UNIVERSITE DE MONTREAL

L'APPLICABILITE DU JUSTE A TEMPS DANS L'INDUSTRIE AERONAUTIQUE

par

Stefano EUGENI
DEPARTEMENT DE GENIE INDUSTRIEL
ECOLE POLYTECHNIQUE

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION
DU GRADE DE MAITRE EN INGENIERIE (M.Ing.)

septembre 1990

© Stefano Eugeni 1990

National Library
of Canada

Canadian Theses Service

Ottawa, Canada
K1A 0N4

Bibliothèque nationale
du Canada

Service des thèses canadiennes

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège sa thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

ISBN 0-315-69630-3

Canada

UNIVERSITE DE MONTREAL

ECOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

L'APPLICABILITE DU JUSTE A TEMPS DANS L'INDUSTRIE AERONAUTIQUE

Présenté par: Stefano Eugeni

en vue de l'obtention du grade de: M.Ing

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. Michel Normandin,	D.Sc.A., président
M. Mario Godard,	M.Sc.
M. Kalyan Ghosh	D.Eng.

SOMMAIRE

Cette étude avait pour but d'adapter un système de production basé sur le juste à temps à une entreprise oeuvrant dans le domaine de l'aéronautique. Elle fut réalisée à l'usine de Longueuil de la compagnie Pratt & Whitney Canada.

A partir des informations recueillies sur les processus de fabrication des tuyères d'éjection, une des composantes majeures des moteurs à turbine à gaz, des cellules de production furent créées afin de faciliter l'écoulement des matériaux. Cette implantation fut comparée à un projet lancé par l'entreprise concernant le même produit et un compromis fut proposé. En même temps, une étude sur les changements nécessaires au sein des cellules fut effectuée pour permettre la conversion au juste à temps.

Ensuite, on s'attaqua au système de gestion de la production dans le but de le rendre plus compatible avec les objectifs du juste à temps tout en l'adaptant aux particularités de l'entreprise. Finalement, une analyse de rentabilité fut entreprise pour juger de la validité du système global par rapport au projet de l'entreprise.

Cinq cellules furent créées: deux de fabrication de composantes, une de sous-assemblage, une d'assemblage et une

pour les traitements thermiques. Par contre, suite à l'évaluation sommaire des coûts, les deux cellules de fabrication furent combinées et certaines machines de l'assemblage furent partagées avec le sous-assemblage afin de réduire leur récurrence et ainsi diminuer les investissements. De plus, les temps de mise en course furent réduits de 80% et la nécessité d'implanter un système de contrôle préventif des défauts ainsi qu'une main-d'oeuvre multi-fonctionnelle pour augmenter la flexibilité de l'usine fut démontrée.

Un système de planification de la production de type "Pull" fut proposé. Dans la cellule de fabrication, le système accumule sept jours de consommation avant de lancer un cycle de production pour garder les coûts de mise en production à un niveau acceptable tandis que les cellules de sous-assemblage et d'assemblage sont gérées directement par le système Kanban qui, à son tour, est dirigé par la séquence d'assemblage bimensuelle. Finalement, l'analyse de rentabilité a permis de démontrer la viabilité économique du système proposé puisqu'il affiche un taux de rendement interne de 196% et un délai de récupération actualisé inférieur à un an.

Grâce à ces résultats, il nous est possible d'affirmer que la conversion au juste à temps est possible dans des domaines tel l'aéronautique où la fabrication se fait par lots et le volume de production est faible.

ABSTRACT

This study's goal was to adapt a production system based on just-in-time to a firm working in the aeronautical field. It was carried out at Pratt & Whitney's Longueuil plant.

From the information collected on manufacturing methods for exhaust ducts, one of the major components of gaz turbine motors, cells were created to facilitate material flow. This layout was then compared to a project for the same product, initiated by the firm and a compromise was proposed. Concurrently, a study on the changes required in the cells was done to permit their conversion to just-in-time.

Then, the production planning system was addressed to render it more compatible with the objectives of just-in-time manufacturing while adapting it to the firm's specific features. Finally, a profitability analysis was undertaken to verify the validity of the system as a whole compared to the company's project.

Five cells were built: two part-manufacturing cells, a sub-assembly cell, another for assembly and one for heat treating. But, following a broad evaluation of the costs, the two manufacturing cells were combined and certain machines of the assembly cells were shared with the sub-assembly cell to

reduce their recurrence and cut investment costs. Furthermore, setups were reduced by 80% and the necessity for a preventive control system for defects along with multi-fonctionnal manpower, in order to increase the plants flexibility, was discussed.

A "Pull" type production planning system was proposed. For the manufacturing cell, the system accumulates seven days worth of consumption before initiating a production cycle. This is done to keep the order preparation costs at an acceptable level. The sub-assembly and assembly cells are directly controlled by the Kanban system which in turn is directed by a bi-weekly assembly sequence. Finally, the profitability analysis has demonstrated the economic viability of the proposed system since it has an internal rate of return of 196% and a discounted payback period that is under a year.

Consequently, we may conclude that it is possible to convert a firm in a field such as aeronautics, where there is batch manufacturing and production volumes are low, to just-in-time manufacturing.

REMERCIEMENTS

J'aimerais exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui m'ont encouragé et aidé lors de la réalisation de cet ouvrage.

Je voudrais remercier, principalement, la compagnie Pratt & Whitney Canada qui a subventionné l'étude qui a mené à la production de ce document. J'aimerais remercier particulièrement M. John Carroll, chef du génie industriel et de l'optimisation des systèmes, M. Victor Vonka, spécialiste en manutention et M. Royal Demers, directeur de la fabrication des tôleries ainsi que tout son personnel qui m'ont beaucoup aidé et supporté lors de mon stage à l'usine de Longueuil.

Finalement, ce mémoire n'aurait jamais vu le jour sans les conseils de M. Mario Godard, directeur de recherche du mémoire, qui a su me guider tout au long de ce travail.

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE iv

ABSTRACT vi

REMERCIEMENTS viii

TABLE DES MATIERES ix

LISTE DES FIGURES xiii

LISTE DES TABLEAUX xv

LISTE DES ABREVIATIONS xviii

LISTE DES ANNEXES xx

INTRODUCTION 1

1 - Révision des concepts reliés au juste à temps dans le contexte de cette étude 5

1.1 Réduction des temps de mise en course 8

1.2 Améliorer la qualité 12

1.3 Fiabilité des équipements 15

1.4 Réaménagement en fonction des produits 16

1.5 Le travailleur multi-fonctionnel 23

1.6 Contrôle de la quantité par le système Kanban 24

1.7 Nivellement de la production et petits lots 25

1.8 Réduction des délais et cycle d'amélioration 27

2 - Description du domaine d'étude et de la situation présente 28

2.1 Le produit 31

2.1.1 La fabrication des composantes 31

2.1.2 L'assemblage des composantes 35

2.1.3 L'usinage des tuyères 38

2.1.4 La demande annuelle 39

2.2 L'implantation projetée par l'entreprise 41

2.2.1 Ressources et espaces nécessaires 41

2.2.2 Inventaires de produits en cours et finis 43

2.3 La méthode de planification et de contrôle de la production 45

2.4 Les limites de l'étude 48

3 - Approche suivie 49

3.1 Création des cellules de fabrication et d'assemblage 50

3.1.1 Les cellules de fabrication 50

3.1.2 Les cellules d'assemblage 56

3.1.3 Evaluation du coût de l'implantation et délais de fabrication théoriques 59

3.2 Réorganisation en cellules plus viables 61

3.2.1 Modifications à l'implantation 61

3.2.2 Evaluation sommaire du coût de la proposition 63

3.3 Améliorations nécessaires au niveau des cellules 64

3.3.1 Réduction des temps de mise en course 65

A/ Presse mécanique 110 t (#6136) 66

B/ Soudeuse à molette (#7308) 71

C/ Soudeuse T.I.G. circulaire (#7328) 76

D/ Tour vertical à contrôle numérique (#143) 81

3.3.2 Améliorations de la qualité par des dispositifs simples 87

3.3.3 Formation d'une main-d'oeuvre multi-fonctionnelle 92

3.4 Le système de planification de la production 98

3.4.1 Détermination de la taille des lots 99

3.4.2 Le plan mensuel 101

3.4.3 Gestion des cellules de production 105

A/ La cellule de fabrication de composantes 106

B/ La cellule de sous-assemblage 109

C/ La cellule d'assemblage 111

D/ La cellule de traitement thermique 115

3.4.4 La séquence d'assemblage 116

4 - Viabilité du système proposé par rapport à l'usine projetée par l'entreprise 121

4.1 Les investissements 124

4.1.1 Achat de l'équipement de production 124

4.1.2 Installation de l'équipement 124

4.1.3 Coût des modifications aux mises en course 125

4.1.4 Achat des étagères d'entreposage 125

4.1.5 Achat des chariots 127

4.1.6 Coût du système Kanban 129

4.2 Les coûts d'opération 129

4.2.1 La main-d'oeuvre 129

4.2.2 La location de l'espace 130

4.2.3 Fournitures de production 131

4.2.4 Frais généraux de fabrication fixes 132

4.2.5 L'amortissement fiscal des immobilisations 132

4.3 Avantage d'opportunité 133

4.3.1 Inventaire 133

4.4 Les cash flow annuels 133

CONCLUSION 137

BIBLIOGRAPHIE 140

ANNEXES 142

LISTE DES FIGURES

1.1 Aspects constituants le juste à temps et leurs relations 8

1.2 SMED: étapes conceptuelles et techniques 12

1.3 Diagramme de cause à effet pour l'amélioration de la fiabilité d'un processus 14

1.4 Ecoulement des matériaux à travers une implantation fonctionnelle 19

1.5 Ecoulement des matériaux à travers une implantation par produits 19

1.6 Comparaison entre une implantation fonctionnelle et par produits 20

2.1 Configuration d'un moteur tirant sa poussée du flux d'air éjecté (JT15) 29

2.2 Configuration d'un moteur tirant sa poussée de la force développée au bout d'un arbre (PT6) 29

2.3 Deux processus majeurs de fabrication de composantes 32

3.1 Modifications aux ensembles matrice-poinçon 68

3.2 Modifications au poste de travail (presse 110 t) 69

3.3 Soudeuse à molette modifiée 73

3.4 Méthode de fixation des roues 73

3.5 Nouvelle disposition de la soudeuse T.I.G. circulaire 78

3.6 Dispositif de fixation du rouleau de fil d'apport 79

3.7 Transport des gabarits pour le tour #143 82

3.8 Système de positionnement du gabarit 83

3.9 Contrôle de la distance électrode-joint 89

3.10 Système de sélection de pièce 91

3.11 Circuits des trois opérateurs dans la cellule d'assemblage 113

LISTE DES TABLEAUX

2.1 Prévisions de ventes pour l'année 1990 40

2.2 Ressources et espace nécessaires pour l'implantation projetée par l'entreprise 42

2.3 Inventaire des produits en cours et finis dans l'usine actuelle 43

2.4 Comparaison entre les délais de fabrication et les temps standards 44

3.1 Liste des machines dans les cellules de fabrication et de traitement thermique 55

3.2 Liste des machines dans les cellules de sous-assemblage et d'assemblage 58

3.3 Ressources et espace nécessaires pour l'implantation "idéale" 60

3.4 Taux d'utilisation dans les implantations idéale et proposée 62

3.5 Ressources et espace nécessaires pour l'implantation proposée 63

3.6 Opérations de mise en course pour la presse 110 t (#6136) 67

3.7 Mise en course modifiée pour la presse 110 t 70

3.8 Opérations de mise en course pour la soudeuse à molette (#7308) 72

3.9 Mise en course modifiée pour la soudeuse à molette 74

3.10 Opérations de mise en course pour la soudeuse T.I.G. circulaire (#7328) 77
3.11 Mise en course modifiée pour la soudeuse T.I.G. circulaire 79
3.12 Opérations de mise en course pour le tour vertical à contrôle numérique (#143) 81
3.13 Mise en course modifiée pour le tour vertical à contrôle numérique 85
3.14 Taille des lots actuels pour le sous-assemblage et l'assemblage 99
3.15 Taille et durée des lots proposés pour le sous-assemblage et l'assemblage 101
3.16 Prévisions pour le mois de janvier 1990 102
3.17 Main-d'oeuvre nécessaire dans les cellules de production pour le mois de janvier 1990 102
3.18 Main-d'oeuvre totale pour janvier 1990 104
3.19 Inventaire moyen des composantes finies 108
3.20 Inventaire moyen des composantes en cours 108
3.21 Inventaire moyen des sous-assemblages finis 110
3.22 Inventaire moyen des sous-assemblages en cours 110
3.23 Inventaire moyen des tuyères en cours 114
3.24 Inventaire moyen de tuyères finies 115
3.25 Horaire d'assemblage pour les cinq premiers jours de janvier 1990 117
3.26 Horaire de production de la cellule de sous-assemblage pour les cinq premiers jours de janvier 119

3.27 Charge de travail de la cellule de fabrication de composantes pour les jours 8 à 14 de janvier 1990 120

4.1 Comparaison des investissements et des coûts entre le système proposé et celui projeté par l'entreprise 123

4.2 Analyse différentielle des coûts d'implantation du système proposé vs. le système projeté par l'entreprise 134

LISTE DES ABREVIATIONS

B/V	Bas Voltage (dans le cas de soudeuse par points)
C.N.	Commande Numérique
EDM	Electro-Discharge Machining: usinage par décharges électriques
EOQ	Economic Order Quantity: méthode utilisée pour déterminer la taille optimale d'un lot étant donné les coûts de mise en production et d'entreposage
FIFO	Méthode de gestion des stocks First In First Out
F.P.I	Fluor Penetrant Inspection: inspection par pénétrant à base de fluor
JT15	Turbosoufflante du type JT15
PBM	Planification des Besoins-Matières (en anglais MRP)
PDP	Programme Directeur de la Production
PT6-BP	Turbomoteur du type PT6 Basse Puissance
PT6-HP	Turbomoteur du type PT6 Haute Puissance
PT6-HY	Turbomoteur du type PT6 Hybride
PW100	Turbopropulseur du type PW100
SMED	Single Minute Exchange of Die: technique de réduction des temps de mise en course
T.I.G.	Tungsten Inert Gas: méthode de soudage à électrode non-combustible et sous une atmosphère protectrice
T/T	Cellule de traitement thermique
VAN	Valeur Actuelle Nette

WIP	Work In Progress: se dit de l'inventaire de produits en cours et du département qui contrôle leurs déplacements

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1. Nomenclature en arbre des six familles 143

ANNEXE 2. Diagrammes de déroulement-matière simple de l'assemblage d'une tuyère 147

ANNEXE 3. Liste des machines de l'usine projetée par l'entreprise 163

ANNEXE 4. Codification des machines et routes suivies par les composantes 165

ANNEXE 5. Matrices paquets/machines pour le Group Analysis 167

ANNEXE 6. Taux d'utilisation des machines pour la fabrication des composantes 173

ANNEXE 7. Cheminement des composantes pour le Line Analysis 174

ANNEXE 8. Diagrammes des cellules de fabrication 179

ANNEXE 9. Taux d'utilisation des machines pour l'assemblage et l'usinage final des tuyères 182

ANNEXE 10. Diagrammes des cellules de sous-assemblage et d'assemblage 183

ANNEXE 11. Diagrammes des cellules modifiées 186

ANNEXE 12. Liste des machines pour les usines idéale et proposée 189

ANNEXE 13. Coût des changements de méthode de mise en course 191

ANNEXE 14. Calcul de la taille d'un lot suite à la réduction des temps de mise en course de 80% 196

ANNEXE 15. Prévision des besoins en tuyères pour l'année 1990 199

ANNEXE 16. Temps d'opération et de mise en course et nombre de transports pour les six familles de tuyères 200

ANNEXE 17. Variation du niveau d'inventaire de sous-assemblages finis en fonction du temps 202

ANNEXE 18. Application du Goal-Chasing pour déterminer la séquence d'assemblage 205

INTRODUCTION

De nos jours, les entreprises sont de plus en plus confrontées à la nécessité de répondre rapidement aux besoins de leurs clients tout en cherchant des moyens de réduire leurs coûts d'opération. Plusieurs philosophies de gestion ont été développées avec ces objectifs en tête: le juste à temps, "l'optimized production technology" (OPT) et la technologie de groupe pour n'en nommer que quelques-unes. Les premières entreprises à adopter ces philosophies avaient pour la plupart une production de masse (automobiles, électronique) qui semblait mieux adaptée aux changements préconisés et promettre de plus gros bénéfices.

Pourtant, comme le mentionne M. Robert Hall dans son livre "Zero Inventories" (1), le potentiel d'amélioration existe aussi dans les autres entreprises si on veut faire preuve d'ingéniosité. Ce mémoire s'intéresse à l'applicabilité d'une de ces philosophies, le juste à temps, dans un domaine qui a des caractéristiques beaucoup plus proches du "job shop" que de la production à haut volume: l'aéronautique.

L'industrie de l'aéronautique est typiquement un domaine où le contenu technologique est très important. Son développement est limité par les progrès techniques au niveau du design des produits ainsi que dans les méthodes de

fabrication. La fabrication de moteurs pour cette industrie est basée sur des projections à long terme pour le remplacement des moteurs existants et la mise en chantier d'aéronefs. Le volume des ventes, en unités, est loin de celui qu'on retrouve dans l'industrie automobile. Les usines nécessitent des investissements importants pour l'acquisition d'équipements sophistiqués et, puisque les délais d'approvisionnement et de fabrication sont généralement très longs (respectivement 6 à 8 mois et 1.5 ans), elles doivent tenir un inventaire important de produits en cours à divers stades d'achèvement.

L'objectif visé par cette étude est d'adapter un système de production basé sur le juste à temps à une entreprise fabriquant des moteurs d'aéronef dans le but de:

- mieux utiliser les ressources disponibles
- réduire les délais de fabrication
- réduire les inventaires de produits finis et de produits en cours
- augmenter la qualité du produit et la fiabilité de l'équipement

Elle a pu être menée dans un contexte industriel grâce au parrainage de la compagnie Pratt & Whitney Canada qui a accepté de nous donner accès à son usine de Longueuil. Vue l'étendue et la diversité des opérations exécutées dans cette

usine, l'étude s'est limitée à un secteur bien défini: la fabrication et l'assemblage d'une des composantes majeures d'un moteur à turbine à gaz, la tuyère d'éjection. Une des raisons qui motiva ce choix fut que l'entreprise était en train d'étudier la possibilité de construire une usine indépendante pour la production de cette composante, ce qui donnerait un point de comparaison pour la présente étude.

Dans une première phase, nous rappellerons les principaux objectifs du juste à temps et décrirons les améliorations à viser lors de l'implantation de cette philosophie.

Par la suite, le produit sur lequel nous travaillerons (les tuyères d'éjection) sera présenté ainsi que son processus de fabrication, la méthode de planification de la production utilisée actuellement et un modèle de l'usine considérée par l'entreprise.

Nous poursuivrons en appliquant les principes exposés au départ à la fabrication des tuyères. Au départ, des cellules seront donc créées sans égard aux coûts mis en jeu puis, elles seront remaniées de façon à diminuer l'investissement tout en minimisant l'impact sur le flux des produits dans l'usine. Dans les deux cas, nous ferons une comparaison sommaire des coûts entre l'implantation proposée et celle projetée par Pratt & Whitney afin de justifier les changements envisagés.

On se tournera ensuite vers les améliorations intra-cellule, plus particulièrement:

- la réduction des temps de mise en course
- l'amélioration de la qualité
- la nécessité d'une main-d'oeuvre multi-fonctionnelle

Finalement, un système de planification de la production sera proposé en se basant sur les deux grands concepts, le Push et le Pull et en développant une solution adaptée au contexte de l'étude.

La dernière partie de ce mémoire consiste en une analyse de rentabilité de la proposition globale en la comparant à l'usine projetée par Pratt & Whitney.

1 - Révision des concepts reliés au juste à temps dans le contexte de cette étude

L'application du juste à temps en Occident est relativement récente (début des années 80, (2)) et c'est pourquoi on rencontre des avis différents sur ce que devrait être le juste à temps. Ce chapitre est présenté pour donner une base commune à tous les lecteurs sur l'interprétation que cet ouvrage a du juste à temps, de ses buts et des aspects qu'il faut considérer lors de son implantation dans une entreprise nord-américaine. Au cours de cette présentation, des techniques particulières nous permettant de réaliser certains aspects seront introduites; leur méthodologie sera présentée plus en profondeur dans les chapitres qui suivent.

La philosophie du juste à temps a pour but principal la réduction des coûts (3) à tous les niveaux de la commercialisation d'un produit. L'indicateur majeur de gaspillage est l'accumulation de stocks dans l'usine (4). Traditionnellement, on acceptait la présence de stocks pour cinq raisons majeures:

- Nécessité de travailler par lots
- Désir d'optimiser l'utilisation de la capacité des ressources
- Nécessité de produire pour absorber les fluctuations des prévisions et les écarts relatifs aux prévisions

- Faible fiabilité de l'équipement
- Problèmes de qualité

Ces conditions étaient réputées immuables lors de la fabrication d'un produit.

Or, le juste à temps remet en question ces principes puisqu'il adopte une autre approche à la gestion de la production. Son objectif est simple (3 et 5):

"... Produire le produit voulu,
au moment voulu,
dans la quantité voulue
et ce, sans gaspillage (ressources, qualité) ..."

pour pouvoir satisfaire aux exigences des clients.

Ceci n'a rien d'original en soi, sauf que le juste à temps veut aussi que la production soit égale à la demande ce qui diffère des méthodes de gestion traditionnelle.

On ne s'intéresse plus à la gestion des stocks mais plutôt à la gestion des flux, les stocks étant considérés comme un défaut du flux (2). Tout doit être mis en oeuvre pour faciliter l'écoulement des produits et c'est pourquoi le juste à temps promeut d'autres principes pour augmenter l'efficacité de la production, soient:

- La réduction de la taille des lots
- La surcapacité des machines
- La polyvalence du personnel
- L'ordonnancement de la production par l'aval
- La fiabilité de l'approvisionnement et des ressources
- La réduction de l'inertie et des délais de fabrication

Le juste à temps englobe toute l'entreprise; pour qu'une usine puisse profiter au maximum du juste à temps, elle doit travailler sur les aspects suivants (3):

- Réduire les temps de mise en course
- Améliorer la qualité (Qualité Totale)
- Augmenter la fiabilité des équipements (maintenance préventive)
- Revoir l'organisation physique de la production (implantation par produits)
- Mieux utiliser le potentiel humain (travailleur multi-fonctionnel)
- Assurer un contrôle de la production par l'aval
- Niveler la production
- Réduire les délais et travailler à toujours s'améliorer
- Standardiser les produits

Il est bien évident que tous ces aspects ont une certaine interdépendance (voir figure 1.1) et que c'est par leur synergie que l'on obtient les meilleurs résultats.

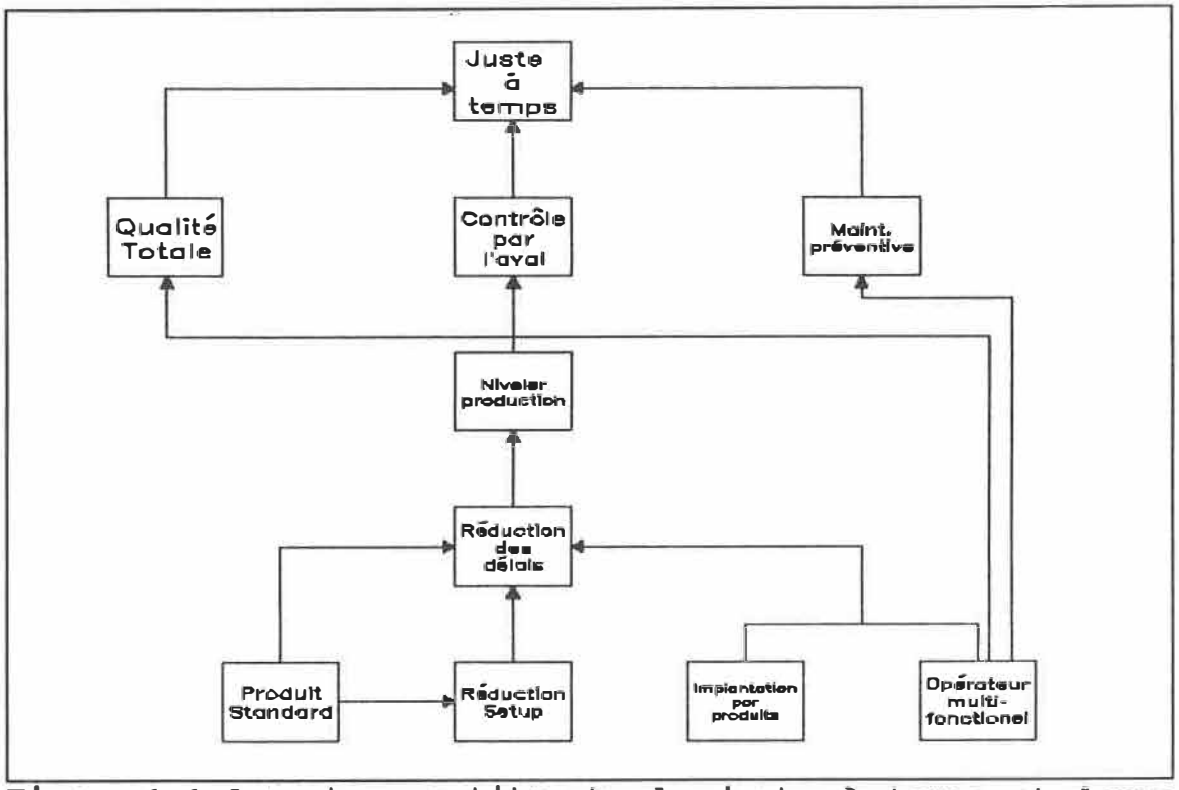


Figure 1.1 Aspects constituants le juste à temps et leurs relations

1.1 Réduction des temps de mise en course

Puisque le juste à temps consiste à suivre de près la demande, il sera nécessaire que la production puisse changer rapidement d'un produit à un autre. Il faut donc étudier les opérations de mise en course pour trouver des moyens de réduire au minimum le temps où les machines resteront improductives.

M. S. Shingo (6) s'est penché sur ce problème pendant dix-neuf ans et a développé une méthode pratique, le SMED

(Single Minute Exchange of Die), pour réduire sérieusement le temps de mise en course. C'est cette méthode qui sera utilisée lorsqu'il sera temps de réduire les temps de mise en course chez Pratt & Whitney.

Les opérations de mise en course sont essentiellement de deux types:

les opérations internes, qui ne peuvent être accomplies que lorsque la machine est arrêtée; par exemple, le montage d'une matrice.

les opérations externes, qui peuvent être accomplies lorsque la machine est en fonction; par exemple, le transport de l'ancienne matrice à l'entrepôt.

Ces deux types d'opérations sont très souvent confondus; ce qui pourrait être effectué en externe est accompli pendant que la machine est arrêtée d'où de longues périodes où la machine reste inactive.

Il faut analyser chaque mise en course pour séparer les opérations internes et externes. Cette distinction constitue la première, et la plus importante, étape du SMED. Si on s'efforce de traiter le maximum d'opérations comme externes, le temps requis pour faire la mise en course interne, lorsque

la machine doit être arrêtée, peut généralement être réduit de 30% à 50%.

La seconde étape, convertir les opérations internes en opérations externes, consiste en une réévaluation de la fonction de chaque opération pour trouver des moyens de l'accomplir sans arrêter la production. A cette étape, il faut adopter une nouvelle perspective et se demander le pourquoi de toute chose. La standardisation fonctionnelle est une technique que l'on peut utiliser; par exemple, si l'on standardise la hauteur des matrices qui doivent servir à une presse, il ne sera plus nécessaire de faire des ajustements de hauteur lors du changement de matrice.

Une autre technique est l'utilisation d'un gabarit intermédiaire pour faire le montage de la prochaine pièce pendant qu'une pièce différente est usinée. Lorsque l'opération d'usinage est terminée, on échange les gabarits et on peut procéder à un autre montage.

La dernière étape consiste à rationaliser tous les aspects de l'opération de mise en course. Ceci requiert une analyse détaillée de chacun des éléments opérationnels. L'utilisation de serres fonctionnelles pour tenir en place des objets avec un minimum d'effort est une des techniques les plus répandues: par divers moyens, on doit pouvoir s'assurer

qu'en un seul mouvement (ou un tour de vis) des objets puissent être maintenus en place. On peut s'attaquer aussi au temps requis pour faire des ajustements qui comptent normalement pour 50% du temps de mise en course. Ces ajustements sont dûs au manque de précision lors du positionnement, il est donc nécessaire d'augmenter cette précision si l'on veut éliminer l'ajustement. Par exemple, on peut calibrer les paramètres d'une machine et se servir de valeurs numériques pour indiquer le réglage sur un cadran. Finalement, on peut considérer la mécanisation des opérations de mise en course.

Les trois étapes conceptuelles du SMED ainsi que certaines techniques sont présentées à la figure 1.2.

Grâce au SMED, l'opération de mise en course moyenne requiert un vingtième du temps originalement requis. En réduisant ainsi le temps où la machine est inactive, on augmente sa productivité (et sa capacité); en même temps, on réduit les erreurs lors de la mise en course, on simplifie la tâche des opérateurs qui pourront faire les setup eux-mêmes (ce qui était rare dans le passé). La fabrication par petits lots devient possible ce qui augmente la flexibilité de l'usine et diminue les temps d'attente dûs aux gros lots influençant ainsi positivement les délais de fabrication des produits.

