomenon of company-specific production systems : one-best-way or own-best-way ?” *International Journal of Production Research*, vol. 51, n<sup>o</sup>. 4, p. 1084–1097, 2013.

- [16] T. Ohno, “How the toyota production system was created,” *Japanese Economic Studies*, vol. 10, n<sup>o</sup>. 4, p. 83–101, 1982.
- [17] A. Moeuf *et al.*, “The industrial management of smes in the era of industry 4.0,” *International Journal of Production Research*, vol. 56, n<sup>o</sup>. 3, p. 1118–1136, 2018.
- [18] U. Dombrowski, T. Richter et P. Krenkel, “Interdependencies of industrie 4.0 & lean production systems : A use cases analysis,” *Procedia Manufacturing*, vol. 11, p. 1061–1068, 2017.
- [19] F. Rosin *et al.*, “Impacts of industry 4.0 technologies on lean principles,” *International Journal of Production Research*, vol. 58, n<sup>o</sup>. 6, p. 1644–1661, 2020.
- [20] S.-V. Buer, J. O. Strandhagen et F. T. Chan, “The link between industry 4.0 and lean manufacturing : mapping current research and establishing a research agenda,” *International journal of production research*, vol. 56, n<sup>o</sup>. 8, p. 2924–2940, 2018.
- [21] D. Kohler et J.-D. Weisz, *Industrie 4.0 : les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*. La Documentation française Paris, 2016.
- [22] “Towards Industry 4.0 - Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems,” vol. 48.
- [23] “Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies,” vol. 48.
- [24] “Industry 4.0 : A survey on technologies, applications and open research issues,” vol. 6.
- [25] “Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0 : A Review,” vol. 3.
- [26] H. Fatorachian et H. Kazemi, “A critical investigation of industry 4.0 in manufacturing : theoretical operationalisation framework,” *Production Planning & Control*, vol. 29, n<sup>o</sup>. 8, p. 633–644, 2018.
- [27] U. Dombrowski et T. Richter, “The lean production system 4.0 framework—enhancing lean methods by industrie 4.0,” dans *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*. Springer, 2018, p. 410–416.
- [28] “Smart manufacturing systems for Industry 4.0 : Conceptual framework, scenarios, and future perspectives,” vol. 13.
- [29] D. Eyers, “The flexibility of industrial additive manufacturing systems,” Thèse de doctorat, Cardiff University, 2015.
- [30] V. Alcácer et V. Cruz-Machado, “Scanning the industry 4.0 : A literature review on technologies for manufacturing systems,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019.
- [31] A. Mayr *et al.*, “Lean 4.0—a conceptual conjunction of lean management and industry 4.0,” *Procedia CIRP*, vol. 72, n<sup>o</sup>. 1, p. 622–628, 2018.
- [32] S. Vaidya, P. Ambad et S. Bhosle, “Industry 4.0—a glimpse,” *Procedia manufacturing*, vol. 20, p. 233–238, 2018.
- [33] T. Wagner, C. Herrmann et S. Thiede, “Industry 4.0 impacts on lean production systems,” *Procedia Cirrp*, vol. 63, p. 125–131, 2017.
- [34] R. Y. Zhong *et al.*, “Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0 : a review,” *Engineering*, vol. 3, n<sup>o</sup>. 5, p. 616–630, 2017.
- [35] F. Zezulka *et al.*, “Industry 4.0—an introduction in the phenomenon,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, n<sup>o</sup>. 25, p. 8–12, 2016.

- [36] D. C. Fettermann *et al.*, “How does industry 4.0 contribute to operations management ?” *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 35, n<sup>o</sup>. 4, p. 255–268, 2018.
- [37] J. P. Womack et D. T. Jones, “Lean thinking—banish waste and create wealth in your corporation,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 48, n<sup>o</sup>. 11, p. 1148–1148, 1997.
- [38] T. H. Netland, “Critical success factors for implementing lean production : the effect of contingencies,” *International Journal of Production Research*, vol. 54, n<sup>o</sup>. 8, p. 2433–2448, 2016.
- [39] R. Davies, T. Coole et A. Smith, “Review of socio-technical considerations to ensure successful implementation of industry 4.0,” *Procedia Manufacturing*, vol. 11, p. 1288–1295, 2017.
- [40] P. Halgeri *et al.*, “Erp systems supporting lean manufacturing : a literature review,” dans *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, vol. 48517, 2008, p. 541–549.
- [41] D. Powell et L. Skjelstad, “Rfid for the extended lean enterprise,” *International Journal of Lean Six Sigma*, 2012.
- [42] “Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems : A Use Cases Analysis,” vol. 11.
- [43] O. Maghazei et T. Netland, “Implementation of industry 4.0 technologies : what can we learn from the past ?” dans *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*. Springer, 2017, p. 135–142.
- [44] Y. Liao *et al.*, “Past, present and future of industry 4.0—a systematic literature review and research agenda proposal,” *International journal of production research*, vol. 55, n<sup>o</sup>. 12, p. 3609–3629, 2017.
- [45] “Robots and robotic devices - collaborative robots,” International Organization for Standardisation, Geneva, CH, Standard, févr. 2016. [En ligne]. Disponible : <https://www.iso.org/fr/standard/62996.html>
- [46] W. Bauer *et al.*, “Lightweight robots in manual assembly—best to start simply,” *Examining companies’ initial experiences with lightweight robots*, Stuttgart, 2016.
- [47] S. Heydaryan, J. Suaza Bedolla et G. Belingardi, “Safety design and development of a human-robot collaboration assembly process in the automotive industry,” *Applied Sciences*, vol. 8, n<sup>o</sup>. 3, p. 344, 2018.
- [48] E. Matheson *et al.*, “Human–robot collaboration in manufacturing applications : A review,” *Robotics*, vol. 8, n<sup>o</sup>. 4, p. 100, 2019.
- [49] I. E. Association *et al.*, “Definition and domains of ergonomics,” *Recuperado de <https://www.iea.cc/whats/index.html>*, 2016.
- [50] A. Otto et A. Scholl, “Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing,” *European Journal of Operational Research*, vol. 212, n<sup>o</sup>. 2, p. 277–286, juill. 2011. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037722171100110X>
- [51] A. Otto et O. Battaïa, “Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation : A survey,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 111, p. 467–480, 2017.
- [52] P. W. Buckle et J. J. Devereux, “The nature of work-related neck and upper limb musculoskeletal disorders,” *Applied ergonomics*, vol. 33, n<sup>o</sup>. 3, p. 207–217, 2002.
- [53] M.-È. Chiasson *et al.*, “Comparing the results of eight methods used to evaluate risk factors associated with musculoskeletal disorders,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 42, n<sup>o</sup>. 5, p. 478–488, 2012.