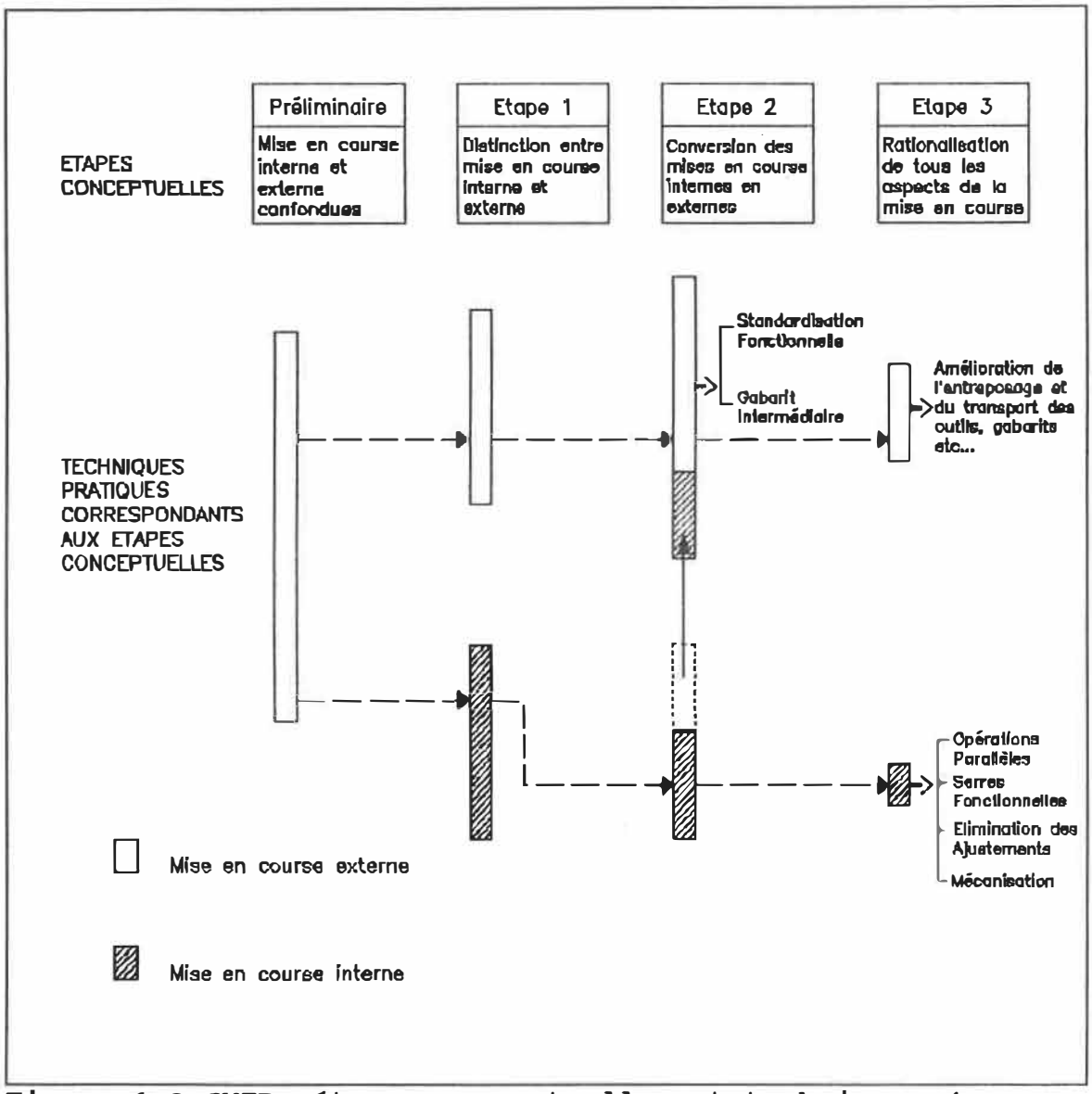


Figure 1.2 SMED: étapes conceptuelles et techniques (source: "The SMED system" (6))

1.2 Améliorer la qualité

Dans la philosophie du juste à temps, la qualité est définie comme étant le développement, le design, la production et l'entretien de produits qui satisferont les besoins des

clients à un coût minimum. Ceci implique non seulement la qualité du produit mais aussi celle du système de production puisque si on réduit les stocks et les délais de fabrication, on ne peut se permettre de produire d'articles défectueux.

La première chose à faire est donc de déterminer les exigences en qualité des clients puisque c'est à partir de cela que l'on établira nos critères.

Ensuite, on établit des procédures pour s'assurer que chaque produit livré (100%) réponde à ces critères:

- En premier lieu, il faut que tous les procédés soient sous contrôle (qu'il n'y ait pas de déviation aléatoire des paramètres de qualité). Ceci peut être atteint par l'étude de ces procédés en établissant les relations de cause à effet des déviations enregistrées. La fiabilité d'une machine n'est qu'une des quatre causes possibles (figure 1.3); si on réussit à diminuer (ou éliminer) la variabilité due aux autres causes, la fiabilité du procédé sera grandement améliorée.

- Ensuite, on incorpore dans le processus de fabrication des méthodes de vérification automatique (Jidoka) qui nous préviennent si le processus sort des limites établies. Il y a plusieurs techniques à notre disposition, mais l'idée de base est toujours de vérifier le produit le plus tôt possible

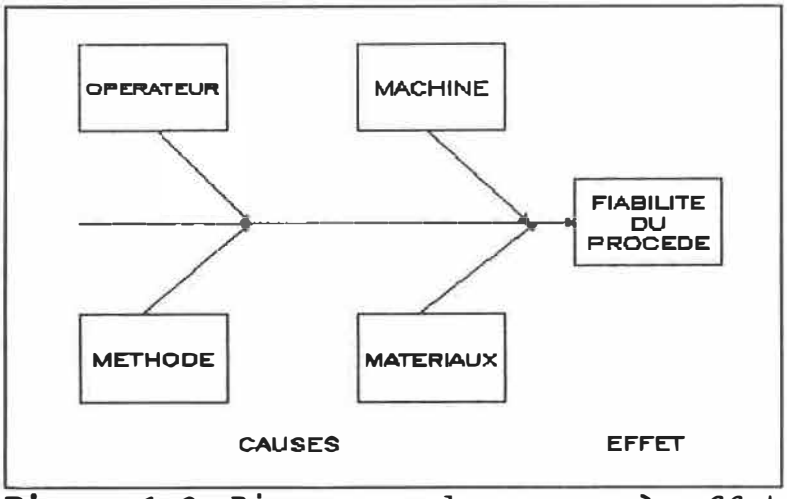


Figure 1.3 Diagramme de cause à effet pour l'amélioration de la fiabilité d'un processus (source: "The New Manufacturing Challenge" (5))

après sa transformation (si possible pendant). Cette vérification peut être faite manuellement par l'opérateur mais de plus en plus, on essaie d'incorporer aux machines des mécanismes qui aident l'opérateur dans sa tâche en arrêtant la machine automatiquement lorsqu'elle a produit la quantité requise ou lorsqu'il y a une déviation. Ceci fait ressortir tout de suite les problèmes et stimule l'opérateur à trouver des améliorations.

En même temps, il faut donner aux travailleurs le pouvoir d'arrêter la ligne si un problème apparaît puisqu'à ce moment, toute l'attention doit être tournée vers la correction de la cause de ce problème afin qu'il ne se reproduise plus.

- Finalement, on bâtit un programme de Qualité Totale qui implique tous les départements et tous les niveaux hiérarchiques. Dès le stade du design, il faut penser à incorporer les paramètres de qualité dans la définition du produit et ceci s'étend jusqu'au service après-vente. Au niveau de la production, on forme des cercles de qualité avec les travailleurs d'une section qui s'attaquent aux problèmes particuliers à cette section. Leur rôle est d'améliorer la qualité du processus de fabrication que ce soit au niveau des opérations, du transport ou même de la gestion. Tous les travailleurs doivent se sentir responsables de la qualité et avoir les moyens pour l'améliorer.

1.3 Fiabilité des équipements

Il est très bon d'être assuré d'une qualité totale, encore faudrait-il que l'on soit assuré que les machines sur lesquelles on doit travailler sont toujours en état de fonctionner à 100 pour cent. Dans bien des entreprises, la maintenance se traduit par la réparation d'équipements défectueux (maintenance palliative), puisque les équipes de maintenance sont trop occupées à "éteindre les feux" et les opérateurs considèrent que ce n'est pas de leur ressort. Or, si l'on veut produire sans stock, il ne faut pas qu'il y ait de bris de machine. Il faut donc monter un programme de

maintenance préventive qui implique autant les opérateurs que les équipes de maintenance.

De la même manière que pour la qualité, la fiabilité des machines devient une responsabilité de l'opérateur puisque c'est lui qui est à même de constater les déviations. Il doit garder son environnement propre, accomplir les tâches mineures d'entretien tel le graissage ou le serrage des boulons et se familiariser avec les machines qu'il contrôle. De cette façon, il lui sera plus facile de détecter des conditions anormales et peut-être y apporter une correction.

D'un autre côté, les équipes d'entretien doivent assister les opérateurs dans leur apprentissage et réagir rapidement lorsqu'un problème est signalé pour ne pas nuire à la production. Des périodes devront être allouées à toutes les machines (entre les quarts, par exemple) pour permettre aux équipes d'accomplir la maintenance périodique et ramener les machines à leur condition normale.

1.4 Réaménagement en fonction des produits

Dans le passé, l'aménagement d'une usine se faisait avec l'objectif de maximiser l'utilisation de l'équipement puisqu'il constituait un gros facteur dans le coût de fabrication. Toutes les machines d'un même type étaient

regroupées dans un département, le personnel pouvait passer d'une machine à une autre sans (ou avec peu de) formation supplémentaire. Si un bris se produisait, il était facile d'utiliser une autre machine et le besoin pour un type de machine était centralisé dans un département ce qui permettait de réduire au maximum le nombre de machines dédoublées.

Or, dans cet environnement, l'accent était mis sur le volume de travail effectué et la communication entre les départements était difficile puisqu'on n'avait pas une bonne visibilité de l'écoulement global des produits. Chaque département s'évertuait à fournir l'effort maximum en exécutant tout le travail qu'on lui présentait mais sans savoir ce qui était vraiment requis tout de suite.

Lors de la planification de la production, il fallait tout prévoir à l'avance puisque le retour d'information nécessitait beaucoup de temps et qu'il était difficile de réagir rapidement à une variation tant au niveau de la demande qu'au niveau de la production (par exemple, mauvaise qualité). On se retrouvait donc avec des accumulations d'inventaire entre les départements et des arrêts de production causés par une pénurie d'autres composantes.

Si on trace le cheminement des produits à travers une usine typique aménagée en fonction des procédés (Figure 1.4),

on se rend compte qu'il y a des pertes d'efficacité à plusieurs niveaux:

1. Difficulté à coordonner les procédés et à planifier la production puisque l'écoulement des produits n'est pas pré-établi et facilement visible.
2. Puisque les procédés sont regroupés, les pièces doivent parcourir énormément de distance. Ceci implique aussi une armée de manutentionnaires et d'équipement.
3. L'écoulement des produits étant assez tordu et les lots étant gros, on a des accumulations de produits en cours en plusieurs points de l'usine.
4. Puisqu'il y a beaucoup de transport et d'attente, le même produit sera manipulé à plusieurs reprises, ce qui offre plus d'occasions pour des accidents et donc une baisse de la qualité (ou de l'efficacité si on répare).
5. Un des résultats des 4 premiers points est un délai de fabrication très long donc un horizon de planification plus étendu sur lequel il faudra faire des hypothèses.
6. Puisque le délai de fabrication est long et que l'on fabrique par gros lots, l'identification des causes de défauts devient très difficile et se fait plusieurs semaines plus tard.

7. Il est difficile de standardiser l'écoulement des produits et le travail des opérateurs.

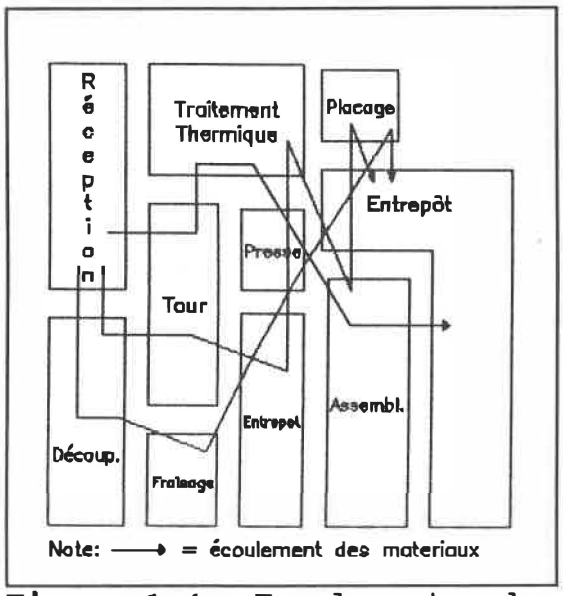


Figure 1.4 Ecoulement des matériaux à travers une implantation fonctionnelle (source: The New Manufacturing Challenge" (5))

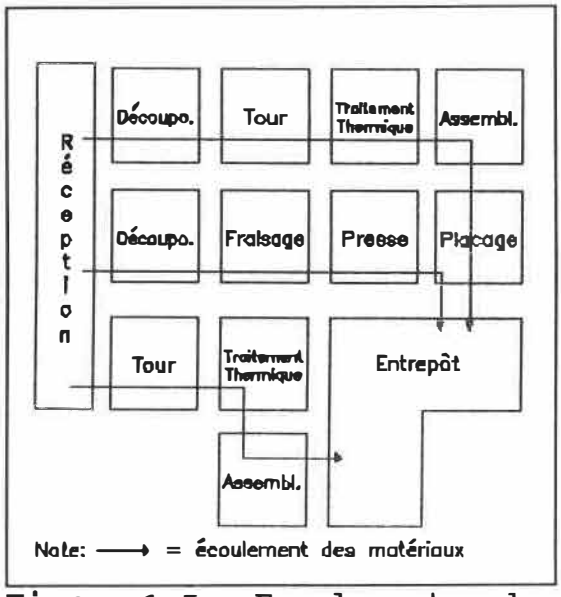


Figure 1.5 Ecoulement des matériaux à travers une implantation par produits (source: "The New Manufacturing Challenge" (5))

Les problèmes mentionnés ci-haut, additionnés au fait que les coûts de main-d'oeuvre ne cessent d'augmenter, nous encourage à changer d'approche pour l'aménagement d'une usine. L'important est de fabriquer un produit le plus rapidement et le plus économiquement possible. Il faut donc que l'usine soit aménagée afin de faciliter la circulation des produits et la coordination des procédés (5). La figure 1.5 nous montre l'usine de la figure 1.4 améliorée: les procédés sont agencés selon la gamme de fabrication des produits, la séquence des opérations est clairement visible, les mouvements de matériels sont minimisés et les procédés peuvent être

coordonnés plus facilement (directement par les gens sur le plancher).

Etant donné que l'on décentralise les procédés, il peut advenir que l'on ait besoin de dédoubler certaines machines même s'il y a surcapacité, mais l'investissement supplémentaire sera profitable si l'on réussit à éliminer les pertes énumérées plus haut. A la figure 1.6, nous comparons les deux approches.

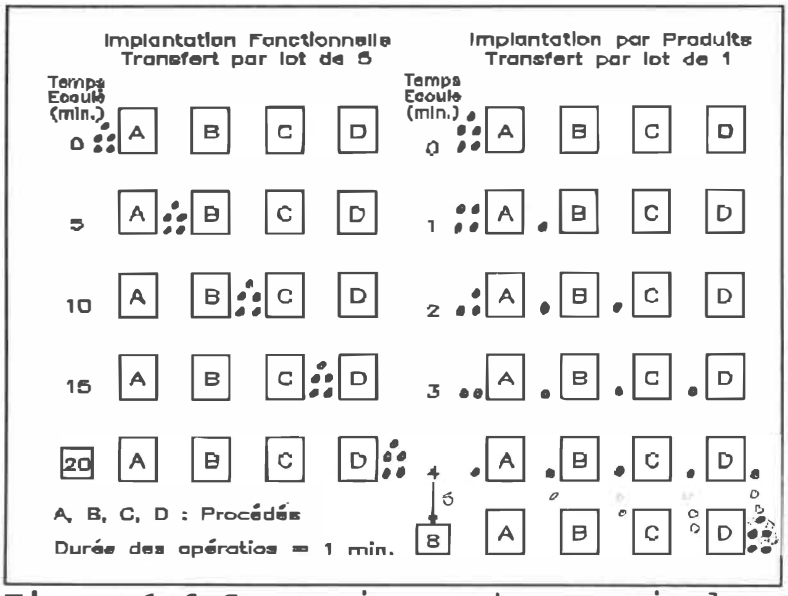


Figure 1.6 Comparaison entre une implantation fonctionnelle et par produits (source: "The New Manufacturing Challenge" (5))

Considérons A,B,C et D, quatre procédés différents chacun nécessitant 1 minute. Si on considère qu'on produisait en lots de 5 antérieurement, chaque procédé nécessite 5 minutes

pour compléter un lot, sans compter le transport, ce qui fait 20 minutes pour fabriquer un lot de 5.

Dans une implantation par produits où l'on peut manipuler les produits un à la fois puisque les machines sont une à côté de l'autre, la 1ère pièce est complétée après 4 minutes et le lot de 5 en 8 minutes. Cet écart dans le délai de fabrication augmentera encore plus si on considère le temps perdu durant le transport.

Si on compare l'inventaire en cours, on voit que pour l'approche fonctionnelle on a 15 composantes comparativement à 3 pour l'approche produit. Cette différence sera d'autant plus grosse dans un environnement réel puisqu'il y a beaucoup de produits différents en cours en même temps; il n'est pas rare de constater dans une implantation fonctionnelle que la somme des temps d'opération principale compte pour seulement 1/100 à 1/1000 du délai de fabrication (K. Suzaki, (5)); le reste étant transport et surtout entreposage en cours. Il sera donc important d'arriver à réduire le temps d'entreposage au lieu de chercher à acquérir des machines plus performantes qui ne feraient que créer de l'inventaire supplémentaire puisqu'elles ne seraient pas coordonnées au reste du processus. De plus, un retour d'information rapide sur les défauts ainsi que la facilité de planifier et de contrôler la

production sont des avantages découlant d'une meilleure visibilité du processus de fabrication.

La technologie de groupe est une approche à la gestion de la production qui prône l'aménagement en fonction des produits. Dans un de ses ouvrages à ce sujet, M. Burbidge (7) nous présente une méthode efficace (Production Flow Analysis) pour réaliser un réaménagement physique qui permettra de produire une "famille" de pièces avec un nombre limité de groupes de machines. Cette technique s'applique en quatre étapes:

- Le "Factory Flow Analysis" étudie l'écoulement des matériaux à travers les différentes étapes de fabrication. Elle permet de constituer des Groupes Majeurs de machines.
- Le "Group Analysis" sépare les pièces passant dans un Groupe Majeur en familles et les machines en groupes de tel façon qu'une famille est traitée par un seul groupe.
- Le "Line Analysis" analyse le cheminement des familles à travers les machines d'un groupe pour déterminer la meilleure implantation.
- Le "Tooling Analysis" divise les pièces passant sur une machine en famille d'outillage et détermine la séquence optimale.

1.5 Le travailleur multi-fonctionnel

En même temps que l'on procède au réaménagement de l'usine en fonction des produits, on doit aussi changer notre vision du travailleur. Puisque les machines seront disposées de façon à faciliter l'écoulement des produits, il faudra former des opérateurs multi-fonctionnels qui pourront suivre le cheminement des produits à travers plusieurs procédés.

Avec des travailleurs multi-fonctionnels, le système de production devient plus flexible puisqu'on pourra augmenter ou diminuer les effectifs d'une cellule[1] facilement pour suivre les fluctuations de la demande.

En même temps que l'opérateur augmente sa flexibilité, il faudra qu'il apprenne à exécuter les opérations de mise en course et d'entretien. Il doit sentir l'importance de son travail et à ce titre vouloir exécuter personnellement toutes les tâches qui pourraient influencer son rendement. Comme il a été mentionné dans les sections précédentes (cf. section 1.1, 1.2 et 1.3), la participation des opérateurs au contrôle de qualité, à l'entretien et aux réglages est très important puisque ce sont eux qui sont directement en contact avec le processus de fabrication; ce point a très bien été exprimé

---

[1] Une cellule est un regroupement de ressources travaillant à la fabrication d'une famille de produits ou composantes

dans un article du Industrial Engineering de février (8) où l'on parle de l'accroissement de la productivité par l'éducation des opérateurs. La Direction doit donner tout son support pour encourager les travailleurs à augmenter leurs habiletés.

1.6 Contrôle de la quantité par le système Kanban

Pour qu'on puisse efficacement contrôler les quantités, il faut adopter une autre façon de planifier la production à l'intérieur de l'usine. Cette méthode s'apparente beaucoup au concept du supermarché où le client va prendre ce dont il a besoin sur les étagères et le magasin n'a qu'à remplir les espaces vides et ne "produit" donc que ce que le client achète. Dans l'usine, les employés d'un procédé vont se rendre à l'aire d'entreposage du procédé précédent pour retirer les composantes nécessaires dans les quantités requises au moment où ils en ont besoin. Le procédé précédent a la responsabilité de ne produire que les unités nécessaires pour remplacer celles qui ont été prélevées. A leur tour, ils se rendront à l'aire d'entreposage du procédé qui les précède et le cycle recommencera.

Dans ce système, le type de produit (ou de composante) et la quantité sont représentés par des cartes nommées Kanbans. Celles-ci servent d'ordre de fabrication quand elles circulent d'un procédé à un autre et c'est ainsi que l'on coordonne toute la production dans une usine. Puisque chaque Kanban représente une quantité prédéfinie d'un produit, on peut toujours contrôler le niveau des produits en cours en contrôlant le nombre de Kanbans en circulation.

Les objectifs de la méthode Kanban sont les suivants:

- Initier la mise en production par l'aval, c'est-à-dire à partir de la consommation réelle.
- Etablir les priorités à partir des besoins réels de la dernière cellule et non des prévisions (comme c'est le cas avec la Planification des Besoins-Matières).
- Ramener l'ordonnancement des ordres de fabrication au niveau de l'exécution (opérateurs).
- Rendre le flux de la fabrication continuellement contrôlable à vue.

1.7 Nivellement de la production et petits lots

Une condition importante pour que la méthode Kanban soit efficace est que l'on puisse niveler la production. Ceci est essentiel puisque si un procédé en aval retire des unités selon une cadence trop fluctuante, les procédés en amont

devront avoir disponible autant d'inventaire, d'équipement et de main-d'oeuvre qu'il est nécessaire pour s'adapter aux pointes de cette demande fluctuante. S'il faut passer par plusieurs procédés, les effets des fluctuations ne cesseront d'augmenter à mesure que l'on remonte les étapes de fabrication.

Cette accumulation de capacité supplémentaire va à l'encontre des objectifs de la méthode Kanban et du juste à temps qui sont de produire seulement ce qui est requis au présent. Il faut donc minimiser la variance dans tous les procédés et ainsi éliminer les ressources "gelées". Pour y arriver, il s'agit de contrôler la production au niveau de l'assemblage final (dernière étape avant le client) qui est la source de toute la demande à travers l'usine. Donc, au début de chaque période de production (entre deux semaines et un mois), on estime la demande pour les diverses gammes de produits et on répartit la production de ces produits de façon à ce que chaque jour on répète la même séquence d'assemblage.

Si le système Kanban remplit bien sa tâche, tous les procédés produiront en fonction de la demande ce qui entraînera une nécessité de réduire la taille des lots pour ne produire que ce qui est requis tout de suite. Par conséquent, les procédés devront être plus efficaces lors de la mise en course d'un lot puisqu'il y en aura plus souvent.

Ce problème a été traité plus haut lorsqu'on a parlé de la réduction des temps de mise en course (cf. section 1.1).

1.8 Réduction des délais et cycle d'amélioration

En travaillant sur les sept aspects mentionnés plus haut, on progresse vers un système qui a un minimum d'inventaire et qui est capable de réagir rapidement aux besoins du marché sans perte d'efficacité. Puisque les lots de fabrication sont plus petits et que l'on est assuré de leur qualité, les délais de fabrication diminueront en conséquence. Ceci nous permettra de nous baser plus sur des ventes réelles que sur des prévisions lorsqu'on prépare le programme de production mensuel et en même temps de raccourcir nos délais de livraison au client.

Mais un principe important du juste à temps est que rien n'est jamais parfait. Il faut donc continuer à réduire les inventaires, les délais et les pannes et améliorer les méthodes d'assurance qualité et la flexibilité des unités de production (main-d'oeuvre, machines, transports etc...). C'est ce désir de s'améliorer qui doit être la force motrice de toute conversion au juste à temps et ce désir doit exister à tous les niveaux de l'entreprise surtout dans la Haute Direction qui doit donner son plein appui et au niveau des travailleurs qui sont le moteur de l'usine.

2 - Description du domaine d'étude et de la situation présente

Comme mentionné précédemment, cette étude est basée sur les données recueillies à la compagnie Pratt & Whitney Canada. Celle-ci fabrique des moteurs à turbine à gaz servant principalement à la propulsion d'aéronefs. Comme on peut l'imaginer, les normes sont très sévères dans ce domaine et la qualité est essentielle et primordiale. Les matériaux et les procédés utilisés requièrent beaucoup d'attention et de précision puisque les tolérances sont souvent de l'ordre d'un dixième de millimètre (ou 5/1000 de pouce).

Les principales composantes de ces moteurs sont:

- un ou plusieurs compresseurs
- un générateur à gaz
- une chambre à combustion
- une tuyère d'éjection
- un boîtier d'engrenages

La composante étudiée dans ce mémoire est la tuyère d'éjection qui, comme son nom l'indique, sert à éjecter les gaz brûlés après la combustion. Elle serait inutile si l'on voulait éjecter ces gaz directement à l'extérieur, dans l'axe de sortie de la turbine, mais une telle éjection causerait du gaspillage, puisqu'en utilisant une tuyère d'éjection, on peut

donner aux gaz une vitesse supérieure à celle qu'ils ont à la sortie de la turbine (9) et ainsi, pour certains types de moteur, contribuer à augmenter la poussée.

De plus, dépendant si on a affaire à un moteur qui tire sa poussée du flux d'air ou de la force développée au bout d'un arbre de transmission, la géométrie de la tuyère sera conçue respectivement pour changer l'écoulement de l'air (cas des moteurs PW100 et JT15, cf. figure 2.1) ou pour protéger le système d'engrenage (cas des moteurs PT6, cf figure 2.2).

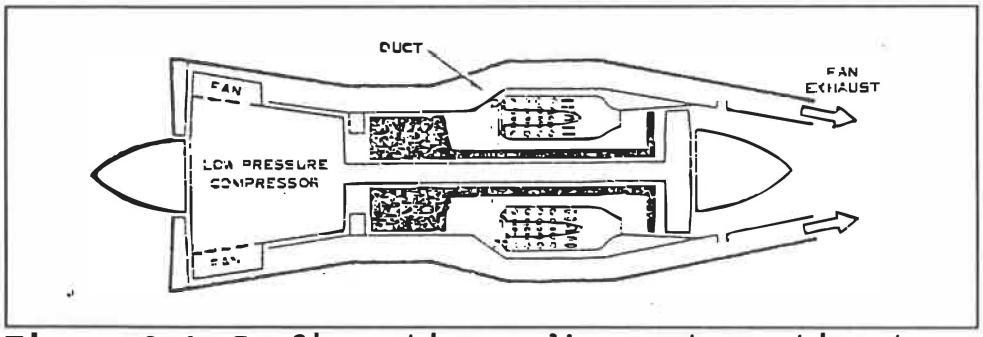


Figure 2.1 Configuration d'un moteur tirant sa poussée du flux d'air éjecté (JT15) (source:(9))

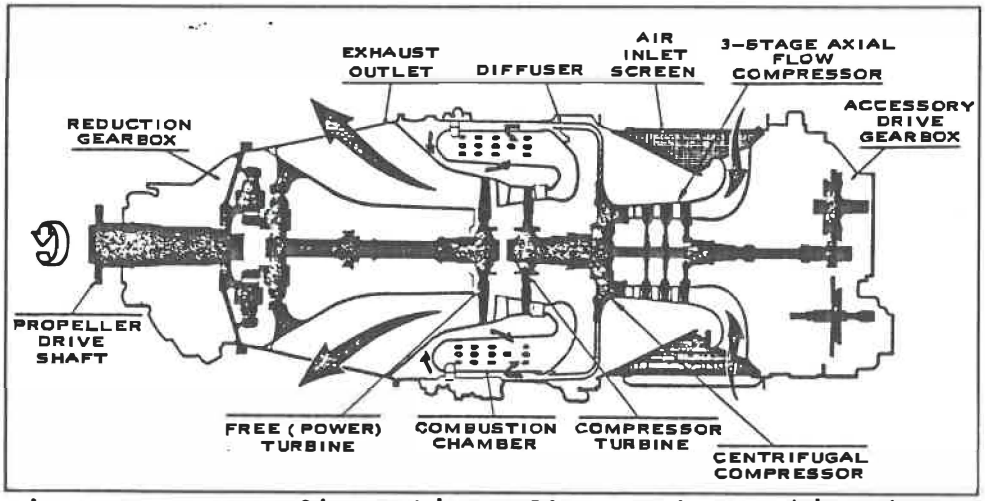


Figure 2.2 Configuration d'un moteur tirant sa poussée de la force développée au bout d'un arbre (PT6)(source: "Le Moteur à Turbine à Gaz" (9))

On distingue trois grandes familles de tuyères correspondant aux configurations de moteurs mentionnés, elles sont:

- PT6 (turbomoteur pour hélicoptère surtout)
- PW100 (turbopropulseur)
- JT15 (turbosoufflante)

Les PT6 se divise en trois sous-familles en fonction de la configuration interne de la tuyère laquelle changera le processus de fabrication. Ces groupes sont:

- haute puissance (HP)
- basse puissance (BP)
- hybride (HY)

Les JT15 se sépare en deux selon que le sous-assemblage du Outer Duct est assemblé à la tuyère (Version A) ou envoyé séparément (Version B). La présente étude portera donc sur six familles de tuyères d'éjection (voir les nomenclatures à l'annexe 1).

2.1 Le produit

La plupart des composantes d'une tuyère sont fabriquées à partir de métal en feuille taillé et formé selon différents patrons. Parmi les autres composantes achetées finies ou semi-finies, cas où elles seront retravaillées dans les locaux de Pratt & Whitney, on compte des brides, des bossages et des pièces moulées.

2.1.1 La fabrication des composantes

Les composantes sont fabriquées dans le département de Métal en Feuille et faites à partir de feuilles de tôle d'alliage à base de nickel et contenant du titane (par exemple des inconels...) pour qu'elles puissent maintenir leurs propriétés mécaniques à de très hautes températures (1000^{o}F) tout en ayant une masse faible.

Les méthodes de fabrication varient selon le type de composante à produire et les deux principales méthodes sont (figure 2.3):

- former la composante à partir d'un cylindre ou d'un cône
- former la composante à partir d'une forme circulaire plane

Dans le premier cas (pièce de type 1), on découpe la forme (rectangulaire, semi-circulaire ou complexe), on

construit le cylindre (par soudure) puis on procède au formage. Ensuite, on perce des trous ou des encoches et finalement, on usine la pièce aux dimensions finales.

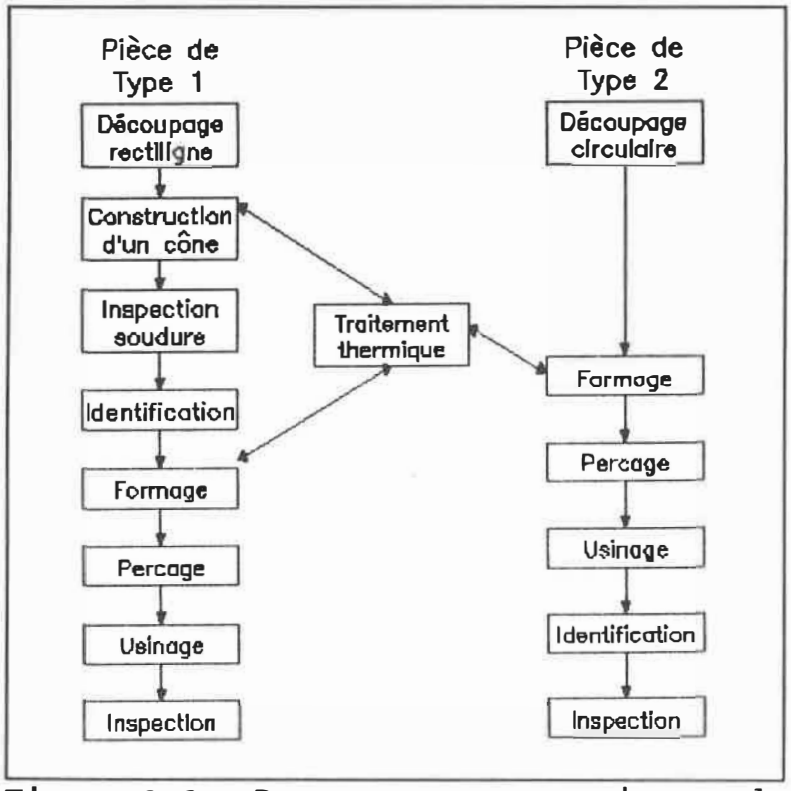


Figure 2.3. Deux processus majeurs de fabrication de composantes

Le deuxième cas (pièce de type 2) est similaire au précédent sauf que l'on découpe un cercle (ou un anneau) et que l'on travaille à partir de cette forme.

Dans les deux cas, une des deux dernières étapes (ou les deux) peut être omise et le formage peut être exécuté en plusieurs opérations successives.

Le découpage est exécuté sur une cisaille (droite ou circulaire), une presse mécanique ou une poinçonneuse au laser.

La fabrication des cylindres débute par une opération consistant à passer la feuille de métal entre des rouleaux qui la courbent. Ensuite, on soude les deux extrémités de cette feuille pour créer le cylindre et on aplanit la soudure afin qu'elle ait la même épaisseur que le métal environnant. La soudure est longitudinale de type T.I.G. (tungsten inert-gas) et est exécutée sur des machines manuelles ou automatiques selon la longueur du joint. Chaque soudure subit une inspection visuelle et, pour certaines composantes, passe par une inspection radiographique (rayon-X pour des inclusions) et/ou une inspection par pénétrant au fluor (F.P.I. pour des fissures superficielles).

Le formage se fait sur des presses mécaniques, hydrauliques ou à membrane; dans le cas des cylindres, on se sert aussi d'un étendeur et de rouleaux formeurs.

Lors des opérations de formage ou après la soudure, des recuits de détente sont effectués sur certaines composantes. Ces traitements se font dans des fours sous vide à des températures allant jusqu'à 1600^{o}F dans une atmosphère d'argon et requièrent environ trois heures et demie par lot. Dans le

cas de formage complexe (en plusieurs étapes), on constate souvent un va-et-vient entre la presse et les fours, afin de relâcher les contraintes induites par le formage.

Le poinçonnage est exécuté sur des presses mécaniques ou hydrauliques ainsi qu'avec un laser à six axes.

En dernier lieu, l'usinage des composantes à leurs dimensions finales se fait sur des tours (horizontaux ou verticaux), une sableuse à courroie, une perceuse à commande numérique et des fraiseuses.

Tout au long de la transformation, on effectue des opérations d'ébavurage (après le découpage, la soudure, le perçage et l'usinage) et de dégraissage (avant la soudure, les traitements thermiques et après le formage, le perçage et à la fin des opérations). Chaque pièce est identifiée par un procédé de gravure soit lorsqu'elle est soudée en cylindre (pièce de type 1), ou à la fin de l'usinage (pièce de type 2).

Pour la plupart des opérations, l'opérateur procède à la vérification par échantillonnage de certains paramètres de la pièce. Un inspecteur est chargé de s'assurer que ces vérifications soient exécutées et qu'il n'y ait pas d'anomalies. A la fin du processus de fabrication, les pièces sont inspectées pour s'assurer que toutes les opérations ont

été accomplies (inspection finale), puis elles sont entreposées.

2.1.2 L'assemblage des composantes

Comme on peut le constater en se référant aux nomenclatures typiques des six familles de tuyères à l'annexe 1, l'assemblage d'une tuyère est souvent constitué de plusieurs sous-assemblages progressifs. Le PT6-HP possède 4 niveaux d'assemblage, les PT6-BP et -HY en ont 3, le PW100 n'en n'a qu'un et le JT15, 2. A ceci on ajoute un niveau d'usinage final séparé de l'assemblage.

Cet usinage est séparé de l'assemblage par le système de gestion de la fabrication puisqu'on se sert d'un groupe de machines différent et qu'il est plus facile de le gérer ainsi. Un numéro de pièce distinct de celui du dernier niveau d'assemblage lui est attribué mais il représente en réalité la dernière étape de l'assemblage.

Les opérations d'assemblage des composantes à proprement parler sont accomplies selon un des deux procédés suivants: la soudure T.I.G. ou la soudure par résistance.

La soudure T.I.G. peut être exécutée manuellement ou sur une machine semi-automatique où l'opérateur a la possibilité de changer certains paramètres à l'intérieur d'un intervalle réglé à l'avance ou sur une machine à contrôle numérique. Les soudures manuelles requièrent plus d'habileté et sont donc exécutées par un soudeur de grade plus élevé. Toutes les soudures sont inspectées visuellement et, théoriquement, une inspection non-destructive (F.P.I. et/ou rayon-X) devrait suivre ainsi qu'un traitement thermique pour relâcher les contraintes, mais en pratique, ceci varie énormément.

La soudure par résistance peut être exécutée sur une machine à souder par points (spot welder) ou à molette (seam welder) mais, dans les deux cas, elle requiert au préalable une opération de positionnement et de fixation temporaire sur une machine à souder par points à bas voltage (tack welder). Cette opération, nécessitant plus de précision et d'expérience, est exécutée par un soudeur de compétence supérieure.

L'assemblage ne consiste pas uniquement à joindre les composantes entre elles; on doit aussi procéder à des opérations de tournage, de poinçonnage, d'expansion, de perçage (sur des perceuses ou des machines à décharge électriques (EDM)), de fraisage et d'aplanissement qui permettent d'ajuster deux composantes (ou sous-assemblés)

avant la soudure ou d'exécuter des opérations nécessitant une localisation sur plusieurs composantes. Ces opérations sont sujettes au même type d'inspection par échantillonnage que les composantes lors de leur fabrication.

Puisque le système de gestion gère chaque composante et sous-assemblage séparément, lorsqu'on fait une soudure, on ne sait pas combien de temps les différentes composantes sont restées en entrepôt. La soudure T.I.G. étant très sensible aux impuretés (oxydation, graisse etc...), on doit donc passer par des opérations d'ébavurage et de dégraissage avant de procéder à la soudure. Lors de soudures par résistance, il est nécessaire de procéder à la préparation des surfaces (ébavurage) pour s'assurer d'une bonne adhésion et après les opérations d'usinage, il est encore nécessaire d'exécuter une opération d'ébavurage pour réduire les risques de blessures causés par les rebuts de métal dépassant de la pièce. De plus, à chaque sous-assemblage puis lors de l'assemblage final, on doit passer par une opération d'identification au début du processus et un dégraissage suivi d'une inspection finale à la fin.

Dans le cas des PT6, à la fin de l'assemblage final, on procède à une trempe de durcissage dans les fours à vide qui dure environ vingt-quatre heures.

A l'annexe 2 est présenté le diagramme de déroulement-matière simplifié de l'assemblage d'une tuyère, les opérations manuelles (ébavurage, identification, dégraissage) ont été omises ainsi que les inspections visuelles des soudures et les inspections finales pour plus de clarté et de concision. On constate l'utilisation répétée des machines à souder des deux types et des opérations secondaires d'usinage. On serait porté à croire que certaines opérations effectuées sur une même machine pourraient être regroupées (par exemple l'usinage des deux extrémités du caisson par le tour vertical, opération 17 et 19 pour les PT6-HP) mais le souci de précision ne nous le permet pas toujours. Notons toutefois que, suite à une analyse des divers processus d'assemblage, certaines modifications de ces processus seront intégrées dans le système proposé.

2.1.3 L'usinage des tuyères

La dernière étape de transformation est l'usinage final de la tuyère (annexe 2). A cette étape, on usine les brides qui serviront à l'assemblage des composantes majeures du moteur, on y perce des trous et on y usine des "scallops", on usine les bossages et on installe les dernières composantes mécaniquement (écrous, rivets, supports).

Les premières opérations sont accomplies sur des tours à commande numérique, une perceuse verticale ou à commande numérique, des fraiseuses, un laser à six axes, des EDM, une rectifieuse et une lameuse. On procède aussi à l'application d'un revêtement céramique sur certaines régions de la tuyère pour permettre la diffusion de la chaleur lors du fonctionnement (dans le cas des PT6, cette opération est fait en sous-traitance). Finalement, les tuyères passent une dernière inspection F.P.I., sont vérifiées de A à Z à l'inspection finale et sont entreposées en attendant leur intégration à un moteur.

2.1.4 La demande annuelle

Puisque cette étude se concentre sur la fabrication des tuyères d'éjection, on peut considérer le département d'assemblage des moteurs comme client. Notons qu'il y a une autre source de demande qui est l'approvisionnement en pièces de rechange pour les moteurs déjà vendus mais celle-ci ne contribue que modestement à la demande totale pour des tuyères (voir section 2.3).

Les prévisions de ventes du département de Marketing pour l'année 1990 sont présentées au tableau 2.1.

PT6-HP	444
PT6-BP	286
PT6-HY	93
PW100	565
JT15-A	72
JT15-B	122
	1582 tuyères par an

Tableau 2.1 Prévisions de ventes pour l'année 1990

Si on considère qu'il y a 237 jours ouvrables dans l'année, la demande globale est de 6.6 tuyères par jour, ce qui représente en moyenne 158.16 heures standards[1] de travail.

En étudiant ces chiffres, il est évident que nous sommes loin de la production de masse. En effet, le volume est bas, la valeur du produit (tuyère) est assez élevée (en moyenne $7 125) et le processus de fabrication demande beaucoup d'ajustements. Ceci démontre bien le caractère "job shop" du domaine d'étude.

[1] la durée standard d'une opération est le temps alloué à cette opération pour fixer la pièce, exécuter l'opération et détacher la pièce.

2.2 L'implantation projetée par l'entreprise

Comme mentionné à l'introduction, cette étude fut menée en parallèle avec un projet de création d'une unité de fabrication de tuyères d'éjection indépendante initié par Pratt & Whitney. Dans cette section, nous présenterons certaines données sur cette implantation qui nous servira de point de comparaison lors de l'étude de viabilité.

2.2.1 Ressources et espaces nécessaires

Le tableau 2.2 montre les ressources nécessaires à la fabrication des tuyères d'éjection dans cette usine indépendante. La plupart des données proviennent d'une étude menée par le département de Métal en Feuille.

Une liste complète des machines est présentée à l'annexe 3, incluant le coût d'achat et l'espace qui leur est réservé. Nous n'avons considéré que les départements directement associés à la fabrication; d'autres, tels le service des outils ou les services de bâtiment, auraient pu être inclus mais l'impact d'un changement de système de production aurait été plus difficile à évaluer.

DEPARTEMENT	MAIN-D'OEUVRE EFFECTIF	MAIN-D'OEUVRE COUT/AN	EQUIPEMENT ACQUISITION	EQUIPEMENT COUT/AN	ESPACE PI^2	ESPACE COUT/AN
Inspection						
- En cours	4.00		$4,000		0	
- Finale	5.00		$22,000		1,150	
- Rayon-X	3.50		$500,000		1,600	
- F.P.I.	2.50		$250,000		1,300	
	15.00	$579,540	$776,000	$75,000	4,050	$65,610
Fabrication Compos.						
- Découpage	2.50	$94,900	$1,062,000		2,420	
- Usinage	2.00	$81,172	$400,000		440	
- Manuel (ébavurage)	2.00	$72,228	$53,600		885	
- Presse + Formage	1.50	$57,447	$1,500,000		1,214	
- Cônes	1.00	$37,596	$240,000		605	
	9.00	$343,343	$3,255,000	$525,270	5,564	$103,664
					835	en cours
Assemblage						
- Soud. manuelle	3.75	$147,030	$120,000		300	
- Soud. automatique	3.50	$135,681	$540,000		1,350	
- Soud. résistance	3.50	$134,225	$850,000		1,104	
- Opérations second.	11.25	$424,125	$977,200		2,891	
	22.00	$841,061	$2,487,200	$1,292,800	5,645	$105,166
					847	en cours
Usinage final						
- Tour vert. + Frais.	11.50	$437,138	$4,373,333		2,508	
- Perçage + Meulage	1.00	$36,556	$768,333		1,248	
- Tour horiz.	1.00	$40,430	$1,023,333		983	
- Manuel	4.50	$164,502	$52,400		875	
	18.00	$678,626	$6,217,400	$1,537,202	5,615	$104,607
					842	en cours
Traitement thermique						
- Fournaise	4.00	$152,048	$1,495,000		2,116	
- Laser 6-axes	0.00	$0	$0		0	
	4.00	$152,048	$1,495,000	$347,690	2,116	$39,415
					317	en cours
Entreposage composantes et Travail en cours	7.00	$264,992	$39,500	$2,100	1,500	$24,300
TOTAL	75.00	$2,859,610	$14,270,700	$3,780,062	27,331	$442,762

GRAND TOTAL $14,270,700 investissement initial
$7,082,434 par an

Tableau 2.2 Ressources et espace nécessaires pour l'implantation projetée par l'entreprise

2.2.2 Inventaires de produits en cours et finis

Puisque cette implantation n'a pas encore été réalisée, il n'y a pas de chiffres disponibles sur l'inventaire. Pourtant, si l'on considère le système actuel, où les tuyères sont fabriquées dans le même département que les générateurs à gaz et les chambres à combustion, et que l'on tient compte du fait qu'on s'attend à réduire de moitié les délais de fabrication dans la nouvelle usine, on peut estimer le volume et la valeur de l'inventaire qu'elle devra supporter. Le tableau 2.3 présente les inventaires actuels:

	Produits en cours		Produits finis	
	Quantité	Valeur	Quantité	Valeur
Composantes PT6-HP	1087	$92,431	1197	$96,330
Composantes PT6-BP	584	$39,098	1860	$147,542
Composantes PT6-HY	60	$3,920	555	$50,171
Composantes PW100	130	$91,460	172	$89,754
Composantes JT15	218	$12,531	236	$38,022
TOTAL COMPOSANTES	2079	$239,440	4020	$421,819
Assemblés PT6-HP	281	$1,221,107	93	$204,005
Assemblés PT6-BP	171	$296,920	243	$329,917
Assemblés PT6-HY	1	$1,558	19	$18,535
Assemblés PW100	0	$0	0	$0
Assemblés JT15	73	$237,316	31	$5,752
TOTAL ASSEMBLES	526	$1,756,901	386	$558,209
Usinage final PT6-HP	61	$457,744	62	$522,536
Usinage final PT6-BP	22	$118,370	56	$359,492
Usinage final PT6-HY	1	$7,548	79	$140,855
Usinage final PW100	48	$242,400	50	$282,150
Usinage final JT15	21	$103,251	47	$190,142
TOTAL USINAGE FINAL	153	$929,313	294	$1,495,175
GRAND TOTAL	2758	$2,925,654	4700	$2,475,203

Tableau 2.3 Inventaire des produits en cours et finis dans l'usine actuelle

Si l'on suppose que la compagnie réussira à réduire de 50% ses délais de fabrication, ces nouveaux délais de fabrication sont présentés au tableau 2.4.

	Délais	Temps standards
PT6-HP	100 jours	36.9 heures
PT6-BP	80 jours	29.8 heures
PT6-HY	65 jours	32.6 heures
PW100	40 jours	10.3 heures
JT15-A	50 jours	15.1 heures
JT15-B	50 jours	22.3 heures

Tableau 2.4 Comparaison entre les délais de fabrication et les temps standards

Il existe une corrélation entre le délai de fabrication et le volume d'inventaire de produits en cours. Nous pourrions donc supposer que cet inventaire serait diminué de moitié dans la nouvelle usine (tous les autres paramètres étant gardé constant). L'inventaire des produits finis, étant plus influencé par la méthode de gestion des stocks qui reste inchangée, ne devrait pas subir de changement notable.

Cette nouvelle usine aurait donc un inventaire de produits en cours d'une valeur de 1,46 millions de dollars et un inventaire de produits finis de 2,47 millions.

2.3 La méthode de planification et de contrôle de la production

Le système de planification de la production est basé sur le système PBM (10). Les commandes de moteurs sont adressées au Marketing qui fournit à l'Ordonnancement de Production (Master Scheduling) les prévisions de ventes sur un horizon de quatre ans. L'Ordonnancement produit un plan directeur de production qui sera mis à jour continuellement.

Les commandes pour des pièces de rechange passent par les Pièces qui fournit à la Planification et Contrôle des Besoins Matières une prévision des besoins en pièces.

A chaque deux semaines, la Planification et Contrôle des Besoins Matières fait une explosion des besoins sur tous les niveaux des nomenclatures de produit et sur un horizon de trois ans en utilisant le programme directeur de production et les prévisions de pièces les plus récents. Durant cette opération, toutes les fiches d'inventaire sont mises à jour avec la demande prévue et les réceptions planifiées pour trois ans. Le système planifie lui-même les ordres de fabrication à être émis suite à l'explosion des besoins.

En même temps, une cédule de fabrication pour vingt semaines est compilée et distribuée aux départements de production en se basant sur les transactions d'inventaire générées. Cette cédule donne les quantités de composantes à produire par intervalle de deux semaines mais n'est mise en circulation qu'à titre d'information pour établir des priorités dans les départements, elle ne constitue pas un ordre de fabrication.

Après l'explosion des besoins et la mise à jour des inventaires, un programme analyse les projections de l'inventaire pour signaler une des trois conditions suivantes: une pénurie ou un excédent d'inventaire planifié ou un ordre de fabrication qui est dû pour être lancé. A ce moment, un contrôleur entreprend les démarches nécessaires, soit avancer ou reculer des commandes déjà planifiées, soit émettre un ordre de fabrication.

Lorsqu'un ordre de fabrication est lancé, les matériaux requis sont préparés et transportés au premier département. L'ordre de fabrication liste les machines à être utilisées et accompagne le lot tout au long de la fabrication. A chaque opération, l'opérateur doit apposer son sceau et inscrire la date à laquelle l'opération a été terminée. Pour les opérations nécessitant une inspection par échantillonnage, le sceau d'un inspecteur des "en cours" doit apparaître aussi.

Si un défaut est détecté, le lot est divisé: les pièces acceptées poursuivent leur route et les pièces défecteuses sont étudiées pour déterminer s'il faut les réparer ou les mettre au rebut. Les lots sont transportés par le personnel du département du Travail en cours (WIP) qui s'occupe aussi de préparer les matériaux lors du lancement d'un ordre de fabrication. C'est ce département qui est chargé d'enregistrer la progression des lots à travers le système de production.

2.4 Les limites de l'étude

Cette étude ne s'intéresse qu'aux composantes fabriquées aux usines de Longueuil (plant 1, 2 et 7). L'approvisionnement des pièces et des matériaux provenant des fournisseurs ne sera pas traité mais l'hypothèse que ces items seront toujours disponibles en quantité suffisante pour alimenter le système de production (ce qui est généralement le cas présentement) est posée.

L'étude portera sur les départements directement impliqués dans la production de tuyères d'éjection soient: les départements de Métal en Feuille, les départements d'inspection et le département de Travail en cours.

Les tuyères seront traitées comme des produits finis et seront acheminées au client (l'assemblage des moteurs) selon la demande établie par l'horaire d'assemblage des moteurs.

Les recommandations qui seront formulées lors de cette étude, sont basées sur les données recueillies dans l'entreprise, et à ce titre, leur valeur sera directement influencée par d'éventuels changements aux méthodes de production ou de planification.

3 - Approche suivie

Dans ce chapitre nous traiterons de la création et de la gestion de cellules pour la fabrication des tuyères d'éjection. En premier lieu, le "Production Flow Analysis" (7) sera utilisé pour construire les cellules de fabrication des composantes. Cette méthode n'étant pas applicable pour l'assemblage des tuyères à cause du faible nombre de produits finis (environ une quinzaine) et du haut degré de répétition des opérations dans un processus d'assemblage, la création de cellules d'assemblage sera basée sur une analyse des diagrammes de déroulement-matière simples. Une évaluation sommaire de la solution théorique sera faite en se servant des coûts d'acquisition de l'équipement, de l'espace occupé, de la main-d'oeuvre et des délais de fabrication possibles.

Par la suite, une réorganisation des cellules sera proposée dans le but d'optimiser les ressources. Ce compromis sera évalué selon les mêmes critères cités précédemment.

La troisième section traitera des améliorations nécessaires au niveau des cellules afin de permettre la conversion au juste à temps. Ces dernières sont principalement la réduction des temps de mise en course, l'amélioration de la qualité et la formation d'une main-d'oeuvre multi-fonctionnelle.

Finalement, une méthode de planification de la production sera proposée en examinant les systèmes de gestion Push et Pull afin de trouver le meilleur compromis étant donné les contraintes présentes dans ce système.

3.1 Création des cellules de fabrication et d'assemblage

Cette section est divisée en deux: la création des cellules de fabrication et ensuite des cellules d'assemblage puisque les méthodes de création utilisées sont différentes.

3.1.1 Les cellules de fabrication

Pour construire les cellules de fabrication par la technique du "Production Flow Analysis", il faut tout d'abord dresser la liste de toutes les composantes fabriquées ainsi que leur séquence d'opérations. Puisque les activités de fabrication sont déjà concentrées dans un département, celui de Métal en Feuille, il sera possible de passer directement à la seconde étape de cette technique, soit le Group Analysis.

Chaque type de machine est codifié et on assigne une séquence codifiée à chaque composante qui représente la séquence des machines utilisées. Les opérations manuelles ne nécessitant pas d'équipement particulier ainsi que les opérations exécutées sur des machines déjà visitées ne sont

pas comptées. Les séquences codifiées sont progressivement triées en paquets selon la machine de la première opération, puis de la seconde et ainsi de suite. A l'annexe 4, le résultat du tri est présenté: quarante-et-une séquences ont été listées correspondant aux cinquante-sept composantes.

Par la suite, on dresse une matrice paquets/machines et on regroupe les composantes en familles, chaque famille étant associée à un groupe de machines. Plusieurs algorithmes sont proposés dans la littérature pour résoudre ce problème de regroupement. Tous semblent fonctionner très bien pour des cas simples mais leur applicabilité sur des cas réels est controversée. Dans ce cas, le "Rank Order Cluster Algorithm" de King (11) a été utilisé, la matrice initiale et la solution finale sont présentées à l'annexe 5 (matrice initiale et matrice finale de l'algorithme de King), mais cette solution n'a que peu d'intérêt puisqu'il n'y a pas de séparation claire en familles; il faudra donc procéder intuitivement.

A la section 2.1.1, nous avions déjà constaté qu'il y avait principalement deux façons de fabriquer les composantes, nous allons donc séparer les paquets en trois groupes soient:

- ceux fabriqués à partir d'un cône
- ceux fabriqués à partir d'une forme circulaire
- et les autres

Ceci nous permettra de constituer deux familles en incorporant les paquets "autres" dans la famille la plus appropriée et en changeant certaines méthodes de fabrication pour intégrer les exceptions. On constate à l'annexe 5 (matrice modifiée) que la séparation est déjà plus apparente.

Les deux familles de pièces ainsi que le groupe de machines qui leur est associé sont les suivantes[1]:

Famille 1: 1,2,3,3A,4,4A,4AA,4B,7,9,10,12,14,15,15A,17, 18,18A,18B,19,20,22,25,26,29,32,36.

Groupe 1: 1,2(1),5(1),7,9,0,A(1),B(1),C,D,E(1),F,H,I,K, L,M.

Famille 2: 5,6,8,8A,11,11A,13,13A,16,16A,21,23,24,28,30, 33,34,35,37,38.

Groupe 2: 2(2),3,4,5(2),6,8,A(2),B(2),E(2),G.

La prochaine étape consiste à vérifier l'utilisation des machines et à considérer des alternatives pour les machines surutilisées ou sous-utilisées. Comme l'indique le tableau de l'annexe 6, il n'y a pas de surutilisation mais il y a plusieurs machines qui ont un taux d'utilisation très bas. Les machines 8 et 9 ont les coûts d'acquisition les plus élevés et des taux d'utilisation faibles (1.93% et 8.08%), elles pourraient être remplacées par d'autres machines. La

[1] Les chiffres entre parenthèses indiquent la répétition d'un type de machine dans plusieurs groupes.

machine 8, un laser à six axes, n'est utilisée que pour deux composantes reçues sous forme de semi-finis. On propose d'utiliser une cisaille manuelle (J) pour découper grossièrement le contour, puis d'employer soit une presse 110t (2), ou une fraiseuse (G) pour finaliser le contour. La machine 9, une découpeuse laser, avait été introduite pour remplacer les presses 110t lors du découpage de certains contours plats. On propose de revenir à l'utilisation d'une presse 110t (2) car le volume de travail ne justifie pas l'utilisation d'un laser. On constate aussi que l'ébavurage exécuté sur la machine F pourrait être fait manuellement étant donné le très faible taux d'utilisation (0.003%).

Suite à ces modifications, les groupes deviennent:

Groupe 1: 1,2(1),5(1),7,0,A(1),B(1),C,D,E(1),H,I,K,L,M.

Groupe 2: 2(2),3,4,5(2),6,A(2),B(2),E(2),G,J.

Après avoir établi les familles et les groupes, on passe au Line Analysis pour déterminer la meilleure séquence des machines à l'intérieur de chaque groupe. Le cheminement de chaque pièce est recodifié, mais cette fois en tenant compte de toutes les opérations (voir annexe 7).

Ensuite, on dessine le diagramme-réseau de chaque famille et par des modifications aux processus de fabrication des composantes on tente de standardiser les cheminements et

obtenir ainsi une séquence des machines optimale. L'annexe 7 présente les cheminements modifiés pour les deux familles. A ce stade de l'étude, une contrainte apparaît au niveau de la localisation des fours à vide. Ces fours constituent un gros investissement et requièrent une installation particulière, il a donc été décidé de séparer ce procédé du reste et de constituer une cellule à part en y ajoutant les deux procédés d'inspection non-destructive (F.P.I. et rayon-X). La disposition des machines à l'intérieur des cellules ainsi que les interactions avec la cellule de traitement thermique sont illustrées à l'annexe 8.

La liste des machines constituant les deux cellules de fabrication ainsi que celle de traitement thermique est présentée au tableau 3.1.

Numéro de machine	Cellule 1	Cellule 2	Cellule T/T
3905		1	
4249	1	1	
4272		1	
6136	2	2	
6145	1	1	
6149	1		
6307	1		
6413	2		
6606		1	
6611		1	
6614	1	2	
6628	1		
7012			1
7095			1
7102	1		
7103	1		
7322	1		
7324	1		
7329	1		
25944			1
90010	1	1	
90012	4	4	
90014	1	1	
90020	2	1	
90038	1		1
90043			1
90059	—	—	1
TOTAL	24	17	6

Note: voir l'annexe 3 pour la description des machines

Tableau 3.1 Liste des machines dans les cellules de fabrication et de traitement thermique

3.1.2 Les cellules d'assemblage

La construction des cellules d'assemblage[1] est réalisée à partir des renseignements contenus dans les diagrammes de déroulement-matière simples de l'annexe 2. Les séquences d'assemblage sont comparées entre elles pour trouver des similarités et, par des modifications au processus ou au procédé, on essaie de combiner les diagrammes et ainsi former une seule ligne d'assemblage pouvant assembler tous les produits.

Le taux d'utilisation des diverses machines a été déterminé à l'annexe 9 pour nous guider dans l'analyse et la modification des processus et décider quelles machines devraient être éliminées.

Durant la construction de la ligne d'assemblage, on veut utiliser un nombre minimum de machines tout en respectant le principe qu'une pièce ne devrait passer qu'une seule fois par une machine donnée. Etant donnée la répétitivité des opérations d'assemblage d'une tuyère, si l'on veut avoir un flux unidirectionnel, il faudra répéter certaines machines plusieurs fois.

---

[1] Dans la suite de ce document, l'assemblage et l'usinage final des tuyères ont été regroupés pour former des cellules d'assemblage

En examinant les diagrammes de déroulement-matière, on constate que la plupart des opérations peuvent être exécutées sur une ligne principale qui serait alimentée par plusieurs lignes auxiliaires qui préparent des sous-assemblages. Ces lignes pourraient être regroupées en une cellule séparée de sous-assemblage ce qui nous permettrait de réduire le nombre de machines nécessaires.

En plusieurs points des processus d'assemblage, on fait appel à un traitement thermique ou à une inspection non-destructive; ces opérations seront exécutées par la cellule de traitement thermique. Cependant, une de ces opérations consiste à exécuter une trempe de durcissage d'une durée totale de vingt-quatre heures; puisqu'elle nécessite à elle seule l'équivalent d'un four à vide, il a été décidé de l'incorporer à la ligne d'assemblage.