- [54] D. Battini *et al.*, “Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure : a multi-objective model,” *International Journal of Production Research*, vol. 54, n<sup>o</sup>. 3, p. 824–845, 2016.
- [55] ———, “Preventing ergonomic risks with integrated planning on assembly line balancing and parts feeding,” *International Journal of Production Research*, vol. 55, n<sup>o</sup>. 24, p. 7452–7472, 2017.
- [56] J. E. C. Mateus *et al.*, “Method for transition from manual assembly to human-robot collaborative assembly,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, n<sup>o</sup>. 11, p. 405–410, 2018.
- [57] D. Stadnicka et D. Antonelli, “Human-robot collaborative work cell implementation through lean thinking,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 32, n<sup>o</sup>. 6, p. 580–595, 2019.
- [58] P. Tsarouchi *et al.*, “On a human-robot collaboration in an assembly cell,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 30, n<sup>o</sup>. 6, p. 580–589, 2017.
- [59] A. A. Malik et A. Bilberg, “Collaborative robots in assembly : A practical approach for tasks distribution,” dans *52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*, vol. 81, 2019, p. 665–670.
- [60] F. Ore, L. Hansson et M. Wiktorsson, “Method for design of human-industrial robot collaboration workstations,” *Procedia Manufacturing*, vol. 11, p. 4–12, 2017.
- [61] T. Munzer, M. Toussaint et M. Lopes, “Preference learning on the execution of collaborative human-robot tasks,” dans *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2017, p. 879–885.
- [62] P. L. Rocha *et al.*, “Exact algorithms for a scheduling problem with unrelated parallel machines and sequence and machine-dependent setup times,” *Computers and Operations Research*, vol. 35, n<sup>o</sup>. 4, p. 1250–1264, 2008.
- [63] S. Wang et B. Ye, “Exact methods for order acceptance and scheduling on unrelated parallel machines,” *Computers and Operations Research*, vol. 104, p. 159–173, 2019.
- [64] J. Herrmann, J.-M. Proth et N. Sauer, “Heuristics for unrelated machine scheduling with precedence constraints,” *European Journal of Operational Research*, vol. 102, n<sup>o</sup>. 3, p. 528–537, 1997.
- [65] L. Fanjul-Peyro et R. Ruiz, “Size-reduction heuristics for the unrelated parallel machines scheduling problem,” *Computers and Operations Research*, vol. 38, n<sup>o</sup>. 1, p. 301–309, 2011.
- [66] H. Wang et A. Bahram, “Effective heuristic for large-scale unrelated parallel machines scheduling problems,” *Omega*, vol. 83, p. 261–274, 2019.
- [67] Y. K. Lin, H. Hsieh et F. Y. Hsieh, “Unrelated parallel machines scheduling problem using an ant colony optimization approach,” *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, vol. 6, n<sup>o</sup>. 8, p. 1727–1732, 2012.
- [68] D.-W. Kim *et al.*, “Unrelated parallel machine scheduling with setup times using simulated annealing,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 18, n<sup>o</sup>. 3–4, p. 223–231, 2002.
- [69] S.-W. Lin et K.-C. Ying, “A multi-point simulated annealing heuristic for solving multiple objective unrelated parallel machine scheduling problems,” *International Journal of Production Research*, vol. 53, n<sup>o</sup>. 4, p. 1065–1076, 2015.
- [70] M. S. Nikabadi et R. Naderi, “A hybrid algorithm for unrelated parallel machines scheduling,” *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 7, p. 681–702, 2016.

- [71] E. Vallada et R. Ruiz, "A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times," *European Journal of Operational Research*, vol. 211, n<sup>o</sup>. 3, p. 612–622, 2011.
- [72] S. E. Elmaghraby, *Activity networks : Project planning and control by network models*. John Wiley & Sons, 1977.
- [73] V. Van Peteghem et M. Vanhoucke, "A genetic algorithm for the preemptive and non-preemptive multi-mode resource-constrained project scheduling problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 201, n<sup>o</sup>. 2, p. 409–418, 2010.
- [74] R. Kolisch et A. Sprecher, "Psplib-a project scheduling problem library : Or software-orsep operations research software exchange program," *European journal of operational research*, vol. 96, n<sup>o</sup>. 1, p. 205–216, 1997.
- [75] B. Yang, J. Geunes et W. J. O'brien, "Resource-constrained project scheduling : Past work and new directions," *Department of Industrial and Systems Engineering, University of Florida, Tech. Rep*, 2001.
- [76] S. Hartmann et D. Briskorn, "A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem," *European Journal of operational research*, vol. 207, n<sup>o</sup>. 1, p. 1–14, 2010.
- [77] O. Battaïa et A. Dolgui, "A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches," *International Journal of Production Economics*, vol. 142, n<sup>o</sup>. 2, p. 259–277, avr. 2013. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925527312004616>
- [78] N. Boysen, M. Fliedner et A. Scholl, "A classification of assembly line balancing problems," *European journal of operational research*, vol. 183, n<sup>o</sup>. 2, p. 674–693, 2007.
- [79] J. Rubinovitz, J. Bukchin et E. Lenz, "Ralb – a heuristic algorithm for design and balancing of robotic assembly lines," *CIRP Annals*, vol. 42, n<sup>o</sup>. 1, p. 497–500, 1993.
- [80] M. C. O. Moreira *et al.*, "Robust assembly line balancing with heterogeneous workers," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 88, p. 254–263, oct. 2015. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360835215003058>
- [81] L. Borba et M. Ritt, "A heuristic and a branch-and-bound algorithm for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem," *Computers & Operations Research*, vol. 45, p. 87–96, mai 2014. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030505481300347X>
- [82] M. C. O. Moreira *et al.*, "Simple heuristics for the assembly line worker assignment and balancing problem," *Journal of Heuristics*, vol. 18, n<sup>o</sup>. 3, p. 505–524, juin 2012. [En ligne]. Disponible : <http://link.springer.com/10.1007/s10732-012-9195-5>
- [83] C. Miralles *et al.*, "Advantages of assembly lines in sheltered work centres for disabled. a case study," *International Journal of Production Economics*, vol. 110, n<sup>o</sup>. 1-2, p. 187–197, 2007.
- [84] C. Becker et A. Scholl, "Balancing assembly lines with variable parallel workplaces : Problem definition and effective solution procedure," *European Journal of Operational Research*, vol. 199, n<sup>o</sup>. 2, p. 359–374, 2009.
- [85] C. Weckenborg et T. S. Spengler, "Assembly line balancing with collaborative robots under consideration of ergonomics : a cost-oriented approach," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, n<sup>o</sup>. 13, p. 1860–1865, 2019.