En incorporant aux diagrammes les stations manuelles (dégraissage, ébavurage ...) requises par certaines opérations, on obtient une ligne d'assemblage comprenant 42 machines, 2 bancs de travail manuel, 7 stations de dégraissage, 8 bancs d'ébavurage, 1 banc d'inspection des soudures et 1 banc d'identification. La cellule de sous-assemblage serait constituée de 13 machines, 3 stations de dégraissage, 3 bancs d'ébavurage et 1 banc d'identification et les deux cellules feraient appel, en divers points, à la

cellule de traitement thermique. A l'annexe 10, on présente les deux cellules ainsi que les points d'interaction avec la cellule de traitement thermique et au tableau 3.2 ci-dessous, la liste des machines.

Numéro de machine	Cellule sous-assemblage	Cellule assemblage
100		2
143		2
1027		3
1837		2
1845		1
3218		1
3905		2
4249	1	
5131		1
5997		1
6083		1
6106		1
6128		1
6800		1
7095		1
7102	2	3
7103	1	
7308	2	3
7322	2	4
7323	1	2
7324		1
7328	2	2
7339	2	4
7348		1
90010		2
90012	3	8
90014	1	1
90020	3	7
90038		1
90043		1
90059		1
TOTAL	20	61

Note: voir l'annexe 3 pour la description des machines

Tableau 3.2 Liste des machines dans les cellules de sous-assemblage et d'assemblage

3.1.3 Evaluation du coût de l'implantation et délais de fabrication théoriques

Maintenant que les cellules sont construites, on peut procéder à une évaluation sommaire des coûts associés à une telle implantation. Certaines hypothèses ont été posées pour parvenir aux résultats présentés au tableau 3.3:

- L'application des techniques reliées au SMED a permis de réduire le temps de mise en course à des valeurs entre zéro et quinze minutes (plusieurs machines ont un setup permanent).
- Des dispositions ont été prises pour s'assurer que seule des pièces conformes sont mises en circulation.
- La main-d'oeuvre de chaque cellule a la formation requise pour accomplir les tâches qui lui sont assignées (son taux horaire a été ajusté pour tenir compte de sa plus grande flexibilité).
- Le coût d'une heure d'utilisation de l'équipement est similaire à celui de l'usine proposée par l'entreprise.
- La production est nivelée à l'intérieur d'une période de production et l'assemblage fournit des tuyères à un rythme constant.
- Un système de type Kanban gère la production au niveau du plancher de l'usine.

DEPARTEMENTS	MAIN-D'OEUVRE EFFECTIF	COUT/AN	EQUIPEMENT ACQUISITION	COUT/AN	ESPACE PI^2	COUT/AN
Inspection						
- En cours	3.0		$4,000		0	
- Finale	1.0		$5,000		250	
	4.0	$172,224	$9,000	$900	250	$4,050
Fabrication 1	2.5	$107,965	$2,079,050	$263,095	3,528	$58,288
					70	en cours
Fabrication 2	1.5	$64,779	$3,676,050	$355,965	4,458	$52,018
					50	en cours
Sous-assemblage	3.0	$131,196	$1,726,450	$396,721	3,324	$54,497
					40	en cours
Assemblage	8.5	$367,855	$9,418,850	$2,550,741	13,040	$212,463
					75	en cours
Traitement therm.	1.5	$64,818	$1,547,000	$213,820	3,566	$60,815
					188	en cours
Entreposage et manutention	9.0	$340,704	$51,000	$3,250	600	$9,720
TOTAL	30.0	$1,249,541	$18,507,400	$3,784,492	27,892	$451,850

En résumé: $18,507,400 d'investissement
$5,485,883 par an

Tableau 3.3 Ressources et espace nécessaires pour l'implantation "idéale"

Si on compare ces coûts à ceux obtenus pour l'usine projetée par l'entreprise (tableau 2.2), on constate que les deux options deviennent équivalentes après trente-deux mois d'opération et qu'ensuite, l'usine "idéale" devient plus rentable.

De plus, dans l'usine idéale, le délai de fabrication d'une tuyère serait en moyenne de 16.75 heures (temps nécessaire pour assembler la tuyère) au lieu de 65 jours, délai moyen requis dans l'usine proposée.

3.2 Réorganisation en cellules plus viables

L'usine "idéale" présenterait plusieurs avantages par rapport à la proposition faite par l'entreprise mais il reste que le taux d'utilisation des machines est très bas (en moyenne 11.4%). L'aéronautique est un domaine où les ventes sont planifiées par des contrats échelonnés sur plusieurs années, la demande ne fluctue donc pas beaucoup à moyen terme. L'avantage d'avoir un délai de fabrication très court devient moins important pour la planification dans ces circonstances puisqu'il nous est possible de prévoir plusieurs semaines à l'avance les besoins du département d'assemblage des moteurs. On pourrait donc considérer modifier l'implantation pour réduire l'investissement en acceptant certains compromis au niveau du cheminement des produits et des délais de fabrication.

3.2.1 Modifications à l'implantation

En comparant les deux cellules de fabrication, on constate qu'il y a une certaine similitude dans la séquence

des opérations. Ceci nous permettra de les combiner en une seule cellule contenant vingt-neuf machines sans perturber la plupart des flux de composantes (annexe 11). Ainsi, nous avons pu éliminer douze postes de travail qui se répétaient dans les deux cellules.

Dans le cas des cellules de sous-assemblage et d'assemblage, on a constaté qu'une certaine séquence de machines était très similaire dans les deux cellules. Après une analyse de l'utilisation des machines en question, nous avons conclu qu'il serait possible de partager ce groupe de machines entre les deux cellules (le taux d'utilisation combiné de chaque machine ne dépasse pas 25% de la capacité disponible). Cette modification nous permettra d'éliminer douze autres postes de travail. La cellule combinée est représentée à l'annexe 11.

Le taux d'utilisation des machines fut amélioré sensiblement comme le démontre le tableau 3.4 ci-dessous.

Cellule	Idéale	Proposée
Fabrication	5.64%	7.83%
Sous-assemblage	7.64%	10.45%
Assemblage	16.58%	18.22%

Tableau 3.4 Taux d'utilisation dans les implantations idéale et proposée

3.2.2 Evaluation sommaire du coût de la proposition

Les modifications proposées ont pour but de réduire la quantité d'équipement nécessaire et en effet, elles permettront de réduire le coût de l'investissement de $3,737,500 (voir annexe 12 pour comparaison). Cette estimation est basée sur les mêmes hypothèses que citées précédemment; le tableau 3.5 détaille les coûts prévus.

	MAIN-D'OEUVRE		EQUIPEMENT		ESPACE	
DEPARTEMENTS	EFFECTIF	COUT/AN	ACQUISITION	COUT/AN	PI^2	COUT/AN
Inspection						
- En cours	3.0		$4,000		0	
- Finale	1.0		$5,000		250	
	4.0	$172,224	$9,000	$900	250	$4,050
Fabrication 1+2	4.0	$172,744	$3,088,650	$485,738	4,458	$74,164
					120	en cours
Sous-assemblage	3.0	$131,196	$1,221,050	$371,450	2,185	$36,045
					40	en cours
Assemblage	8.5	$367,855	$8,853,200	$2,522,458	12,147	$197,996
					75	en cours
Traitement therm.	1.5	$64,818	$1,547,000	$213,820	3,566	$60,815
					188	en cours
Entreposage et manutention	9.0	$340,704	$51,000	$3,250	600	$9,720
TOTAL	30.0	$1,249,541	$14,769,900	$3,597,616	23,629	$382,790

En résumé: $14,769,900 d'investissement
$5,229,947 par an

Tableau 3.5 Ressources et espace nécessaires pour l'implantation proposée

On constate que la réduction des investissements se reflète sur l'espace nécessaire pour l'implantation qui est réduit de 4,263 pieds carrées contribuant ainsi à abaisser les coûts fixes d'exploitation (assurance, dépréciation...); en tout, on peut compter sauver un peu plus de $250,000 par an.

Ces économies ont une contre-partie: puisque les cellules de sous-assemblage et d'assemblage partagent une partie de l'équipement, il serait prudent, lors de la planification de la production, de s'assurer que les deux cellules peuvent accomplir leurs opérations sans trop perturber le flux des produits.

3.3 Améliorations nécessaires au niveau des cellules

Lors des évaluations du coût des implantations suivant les lignes directrices du juste à temps présentées dans les sections précédentes, plusieurs hypothèses avaient été posées. Dans cette section, nous allons étudier les trois premiers objectifs, soit: la réduction des temps de mise en course, les méthodes d'assurance qualité et la formation d'une main-d'oeuvre multi-fonctionnelle, ainsi que la manière de les réaliser dans les cellules proposées.

3.3.1 La réduction des temps de mise en course

Comme il a été mentionné au premier chapitre, le juste à temps s'applique à produire selon les besoins des clients. Ceci nécessite une certaine flexibilité de la part des unités de production ainsi que la capacité de produire par petits lots. Tout le monde peut voir les avantages d'un tel objectif mais jusqu'à récemment, on y trouvait un inconvénient majeur: la baisse de la productivité due au plus grand nombre de mises en course nécessaires. Les principes du EOQ ont réussi à balancer le coût d'inventaire et celui de la mise en production pour proposer une taille de lot optimum, mais avant de déterminer ce "lot économique", il est primordial de s'attaquer à la réduction des coûts de mise en course, puisque c'est de cette façon que l'on pourra travailler en petits lots sans perte d'efficacité.

Cette section analysera les opérations de mise en course de quatre machines correspondant aux principaux processus lors de la fabrication d'une tuyère, soit: une presse mécanique, une soudeuse par résistance, une soudeuse T.I.G. et un tour à contrôle numérique. En appliquant les techniques proposées par M. S. Shingo (6), des améliorations seront proposées pour réduire le temps d'inactivité (dû à la mise en course) sur ces machines.

A/ Presse mécanique 110 t (#6136)

Cette presse est utilisée principalement dans la cellule de fabrication pour découper le contour des composantes à partir de tôles, mais elle sert aussi à emboutir certaines pièces et poinçonner des ouvertures dans d'autres. Tous les ensembles poinçon-matrice sont en bloc à colonne (die set) ne nécessitant pas d'alignement entre le poinçon et la matrice et possèdent un manchon cylindrique sur la partie supérieur du poinçon qui s'insère dans le coulisseau.

Lorsque la dernière pièce d'un lot est terminée, l'opérateur exécute les opérations décrites au tableau 3.6.

Suite à l'analyse des éléments constituants la mise en course, on constate que 18.6% (9.5 minutes) de sa durée est employé à accomplir des tâches qui pourraient être faites lorsque la presse est en opération, par un autre travailleur (opérations 4, 5, 7 et 8).

En standardisant la hauteur de fermeture des ensembles et en installant un gabarit de centrage sur la semelle inférieure de la presse, on élimine les tâches d'ajustement (opérations 6, 9, 11 et 12) (voir figure 3.1).

Opérations		Minutes
1. Baisser le coulisseau pour refermer l'ensemble		0.5
2. Enlever les attaches (5 à 7 tours de vis) du haut (4) et du bas (4) et relever coulisseau		9.0
3. Glisser l'ensemble sur la semelle de la presse, approcher une table hydraulique et y glisser l'ensemble		1.0
4. Approcher la table hydraulique d'une palette, y transférer l'ensemble, vérifier le numéro du prochain ensemble		1.0
5. Ramasser la palette avec un chariot élévateur, la placer dans l'aire d'entreposage temporaire, ramasser la palette contenant le nouvel ensemble et retourner à la presse		7.0
6. Dépendant de la différence de hauteur entre l'ancien et le nouvel ensemble, l'opérateur peut avoir à ajouter ou enlever une plaque d'attache au coulisseau.		
6a -S'il doit l'ajouter, avec le chariot élévateur, il retire la plaque de son rangement sous la semelle de la presse et la positionne sous le coulisseau	1.0	
-Positionner horizontalement, à l'aide d'un autre opérateur pour le diriger	5.0	
-Poser 4 boulons au complet	8.0	3.5*
6b -S'il doit l'enlever,avec le chariot élévateur, il soutient la plaque	1.0	
-Dévisser les 4 boulons au complet	8.0	
-Descendre la plaque et la ranger sous la semelle de la presse	1.0	2.5*
7. Vérifier la date d'expiration de la certification de l'ensemble		0.5
8. Transférer l'ensemble sur la table hydraulique, approcher la table de la semelle de la presse et y glisser l'ensemble		1.0
9. Positionner le manchon vis-à-vis du trou dans le coulisseau et baisser le coulisseau jusqu'à ce qu'il s'appuie sur l'ensemble		3.0
10. Poser les attaches (8) et serrer		9.0
11. Ajuster la hauteur de fermeture de la presse par des essaies et s'il y a lieu, connecter les micro-rupteurs au système de protection de la presse		10.0
12. Placer première pièce, découper, vérifier les dimensions et faire des ajustements si nécessaire		2.0
		50.0

* Les opérations 6a et 6b sont exécutées une fois sur quatre en moyenne

Tableau 3.6 Opérations de mise en course pour la presse 110 t (#6136)

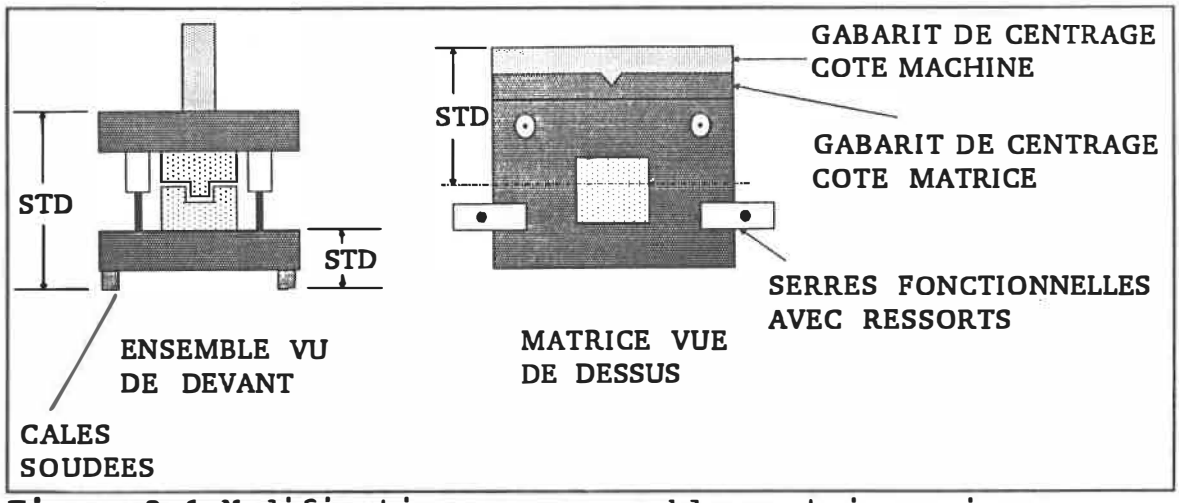


Figure 3.1 Modifications aux ensembles matrice-poinçon

En utilisant deux serres fonctionnelles et standardisant la hauteur de serrage sur la base de la matrice et en utilisant les deux boulons de serrage sur le coulisseau pour fixer le poinçon, on peut réduire le temps nécessaire à l'installation de l'ensemble (opérations 2 et 10).

L'utilisation d'une table pivotante à rouleaux permet à l'opérateur d'évacuer l'ancien ensemble, faire tourner la table et insérer le nouvel ensemble en même temps (figure 3.2)

De plus, en localisant l'entrepôt des matrices à côté de la presse et en y installant un pont roulant gerbeur (stacking crane) avec une pince au bout, on élimine la nécessité des palettes et du chariot élévateur, on accélère le transport des ensembles (la pince agrippe l'ensemble par le manchon cylindrique) et on élimine une double manipulation des ensembles.

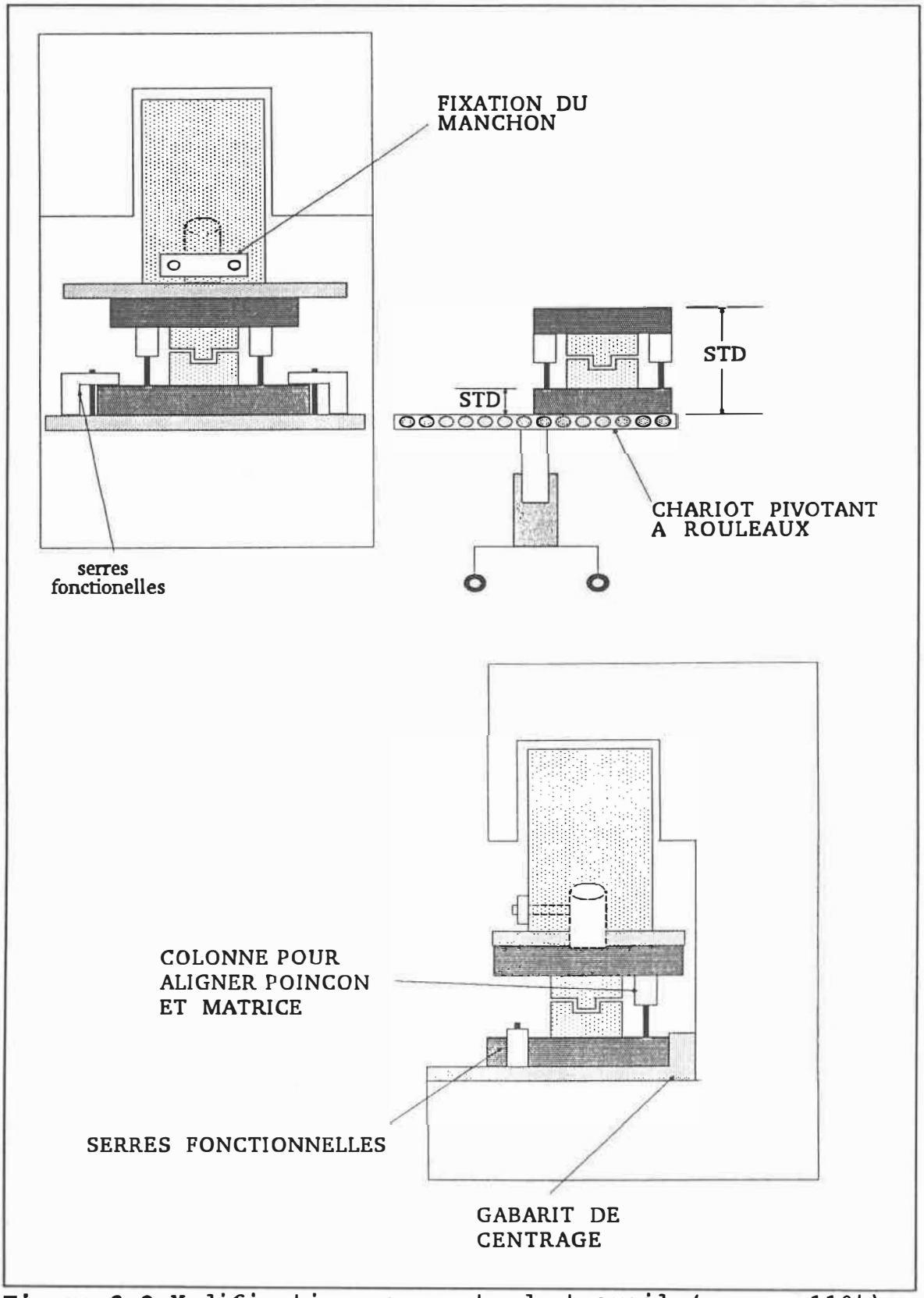


Figure 3.2 Modifications au poste de travail (presse 110t)

Suite à ces modifications, la mise en course d'un lot se fait comme suit:

Opérations	Minutes
1. Baisser le coulisseau	0.5
2. Défaire deux serres et deux boulons (1 tour)	1.0
3. Lever le coulisseau	0.5
4. Transférer ancien ensemble sur table pivotante et nouvel ensemble sur la semelle de la presse	2.0
5. Accoter l'ensemble sur le gabarit de centrage	0.5
6. Descendre le coulisseau	0.5
7. Serrer les deux serres et les deux boulons	1.0
	6.0

Tableau 3.7 Mise en course modifiée pour la presse 110 t

Pendant que la presse travaille, un autre travailleur peut prendre l'ancien ensemble avec le pont roulant, le place à sa place et récupère le prochain ensemble qu'il dépose sur la table pivotante (2 minutes).

L'opération de mise en course qui nécessitait cinquante minutes d'opérations internes en prend maintenant six plus deux minutes d'opérations externes, soit une réduction de 88%.

B/ Soudeuse à molette (#7308)

Cette machine est utilisée dans les cellules de sous-assemblage et d'assemblage pour joindre des composantes de métal en feuille. On utilise de préférence cette machine au lieu de la soudeuse par points, quand la configuration des composantes le permet, car la soudure se fait plus rapidement et que l'avance est donnée par la machine (moins de risques d'erreur). Par contre, la plupart des modifications proposées dans cette section pourraient s'appliquer aussi bien à la soudeuse par points.

Les électrodes sont des roues de diamètre et d'épaisseur variables pouvant être montées directement sur la machine ou sur des extensions à l'aide de quatre boulons. Les tâches à exécuter sont présentées au tableau 3.8.

En examinant ces tâches, on constate que 35.6% (10.5 minutes) pourrait être fait en opérations externes (opérations 1, 2b, 4 et 6a).

De plus, en installant de façon permanente une extension qui accommode toutes les opérations devant être accomplies (figure 3.3), on élimine une partie des opérations internes (opérations 3 et 5). Celles-ci pourraient être réduites encore plus en standardisant l'épaisseur des roues à leur base

et en n'utilisant que deux boulons par roue combinés à deux goujons (figure 3.4).

Opérations	Minutes
1. Consulter la feuille de route pour avoir le numéro de la fiche technique, prendre la fiche et le ruban perforé dans le département	2.0
2. a/Enlever les deux roues en dévissant quatre boulons chaque fois (5 tours)	4.0
b/les sécher	1.0
3. Enlever les extensions (quatre boulons), s'il y a lieu (une fois sur deux)	8.0/2
4. Ramener les roues etc... dans leur casier approprié et prendre les nouvelles roues	7.0
5. Installer les extensions (une fois sur deux)	10.0/2
6. a/Nettoyer les roues au solvent	4.0
b/les installer	0.5
7. Retirer ancien ruban et installer nouveau	1.0
8. Prendre pièces d'essai et faire test "A"	1.0
9. Envoyer pièces au laboratoire er attendre réponse, si c'est bon on fait le lot sinon on ajuste les paramètres	37.5
	67.0

Tableau 3.8 Opérations de mise en course pour la soudeuse à molette (#7308)

Ainsi, un seul tour des deux boulons serait suffisant pour fixer une roue. Les boulons seraient fixés sur la machine, les trous dans les roues laissant passer la tête des boulons et une plaque de fixation ayant des encoches en forme de poire maintient la roue en place (système déjà utilisé).

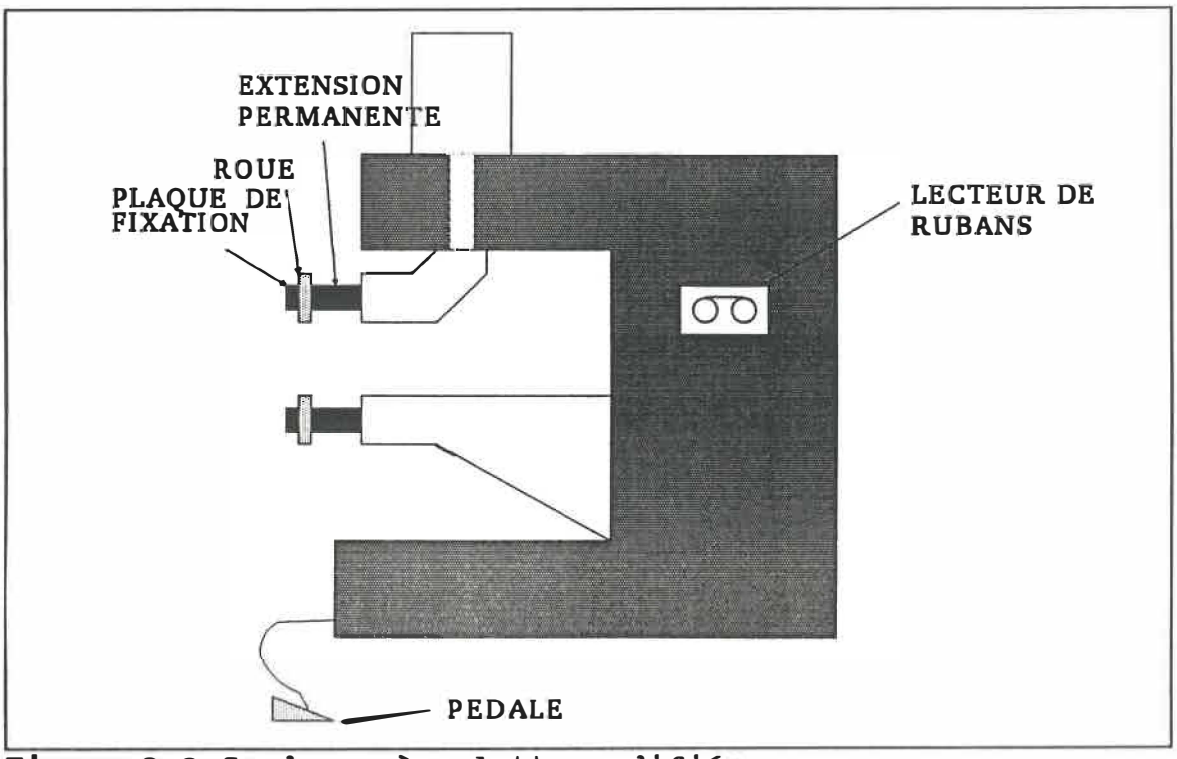


Figure 3.3 Soudeuse à molette modifiée

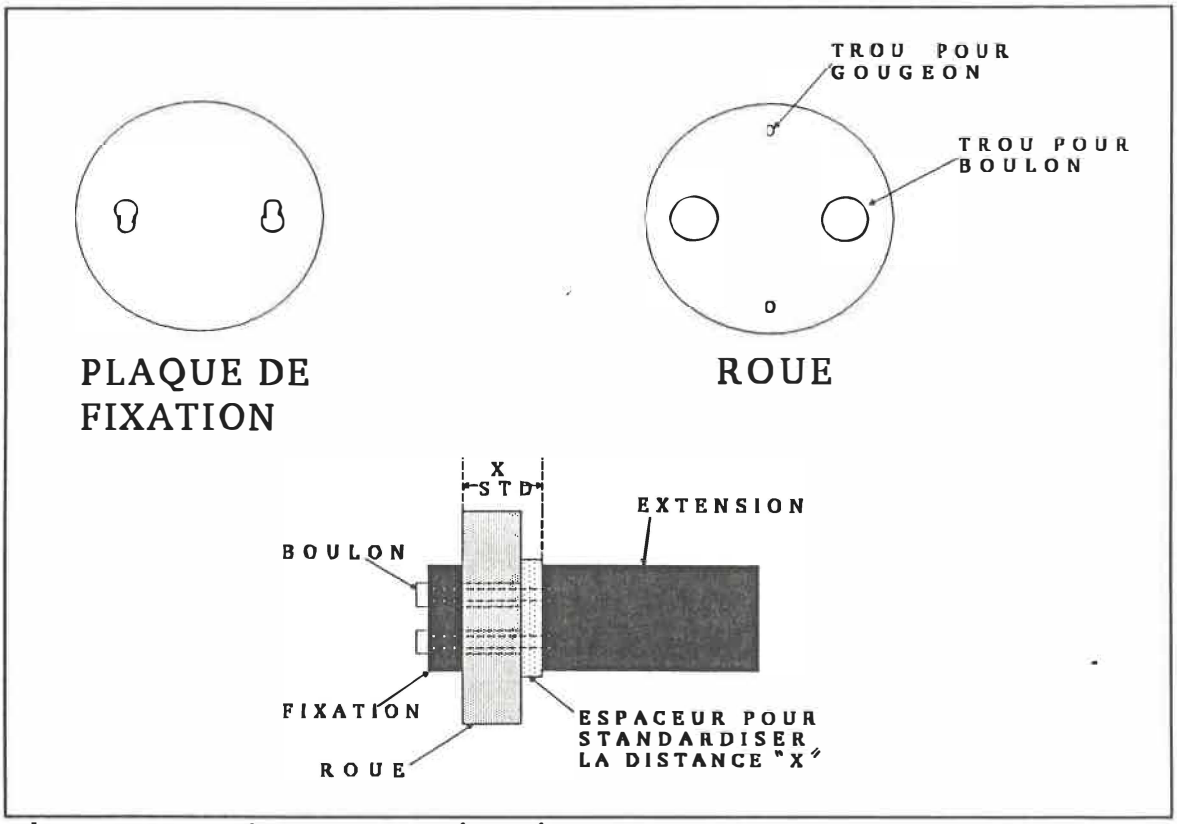


Figure 3.4 Méthode de fixation des roues

Chaque fois qu'un nouveau lot est commencé, il est nécessaire de procéder à un test "A" qui consiste à souder deux morceaux de tôle ayant les mêmes caractéristiques que les composantes à joindre et à vérifier le noyau de soudure (grosseur, recouvrement...). La vérification est accomplie par un laboratoire de soudure centralisé; en ajoutant une scie et un microscope au poste de travail ($18,000) et en formant les opérateurs, on pourrait faire le test sur place et sauver du temps.

En appliquant ces propositions, on obtient le tableau des opérations de mise en course suivant:

Opérations	Minutes
1. Enlever les deux roues en dévissant deux boulons chaque fois (1 tour)	2.0
2. Installer les nouvelles roues (4 boulons)	2.0
3. Retirer ancien ruban et installer nouveau	1.0
4. Prendre pièces d'essai et faire test "A"	1.0
5. Vérifier la soudure et ajuster	6.0
	12.0

Tableau 3.9 Mise en course modifiée pour la soudeuse à molette

Ceci constitue une réduction de 82% de temps par rapport à l'ancienne méthode.

Notons aussi qu'en relocalisant les fiches techniques de soudure, les rubans perforés et les roues près de la machine, les opérations externes pourraient être accomplies en 6 minutes.