- [86] M. Pearce *et al.*, “Optimizing makespan and ergonomics in integrating collaborative robots into manufacturing processes,” *IEEE transactions on automation science and engineering*, vol. 15, n<sup>o</sup>. 4, p. 1772–1784, 2018.
- [87] S. Sakakibara *et al.*, “The impact of just-in-time manufacturing and its infrastructure on manufacturing performance,” *Management Science*, vol. 43, n<sup>o</sup>. 9, p. 1246–1257, 1997.
- [88] I. Belekoukias, J. A. Garza-Reyes et V. Kumar, “The impact of lean methods and tools on the operational performance of manufacturing organisations,” *International Journal of Production Research*, vol. 52, n<sup>o</sup>. 18, p. 5346–5366, 2014.
- [89] K. O. Cua, K. E. McKone et R. G. Schroeder, “Relationships between implementation of tqm, jit, and tpm and manufacturing performance,” *Journal of operations management*, vol. 19, n<sup>o</sup>. 6, p. 675–694, 2001.
- [90] “Lean manufacturing : context, practice bundles, and performance,” vol. 21.
- [91] R. Shah et P. T. Ward, “Defining and developing measures of lean production,” *Journal of operations management*, vol. 25, n<sup>o</sup>. 4, p. 785–805, 2007.
- [92] J.-P. Noblet et É. Simon, “La capacité d’absorption, un état de l’art,” *Management Avenir*, n<sup>o</sup>. 5, p. 33–50, 2010.
- [93] D. J. Teece, G. Pisano et A. Shuen, “Dynamic capabilities and strategic management,” *Strategic management journal*, vol. 18, n<sup>o</sup>. 7, p. 509–533, 1997.
- [94] T. Ohno, *Toyota production system : beyond large-scale production*. crc Press, 1988.
- [95] S. Kortmann *et al.*, “Linking strategic flexibility and operational efficiency : The mediating role of ambidextrous operational capabilities,” *Journal of Operations Management*, vol. 32, n<sup>o</sup>. 7-8, p. 475–490, 2014.
- [96] M. M. Crossan et I. Berdrow, “Organizational learning and strategic renewal,” *Strategic management journal*, vol. 24, n<sup>o</sup>. 11, p. 1087–1105, 2003.
- [97] K. Umemoto, “Ikujiro Nonaka and Hirotaka Takeuchi,” p. 13.
- [98] P. Cobb *et al.*, “Design experiments in educational research,” *Educational researcher*, vol. 32, n<sup>o</sup>. 1, p. 9–13, 2003.
- [99] É. Sanchez et R. Monod-Ansaldi, “Recherche collaborative orientée par la conception. un paradigme méthodologique pour prendre en compte la complexité des situations d’enseignement-apprentissage,” *Éducation et didactique*, vol. 9, n<sup>o</sup>. 2, p. 73–94, 2015.
- [100] J. Loiselle et S. Harvey, “La recherche développement en éducation : fondements, apports et limites,” *Recherches qualitatives*, vol. 27, n<sup>o</sup>. 1, p. 40–59, 2007.
- [101] F. Wang et M. J. Hannafin, “Design-based research and technology-enhanced learning environments,” *Educational technology research and development*, vol. 53, n<sup>o</sup>. 4, p. 5–23, 2005.
- [102] J. Van den Akker *et al.*, *Educational design research*. Routledge, 2006.
- [103] J. Perrenet et B. Zwaneveld, “The many faces of the mathematical modeling cycle,” *Journal of Mathematical modelling and Application*, vol. 1, n<sup>o</sup>. 6, p. 3–21, 2012.
- [104] A. Arcus, “Comsoal : a computer method of sequencing operations for assembly lines,” 1965.
- [105] A. Scholl *et al.*, *Data of assembly line balancing problems*. Techn. Hochsch., Inst. für Betriebswirtschaftslehre, 1995.

- [106] T. Bhattacharjee et S. Sahu, “Complexity of single model assembly line balancing problems,” *Engineering costs and production economics*, vol. 18, n<sup>o</sup>. 3, p. 203–214, 1990.
- [107] M. Gourgand, N. Grangeon et N. Klement, “An analogy between bin packing problem and permutation problem : A new encoding scheme,” dans *Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World*. Springer Berlin Heidelberg, 2014, vol. 438, p. 572–579.
- [108] C. Marchwinski et J. Shook, *Lean lexicon : a graphical glossary for lean thinkers*. Lean Enterprise Institute, 2003, p. 38–39.
- [109] P. J. Van Laarhoven et E. H. Aarts, “Simulated annealing,” dans *Simulated annealing : Theory and applications*. Springer, 1987, p. 7–15.
- [110] S. Kirkpatrick, “Optimization by simulated annealing : Quantitative studies,” *Journal of statistical physics*, vol. 34, n<sup>o</sup>. 5, p. 975–986, 1984.
- [111] G. Brousseau, “Le contrat didactique : le milieu,” *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 9, n<sup>o</sup>. 9.3, p. 309–336, 1990.