C/ Soudeuse T.I.G. circulaire (#7328)

La soudure T.I.G. est utilisée dans la cellule de fabrication pour former des cônes et dans les cellules de sous-assemblage et d'assemblage pour joindre des composantes ensemble, une des deux composantes étant souvent une pièce coulée (bride, bossage...). La soudeuse circulaire est semi-automatique, ce qui veut dire que les paramètres de soudure font partie du programme transmis à la machine mais que l'opérateur peut jouer sur certains paramètres pour améliorer la soudure.

Lorsqu'un lot est terminé, l'opérateur exécute les étapes décrites au tableau 3.10.

On constate, ici aussi, que certaines tâches (opérations 2, 3, 4, 5 et 8b pour un total de 17 minutes) pourraient être accomplies lorsque la machine est en opération.

Certaines de ces machines sont équipées de deux tables tournantes; si on équipe les autres de la même façon ($20,000) on pourrait accomplir certaines tâches préparatoires pendant qu'une opération est en cours (figure 3.5). Ainsi, pendant que l'opérateur soude sur la table 1, un autre travailleur peut consulter la feuille de route pour la prochaine opération, débrancher les conduits d'argon, démonter le

gabarit, l'échanger pour un autre avec la potence, installer le nouveau gabarit sur la table 2, le nettoyer au solvant, vérifier son intégrité et positionner la table à l'angle spécifié par la fiche technique de soudure.

Opérations	Minutes
1. Débrancher les conduits d'argon, mettre la table à l'horizontal, démonter le gabarit (4 boulons)	5.5
2. Avec une potence, transporter le gabarit sur une palette non loin	3.0
3. Consulter la feuille de route pour le numéro de la fiche technique et aller la prendre dans le département	2.0
4. Ramasser nouveau gabarit, le déposer sur la table et vérifier l'expiration de la certification	4.0
5. Nettoyer le gabarit au solvent, vérifier pour des dommages	6.0
6. Positionner le gabarit grâce à un manchon de centrage et la fixer avec 4 boulons	5.0
7. Brancher les conduits d'argon et vérifier le flux de gaz	1.5
8. a/Couper l'ancien fil d'apport, enlever le rouleau (dévisser 1 boulon au complet)	3.0
b/aller à l'armoire et échanger les rouleaux	2.0
c/poser le nouveau et passer le fil dans le système d'entrainement	3.0
9. Ajuster les paramètres sur les cadrans	12.5
10. Changer l'électrode de tungsten	1.5
11. Régler l'angle de la table	1.0
12. Positionner la tête de soudure par rapport à la pièce	5.0
	55.0

Tableau 3.10 Opérations de mise en course pour la soudeuse T.I.G. circulaire (#7328)

Puisque la tête ne bouge presque pas (c'est la table qui tourne) lors de la soudure, en posant un second support à fil d'apport sur la machine (coupe A-A), le travailleur peut aussi enlever l'ancien rouleau et le remplacer par un autre.

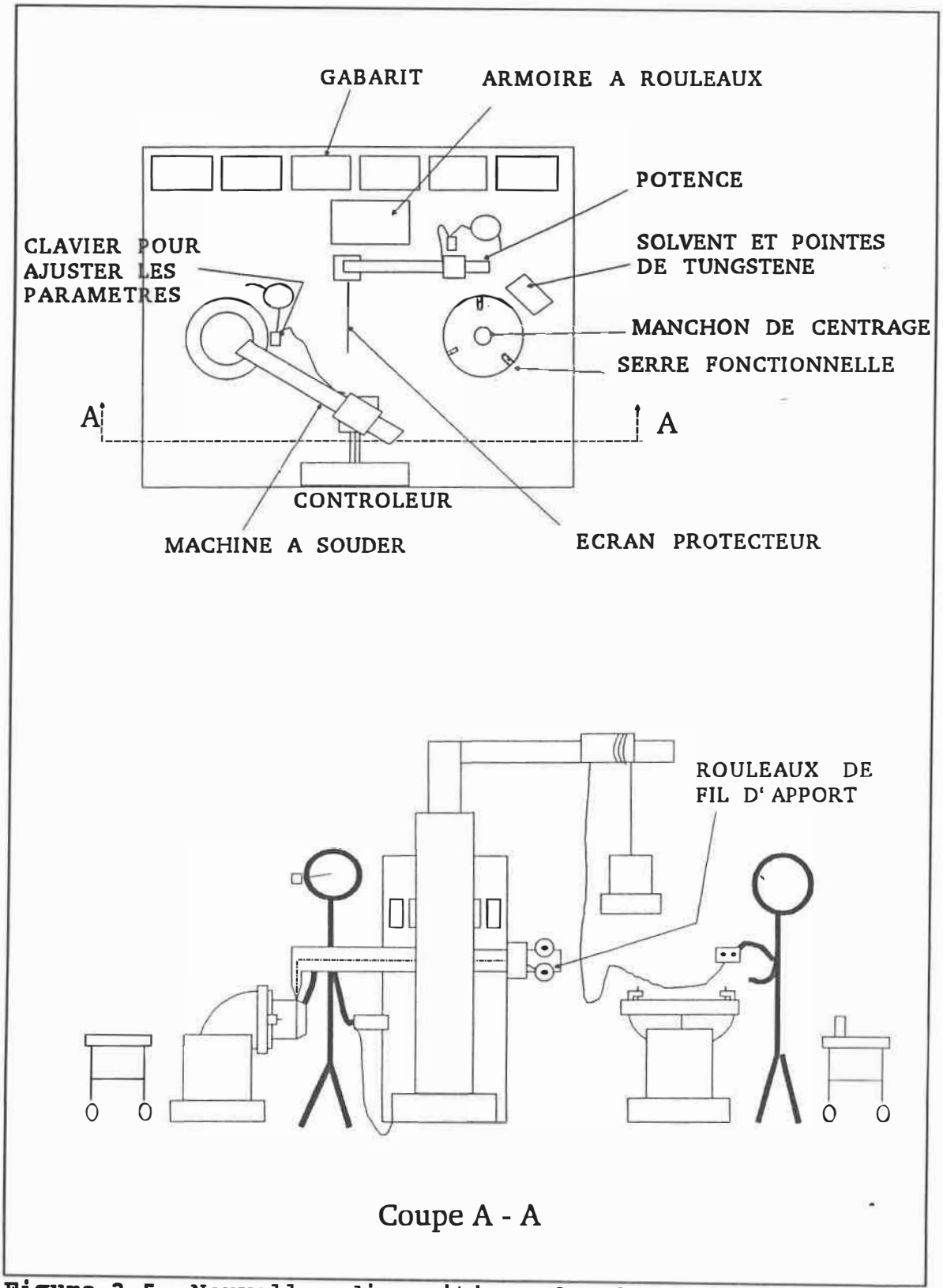


Figure 3.5 Nouvelle disposition de la soudeuse T.I.G. circulaire

De plus, l'utilisation de trois serres fonctionnelles pour fixer le gabarit sur la table au lieu des boulons, la décentralisation des fiches techniques, des rouleaux et des gabarits et l'utilisation d'un système à bille-et-ressort (figure 3.6) pour fixer le rouleau de fil d'apport réduira la durée des opérations externes de 34.0 minutes à 19.5 minutes et évitera une double manipulation des gabarits qui sont normalement entreposés ailleurs.

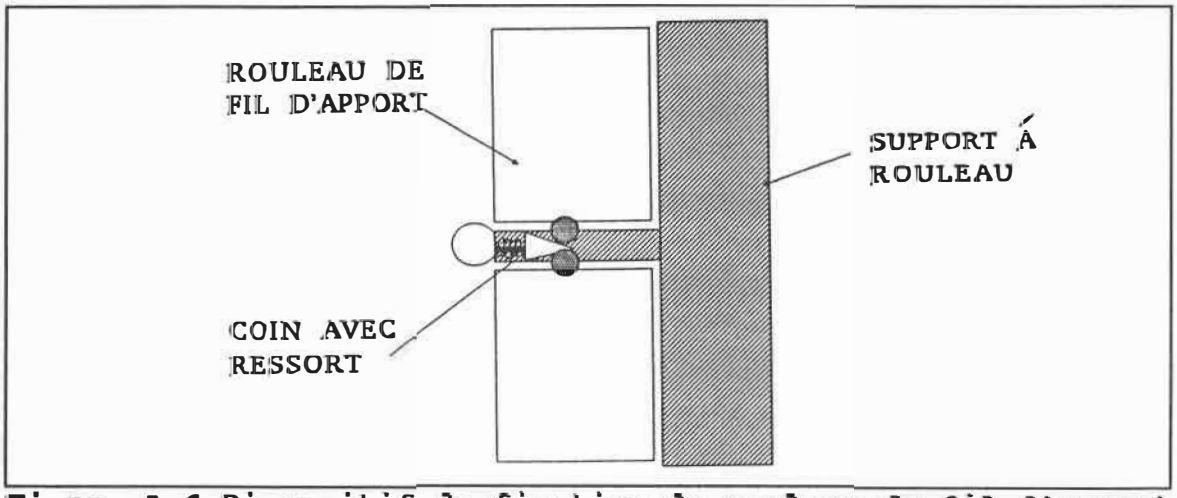


Figure 3.6 Dispositif de fixation du rouleau de fil d'apport

La mise en course modifiées s'exécute comme suit:

Opérations	Minutes
1. L'opérateur passe à l'autre table	0.5
2. Coupe le fil d'apport et passe le nouveau fil dans le système d'entrainement	2.0
3. Dévie l'arrivée d'argon à la seconde table	0.5
4. Ajuste les paramètres sur les cadrans	12.5
5. Change l'électrode de tungsten	1.5
6. Positionne la tête de soudure par rapport à la pièce	5.0
	22.0

Tableau 3.11 Mise en course modifiée pour la soudeuse T.I.G. circulaire

Une amélioration supplémentaire serait possible si on installait des contrôleurs électroniques (certaines machines l'ont déjà: $30,000) qui ajusteraient les paramètres à partir d'un programme en mémoire. La mise en course ne durerait plus que neuf minutes et demie soit une réduction totale de 82.7%.

D/ Tour vertical à contrôle numérique (#143)

Ce tour est utilisé dans la cellule d'assemblage pour usiner les brides des tuyères (flange) lors de l'usinage final. Il possède deux tourelles indépendantes, chacune pouvant tenir quatre porte-outils. Les gabarits qui maintiennent les pièces se trouvent dans une aire d'entreposage temporaire. Notons qu'à ce stade de la fabrication les tolérances sont de l'ordre de 5/1000 de pouce.

Opérations	Minutes
1. Démonter l'ancien gabarit (4 boulons, 5 à 7 tours)	4.0
2. Le transporter, à l'aide d'un pont roulant, à l'aire d'entreposage temporaire	5.0
3. Nettoyer le plateau de la broche au solvent et s'assurer qu'il n'y aucune matière étrangère	2.0
4. Consulter la feuille de route pour le numéro de gabarit, transporter le gabarit au plateau	5.5
5. Installer boulons sur gabarit	6.0
6. Centrer et ajuster planéité à l'aide de jauges, en faisant tourner le plateau et serrer les boulons	26.0
7. Prendre porte-outils, changer les pastilles et fixer porte-outils sur les tourelles (2 boulons par porte-outil)	30.0
8. a/Enlever ancien ruban perforé	0.5
b/aller chercher le nouveau au département	1.0
c/l'installer dans le contrôleur	0.5
9. Une fois que la première pièce est installer, exécuter le début du programme pour ajuster les compensations en X et en Z	10.0
	90.5

Tableau 3.12 Opérations de mise en course pour le tour vertical à contrôle numérique (#143)

Les opérations de mise en course sont présentées au tableau 3.12 et durent en tout quatre-vingt-dix minutes et demie. De ce temps, 19.3% (17.5 minutes) est consacré à des opérations (2, 4, 7a et 8b) qui devraient être faites en mise en course externe par l'opérateur puisque le tour exécute un cycle automatique.

Pour faciliter le changement de gabarit, une table à rouleaux est utilisée. Une potence remplace le pont roulant et sert seulement à transférer les gabarits du plateau de la broche à la table (et vice versa). L'opérateur pourra ensuite rapporter l'ancien gabarit et le glisser à sa place dans des étagères à rouleaux (figure 3.7) pendant que le tour usine.

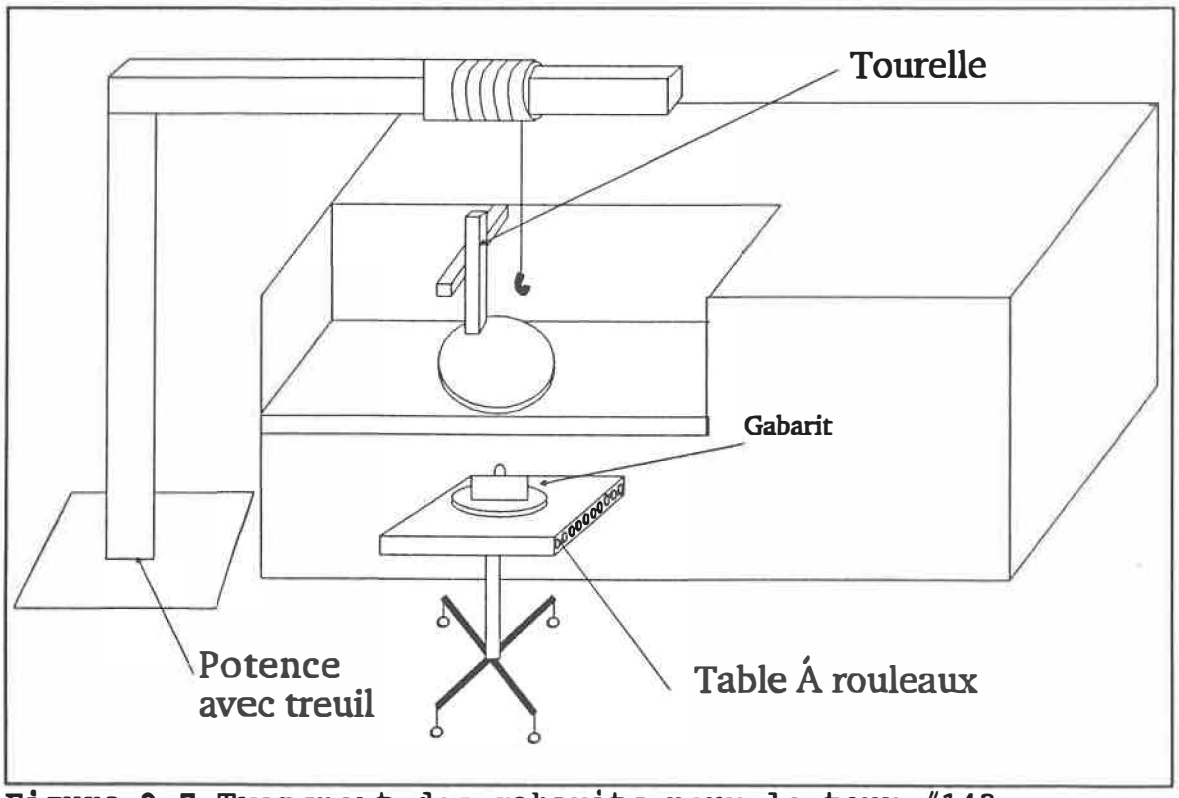


Figure 3.7 Transport des gabarits pour le tour #143

En standardisant la base de tous les gabarits (diamètre et épaisseur), il est possible de fixer trois poteaux sur la poupée fixe du tour qui servent de supports pour des jauges de centrage et de planéité (figure 3.8). Ainsi, il n'est plus nécessaire d'effectuer des ajustements successifs en faisant tourner le plateau. Ceci nous permet aussi de standardiser la hauteur de serrage des gabarits.

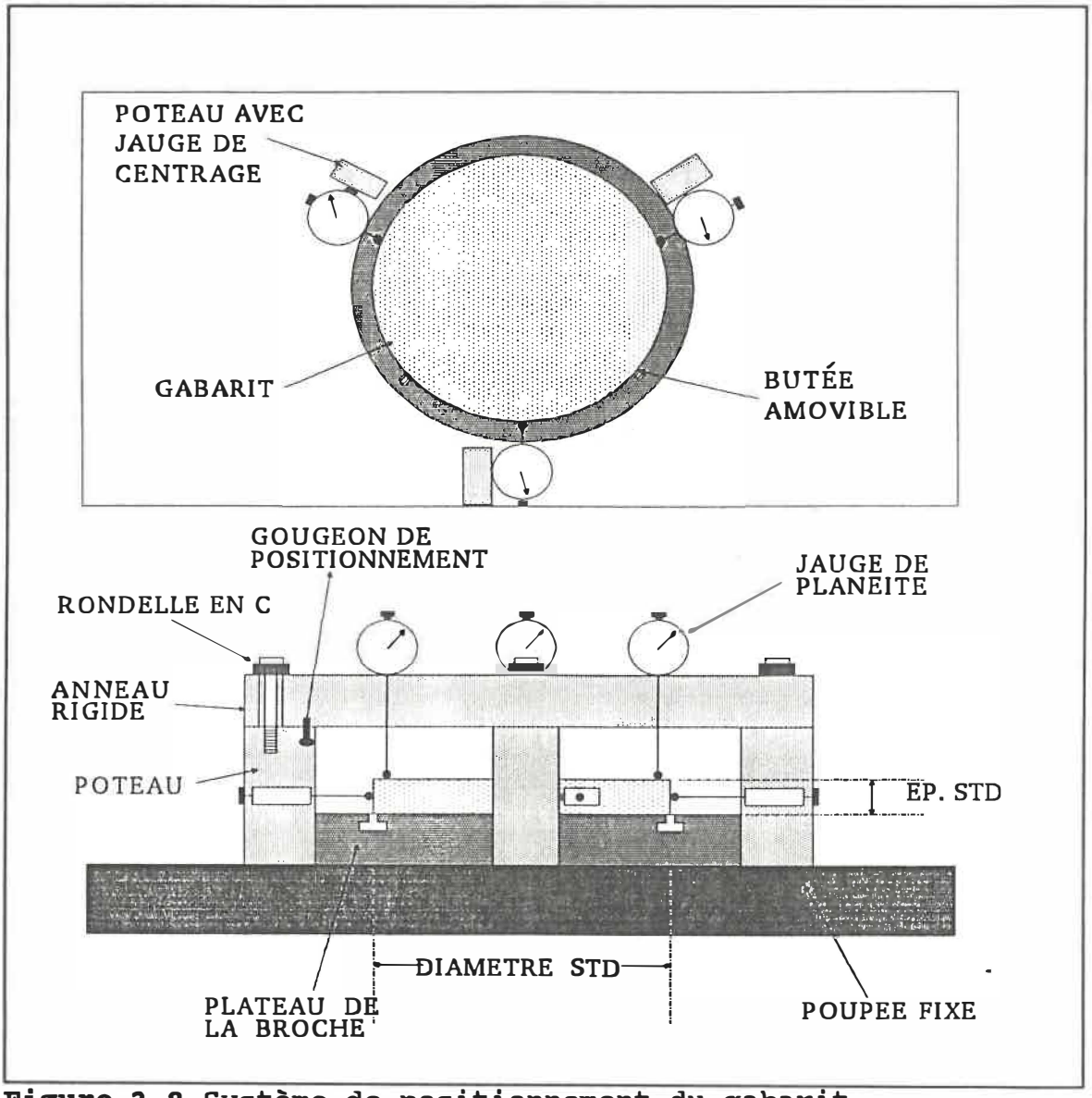


Figure 3.8 Système de positionnement du gabarit

En relocalisant les gabarits et les rubans perforés près de la machine, on évite la double manipulation des gabarits et on raccourcit la distance que l'opérateur doit parcourir pour les récupérer.

Deux butées rétractables sont installées sur le plateau pour faciliter le positionnement grossier du gabarit et se dissimulent lors de l'ajustement final (figure 3.8).

De plus, la séquence des opérations à accomplir sur le tour peut être organisée pour permettre à l'opérateur de monter les porte-outils sur une tourelle pendant que l'autre usine la pièce; de cette façon, l'installation des porte-outils peut se faire en mise en course externe.

La mise en course modifiée est présentée au tableau 3.13. Pendant que le tour exécute la première partie du programme, l'opérateur peut préparer les porte-outils et les monter sur la seconde tourelle, rapporter le gabarit et le programme de l'opération précédente et ramener les prochains. On aurait donc une réduction de 70.7% dans la durée de mise en course.

Notons que si on équipe le poste en conséquence, l'opérateur pourrait calibrer lui-même ses outils avec un minimum de formation au lieu que ce soit un outilleur qui le

fasse. Il ne serait plus tributaire de la charge de travail de celui-ci et on éviterait des arrêts inopportuns.

Opérations	Minutes
1. Démonter l'ancien gabarit (4 boulons, 1 tour) et lever avec le pont roulant	2.5
2. Nettoyer le plateau de la broche au solvent et s'assurer qu'il n'y aucune matière étrangère	2.0
3. Lever les deux butées	0.5
4. Déposer nouveau gabarit contre les butées	0.5
5. Baisser les butées	0.5
6. Poser anneau rigide et serrer 3 boulons	2.0
7. Ajuster centrage et planéité	3.0
8. Fixer gabarit (4 boulons)	2.0
9. Enlever anneau et protéger jauges	2.5
10. Changer le ruban perforé	1.0
11. Une fois que la première pièce est installer, exécuter le début du programme pour ajuster les compensations en X et en Z	10.0
	26.5

Tableau 3.13 Mise en course modifiée pour le tour vertical à contrôle numérique

En résumé, il semblerait possible de réduire les temps de mise en course d'une valeur moyenne de 80%, ceci nous permettra de réduire la taille des lots sans affecter la productivité des machines. Le coût des modifications a été estimé à $300,000 (annexe 13).

Notons pour finir que plusieurs postes de travail n'ont pas de mise en course (l'ébavurage, le dégraissage, l'identification...) et que d'autres sont dédiés à un type de produit ou à une opération et ont donc un réglage permanent (en tout, 54 des 98 machines font partie d'une de ces deux catégories).

3.3.2 Amélioration de la qualité par des dispositifs simples

Le concept de la fabrication juste à temps ne présuppose pas seulement que les produits seront fabriqués au moment voulu, mais aussi que les activités de production seront ajustées pour supporter le volume de la demande. Il ne peut donc pas y avoir de tolérance pour le gaspillage de capacité dû à la production de pièces défectueuses: les pièces doivent être fabriquées selon les spécifications et au bon moment. Les principes de juste à temps et de qualité totale sont intimement liés et il n'est pas possible de produire "juste à temps" si on n'est pas assuré de la qualité du produit à tous coups.

La qualité totale doit être une préoccupation pour tout le monde dans une usine et à l'intérieur d'une cellule, elle se traduit par la nécessité de ne transmettre d'un poste à un autre que des pièces conformes. Pour arriver à cela, il est important de différencier entre la détection des défauts et la prévention des défauts. La meilleure illustration du premier concept est l'opération d'inspection que l'on trouvait à la fin de toutes les feuilles de route: arrivé à cette opération, on vérifiait si toutes les composantes avaient été assemblées et si toutes les opérations avaient été accomplies.

Or, si une anomalie apparaissait, il était souvent trop tard pour y remédier.

Le contrôle de la qualité doit adopter un nouveau rôle, celui de prévenir les défauts. Selon M. S. Shingo (4), il y a principalement trois systèmes de contrôle préventif:

- le contrôle à la source
- l'auto-contrôle
- le contrôle consécutif

Le contrôle à la source s'attaque à l'origine des défauts dans le processus, on tente d'influencer la qualité en contrôlant les paramètres du procédé. Par exemple, la qualité d'une soudure T.I.G. est influencée par plusieurs facteurs: le débit du gaz protecteur, le voltage et l'ampérage du courant, la propreté des surfaces à souder, la vitesse d'avance et la distance entre l'électrode et le joint de soudure. On transmet à l'opérateur des valeurs nominales pour ces paramètres mais il lui est souvent difficile d'évaluer, au cours de l'opération, s'ils changent.

En automatisant le contrôle de certains de ces paramètres, on lui donne plus de liberté pour contrôler les autres. Ainsi, en installant un micro-rupteur[1] à deux

[1] Micro-rupteur: contact mécanique ou électronique (micro-switch).

contacts sur la tête du pistolet de soudure (figure 3.9), de façon que la distance entre les deux contacts soit l'intervalle à l'intérieur duquel la distance électrode-joint peut varier, il sera plus facile de contrôler le procédé. Chaque contact du micro-rupteur est connecté à une lampe témoin et à une cloche qui signalent si l'électrode est trop proche ou trop loin. De plus, un débitmètre peut être fixé au tuyau d'arrivée d'argon et signalera une variation dangereuse du débit.

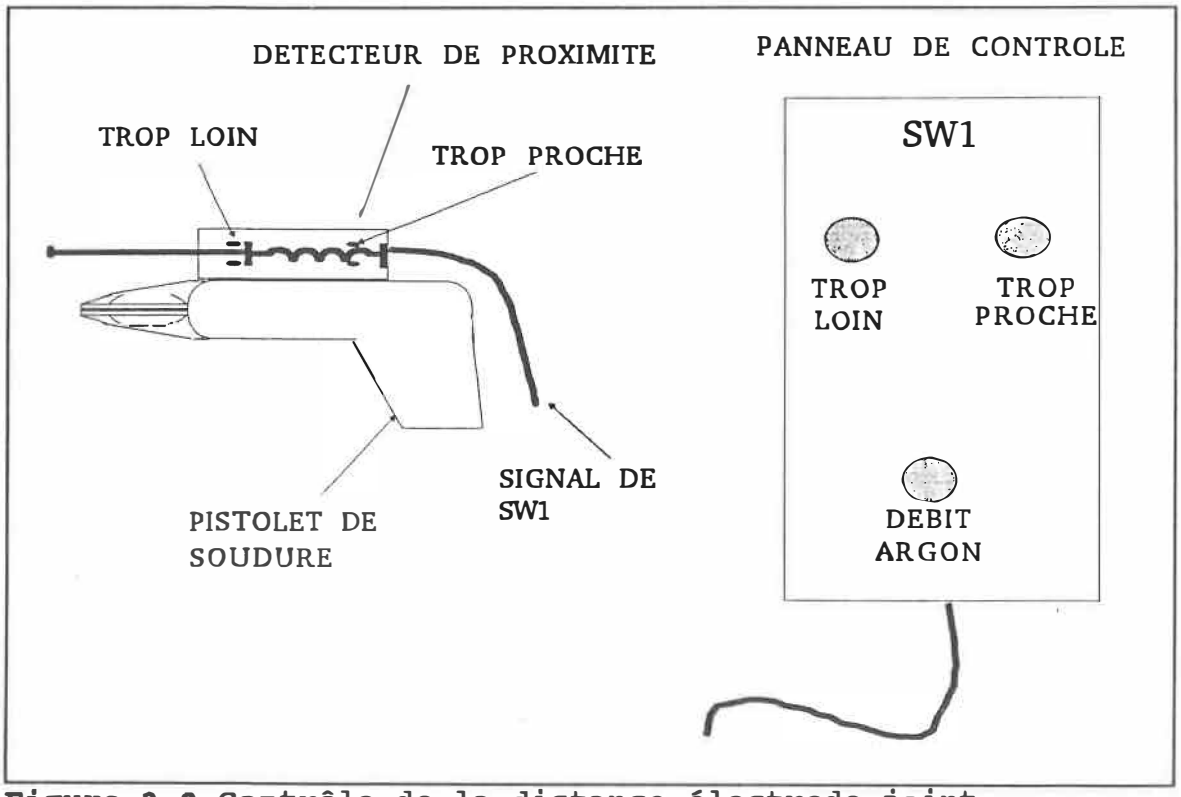


Figure 3.9 Contrôle de la distance électrode-joint

Le second système, l'auto-contrôle, est très efficace aussi car le retour d'information à l'opérateur est instantané puisqu'il exécute lui-même le contrôle de son travail. Bien

sûr, ce système pourrait manquer d'objectivité mais en utilisant des mécanismes automatiques pour assister le jugement humain, on élimine les possibilités d'oubli.

Par exemple, les kanbans, dont nous discuterons à la section 3.4, peuvent être munis d'une carte perforée (ou magnétique) identifiant la pièce qu'ils représentent. Au début de la fabrication des composantes, l'opérateur se rend à l'entreposage des tôles, près des premières machines de la cellule, introduit la carte dans un lecteur qui allumera une lampe-témoin au-dessus du casier contenant la tôle appropriée. Quand l'opérateur prend la tôle, un oeil magique le détecte et lui permet de récupérer sa carte (s'il prend une autre tôle, la carte reste bloquée dans le lecteur).

De la même façon, lors de l'assemblage, si l'opérateur à le choix entre plusieurs pièces, on peut installer un lecteur qui lui indiquera la bonne, la prochaine opération ne pourra débuter que si le système de détection confirme la cueillette de la pièce (figure 3.10)

Dans certains cas, il n'est pas possible ou rentable de contrôler une opération là où elle est exécutée; dans ces cas, il faut trouver un moyen de faire le contrôle le plus vite possible au cours du processus, de préférence au prochain poste de travail (contrôle consécutif). On peut incorporer

dans le gabarit d'une opération un mécanisme qui vérifie l'opération précédente. Par exemple, lors de l'usinage final des tuyères, tous les modèles doivent passer par une opération de perçage des trous sur les brides. En usinant le gabarit de perçage de façon à ce qu'il ne puisse s'installer que si la bride a été usinée au préalable, on exécute un contrôle sur l'opération précédente et on évite des erreurs d'inattention (oubli d'une opération).

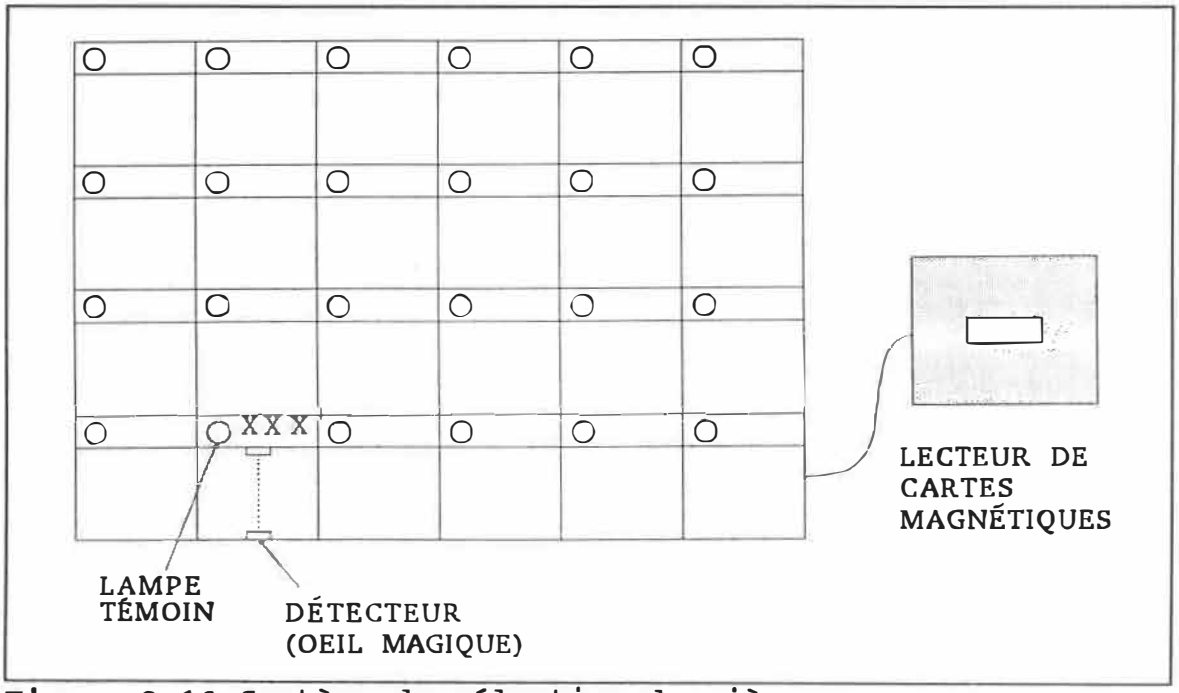


Figure 3.10 Système de sélection de pièce

Bien sûr, lorsqu'un défaut se produit, il faudra trouver un remède au problème immédiat puisqu'à ce moment toute la production s'arrête, mais c'est en analysant les causes de ces défauts qu'il sera possible de les éviter. La formation de cercles de qualité, regroupant des membres de la production, de l'inspection et de l'ingénierie, a pour fonction de

discuter sur les causes des problèmes qui surviennent et de trouver des mesures préventives. Le point important est de faire passer le message que la qualité est la responsabilité de tout le monde et qu'en travaillant ensemble, les résultats seront meilleurs: l'assurance qualité n'est plus le monopole du département d'inspection et de l'ingénierie de la qualité.

3.3.3 Formation d'une main-d'oeuvre multi-fonctionnelle

Les changements proposés dans les sections précédentes (implantation par produits, réduction des temps de mise en course, partage de la responsabilité pour la qualité entre tous les employés d'une usine) crée un bouleversement des principes traditionnellement appliqués dans l'industrie occidentale. Toutes ces choses impliquent une plus grande participation des ouvriers dans la rentabilité de l'usine.

En construisant des cellules et des lignes d'assemblage, on ne peut plus accepter d'avoir des opérateurs spécialisés sur un type de machine, ceci détruirait tous les bénéfices d'une implantation par produits; l'opérateur doit pouvoir suivre les pièces à l'intérieur d'une cellule et ainsi s'assurer d'une meilleure coordination entre les procédés. Il faudra donc que l'entreprise forme une main-d'oeuvre multi-fonctionnelle qui lui donnera une certaine flexibilité

puisqu'il lui sera possible de varier le nombre d'opérateurs dans une cellule selon la charge de travail prévue sans réduire l'efficacité de l'unité.

Lors de la réduction des temps de mise en course, on a simplifié les tâches à accomplir. On élimine donc la nécessité des régleurs (setup man) puisque maintenant, l'opérateur est en mesure d'exécuter la mise en course sans intervention externe. Les régleurs seront encore présents, en plus petit nombre, pour faire la formation des opérateurs et trouver des méthodes pour simplifier encore plus l'opération de mise en course.

De la même façon, le contrôle de la qualité sur le plancher de l'usine devient une préoccupation des opérateurs puisque c'est durant leur travail que les défauts peuvent apparaître. En les éduquant sur les méthodes de contrôle statistique et en leur facilitant la tâche par des mécanismes de contrôle automatique, l'entreprise peut développer un programme de prévention des défauts qui est un prérequis à la fabrication juste à temps. L'ancien département d'inspection aura pour vocation:

1/ la formation des opérateurs.

2/ le support en cas de détection de défauts que l'opérateur ne peut corriger.

Il participera aussi à l'analyse de nouveaux procédés pour concevoir les contrôles manuels et automatiques les mieux adaptés à la situation.

Une partie de l'entretien préventif de l'équipement sera transférée aux opérateurs aussi. Puisqu'ils passent le plus de temps près des machines, ils ont la tâche de détecter les anomalies de fonctionnement de celles-ci. Avec un minimum de formation sur le fonctionnement des machines, l'opérateur est en mesure de prévoir des troubles en utilisant ses sens (bruit, saleté, fuite, vibration ou température élevée) et apporter des corrections (serrer les boulons, huiler, nettoyer...). Si le problème est plus grave, il fait appel à une équipe de maintenance à qui il communiquera les symptômes qu'il a observés. L'équipe de maintenance à la responsabilité:

1/ d'éduquer les opérateurs sur le fonctionnement des machines et sur les activités de maintenance journalière qu'ils doivent exécuter.

2/ d'analyser l'équipement pour trouver des faiblesses de design et prendre des mesures correctives.

3/ D'être toujours prête à intervenir si un bris se produit car le temps perdu lors d'une panne se répercute sur toute l'usine (comme pour un défaut dans une pièce).

Finalement, l'entretien des lieux de travail doit incomber au groupe constituant la cellule. C'est en gardant les postes de travail propres et en ordre qu'il sera possible de faire ressortir les problèmes et en même temps, les opérateurs seront plus motivés si leur environnement est soigné. Dans plusieurs entreprises cette étape a déjà été franchie: dans les postes d'assemblage de Canadair inc., à la fin de chaque journée, les ouvriers nettoient, rangent et balaient leur poste de travail et s'assurent que l'outillage est fonctionnel pour le lendemain.

Plus de responsabilités sont transférées aux opérateurs mais en même temps, il faut leur donner les outils pour accomplir ces tâches (formation et outillage) et surtout l'autorité. Ceci vient à dire que l'opérateur doit avoir une voix dans les décisions qui concernent son travail puisqu'il est l'expert en ce qu'il fait. Sa coopération est impérative si l'on veut élargir l'horizon de ses connaissances mais plusieurs obstacles pourraient apparaître: entre autres, la rigidité des contrats de travail (conventions collectives) et la méfiance des ouvriers vis-à-vis de la direction due à un manque de communication. Si la direction veut garder sa compétitivité sur le marché, il faudra qu'elle améliore le climat de travail et facilite les échanges d'idées entre ses cadres et les opérateurs; les séances de formation et la

constitution de cercles de qualité sont des pas dans la bonne direction pour ouvrir les voies de communication.

Comme mentionné précédemment, pour développer les habiletés des opérateurs, il sera nécessaire de leur donner une formation de base sur les différents procédés qu'ils devront maîtriser mais ensuite, un système de rotation des tâches à l'intérieur des cellules doit être installé pour leur permettre d'acquérir l'expérience pratique nécessaire. En premier, chaque contremaître et chef d'équipe devra exécuter chaque tâche pour prouver ses compétences aux yeux des opérateurs. En même temps, ceci leur permettra de détecter les difficultés et équilibrer la charge de travail des membres d'une équipe. Puis, on planifie un échéancier pour entraîner les opérateurs sur plusieurs procédés et, lorsque les opérateurs les ont maîtrisés, on peut instaurer un horaire de rotation des tâches (le tout peut prendre plusieurs années).

Cette rotation permettra de briser la monotonie du travail qui est souvent la cause d'erreurs et en même temps, encouragera l'esprit d'équipe puisque les opérateurs connaîtront le travail des autres et pourront aider à résoudre les problèmes ou améliorer les méthodes. De plus, les opérateurs auront une vue plus globale de la production et pourront s'identifier plus facilement au produit.

Eventuellement, les compensations salariales pourraient être liées au développement d'habiletés pour encourager les opérateurs à continuer de s'améliorer. De la même façon, les suggestions proposées pour améliorer la qualité ou la fiabilité de l'équipement devraient être encouragées par des bonus. Ce système existe déjà à Pratt & Whitney, mais souvent l'évaluation et l'implantation des suggestions est tellement longue qu'elle décourage les ouvriers qui ne perçoivent pas de réactions concrètes à leurs propositions.

Finalement, à mesure que les procédés sont maîtrisés par plusieurs opérateurs, il serait souhaitable de simplifier encore plus les opérations. Ainsi, l'entraînement de nouveaux opérateurs pourrait se faire plus rapidement et ils contribueraient plus vite à la productivité de l'usine.

3.4 Le système de planification de la production

Une fois que l'implantation de l'usine a été établie et que les cellules ont introduit les améliorations proposées, il s'agit maintenant de monter un système de planification de la production qui soit capable de tirer profit de ces changements.

Comme nous l'avons vu au premier chapitre, le but du juste à temps est de produire ce que le client veut au bon moment. Pour atteindre cet objectif, la production des divers produits doit être répartie équitablement à l'intérieur d'une période donnée. C'est en produisant des petites quantités de chaque produit qu'il sera possible de répondre aux variations de la demande tout en réduisant l'inventaire de produits finis de façon significative.

La demande est nivelée en deux étapes:

- le plan mensuel de production
- la séquence journalière d'assemblage

Avant de pouvoir établir le plan mensuel, il est nécessaire de déterminer la taille des lots qui circuleront dans l'usine. Celle-ci a une influence sur la main-d'oeuvre requise pour le mois ainsi que sur la méthode de gestion utilisée dans les cellules.

3.4.1 Détermination de la taille des lots

Suite à une collecte de données exécutée sur une période de six mois, on a pu déterminer les facteurs suivants:

Dans le département de fabrication des composantes, les cinquante-sept composantes étaient mises en fabrication en lots ayant une moyenne de 35.25 unités. La demande moyenne annuelle pour ces composantes est de 236.56 unités, ce qui veut dire qu'il y a un taux de rotation des inventaires de 6.71 (on fabrique un peu moins de sept lots d'une composante donnée par an).

Les valeurs calculées pour les sous-assemblages et les assemblages ont été séparées par famille de tuyères et sont présentées au tableau 3.14:

	SOUS-ASSEMBLAGE				ASSEMBLAGE		
FAMILLE	NOMBRE	LOT MOYEN	DEMANDE MOYENNE	TAUX DE ROTATION	LOT MOYEN	DEMANDE MOYENNE	TAUX DE ROTATION
PT6-HP	3	16.8	266.4	15.9	5.4	88.8	16.5
PT6-BP	2	9.7	81.7	8.4	3.9	71.5	18.5
PT6-HY	3	7.0	93.0	13.3	4.7	93.0	20.0
PW100	0	-	-	-	10.7	282.5	26.4
JT15-A	3	6.4	72.0	11.3	4.0	72.0	18.0
JT15-B	3	7.1	122.0	17.2	5.5	122.0	22.2

Tableau 3.14 Taille des lots actuels pour le sous-assemblage et l'assemblage

Si on se réfère au calcul du lot économique (12), on a un coût total incrémentaire de:

$$TC = (A/Q)*Cp + (Q/2)*Ch$$

où TC = coût total incrémentaire

A = demande annuelle

Q = taille d'un lot

Cp = coût d'une mise en production

Ch = coût unitaire d'entreposage annuel

Grâce au SMED, on a pu réduire le coût d'une mise en production Cp à 20% de sa valeur précédente; en réduisant Q à un cinquième de sa valeur initiale, on obtient le même coût annuel de mise en production et le coût d'entreposage (Q/2)*Ch sera réduit de 80%. Dans le cas où l'usine opérait avec des lots économiques, on pourrait réduire la taille des lots à 10.55% de sa valeur initiale sans que le coût total ne change (voir annexe 14).

Sachant que Pratt & Whitney ne lance pas toujours des lots de taille économique, nous avons choisi de réduire les lots de 80% en sachant que le coût total sera réduit d'une valeur dépendante de Q (taille actuelle) et Ch.

La taille moyenne des lots de composantes dans la cellule de fabrication devient donc 7 unités, ce qui représente la consommation d'environ sept jours pour ces pièces.

Dans le cas des sous-assemblages et des assemblages, on obtient le tableau suivant:

	SOUS-ASSEMBLAGE			ASSEMBLAGE	
FAMILLE	LOT	DUREE MINIMUM (jours)	DUREE MOYENNE (jours)	LOT	DUREE MOYENNE (jours)
PT6-HP	3.36 => 3	1.60	2.67	1.08 => 1	2.67
PT6-BP	1.94 => 2	2.96	5.80	0.77 => 1	3.31
PT6-HY	1.40 => 2	5.10	5.10	0.93 => 1	2.55
PW100	-	-	-	2.14 => 2	1.68
JT15-A	1.28 => 2	6.58	6.58	0.80 => 1	3.29
JT15-B	1.42 => 2	3.89	3.89	1.10 => 1	1.94

Tableau 3.15 Taille et durée des lots proposés pour le sous-assemblage et l'assemblage

Il nous est maintenant possible d'établir le plan mensuel de production ainsi que la main-d'oeuvre nécessaire pour l'exécuter.

3.4.2 Le plan mensuel

Le plan mensuel est un plan directeur de production sur un horizon d'un mois en fonction des familles de tuyères. Il est basé sur les prévisions des besoins en tuyères au département d'assemblage des moteurs pour un an. On établit un taux de production journalier pour chaque famille et c'est à partir de ces taux que l'on détermine la main-d'oeuvre nécessaire dans chaque cellule pour le prochain mois.

A l'annexe 15, on présente la projection des besoins pour l'année 1990. Le mois de janvier sera utilisé dans le reste de cette section pour fins d'exemple, ses besoins sont présentés ci-dessous:

FAMILLE	Janvier 1990	Taux journalier
PT6-HP	36	1.71
PT6-BP	22	1.05
PT6-HY	10	0.48
PW100	52	2.47
JT15-A	6	0.29
JT15-B	14	0.67
	140	6.67

Il y a 21 jours ouvrables en janvier 1990

Tableau 3.16 Prévisions pour le mois de janvier 1990

En utilisant les temps d'opération et de mise en course pour chaque famille de tuyère (annexe 16) ainsi que les taux de production journaliers calculés au tableau 3.16, on obtient le volume de travail journalier suivant pour chaque cellule:

	Compos.	Sous-ass.	Assem.	T/T
Hrs production	13.99	16.58	48.43	12.83
Hrs mise en course	4.70	6.08	30.66	-
Total	18.69	22.66	79.09	12.83
Besoins par quart	0.83	1.01	3.52	0.57
Main-d'oeuvre assignée	1	1	4	1

Tableau 3.17 Main-d'oeuvre nécessaire dans les cellules de production pour le mois de janvier 1990

La production se fait sur trois quarts pour une journée de durée totale de vingt-deux heures et demie. Sept opérateurs par quart seront requis; pendant cette période, l'opérateur du traitement thermique passera une partie de son temps dans la cellule de sous-assemblage pour y accomplir les mises en course externes et ainsi balancer la charge de travail. Les temps libres des opérateurs pourront être utilisés pour acquérir une formation supplémentaire ou pour aider au transfert des lots d'une cellule à une autre.

A ce personnel, on ajoute un inspecteur des "en cours" par quart qui circulera dans les cellules en faisant des contrôles aléatoires et assistera les opérateurs s'il y a des problèmes de qualité qui surviennent. Présentement, le volume d'unités terminées par jour justifie seulement un inspecteur pour les produits finis qui travaillera sur un des deux premier quarts.

Le transport des lots entre les cellules est la responsabilité du personnel du département de Travail en cours. En se référant à l'annexe 16, où l'on donne le nombre de transports nécessaires pour produire une unité de chaque tuyère, on constate qu'il y aura en moyenne trente-deux aller-retours entre les différentes cellules au cours d'une journée. Il serait donc envisageable de n'utiliser qu'un seul

manutentionnaire par quart qui suivrait un trajet de cueillette prédéfini.

La main-d'oeuvre totale pour le mois de janvier est présentée au tableau 3.18.

Inspection	
- en cours	3
- finale	1
Fabrication des composantes	3
Sous-assemblage	3
Assemblage	12
Traitement thermique	3
Travail en cours	3
TOTAL	28

Tableau 3.18. Main-d'oeuvre totale pour janvier 1990

Maintenant que les taux de production ont été communiqués aux cellules et qu'elles ont pu déterminer leur main-d'oeuvre pour le mois, nous allons discuter des méthodes de gestion de production qui seront utilisées dans chaque cellule puis de la procédure pour établir la séquence d'assemblage.

3.4.3 Gestion des cellules de production

Deux grands concepts existent pour la gestion de la production: le Push et le Pull; dans les deux cas, le point de départ est le programme directeur de production.

Si on applique le Push aux cellules de production, on obtient un système très similaire à celui déjà en place. A intervalle régulier (par exemple deux semaines), les besoins apparaissant dans le PDP sont explosés grâce aux nomenclatures des tuyères pour obtenir les besoins au niveau des sous-assemblages et des composantes. En se référant à l'état des inventaires pour ces pièces, le planificateur détermine à quel moment un ordre de fabrication doit être lancé. En même temps, il vérifie si les ordres déjà planifiés sont encore valides suite aux modifications intervenues durant ces deux semaines et le cas échéant, les modifie.

Le système Pull établit, à partir du PDP, une séquence d'assemblage pour une période donnée (deux semaines). Cette séquence n'est que l'estimé le plus récent de ce qui sera assemblé dans les prochains dix jours, mais puisqu'elle est communiquée journalièrement seulement au début de la cellule d'assemblage, il est encore possible d'y apporter des modifications. La transmission des changements aux autres cellules se fera automatiquement par le système Kanban.

En comparant ces deux concepts, on se rend compte que le système Push nécessite un horizon de planification plus étendu puisqu'il incorpore les délais de fabrication de chaque niveau d'assemblage dans sa planification. De plus, ce système est plus rigide car, à l'intérieur de cet horizon, aucune modification n'est permise, les corrections seront incorporées dans le prochain cycle de planification. Il requiert aussi plus de travail, puisqu'à chaque deux semaines, il faut réévaluer les ordres de fabrication de toutes les pièces. Etant données ces constatations, un système de type Pull a été proposé pour cette implantation. L'application de ce système à chaque cellule est présentée dans les sous-sections qui suivent.

A/ La cellule de fabrication de composantes

On se sert des tailles de lots calculées précédemment (équivalent à sept jours de consommation) pour déterminer à quel moment un lot doit être mis en production. A mesure que les cellules de sous-assemblage et d'assemblage retirent des composantes des inventaires, elles retournent les Kanbans à la cellule de fabrication. Lorsque les Kanbans accumulés atteignent la quantité prédéterminée, on initie un cycle de fabrication pour cette pièce (délai d'un jour).

Pour chaque composante, l'équivalent de huit jours de consommation (lot de fabrication équivalent à sept jours de consommation plus un jour pour la fabrication) plus un certain stock de sécurité circulera dans l'usine. Pendant que la cellule de fabrication produit un lot, les autres cellules prélèvent les composantes dont elles ont besoin dans les inventaires situés près des postes de travail.

Au cours de la fabrication d'un lot, il se peut qu'une opération nécessite l'envoi du lot à la cellule de traitement thermique; pour que l'opérateur puisse continuer à travailler, des lots de composantes post-traitement thermique sont placés à ces endroits et l'opérateur n'a qu'à laisser son lot dans l'aire d'attente, prélever la même quantité de pièces déjà traitées et continuer les opérations sur ce lot. Le manutentionnaire, durant son circuit, transportera les composantes à la cellule de traitement thermique qui les traitera en vingt-quatre heures. Un lot équivalent au lot de fabrication doit toujours être en circulation entre ces deux cellules.

A chaque mois, lorsqu'on détermine le plan mensuel, la quantité de Kanbans en circulation est ajustée en fonction des productions journalières. L'inventaire moyen de composantes terminées est équivalent à trois jours et demi de consommation plus le stock de sécurité. L'inventaire moyen des composantes

en cours correspond à un jour de consommation en plus des stocks pour le traitement thermique.

Pour le mois de janvier 1990, les inventaires moyens de composantes terminées et en cours sont présentés aux tableaux 3.19 et 3.20.

FAMILLE	Nombre de composantes	Consommation 3.5 jours	Stock sécurité (10%)	Inventaire produits finis Quantité	Valeur
PT6-HP	14	6.0	0.6	7	$11,499
PT6-BP	12	3.7	0.4	4	$5,618
PT6-HY	18	1.7	0.2	2	$2,659
PW100	3	8.7	0.9	10	$44,576
JT15-A	2	1.0	0.1	1	$213
JT15-B	3	2.4	0.2	3	$1,703
					$66,268

Tableau 3.19 Inventaire moyen des composantes finies

FAMILLE	Production 1 jours	Valeur ($)	Stock pour T/T ($)	Inventaire en cours ($)
PT6-HP	1.71	1,405	12,896	14,301
PT6-BP	1.05	736	8,189	8,925
PT6-HY	0.48	317	2,577	2,894
PW100	2.47	5,519	83,069	88,588
JT15-A	0.29	30	386	416
JT15-B	0.67	189	528	717
		$8,196	$107,645	$115,841

Tableau 3.20 Inventaire moyen des composantes en cours

B/ La cellule de sous-assemblage

Dans la cellule de sous-assemblage, puisque la taille des lots est assez petite (entre 2 et 3 unités), la production initiée par la circulation de Kanbans est utilisée.

On attribue un Kanban par lot de sous-assemblages. Etant donné que la durée minimum d'un lot est de 1.6 jours et qu'il ne nécessite pas plus de 15.5 heures de production, un seul lot de chaque sous-assemblage sera requis sur la ligne d'assemblage. Lorsqu'un opérateur de l'assemblage retire un lot de l'entreposage, le Kanban qui y était attaché est retourné au sous-assemblage qui initie l'assemblage d'un autre lot. Celui-ci sera terminé bien avant que l'assemblage en ait besoin.

Puisque le délai de fabrication d'un lot est plus court que la durée d'utilisation de celui-ci, l'inventaire de sous-assemblages finis ne sera jamais en pénurie. Pour plus de sécurité, un délai de fabrication d'un jour a été attribué à chaque lot lors du calcul de l'inventaire moyen au tableau 3.21 (à l'annexe 17, les variations des inventaires sont représentées en fonction du temps).

FAMILLE	Sous-Ass. par tuyère	Inventaire moyen par Sous-assemblage Quantité	Valeur
PT6-HP	3	2.29	7,486
PT6-BP	2	1.45	2,075
PT6-HY	3	2.02	4,248
PW100	0	-	-
JT15-A	3	2.21	14,374
JT15-B	3	1.82	13,504
			$41,687

Tableau 3.21 Inventaire moyen de sous-assemblages finis

L'inventaire des sous-assemblages en cours est équivalent à la consommation d'un jour de sous-assemblages sur la ligne d'assemblage (si on suppose que le délai de fabrication est un jour) plus l'inventaire que l'on doit garder pour pouvoir accomplir les opérations de traitement thermique en différé (comme pour la cellule de fabrication):

FAMILLE	Production 1 jours	Valeur ($)	Stock pour T/T ($)	Inventaire en cours Valeur ($)
PT6-HP	1.71	4,947	7,002	11,949
PT6-BP	1.05	1,341	2,862	4,203
PT6-HY	0.48	883	3,774	4,657
PW100	-	-	-	-
JT15-A	0.29	1,522	12,740	14,262
JT15-B	0.67	4,204	15,218	19,044
		$12,897	$41,596	$54,493

Tableau 3.22 Inventaire moyen de sous-assemblages en cours

C/ La cellule d'assemblage

Dans la cellule d'assemblage final des tuyères, la taille des lots de la plupart des familles (tous sauf le PW100) a pu être réduite à une unité, ce qui est un des objectifs du juste à temps.

Rappelons que les tuyères d'éjection ne sont qu'une composante dans l'assemblage d'un moteur à turbine à gaz. L'interface entre l'assemblage des moteurs et la cellule d'assemblage des tuyères pourrait se faire de deux façons: en ayant un certain inventaire de tuyères finies et en faisant circuler des Kanbans ou en transmettant la séquence d'assemblage des moteurs à l'assemblage des tuyères pour qu'elle puisse construire celles-ci dans le même ordre. Dans le cas présent, il serait avantageux d'éliminer l'inventaire intermédiaire de tuyères finies en utilisant la seconde méthode. Etant donné que la demande pour les moteurs est fixée sur un horizon de deux semaines (Master Scheduling), il nous est possible d'établir une séquence pour dix jours qui ne changera pas.

Dans la cellule d'assemblage, quatre opérateurs sont disponibles et il s'agit de répartir les tâches entre eux.

En séparant en quatre les heures de production journalières pour le mois de janvier, on constate que chaque station devrait exécuter 19.75 heures de travail par jour. Un des opérateurs pourrait être assigné aux mises en courses externes qui nécessitent en moyenne 16.7 heures/jour en plus du processus de durcissage (1.25 heures/jour).

Les trois autres opérateurs se répartissent les machines de façon à avoir un contenu de travail équivalent en fonction du mix de produits (voir figure 3.11): le temps de cycle de la cellule est fixé à 226.2 minutes, soit le cycle le plus long parmi les trois opérateurs.

Cette cellule contient dix machines à cycle automatique en plus du processus de durcissage (qui a un cycle de 24 heures). Pour permettre aux opérateurs de continuer à travailler durant ces opérations, on doit avoir un certain nombre d'unités disponibles près de ces machines. Lorsque l'opérateur doit accomplir une de ces opérations, il monte sa pièce sur la machine, part le cycle, ramasse une unité du même produit qui a déjà complétée cette opération et poursuit son circuit. La prochaine fois que cette machine servira, l'opérateur enlèvera la pièce terminée et l'entrepose dans l'espace réservé à côté du poste de travail. Puisqu'aucun cycle automatique n'est plus long que le temps de cycle, il n'y aura pas d'interférence.

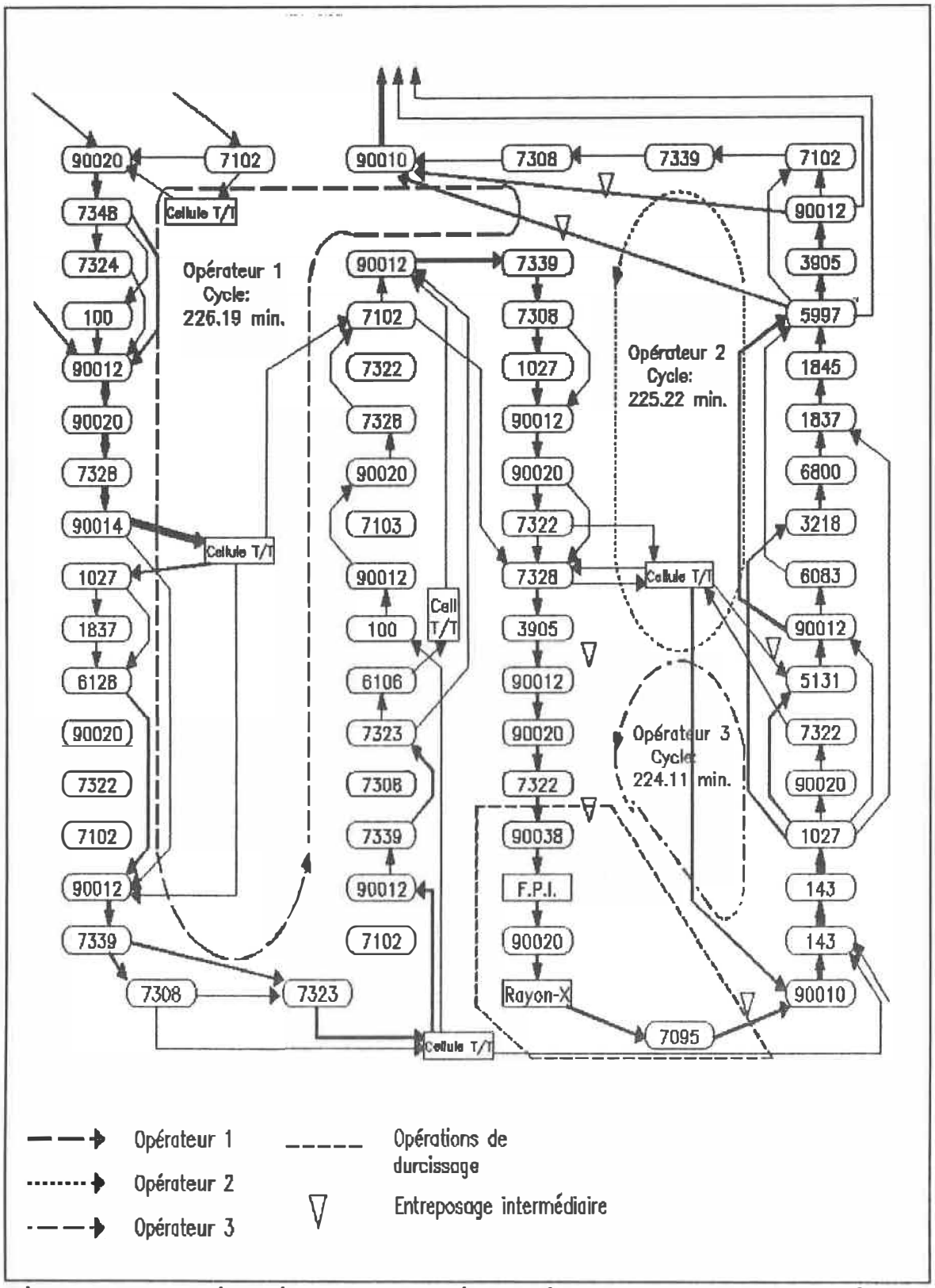


Figure 3.11 Circuits des trois opérateurs dans la cellule d'assemblage

Le même système est utilisé pour le processus de durcissage des PT6. Mais puisque le cycle est de vingt-quatre heures, on ne peut faire qu'un seul lot par jour; par conséquent, un inventaire couvrant la demande de deux jours (un jour pour accumuler le lot + un jour pour le traitement) sera nécessaire après cette opération.