## BIBLIOGRAPHIE

---

# Annexe A

## Calcul de la charge ergonomique du process manuel

Process 1 - Assemblage manuel											
Feuille d'enregistrement du chronométrage			Calculs d'énergie					Calcul du temps de cycle éthique			
N°	Opération	Min repetable	Energie posturale	Énergie de mouvement	Masse supplémentaire	Energie supplémentaire	Energie totale ei	MWR	RA	T. cycle éthique	RT
1	pick and place main body	1.2	0.043055205	0.028879	0	0	0.071934205	3.7424655	0.8128109	2.09065026	0.94
2	pick and place lower plate	2.3	0.086466266	0.020068	1.5	0.04468	0.151214266	3.9173654	0.8845198	4.364662253	2.05
3	pick & place screw 1	3.0	0.112	0.0170242	1.9	0.047768	0.1767922	3.535844	0.728096	5.18428812	2.18
4	pick & place screw 2	2.6	0.096468385	0.0170242	1.92	0.0479224	0.161414985	3.7480628	0.8151058	4.690187157	2.11
5	pick and set screwgun	1.5	0.057038923	0.023272	1.94	0.0480768	0.128387723	5.0419693	1.3456074	3.583685374	2.06
6	tighten screw 1	3.5	0.130666667	0	2.74	0.0542528	0.184919467	3.170048	0.5781197	5.52341888	2.02
7	gun transfer	1.0	0.038895114	0	2.74	0.0542528	0.093147914	5.3644612	1.4778291	2.581485093	1.54
8	tighten screw 2	3.5	0.130666667	0	2.74	0.0542528	0.184919467	3.170048	0.5781197	5.52341888	2.02
9	unpick all	1.1	0.040017119	0.0473602	0	0	0.087377319	4.8910366	1.283725	2.447895416	1.38
10	pick shaft	1.5	0.056	0.020068	0	0	0.076068	3.04272	0.5259152	2.2888728	0.79
11	pick and place upper plate	1.8	0.0672	0.020068	0.4	0.036188	0.123456	4.1152	0.965632	3.5381376	1.74
12	insert shaft	2.0	0.074666667	0	0.8	0.039276	0.113942667	3.41828	0.6798948	3.3597896	1.36
13	pick & place screw 1	2.7	0.1008	0.0170242	0	0.0331	0.1509242	3.3538711	0.6534872	4.46441532	1.76
14	pick & place screw 2	3.1	0.115733333	0.0170242	0	0.0331	0.165857533	3.2101458	0.5945598	4.94313532	1.84
15	pick and set screwgun	1.3	0.046847501	0.023272	0	0.0331	0.103219501	4.9354112	1.3019186	2.888548246	1.63
16	tighten screw 1	2.6	0.097066667	0	0.8	0.039276	0.136342667	3.1463692	0.5684114	4.0778696	1.48
17	gun transfer	1.0	0.037333333	0	0.8	0.039276	0.076609333	4.59656	1.1629896	2.1629896	1.16
18	tighten screw 2	3.5	0.130666667	0	0.8	0.039276	0.169942667	2.9133029	0.4728542	5.1549896	1.65
19	unpick screw gun	0.8	0.028043596	0.025768	0	0	0.053811596	4.2982353	1.0406765	1.532890372	0.78
20	pick rear bracket	1.6	0.059733333	0.0196675	0	0	0.079400833	2.9775313	0.4991878	2.3987005	0.80
21	pick and place screw 1	1.4	0.052266667	0.0170242	0.35	0.035802	0.105092867	4.50398	1.1250318	2.97504452	1.58
22	pick and place screw 2	1.5	0.057477849	0.0170242	0.37	0.0359564	0.110458449	4.3047353	1.0433415	3.145898381	1.61
23	place setsquare	2.2	0.082133333	0.016864	0	0	0.098997333	2.6999273	0.3853702	3.0478144	0.85
24	set screw 1	1.0	0.037333333	0	0	0	0.037333333	2.24	0.1968	1.1968	0.20
25	set screw 2	1.8	0.0672	0	0	0	0.0672	2.24	0.1968	2.15424	0.35
26	pick and set screwgun	1.7	0.063466667	0.023272	0	0	0.086738667	3.0613647	0.5335595	2.6070512	0.91
27	tighten screw 1	3.5	0.130666667	0	0.8	0.039276	0.169942667	2.9133029	0.4728542	5.1549896	1.65
28	gun transfer	1.3	0.048533333	0	0.8	0.039276	0.087809333	4.0527385	0.9400228	2.5220296	1.22
29	tighten screw 2	3.0	0.112	0	0.8	0.039276	0.151276	3.02552	0.5188632	4.5565896	1.56
30	unpick all	1.4	0.051190967	0.025768	0	0	0.076958967	3.3675489	0.6590951	2.27492894	0.90
31	pick front bracket	1.6	0.059733333	0.0196675	0	0	0.079400833	2.9775313	0.4991878	2.3987005	0.80
32	pick and place screw 1	1.2	0.0448	0.0170242	0.35	0.035802	0.0976262	4.88131	1.2797371	2.73568452	1.54
33	pick and place screw 2	1.4	0.052266667	0.0170242	0.37	0.0359564	0.105247267	4.5105971	1.1277448	2.97884276	1.58
34	pick assembly	1.2	0.043055205	0.0422557	0.39	0.0361108	0.121421705	6.3171135	1.8684166	3.30804276	2.15
35	place setsquare	2.2	0.082133333	0.016864	3.56	0.0605832	0.159580533	4.3521964	1.0628005	4.53816112	2.34
36	set screw 1	1.1	0.041066667	0	3.56	0.0605832	0.101649867	5.5445382	1.5516607	2.80682672	1.71
37	set screw 2	1.4	0.052266667	0	3.56	0.0605832	0.112849867	4.8364229	1.2613334	3.16586672	1.77
38	pick and set screwgun	1.2	0.045934364	0.023272	4.36	0.0667592	0.135965564	6.6303925	1.9968609	3.687291998	2.46
39	tighten screw 1	3.5	0.130666667	0	4.36	0.0667592	0.197425867	3.3844434	0.6660218	5.83107632	2.33
40	gun transfer	1.1	0.040456894	0	4.36	0.0667592	0.107216094	5.9362948	1.7122809	2.939208746	1.86
41	tighten screw 2	3.5	0.130666667	0	4.36	0.0667592	0.197425867	3.3844434	0.6660218	5.83107632	2.33
42	unpick screwgun	0.8	0.031273739	0.025768	3.56	0.0605832	0.117624939	8.4249556	2.7326318	3.126786239	2.29
43	pick set tighten joint 1	3.5	0.130666667	0.017665	3.61	0.0609692	0.209300867	3.5880149	0.7494861	6.12320132	2.62
44	pick set tighten joint 2	3.5	0.130666667	0.017665	3.71	0.0617412	0.210072867	3.6012491	0.7549121	6.14219252	2.64
45	unpick	1.3	0.048533333	0.0550399	0	0	0.103573233	4.7803031	1.2383243	2.90982154	1.61

CT Manuel

88.8

Rtot

72.14

---

# Annexe B

## Calcul de la charge ergonomique avec maximisation du mode coopératif

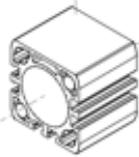
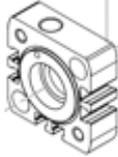
Process 2 - Montage collaboratif (maximisation du mode coopératif)														
Feuille d'enregistrement du chronométrage				Calculs d'énergie					Calcul du temps de cycle éthique					
N°	Operation robot	Opération humain	Min repeatable	Energie posturale	Énergie de mouvement	Masse supplémentaire	Energie supplémentaire	Energie totale ei	MWR	RA	T. cycle éthique	RT		
1	Pick main body	Wait sitting	2.8	0.10266667	0	0	0	0.10266667	2.24	0.1968	3.2912	0.54		
2	place main body	pick and place lower plate and screw	4.0	0.14933333	0.0124054	0	0	0.16173873	2.426081	0.27309321	5.09237284	1.09		
3	hold	pick and place screw 2	1.5	0.056	0.0056954	0	0	0.0616954	2.467816	0.29020456	1.93530684	0.44		
4	hold	pick and set screwgun	2.1	0.068195449	0.007778	0	0	0.075973449	2.18354688	0.17365422	2.450139072	0.36		
5	hold	tighten screw 1	2.8	0.091466667	0	0	0	0.091466667	1.96	0.082	3.0296	0.23		
6	hold	gun transfer	1.0	0.032666667	0	0	0	0.032666667	1.96	0.082	1.082	0.08		
7	hold	tighten screw 2	3.0	0.098	0	0	0	0.098	1.96	0.082	3.246	0.25		
8	hold	unpick screwgun	1.0	0.033800943	0.00861	0	0	0.042410943	2.45926418	0.28669831	1.331375999	0.30		
9	hold	pick and place setsquare and small s	4.0	0.130666667	0.0122185	0	0	0.142885167	2.1432775	0.15714378	4.6285751	0.63		
10	hold	pick and place small screw 2	3.1	0.101266667	0.005642	0	0	0.106908667	2.0692	0.126772	3.4929932	0.39		
11	hold	pick and set screwgun	2.2	0.073173333	0.007778	0	0	0.080951333	2.16833929	0.16741911	2.6150188	0.38		
12	hold	tighten small screw 1	2.5	0.081666667	0	0	0	0.081666667	1.96	0.082	2.705	0.21		
13	hold	gun transfer	1.0	0.033646667	0	0	0	0.033646667	1.96	0.082	1.11446	0.08		
14	hold	tighten small screw 2	2.5	0.081666667	0	0	0	0.081666667	1.96	0.082	2.705	0.21		
15	hold	unpick screwgun	1.0	0.032485475	0.00861	0	0	0.041095475	2.4794654	0.29498082	1.28783762	0.29		
16	hold	activate the robot	0.7	0.023846667	0.0131	0	0	0.039694667	3.03671233	0.52345205	1.11212	0.38		
17	turn sub-assy	pick and set upper plate and shaft	2.9	0.096118451	0.01342	0	0	0.109538451	2.2365401	0.19419815	3.513810501	0.57		
18	hold	insert upper plate and shaft into the r	1.4	0.05376	0	0	0	0.05376	2.24	0.1968	1.72392	0.28		
19	hold	pick and place screw 1	3.3	0.123573333	0.0056954	0	0	0.129268733	2.34323988	0.23912835	4.10151484	0.79		
20	hold	pick and place screw 2	3.5	0.129418595	0.0056954	0	0	0.135113995	2.33857699	0.23721657	4.288897244	0.82		
21	hold	pick and set screwgun	1.8	0.066619536	0.007778	0	0	0.074397536	2.50152569	0.30402553	2.328970769	0.54		
22	hold	tighten screw 1	3.0	0.112	0	0	0	0.112	2.24	0.1968	3.5904	0.59		
23	hold	gun transfer	1.3	0.047413333	0	0	0	0.047413333	2.24	0.1968	1.519936	0.25		
24	hold	tighten screw 2	3.0	0.112	0	0	0	0.112	2.24	0.1968	3.5904	0.59		
25	hold	unpick screwgun	1.0	0.037333333	0.00861	0	0	0.045943333	2.7566	0.408606	1.408606	0.41		
26	hold	pick and place setsquare and small s	4.1	0.153066667	0.0122185	0	0	0.165285167	2.41880732	0.270111	5.2074551	1.11		
27	hold	pick and place small screw 2	3.0	0.112	0.005642	0	0	0.117842	2.35284	0.2430644	3.7291932	0.73		
28	hold	pick and set screwgun	2.6	0.09744	0.007778	0	0	0.105218	2.4188046	0.27010989	3.3149868	0.70		
29	hold	tighten screw 1	2.5	0.093333333	0	0	0	0.093333333	2.24	0.1968	2.992	0.49		
30	hold	gun transfer	1.0	0.036748468	0	0	0	0.036748468	2.24	0.1968	1.178050892	0.19		
31	hold	tighten screw 2	2.5	0.093333333	0	0	0	0.093333333	2.24	0.1968	2.992	0.49		
32	hold	unpick screwgun	1.1	0.039946667	0.00861	0	0	0.048556667	2.72280374	0.39474953	1.492382	0.42		
33	turn sub-assy	pick and place joint 1	1.4	0.052266667	0.00565001	0	0	0.057916677	2.48214329	0.29607875	1.814510246	0.41		
34	hold	rotate joint 1	2.1	0.0784	0	0	0	0.0784	2.24	0.1968	2.51328	0.41		
35	hold	pick and place joint 2	1.5	0.055678814	0.00565001	0	0	0.061328824	2.4673041	0.28994468	1.923893925	0.43		
36	hold	rotate joint 2	2.0	0.074666667	0	0	0	0.074666667	2.24	0.1968	2.3936	0.39		
37	hold	activate the robot	0.7	0.027953977	0.0131	0	0	0.041053977	3.28972542	0.62718742	1.218384623	0.47		
38	eject piece	Wait sitting	12.6	0.468620304	0	0	0	0.468620304	2.24	0.1968	15.02262803	2.47		
<b>CT Coopé</b>			<b>78.2</b>						<b>RTot</b>					<b>15.33</b>