Finalement, puisque les trois opérateurs séparent la ligne d'assemblage en cinq segments et qu'il y a presqu'en permanence un lot dans chaque segment, il y aura cinq lots en cours en tous temps. Le tableau 3.23 résume les quantités d'inventaire en cours dans cette cellule (les opérations de traitement thermique sont traitées comme dans les autres cellules).

FAMILLE	Inventaire en cours requis pour			Inventaire produits en cours	
	Mach. à C.N.	Durcissage	T/T	Total	($)
PT6-HP	5	4	4	13	97,552
PT6-BP	6	2	6	14	73,430
PT6-HY	5	1	2	8	45,312
PW100	8	-	8	16	80,800
JT15-A	8	-	2	10	74,950
JT15-B	9	-	1	10	87,710
					$459,762

A ceci on ajoute les cinq lots en cours (valeur moyenne = $7,763) pour un total de $498,577

Tableau 3.23 Inventaire moyen des tuyères en cours

Puisque le département d'assemblage des moteurs ne prend possession des tuyères qu'à la fin de la période de dix jours, l'inventaire de produits finis accumule toute le production durant cette période. L'inventaire moyen est calculé au tableau 3.24.

Famille	Inventaire moyen	
	Quantité	($)
PT6-HP	8.55	72,060
PT6-BP	5.25	30,592
PT6-HY	2.40	15,086
PW100	12.35	69,691
JT15-A	1.45	12,290
JT15-B	3.35	36,401
		236,120

Tableau 3.24. Inventaire moyen de tuyères finies

D/ La cellule de traitement thermique

Cette cellule fonctionne comme un département de service. A mesure que les lots arrivent des différentes cellules, l'opérateur les classe en fonction des opérations à accomplir (inspection non-déstructive et/ou traitement thermique). L'inspection peut être exécutée en continu mais pour le traitement thermique, il s'agit de refaire des lots (plus gros) et traiter ces lots successivement (le cycle moyen d'un traitement thermique est de 3.5 heures).

Lors du calcul des inventaires nécessaires pour couvrir les opérations de traitement thermique, on planifie un jour de délai par lot, ce qui donne amplement de temps à l'opérateur pour organiser son travail.

3.4.4 La séquence d'assemblage

Suite à l'élaboration du plan de production, les planificateurs doivent établir, pour une période de dix jours, la séquence d'assemblage des tuyères. Une méthode heuristique appelée "Goal-Chasing" est proposée par le professeur Y. Monden (3) qui en a relaté l'utilisation chez Toyota Motors Corp. Cette méthode essaie de garder la consommation des composantes constante pour ainsi transmettre le nivellement de la production aux autres cellules.

Un exemple d'application de la méthode est présenté à l'annexe 18 pour les dix premiers jours de janvier 1990. En adoptant la codification qui suit, on obtient la séquence suivante:

F,A,D,B,A,C,D,A,B,E,D,A,F,B,A,D,C,A,B,D,A,F,B,A,D,E,A,
F,D,B,A,C,D,A,B,F,A,D,B,A,C,D,A,B,F,A,D,E,B,A,D,C,A,F.

PT6-HP => A	PW100 => D
PT6-BP => B	JT15-A => E
PT6-HY => C	JT15-B => F

Le tableau 3.25 présente l'horaire d'assemblage de la cellule pour les cinq premiers jours de janvier. Les quatre premiers lots font partie de la séquence précédente (décembre 1989). Les temps indiqués sont le moment auquel l'opérateur termine le lot pour le segment indiqué.

LOT	Opérateur 1 Segment 1	Opérateur 2 Segment 2	Opérateur 3 Segment 3	Opérateur 2 Segment 4	Opérateur 1 Segment 5
F					75
B				282	418
D			178	477	520
A		187	446	660	815
F1	75	282	667	965	1152
A1	418	633	926	1112	1445
D1	519	660	1104	1534	1547
B1	768	1085	1353	1784	1873
A2	1152	1338	1622	1811	2169
C1	1398	1689	1846	2125	2198
D2	1547	1784	2023	2428	2428
A3	1873	2046	2315	2479	2819
B2	2122	2268	2565	2660	2894
E1	2198	2452	2749	3197	3197
D3	2300	2479	2927	3392	3538
A4	2772	2959	3155	3529	3687
F2	2894	3137	3376	4029	4029
B3	3136	3502	3625	4124	4355
A5	3538	3724	3993	4306	4651
D4	3640	4029	4207	4737	4753
C2	3933	4279	4436	4927	5091
A6	4355	4542	4811	4954	5212
B4	4604	4848	5097	5235	5455
D5	4753	4927	5275	5395	5796
A7	5091	5140	5543	5592	5945
F3	5165	5235	5764	6082	6082
B5	5455	5565	6013	6177	6411
A8	5796	5779	6282	6309	
D6	5898	6082	6460		
E2	5974	6201			
A9	6411				

Tableau 3.25 Horaire d'assemblage pour les cinq premiers jours de janvier 1990

Ainsi, au début de cette période, l'opérateur 1 parcourt le segment 1 avec le lot F1 en 75 minutes, il dépose le lot dans l'entreposage intermédiaire et accomplie le segment 5 avec le lot F appartenant de la séquence d'assemblage précédente. Pendant ce temps, l'opérateur 2 parcourt le segment 2 avec le lot A puis le segment 4 avec le lot B tandis que l'opérateur 3 accomplie les tâches du segment 3 pour le lot D. Le premier cycle se termine donc après 75 minutes pour l'opérateur 1, 282 minutes pour l'opérateur 2 et 178 minutes pour l'opérateur 3 (on retrouve ces temps dans les trois dernières colonnes). L'opérateur 1 ramassera ensuite le lot A1 pour lui faire parcourir le segment 1 puis le lot B dans le segment 5. L'opérateur 2 commencera son deuxième cycle en acheminant le lot F1 à travers le segment 2 suivi du lot D dans le segment 4. Un lot nécessitera donc cinq cycles pour être assemblé soit, en moyenne, 1131 minutes.

En se référant aux trois dernières colonnes, on peut constater que les opérateurs terminent leurs cycles approximativement en même temps (ils sont décalés d'un lot). Ils ont, en moyenne, une heure par jour de marge de manoeuvre.

A mesure que la séquence est exécutée, des contenants de sous-assemblages sont retirés de l'entreposage et apportés sur la ligne d'assemblage. Ceci déclenchera le processus de fabrication des sous-assemblages. Le tableau 3.26 présente

la production de la cellule de sous-assemblages pour les mêmes cinq jours de janvier. Lorsque le début des opérations coincide avec la réception du Kanban, ceci veut dire que la cellule était en attente.

Sous-assemblage		Kanban reçu à	Opérations Début	Fin
Nozzle	JT15-B	0	0	112
Cover	JT15-B	0	112	195
Duct	PT6-HP	75	195	1029
Cone	PT6-HP	106	1029	1123
Inner	PT6-BP	761	1123	1333
Case	PT6-HP	815	1333	1547
Port	PT6-HY	1224	1547	1681
Inner	PT6-HY	1391	1681	1827
Cone	PT6-HP	1965	1965	2059
Cone	PT6-BP	2163	2163	2387
Cover	JT15-A	2169	2387	2434
Outer	JT15-A	2191	2434	2501
Duct	PT6-HP	2428	2501	3335
Inner	PT6-BP	3129	3335	3546
Outer	JT15-B	3161	3546	3654
Case	PT6-HP	3197	3654	3868
Port	PT6-HY	3759	3868	4002
Cone	PT6-HY	4214	4214	4481
Cone	PT6-HP	4412	4481	4575
Duct	PT6-HP	4753	4753	5587
Cone	PT6-BP	4775	5587	5811
Nozzle	JT15-B	5091	5811	5923
Cover	JT15-B	5091	5923	6006
Inner	PT6-BP	5448	6006	6216
Case	PT6-HP	5455	6216	6431
Nozzle	JT15-A	5945	6431	6539

La cellule a cinq jours (6750 minutes) pour fabriquer ces lots

Tableau 3.26 Horaire de production de la cellule de sous-assemblage pour les cinq premiers jours de janvier 1990

Comme on peut le constater, s'il n'y a pas d'interférence avec la cellule d'assemblage, l'opérateur de la cellule de sous-assemblage a trois heures et demie de marge de manoeuvre pendant ces cinq jours (6750 min. - 6539 min.). En vérifiant l'achalandage des machines partagées par ces deux cellules, on constate qu'à certains moments, il se peut qu'une machine soit requise par les deux cellules, mais les occasions sont rares et elles ne causeront pas de problèmes si la priorité est donnée à la cellule d'assemblage, vu la marge de manoeuvre du sous-assemblage.

Dans un intervalle de sept jours, la cellule de fabrication de composantes aura produit un lot de chaque composante ce qui représente le volume de travail présenté au tableau 3.27.

Famille	Production de 7 jours	Temps d'opération par tuyère	Temps de mise en course	Total (min.)
PT6-HP	12	206.50	398.0	2876.00
PT6-BP	7	225.35	631.5	2208.95
PT6-HY	3	263.76	780.0	1571.28
PW100	18	35.79	65.0	709.22
JT15-A	2	26.57	73.5	126.64
JT15-B	5	41.23	112.5	318.65
				7810.74

Ce qui représente 130.18 heures, soit 18.6 heures par jour durant les sept jours.

Tableau 3.27 Charge de travail de la cellule de fabrication de composantes pour les jours 8 à 14 de janvier 1990

4 - Viabilité du système proposé par rapport à l'usine projetée par l'entreprise

Ce chapitre a pour but de vérifier la rentabilité du système de production proposé dans le chapitre 3 en se servant de l'implantation projetée par l'entreprise décrite au chapitre 2 comme référence.

Avant de procéder à l'évaluation des coûts, certaines hypothèses sont posées: selon les lois de l'impôt les plus récentes, Pratt & Whitney Canada est imposée à un taux de 23.69% au fédéral ([38% - 10% - 5%]*1.03) et de 13.94% au provincial (13%*1.0725) ce qui donne un taux global de 37.63%. L'inflation au Canada est établie à 5% par an (indice le plus récent) et le coût du capital pour cette entreprise a été posé à 20%.

Les investissements nécessaires à la réalisation de l'implantation sont amortis selon deux catégories: l'achat, l'installation et la modification de l'équipement de production ainsi que l'achat des étagères servant à l'entreposage sont amortis selon la catégorie 39 (25%), tandis que l'achat des chariots et du système Kanban sont amortis selon la catégorie 10 (30%). Pour fins d'actualisation, toute dépense est considérée engagée à la fin de l'année.

Trois critères d'évaluation ont été utilisés afin de vérifier la rentabilité de la proposition. Premièrement, la valeur actuelle nette de la différence entre les dépenses découlant de la proposition et celles du projet de l'entreprise a été calculée. Ceci nous permettra de déterminer si les investissements supplémentaires sont justifiés. Ensuite, le taux de rendement interne de cette analyse différentielle a été calculé pour établir la productivité de l'investissement. Finalement, le délai de récupération actualisé fut estimé pour mesurer le risque impliqué.

On suppose que les revenus des deux implantantions sont les mêmes puisqu'elles fournissent le même produit au même "prix" à l'assemblage des moteurs. Le tableau 4.1 présente les diverses dépenses d'investissement et d'opération pour la première année pour les deux implantations et fournit le coût différentiel de l'implantation proposée par rapport au projet de l'entreprise. Ces coûts sont détaillés dans les sections qui suivent.

	Implantation proposée	Implantation projetée	Différentiel
1. Investissements:			
- Equipement	(14,769,900)	(14,270,700)	(499,200)
- Installation	(1,510,624)	(1,460,558)	(50,066)
- Setup	(300,000)	-	(300,000)
- Etagères	(36,000)	(16,000)	(20,000)
- Chariots	(95,200)	(210,000)	114,800
- Système Kanban	(86,400)	-	(86,400)
INVESTISSEMENT TOTAL	(16,798,124)	(15,957,258)	(840,866)
2. Coûts d'opération première année:			
- Main-d'oeuvre	(1,195,506)	(2,859,610)	1,664,104
- Espace loué	(437,597)	(501,391)	63,794
- Fournitures	(2,862,121)	(3,107,332)	245,211
- FGF fixes	(735,495)	(672,760)	(62,735)
- Amortissement	(2,104,306)	(1,999,908)	(104,398)
TOTAL	(7,335,025)	(9,141,001)	1,805,976
3. Avantage d'opportunité:			
- Inventaire	592,772	-	592,772
COUT TOTAL	(6,742,253)	(9,141,001)	2,398,748
COUT APRES IMPOT	(4,205,144)	(5,701,243)	1,496,099
4. CASH FLOW 1ère année	(2,100,838)	(3,701,335)	1,600,497

Tableau 4.1 Comparaison des investissements et des coûts entre le système proposé et celui projeté par l'entreprise

4.1 Les investissements

4.1.1 Achat de l'équipement de production

Le coût d'achat de l'équipement de production pour l'usine projetée par l'entreprise est tiré de l'annexe 3 ($14,270,700), tandis que celui de l'usine proposé provient de l'annexe 12 ($14,769,900).

4.1.2 Installation de l'équipement

On alloue 10% de la valeur de l'équipement pour couvrir les coûts de modification des lieux (dalles de béton etc...) et du système électrique, l'approvisionnement en air comprimée et l'installation d'un système de récupération des huiles usées.

A ceci on ajoute la main-d'oeuvre nécessaire pour positionner chaque machine selon la complexité de son installation:

Complexité de l'installation	Temps nécessaire
facile	1 homme * 8 heures
moyenne	2 hommes * 8 heures
difficile	2 hommes * 16 heures
très difficile	4 hommes * 16 heures

Le taux horaire pour cette main-d'oeuvre est de $18.20/heure (bénéfices marginaux inclus).

4.1.3 Coût des modifications aux mises en course

Ce coût a été évalué à l'annexe 13 ($300,000).

4.1.4 Achat des étagères d'entreposage

L'entreprise a déterminé que 16 étagères à palettes de dimensions 8'X 4'seront requises dans son entrepôt de produits en cours; chaque étagère a été évaluée à $1,000.

Dans le cas de la proposition, des étagères (8' X 4') de type "flow-through" sont utilisées. Le manutentionnaire dépose les lots à l'arrière de l'étagère, ceux-ci s'avanceront par gravité vers l'avant où l'opérateur peut les récupérer (entreposage FIFO). Ces étagères coûtent $3,000 chacune et ont une hauteur de 7' pour permettre aux ouvriers d'atteindre tous les niveaux. Les quantités sont calculées comme suit:

Fabrication:

- entreposage de la tôle pour 45 des 57 composantes:
  Chaque composante a besoin d'un espace de 2' de large, 4' de profond et 1' de haut.

- entreposage des pièces forgées ou semi-finies pour les 12 composantes restant:
  Chaque composante a besoin d'un espace de 2' de large, 4' de profond et 2' de haut.

3 étagères de 8' X 4' X 7' seront nécessaires pour la cellule de fabrication.

Sous-assemblage:

- entreposage des composantes fabriquées:
  39 des 57 composantes sont assemblées au sous-assemblage, chacune nécessite un espace de 2'X 4'X 2'.
- entreposage des composantes achetées:
  1 étagère de 8' X 4' X 7' sera requise

4 étagères de 8' X 4' X 7'et 1 étagères de 4' X 4' X 7' seront nécessaires pour la cellule de sous-assemblage.

Assemblage:

- entreposage des composantes fabriquées:
  18 des 57 composantes sont assemblées à l'asemblage,
  17 nécessite chacune un espace de 2'X 4'X 2' et
  1 nécessite cinq espaces de 2'X 4'X 2'.
- entreposage des composantes achetées:
  1 étagères de 8' X 4' X 7' sera requise

- entreposage des sous-assemblages:
  les 14 sous-assemblages nécessitent chacun un espace de 2'X 4'X 2'.

4 étagères de 8' X 4' X 7' seront nécessaires pour le cellule d'assemblage.

Inspection finale:

- entreposage des tuyères finies:
  chaque tuyères nécessite un espace de 2' X 2' X 3' et il y aura au maximum 8 tuyères en attente à ce poste.

1 étagères de 4' X 4' X 7' sera nécessaire au poste d'inspection finale.

En tout, 11 étagères de 8' X 4' X 7' et 2 de 4' X 4' X 7' seront nécessaires pour cette implantation.

4.1.5 Achat des chariots

Selon l'estimé de l'entreprise, leur implantation nécessitera 300 chariots 2'X 2'. Pour l'usine proposée, le calcul qui suit a été exécuté en sachant que, dans presque tout les cas, un lot circule dans un chariot.

Fabrication:	
Quantité maximum de lots en cours et finis:	5
Quantité de lots entreposés pour les opérations de traitement thermique:	29
Sous-assemblage:	
Quantité maximum de lots en cours et finis:	4
Quantité de lots entreposés pour les opérations de traitement thermique:	12
Assemblage:	
Quantité maximum de lots en cours et finis:	8
Quantité de lots entreposés pour les opérations sur des machines à contrôle numérique:	40
Quantité de lots entreposés pour les opérations de traitement thermique:	19
Quantité de lots entreposés pour les opérations de durcissage:	7
	124
Lots en transit: 10% ==========>	12
Total	136

Note: chaque chariot avec ses tablettes coûte $700.

4.1.6 Coût du système Kanban

On estime que 1,200 Kanban devront être produits et encodés pour le système de selection de pièces proposé à la section 3.3.2; le coût unitaire a été approximé à $5. De plus, 4 lecteurs de cartes magnétiques ($20,000/un.) ainsi la programmation de l'algorithme de séquencement (16 heures à $25/heure) seront requis.

4.2 Les coûts d'opération

Les coûts d'opération pour l'implantation projetée sont tirés des estimés de l'entreprise (voir tableau 2.2).

4.2.1 La main-d'oeuvre

Pour l'implantation proposée, la main-d'oeuvre a été évaluée au tableau 3.18 et les taux horaires de base sont les mêmes que ceux utilisés par l'entreprise mais majorés de $2 (augmentation moyenne de 9.2%) pour tenir compte de la valeur d'une main-d'oeuvre multi-fonctionnelle.

4.2.2 La location de l'espace

L'espace nécessaire pour l'équipement des cellules de production est tiré du tableau 3.5 (22,356 pieds^2) et le calcul de l'entreposage suit:

Fabrication:

entreposage des tôles (3 X 64 pieds^2):	192
chariots pour T/T (29 X 4 pieds^2):	116
chariots de composantes finies (5 X 4 pieds^2):	20
	328

Sous-assemblage:

entreposage des composantes (4.5 X 64 pieds^2):	288
chariots pour T/T (12 X 4 pieds^2):	48
chariots de sous-assemblages finis (4 X 4 pieds^2):	16
	352

Assemblage:

entreposage des composantes et des sous-assemblages (4 X 64 pieds^2):	256
chariots pour machines à C.N. (40 X 4 pieds^2):	160
chariots pour T/T (19 X 4 pieds^2):	76
chariots pour durcissage (7 X 4 pieds^2):	28
chariots de tuyères finis (3 X 4 pieds^2):	12
	532

Traitement thermique:

chariots pour T/T (25 X 4 pieds^2): 100

Inspection finale:

L'espace pour l'étagère est inclus dans les 250 pieds^2 alloués à cette cellule.

Entreposage et manutention:

Puisque les pièces restent sur le plancher de l'usine, seul un bureau de 200 pieds^2 est nécessaire.

L'espace total nécessaire pour la proposition est donc 24,118 pieds^2. Pour les deux implantations, la superficie calculée doit être majorée de 12% pour inclure des allées principales (méthode utilisée chez Pratt & Whitney). Le coût annuel de location est de \$16.20/pieds^2.

4.2.3 Fournitures de production

Les taux d'imputation utilisés par l'entreprise pour les frais généraux de fabrication variables (en fontion des heures de production prévues) ont été adoptés. Ces coûts couvrent les dépenses telles l'outillage, l'huile de coupe, la consommation électrique etc...

4.2.4 Frais généraux de fabrication fixes

Seuls les coûts fixes qui pourraient être influencés par la superficie occupée ou l'investissement encouru ont été considérés. Un coût équivalent à 5% de la valeur de l'équipement est imputé pour couvrir ces frais fixes (autres que le loyer) tels les assurances et l'éclairage des lieux.

4.2.5 L'amortissement fiscal des immobilisations

Les immobilisations sont classées selon deux catégories

Catégorie 39 (biens utilisés directement ou indirectement pour la fabrication, 25%):

- **L'équipement**
- **L'installation**
- **Les modifications aux setup**
- **Les étagères**

Catégorie 10 (30%):

- **Les chariots (matériel roulant)**
- **Le système Kanban (matériel de traitement de données)**

4.3 Avantage d'opportunité

4.3.1 Inventaire

L'inventaire de produits en cours et de produits finis a été évalué à $3,938,030 pour le projet de l'entreprise. Dans le cas de la proposition, en se référant à la section 3.4.3, on obtient en inventaire total de $974,171. Etant donné que le système de production proposé maintient un niveau d'inventaire plus bas, le fond de roulement de l'entreprise peut être réduit. L'argent libéré ($2,963,859) peut être investi dans un autre projet ou un placement. Nous avons supposé que cet argent à pu être investi à un taux équivalent au coût du capital de l'entreprise (20%).

4.4 Les cash flow annuels

Les cash flow sont obtenus en additionnant la dépense d'amortissement aux coûts nets après impôt. Déjà à ce stade, on peut constater qu'après seulement un an d'opération, la proposition réussit à combler la différence d'investissement.

A partir des renseignements contenus dans le tableau 4.1 pour la première année d'opération, il nous est possible de faire une analyse différentielle des deux implantations (tableau 4.2).

ANNEE:	0	1	2	3	4	5
1- INVESTISSEMENTS DIFFERENTIELS:						
- EQUIPEMENT	(499,200)					
- INSTALLATION	(50,066)					
- SETUP	(300,000)					
- ETAGERES	(20,000)					
- CHARIOTS	114,800					
- KANBAN	(86,400)					
TOTAL	(840,866)					
2- ECONOMIES D'OPERATION DIFFERENTIELLES:						
- MAIN-D'OEUVRE		1,664,104	1,747,309	1,834,675	1,926,408	2,022,729
- ESPACE LOUE		63,794	66,984	70,333	73,850	77,542
- FOURNITURES		245,211	257,472	270,345	283,862	298,056
- FGF FIXES		(62,735)	(65,872)	(69,165)	(72,624)	(76,255)
- AMORTISSEMENT		(104,398)	(182,910)	(137,545)	(103,412)	(77,736)
TOTAL		1,805,976	1,822,983	1,968,643	2,108,085	2,244,336
3- AVANTAGE:						
- INVENTAIRE		592,772	622,410	653,531	686,207	720,518
ECONOMIE TOTALE		2,398,748	2,445,393	2,622,174	2,794,293	2,964,853
APRES IMPOT DE 37.63%		1,496,099	1,525,192	1,635,450	1,742,800	1,849,179
+ AMORTISSEMENT		104,398	182,910	137,545	103,412	77,736
4- CASH FLOW		1,600,497	1,708,102	1,772,994	1,846,212	1,926,915
INVESTISSEMENT	(840,866)					
5- VAN DES CASH FLOW		1,333,694	1,186,106	1,026,032	890,428	774,427

6- VALEUR ACTUALISEE A L'ANNEE 0
DU DIFFERENTIEL DES INVESTISSEMENTS ET DES COUTS: $ 4,369,822

Tableau 4.2 Analyse différentielle des coûts d'implantation du système proposé vs. le système projeté par l'entreprise

Le tableau 4.2 présente cette analyse sur un horizon de cinq ans car les changements dans le domaine de l'aéronautique pourraient avoir un grand impact sur les méthodes de fabrication et qu'à ce moment il serait nécessaire de réévaluer la proposition.

Le taux d'actualisation utilisé est de 20% (coût du capital) et les coûts sont sujet à une augmentation de 5% par an.

On peut constater que la proposition est manifestement rentable puisque sa valeur actuelle nette est positive ($4,369,821). De plus, le taux de rendement interne étant de 195.5% (bien supérieur au coût du capital de 20%), l'adoption du nouveau système devient une nécessité. Ce fait est confirmé par le délai de récupération qui est inférieur à un an. Il y a donc très peu de risque que les économies ne se réalisent pas.

Suite à ces résultats, on peut considérer que la proposition, satisfaisant aux trois critères, devrait être acceptée.

A cette analyse économique on peut ajouter une comparaison des délais de fabrication des deux implantations.

Comme mentionné à la section 2.2.2, le délai de fabrication d'une tuyère dans l'implantation projetée par l'entreprise varie entre 40 et 100 jours (en moyenne 65 jours). Pour l'implantation proposée, ce délai est entre 2 et 3 jours (un jour pour chaque cellule visitée), ce qui constitue une réduction moyenne de 96%.

CONCLUSION

Ce mémoire avait pour but d'étudier l'applicabilité de la philosophie du juste à temps dans un domaine où la fabrication se faisait par lots et le volume était assez faible: l'aéronautique. Le projet fut réalisé en entreprise pour permettre de générer une proposition qui incorpore les particularités du domaine.

Les activités de production ont été analysées pour les séparer en cellules de fabrication, de sous-assemblage, d'assemblage et de traitement thermique. Ces cellules furent comparées à un projet d'implantation indépendante planifié par l'entreprise et un compromis fut développé pour réduire les coûts engagés tout en conservant les objectifs du juste à temps.

Par la suite, certains changements à l'intérieur des cellules ont été discutés. D'abord, les opérations de mise en course furent analysées dans le but de rendre les cellules plus flexibles et permettre une réduction de la taille des lots de fabrication. Ainsi, une réduction moyenne de 80% a été possible sur la plupart des machines. Ensuite, il a été démontré que l'implantation d'un système de contrôle préventif des défauts entraînerait une amélioration de la qualité du produit sans pour autant augmenter les coûts. Finalement, la

nécessité de cultiver une main-d'oeuvre multi-fonctionnelle pouvant accomplir plusieurs tâches différentes et qui assumerait une plus grande responsabilité pour son travail fut abordée.

Après avoir déterminé les changements physiques nécessaires pour convertir la fabrication par lots en juste à temps, la conception du système de gestion de la production fut entreprise afin de permettre à l'entreprise d'en bénéficier pleinement. Vu la taille des lots, la fabrication des composantes fut isolée du reste de la production par un entreposage de composantes finies. Cette cellule fonctionnera selon le système Kanban mais retardé de sept jours. De cette façon, il sera possible de constituer des lots et maintenir les coûts de mise en production à un niveau acceptable. Les cellules de sous-assemblage et d'assemblage opèreront selon le système Kanban aussi mais avec de petits lots (2 à 3 unités pour le sous-assemblage et 1 à 2 unités pour l'assemblage) et une séquence d'assemblage d'une durée de dix jours qui sera communiquée à l'assemblage au début de chaque période (2 semaines). Dans les trois cellules, des inventaires de pièces en cours seront maintenus pour permettre d'exécuter les opérations de traitement thermique en différé.

Finalement, une analyse économique différentielle a démontré la rentabilité de la proposition par rapport au projet proposé par l'entreprise. En effet, l'implantation de la proposition permettrait à l'entreprise de réaliser des économies de plus de 1.6 millions de dollars annuellement ce qui constitue un taux de rendement interne sur le capital investi de 195.5%. De plus, le délai de récupération étant inférieur à un an, la proposition est considérée très peu risquée.

Il est donc apparent que le but visé par cette étude fut atteint et que le juste à temps peut être adapté à une grande variété de situations si l'on veut faire preuve d'ingéniosité. Cependant, puisque l'étude s'est limitée aux activités de production interne d'une seule composante majeure du produit fini de l'entreprise, plusieurs facteurs n'ont pas été développés, notamment: la possibilité d'étendre la philosophie du juste à temps à l'assemblage final des moteurs ou à l'approvisionnement des matériaux. Ces deux aspects pourraient s'insérer par la suite dans une politique globale de réduction des coûts pour l'entreprise.

BIBLIOGRAPHIE

1. HALL, R. W., "Zero Inventories". Dow Jones-Irwin, Homewood, IL (1983).
2. MINISTERE DE L'INDUSTRIE ET DU COMMERCE, "Séminaire à l'intention des industriels: 14.1 Simulation Juste à Temps". Les Séminaires du MIC, Québec, (1988).
3. MONDEN, Y., "Toyota Production System : Practical approach to production management". Industrial Engineering and Management Press, Norcross, GA (1983).
4. SHINGO, S., "Maîtrise de la Production et Méthode Kanban: le cas Toyota". Les éditions d'organisation, Paris, (1983).
5. SUZAKI, K., "The New Manufacturing Challenge : Techniques for continuous improvement". The Free Press, New York, NY (1987).
6. SHINGO, S., "A Revolution in Manufacturing: The SMED System". Productivity Press, Cambridge, MA (1985).
7. BURBIDGE, J. L., "The Introduction of Group Technology". Heinemann, London, (1975).
8. VIERLING, A. E., "Machines can only Produce as Efficiently as the People who Operate them". Industrial Engineering, Vol. 22 no. 2, (fév. 1990).
9. UNITED TECHNOLOGIES AND PRATT & WHITNEY, "Le Moteur à Turbine à Gaz d'Aéronef et son fonctionnement". UTC and P&WC (1984).

10. Département de Planification et Contrôle des Besoins Matière, P&WC. "System Flow from Customer Order through to Product Shipment". P&WC, Longueil, (mars 1988).

11. KING, J. R., "Machine-Component Grouping in Production Flow Analysis: an approach using a Rank Order Algorithm". International Journal of Production Research, Vol. 18, (1980).

12. VOLLMANN, T. E., BERRY, W. L. et WHYBARK, D. C., "Manufacturing Planning and Control Systems". Dow Jones-Irwin, Homewood, IL, (1984).