---

## **Annexe C**

# **Nomenclature du vérin support d'expérimentation**

## Nomenclature simplifiée

Schéma	Dénomination composant	Qté
	Corps de vérin	1
	Face supérieure	1
	Face inférieure	1
	Tige piston	1
	Vis M8	4
	Raccord pneumatique	2
	Patte de fixation	2
	Vis M6	4

## **Annexe D**

# **Questionnaire d'engagement pour la conception du premier process cobotisé**

Le questionnaire ci dessous a été rempli au cours de la phase de création du premier process cobotisé, c'est à dire dans la mise en situation dite '0 méthode', afin de vérifier que la cause de l'absence d'amélioration des indicateurs de performance du process élaboré ne provenait pas d'un manque d'engagement que les participants auraient pu ressentir devant la difficulté ou une dynamique d'équipe contreproductive.

- 1 Pas du tout d'accord
- 2 plutôt pas d'accord
- 3 neutre
- 4 plutôt d'accord
- 5 tout à fait d'accord

Groupe    1   2   3

Nom

Date

- 1 Je suis capable de réaliser l'assemblage manuel de façon répétable
- 2 Je suis capable de programmer le cobot pour les opérations nécessaires à l'assemblage
- 3 Je suis efficace sur la programmation
- 4 Mon groupe a avancé sur l'objectif de créer un process hybride efficace
- 5 Nous souhaitons continuer à travailler avec la méthodologie que nous avons choisis jusqu'à maintenant
- 7 Nous avons une stratégie pour créer le process
- 8 Notre organisation est efficace
- 9 Nous avons fait une utilisation judicieuse de nos ressources pendant cette séance
- 10 Nous sommes confiant sur l'atteinte de notre objectif

11 Aujourd'hui mes compétences ont évolué

J'ai atteint un niveau

- 1 pas du tout
- 2 de façon marginale / légère
- 3 de façon sensible
- 4 nettement

- A compréhension théorique
- B mise en œuvre avec support
- C je suis autonome
- D je peux former un nouveau

		evolution	niveau
11.1	Création de process (manuel)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
11.2	agencement de poste de travail	<input type="text"/>	<input type="text"/>
11.3	Programmation cobot UR	<input type="text"/>	<input type="text"/>
11.4	création de process cobotisé	<input type="text"/>	<input type="text"/>
11.5	techniques d'efficacité opérationnelle	<input type="text"/>	<input type="text"/>

## **Annexe E**

# **Questionnaire de retour de perception sur le premier process cobotisé**

---

Sur la conception du premier process cobotisé

1. Quel économie ou perte de temps sur le temps de cycle de départ ?

+ / - \_\_\_\_\_ secondes

Date:

Nom:

Gp:

2. Lors du développement de la solution, quelles ont été les principales difficultés rencontrées ?

3. Selon vous, quelles compétences aurait il été nécessaire de posséder pour obtenir un développement plus rapide ?

4. La phase d'assemblage à la main avant la prise en main du cobot vous a-t-elle été utile, et en quoi ?

5. Quelle a été votre stratégie lors du développement de la première solution ?  
Quels buts avez-vous cherché à atteindre ?

5.5 Cette stratégie a-t-elle fonctionné ?  
pourquoi ?

6. En observant la différence de temps de cycle entre le process manuel et le premier process cobotisé, qu'est ce qui - selon vous - fait que la solution cobotisée est finalement peu efficace ?

7. Quelles compétences vous paraissent nécessaires pour réaliser une meilleure solution cobotisée ?

8. Quels outils vous paraissent nécessaires pour réaliser une meilleure solution cobotisée ?

9. Après visionnage de la video de ce process, quelles améliorations pensez vous mettre en œuvre ?

-  
-  
-  
-  
-  
-  
-

## **Annexe F**

**Synthèse des itérations sur le process  
cobotisé du groupe D - notes des  
participants.**

---

Récapitulatif des changements entre les versions :

V1 : Premier jet

Remarque :

- Quelque problème de sécurité pour l'opérateur

Changements pour V2 :

- Changement de position du garage pour sécurité opérateur

V2 :

Remarque :

- Orientation du poste de vissage pas optimale pour visser

Changements pour V3 :

- Changement de position du bouton poussoir
- Changement trajectoire entre garage et retournement

V3 :

Remarque :

Changements pour V4 :

- Changement orientation des composants dans le magasin
- Ajout de l'étape transport petite vis
- Modifier le retournement du vérin (pour fixer les petites vis)

V4 :

Remarque :

- Le mouvement « retournement » passe très proche des tiges de vérin (dangereux)

Changements pour V5 :

- Suppression de l'étape transport petite vis (car on ne peut pas ramener la boîte sans perdre du temps)
- Réagencement magasin (support tige)
- Ajustement et Optimisation de trajectoire
- Changement Orientation du poste de vissage

V5 :

Remarque :

- Perte de temps sur les rotations que le robot cumule pendant le process

## Annexe G

# Méthode d'estimation des temps de tâche pour le cobot

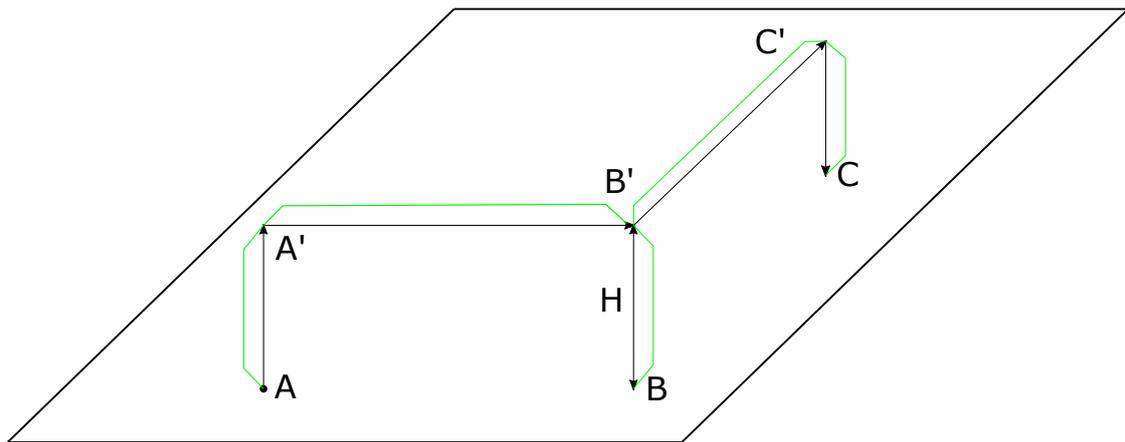


Figure G.1 – Représentation d'une trajectoire sur un plan de travail incluant le **profil de vitesse**.

Pour obtenir une meilleure prédiction des temps de tâche cobot, la méthode proposée réalise une approximation de la trajectoire du cobot, et en calcule le temps de parcours en fonction des lois de commande de vitesse.

Approximation sur la trajectoire (voir figure G.1).

Si une tâche implique 3 points du plan de travail A, B et C, nous supposons que le cobot vient se placer à la verticale de chacun des points (points A', B', C'), à une hauteur  $H$  avant d'accéder à chacun des points au niveau de plan de travail. Nous appellerons 'points d'intérêts' les points A, B et C. Concernant la gestion de la vitesse, nous supposons l'absence de lissage de trajectoire, c'est à dire que le robot passe exactement par chacun des points définis (points d'intérêts et autres points), avec une vitesse nulle.

Le profil de vitesse est illustré par la figure G.2. La vitesse linéaire de consigne est  $v_0 = 250\text{mm/s}$ , l'accélération  $a_0$  qui détermine le temps transitoire  $t_{tr}$  a une valeur de  $1250\text{mm/s}^2$ . La valeur de décélération est identique.

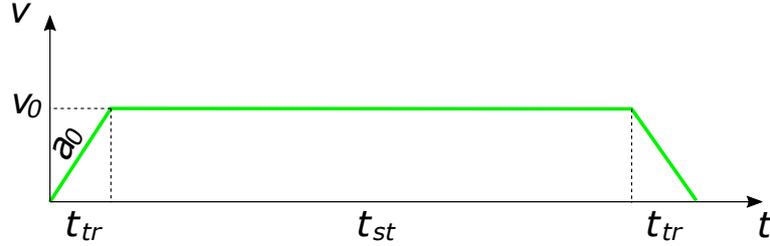


Figure G.2 – Représentation du profil de vitesse sur un tronçon.

La durée  $t$  d'un trajet entre deux points AA' par exemple est la somme des temps transitoires  $t_{tr}$  et du temps à vitesse stable  $t_{st}$ , voir équation G.1

$$t = t_{tr} + t_{st} + t_{tr} = t_{tr} + 2 \times t_{tr} \quad (\text{G.1})$$

On peut déterminer  $t_{tr}$  et la distance parcourue correspondante  $d_{tr}$  avec les calculs suivants (voir équations G.2 et G.3).

$$t_{tr} = \frac{v_0}{a_0} = \frac{250}{1250} = 0.2\text{s} \quad (\text{G.2})$$

$$d_{tr} = \frac{1}{2} \times t_{tr} \times v_0 = \frac{1}{2} \times 0.2 \times 250 = 25\text{mm} \quad (\text{G.3})$$

Le temps passé à vitesse constante  $t_{st}$ , pour le trajet AA' s'exprime donc de la façon suivante (voir équation G.4

$$t_{st} = \frac{AA' - 2 \times d_{tr}}{V_0} \quad (\text{G.4})$$

Le temps total de trajet  $t$  entre 2 points A et A' s'exprime donc avec l'équation G.5

$$\begin{aligned} t &= \frac{AA' - 2 \times d_{tr}}{V_0} + 2 \times \frac{v_0}{a_0} \\ t &= \frac{AA' - 2 \left( \frac{1}{2} \times t_{tr} \times v_0 \right)}{V_0} + 2 \times \frac{v_0}{a_0} \\ t &= \frac{AA'}{v_0} + \frac{v_0}{a_0} \end{aligned} \quad (\text{G.5})$$

Une trajectoire comportant  $n$  points d'intérêts, possède donc  $(n - 1)$  segments horizontaux de longueur  $L$  variable, et  $(2n - 2)$  segments verticaux de longueur  $H$ , va donc correspondre à un temps de trajet  $t_{tot}$  qui s'exprime avec l'équation G.6.

$$\sum_{i=1}^{n-1} \frac{L_i}{v_0} + (n-1) \times \frac{v_0}{a_0} + (2n-2) \times \left( \frac{H}{v_0} + \frac{v_0}{a_0} \right) \quad (\text{G.6})$$

Prise en compte des temps de rotation.

Comme indiqué en section 5.4.3.2, la translation sur un tronçon peut être ralentie si elle est combinée à une rotation qui n'a théoriquement pas le temps de se réaliser intégralement dans ce lap de temps. Le profil de vitesse de rotation est de même nature trapézoïdale que les vitesses linéaires, ainsi le temps nécessaire à une rotation s'exprime avec l'équation G.7.

Soit :

- $\theta$  l'angle de la rotation effectuée sur le tronçon
- $\omega_0$  la vitesse de rotation stabilisée ( $60^\circ/s$  dans notre cas)
- $\dot{\omega}_0$  l'accélération ( $80^\circ/s^2$  dans notre cas)

$$t = \frac{\theta}{\omega_0} + \frac{\omega_0}{\dot{\omega}_0} \quad (\text{G.7})$$

Pour chaque tronçon comportant une rotation on comparera donc le temps nécessaire pour effectuer cette rotation au temps nécessaire à la translation, et l'on retiendra le plus élevé des deux que l'on utilisera pour remplacer le terme correspondant au temps  $t_i$  du tronçon correspondant.

Les ouvertures / fermetures de pinces ont elles aussi été comptabilisées, avec une valeur de 0.25s par mouvement effectué.

Les formules ont été saisies sur un tableur pour que les utilisateurs n'aient à saisir que les informations suivantes :

- Longueur totale des segments horizontaux.
- Nombre de point de passages.
- Hauteur de dégagement.
- Rotation (si il y en a) et longueur du tronçon correspondant
- Nombre d'activations de l'effecteur.

Ensuite ils obtiennent les estimations pour chacun des trajets saisis (cf. figure G.3).

operation#	Input data						Intermediate calculation						ouput values	
	total length (mm)	Nb WP	H(mm)	rotation 1 value	rotation 1 segment length	Nb gripper activation	transitory	stable speed displacement (w/o rota)	rota 1 segment duration	up/down	displacment W/o rota 1	gripper open / close time	prediction w/o rotation	prediction with rota 1
5	984	3	100	0	0	2	0,8	3,536	N/A	3,6		0,5	8,4	N/A
7	906	3	100	0	0	2	0,8	3,224	N/A	3,6		0,5	8,1	N/A
11	195	2	50	90	120	2	0,4	0,58	2,25	1,6	0,68	0,5	3,1	4,7
12	1816	5	40	0	0	2	1,6	6,464	N/A	3,6		0,5	12,2	N/A
23	616	2	40	0	0		0,4	2,264	N/A	1,44		0	4,1	N/A

Figure G.3 – Illustration de la feuille de calcul mise à disposition

---

## **Annexe H**

# **Questionnaire de retour sur les solutions algorithmiques**

---

Utilisation solution algorithme

Groupe

Cas d'étude

Mono objectif (CT)  
Mono objectif + vissage  
Eco + Ergo

Données prep:

Nb tâches   
Méthode estimation temps cobot

facteur k  
estim traj.  
transition

1. Nombre de solutions générées par l'algorithme

2. Pour les solutions immédiatement écartées : Qté de solutions rejetées

Quelles raisons ont poussé à écarter cette / ces solution (sans essai)

Sol 1

Sol 2

Sol 3

Quels modifications sur les variables permettraient de rendre la solution exploitable ?

Quel résultat obtenu ?

---

### 3. Pour les solutions retenues ou exploitables

Solutions identiques ou très proches de la solution déjà implémentée via Lean  
(peu d'intérêt)

justification :

La solution proposée est significativement différente et semble implémentable sans  
modification

justification :

Une partie de la solution proposée par l'algorithme peut être utilisée pour  
modifier la solution trouvée par la méthode Lean et fournir une amélioration  
a priori

justification :

**Résultat d'implémentation**

---



**Résumé :** La robotique collaborative ouvre de nouvelles perspectives de création de process, via de nouvelles possibilités d'interaction homme-machine. Or les résultats d'implémentation apparaissent contrastés en terme de performance, ce qui pose le problème d'efficacité de l'implémentation de technologies innovantes dans les process de production. A contrario, le lean manufacturing, sans être une approche techno-centrée, est aujourd'hui reconnu comme une méthode efficace pour dégager une performance durable des process de production, notamment en mettant à contribution les acteurs du process dans des activités d'amélioration continue. L'objectif de ce travail est d'évaluer la pertinence de ces techniques issues du lean pour l'intégration de robotique collaborative, dans le contexte même de leur mise en œuvre, c'est-à-dire en s'appuyant sur les compétences développées par les opérateurs. Pour cela ce travail de recherche s'appuie sur les méthodes de recherche orientée conception. Dans cette perspective nous avons développé et testé avec des groupes d'étudiants un protocole expérimental qui simule l'intégration de robot collaboratif dans un process d'assemblage initialement manuel. Différents cas d'études de complexité variable sont testés, et un outil d'optimisation a été développé afin d'identifier des solutions approchées en support des démarches lean.

**Mots clés :** Robotique collaborative, Lean manufacturing, Amélioration continue, Recherche orientée conception, Conception de process, Optimisation

**Abstract :** Collaborative robotics is now available as a manufacturing technologie for industry, and opens new perspectives for process design increased opportunities of human – robot interactions. Nevertheless, implementation results are yet questionable when it comes to performance evaluation, which draws attention to successful implementation strategy of advanced manufacturing technologies. Besides, lean manufacturing, as a non technology-centered approach, is widely recognized as a sustainable performance enabler in most manufacturing environments, specially thanks to its ability to involve operators in continuous improvement activities. The purpose of this work is to assess the relevance of lean techniques in the scope of collaborative robot integration, in the very context of their usage, i.e. by using the skills developed by the operators. In this perspective, this research work relies on principle proposed by Design Based Research, mainly used in educational science. Therefore, we have designed an experimental protocol, and tested it with several groups of students to replicate the introduction of a collaborative robot into a manual assembly process. Several case studies are tested, offering various compelxity levels. Moreover, an optimisation algorithm has also been developed in order to support lean techniques for approximate solution search.

**Keywords :** Collaborative robotics, Lean manufacturing, Continuous Improvement, Design based research, Process design, Optimization