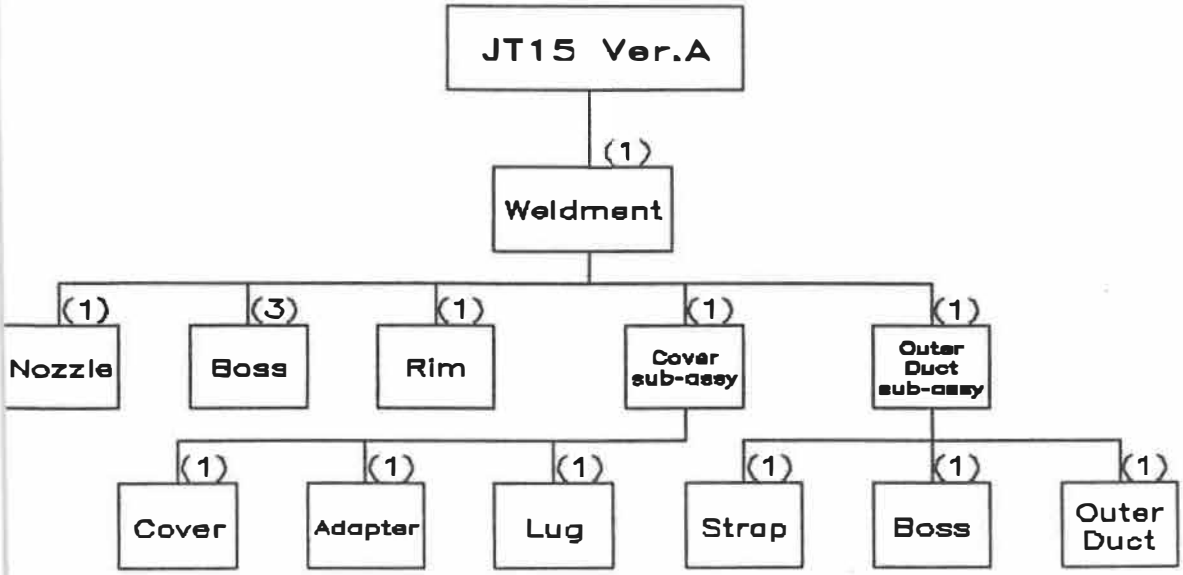
ANNEXES

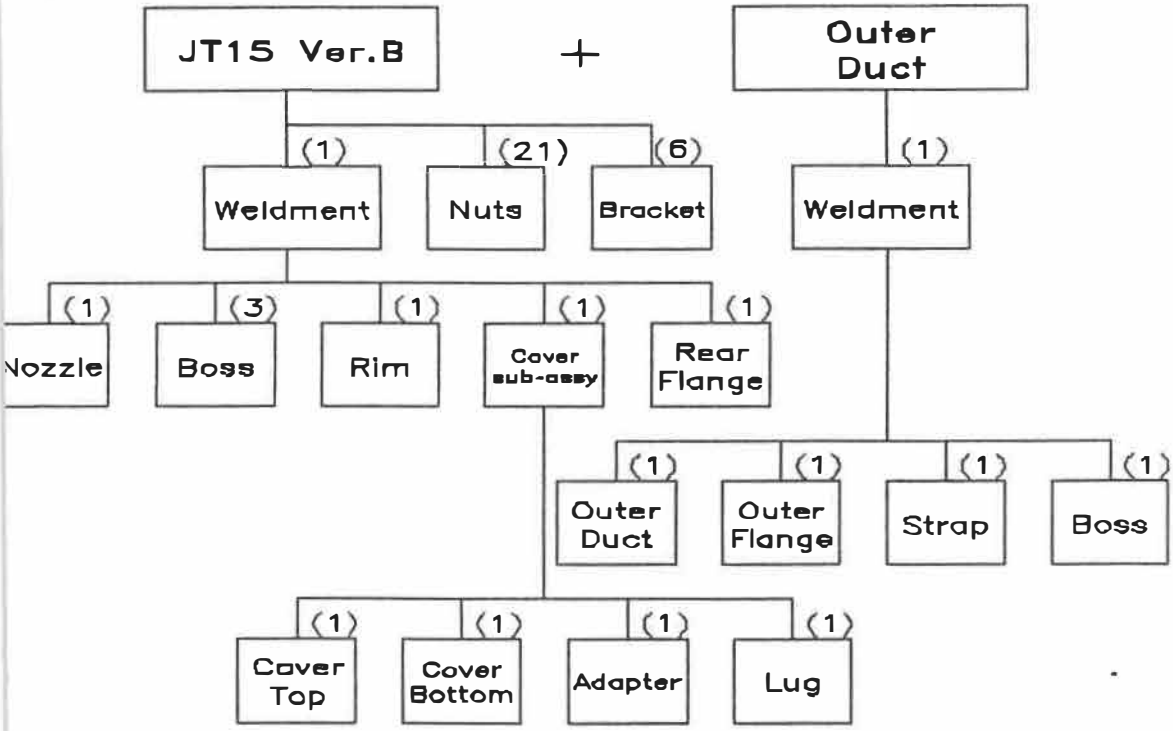
ANNEXE 1. Nomenclature en arbre des six familles

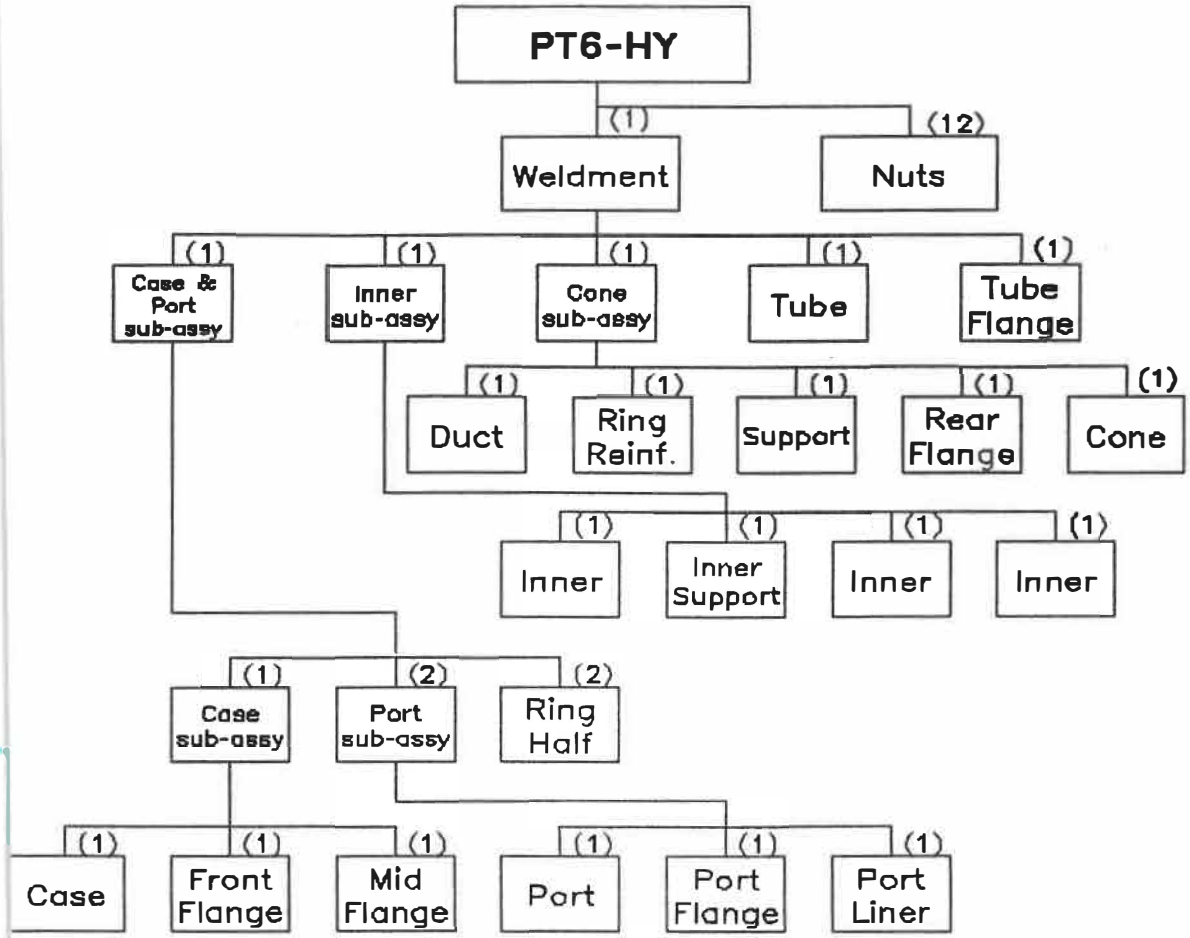
Tous les composantes et assemblages sont identifiés par leur nom anglais, la quantité par assemblage est indiquée au dessus de l'item á droite.

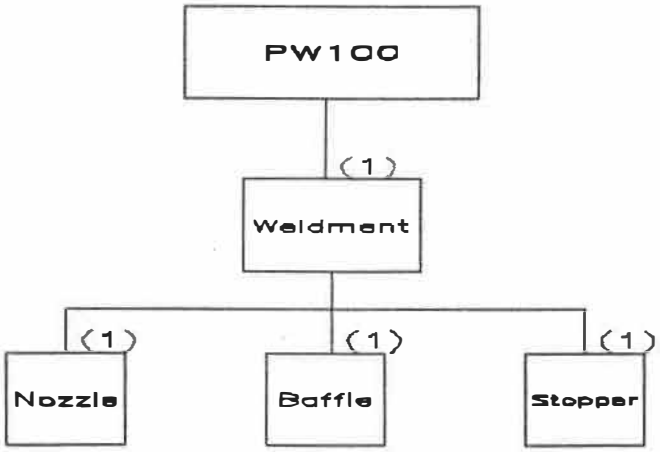
Notons que la famille des JT15 se présente sous deux formes très similaires sauf pour ce qui est du Outer Duct qui peut être pré-assemblé ou non.

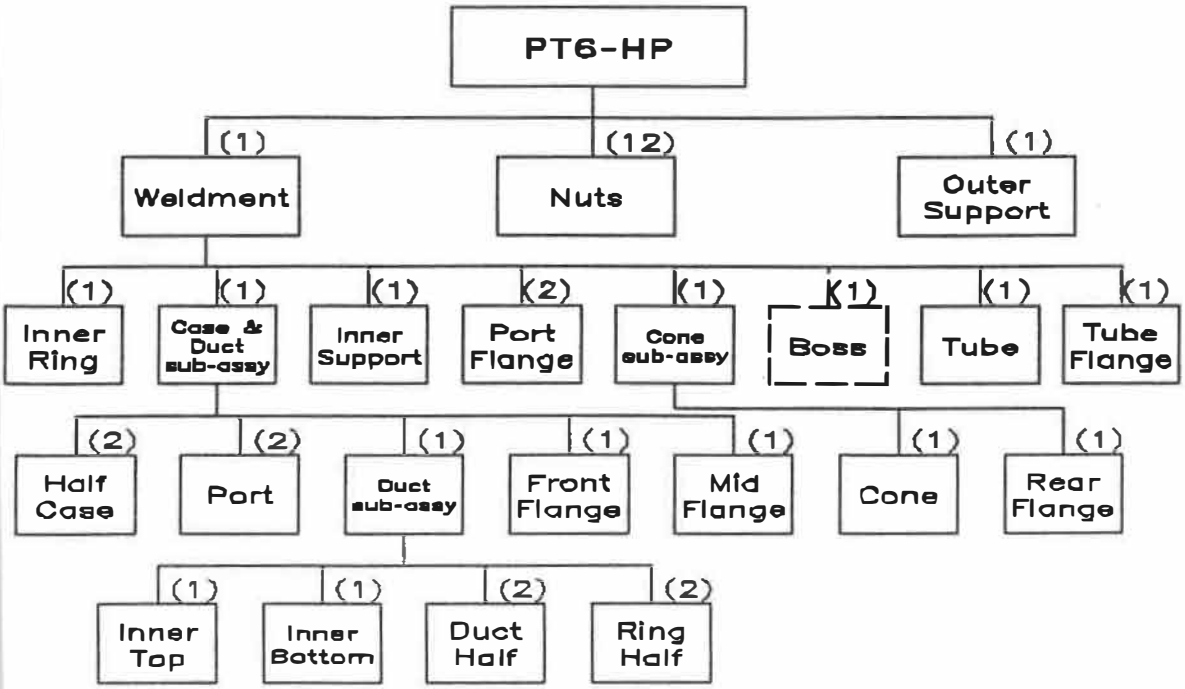
Note:  Ceci représente une composante qui n'est présente que dans certains produits finis

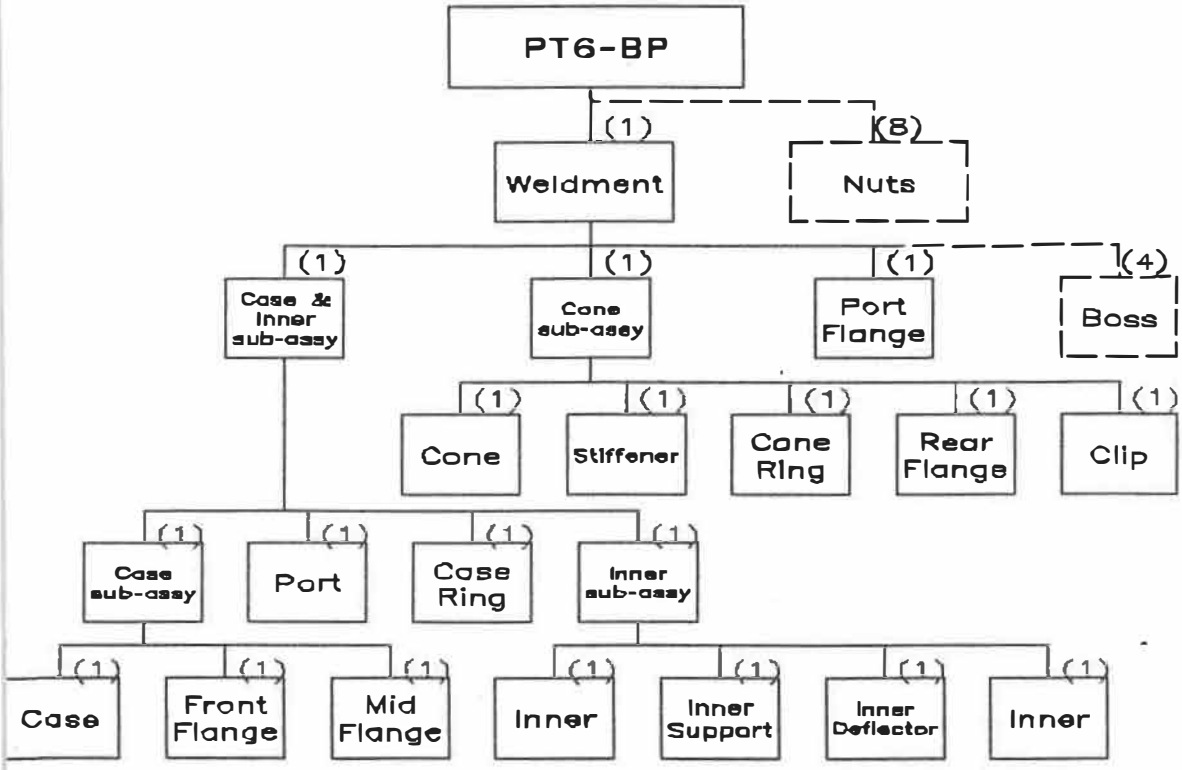

JT15 Ver.A
(1)
Weldment
(1)
Nozzle
(3)
Boss
(1)
Rim
(1)
Cover sub-assy
(1)
Outer Duct sub-assy
(1)
Cover
(1)
Adapter
(1)
Lug
(1)
Strap
(1)
Boss
(1)
Outer Duct


JT15 Ver.B
+
Outer Duct
(1)
Weldment
(21)
Nuts
(6)
Bracket
(1)
Weldment
(1)
Nozzle
(3)
Boss
(1)
Rim
(1)
Cover sub-assy
(1)
Rear Flange
(1)
Outer Duct
(1)
Outer Flange
(1)
Strap
(1)
Boss
(1)
Cover Top
(1)
Cover Bottom
(1)
Adapter
(1)
Lug


PT6-HY
(1)
Weldment
(12)
Nuts
(1)
Case & Port sub-assy
(1)
Inner sub-assy
(1)
Cone sub-assy
(1)
Tube
(1)
Tube Flange
(1)
Duct
(1)
Ring Reinf.
(1)
Support
(1)
Rear Flange
(1)
Cone
(1)
Inner
(1)
Inner Support
(1)
Inner
(1)
Inner
(1)
Case sub-assy
(2)
Port sub-assy
(2)
Ring Half
(1)
Case
(1)
Front Flange
(1)
Mid Flange
(1)
Port
(1)
Port Flange
(1)
Port Liner


PW100
(1)
Weldment
(1)
Nozzle
(1)
Baffle
(1)
Stopper


PT6-HP
(1) Weldment
(12) Nuts
(1) Outer Support
(1) Inner Ring
(1) Case & Duct sub-assy
(1) Inner Support
(2) Port Flange
(1) Cone sub-assy
(1) Boss
(1) Tube
(1) Tube Flange
(2) Half Case
(2) Port
(1) Duct sub-assy
(1) Front Flange
(1) Mid Flange
(1) Cone
(1) Rear Flange
(1) Inner Top
(1) Inner Bottom
(2) Duct Half
(2) Ring Half


PT6-BP
(1) Weldment
(8) Nuts
(1) Case & Inner sub-assy
(1) Cone sub-assy
(1) Port Flange
(4) Boss
(1) Cone
(1) Stiffener
(1) Cone Ring
(1) Rear Flange
(1) Clip
(1) Case sub-assy
(1) Port
(1) Case Ring
(1) Inner sub-assy
(1) Case
(1) Front Flange
(1) Mid Flange
(1) Inner
(1) Inner Support
(1) Inner Deflector
(1) Inner

ANNEXE 2. Diagrammes de déroulement-matière simple de l'assemblage d'une tuyère



Représente une opération



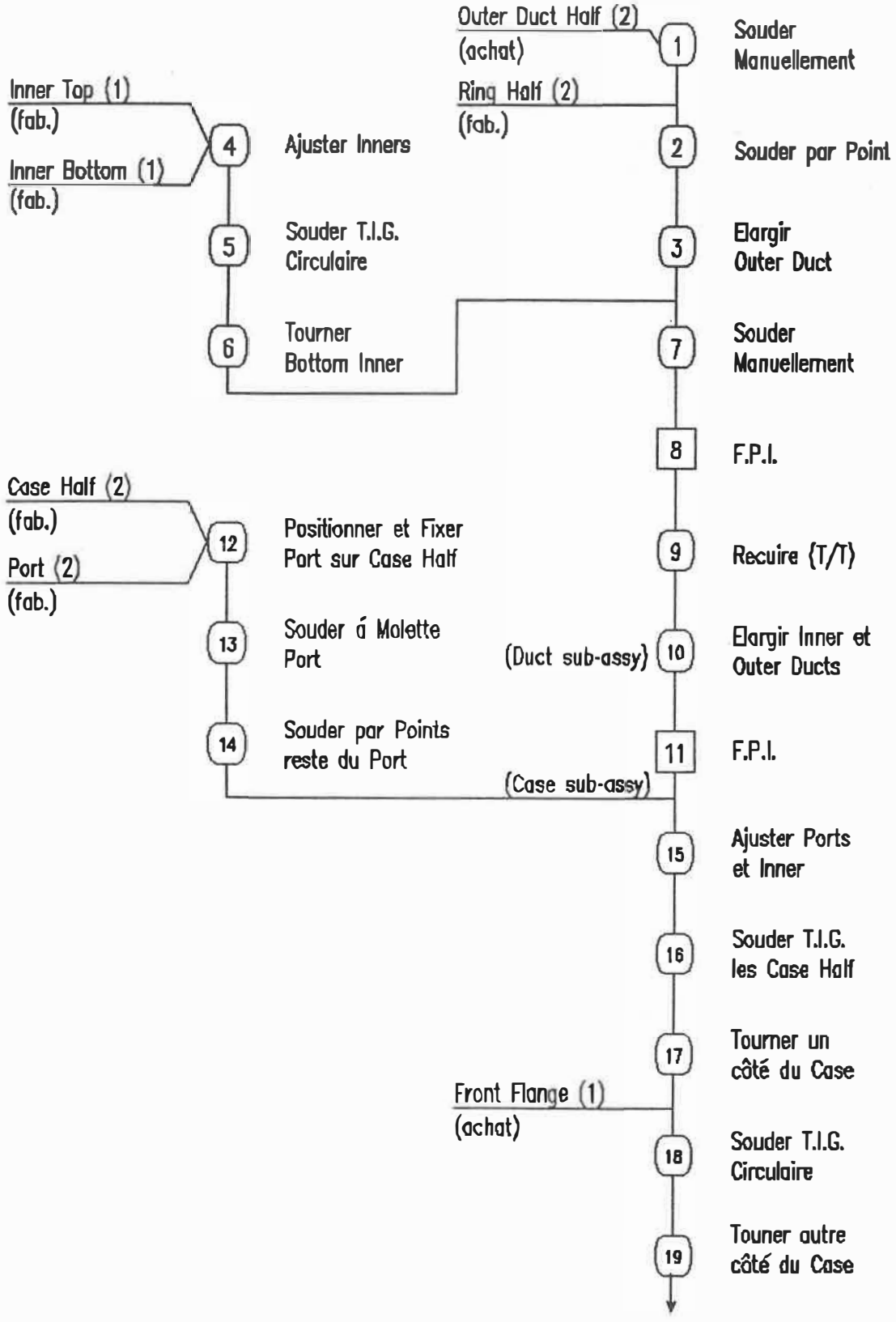
Représente une inspection

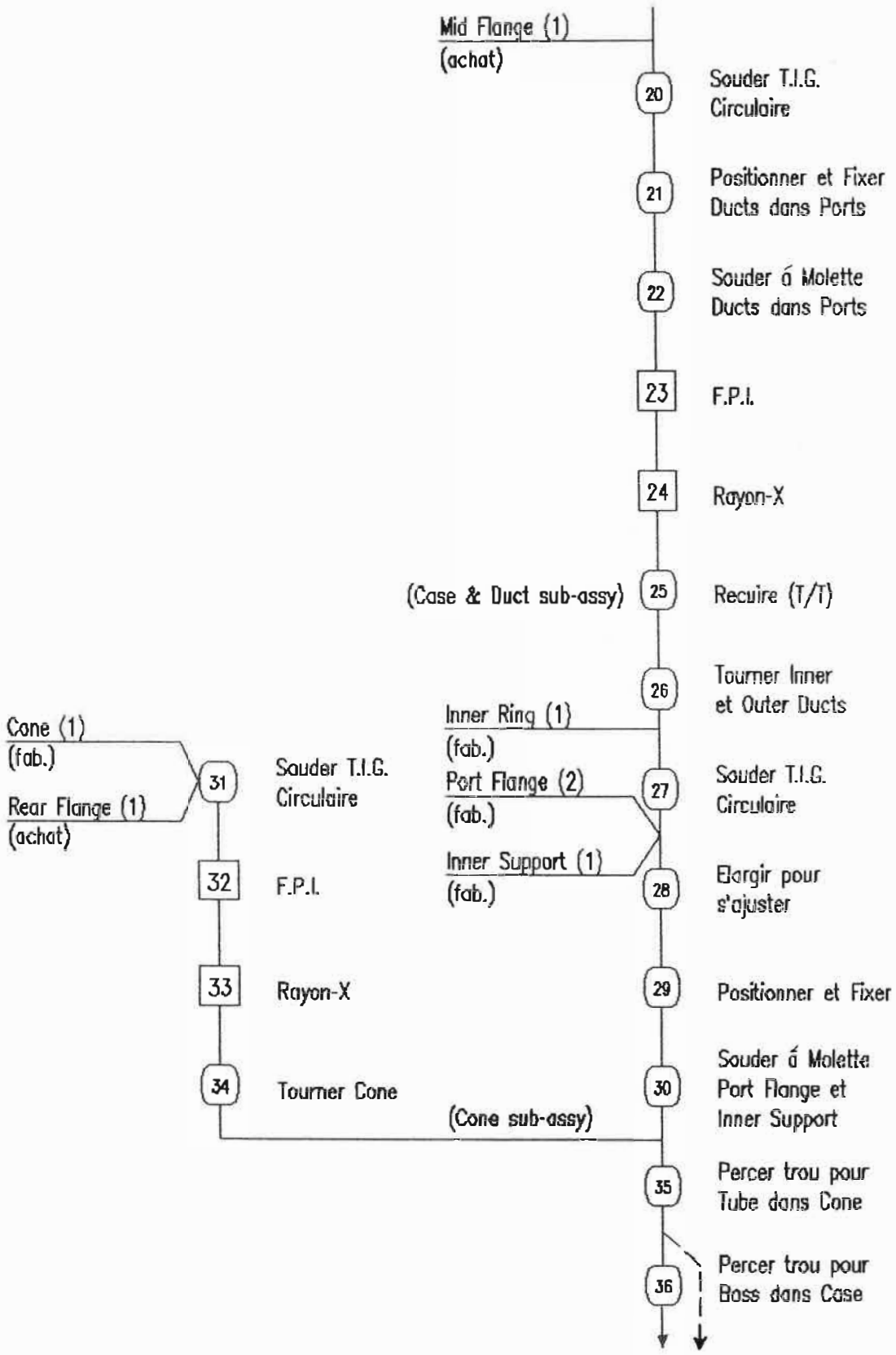
Représente un cheminement alternatif suivi par certains produits finis

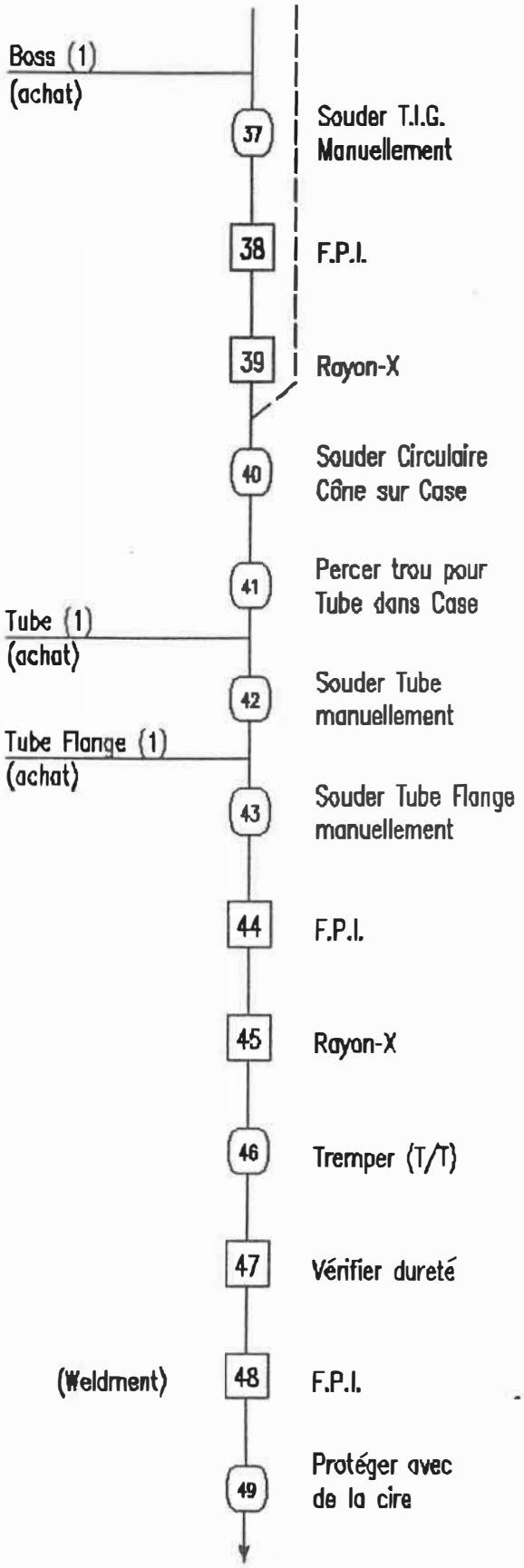


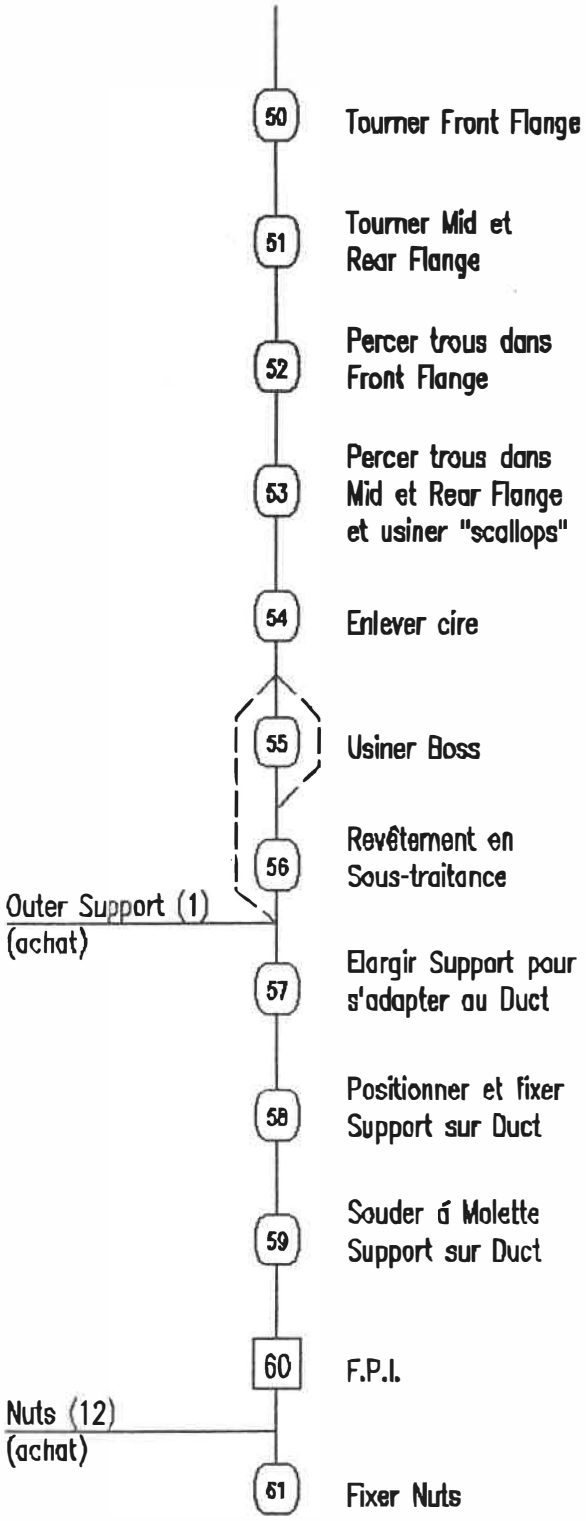
Nom donné au sous-assemblage

Famille des PT6-HP

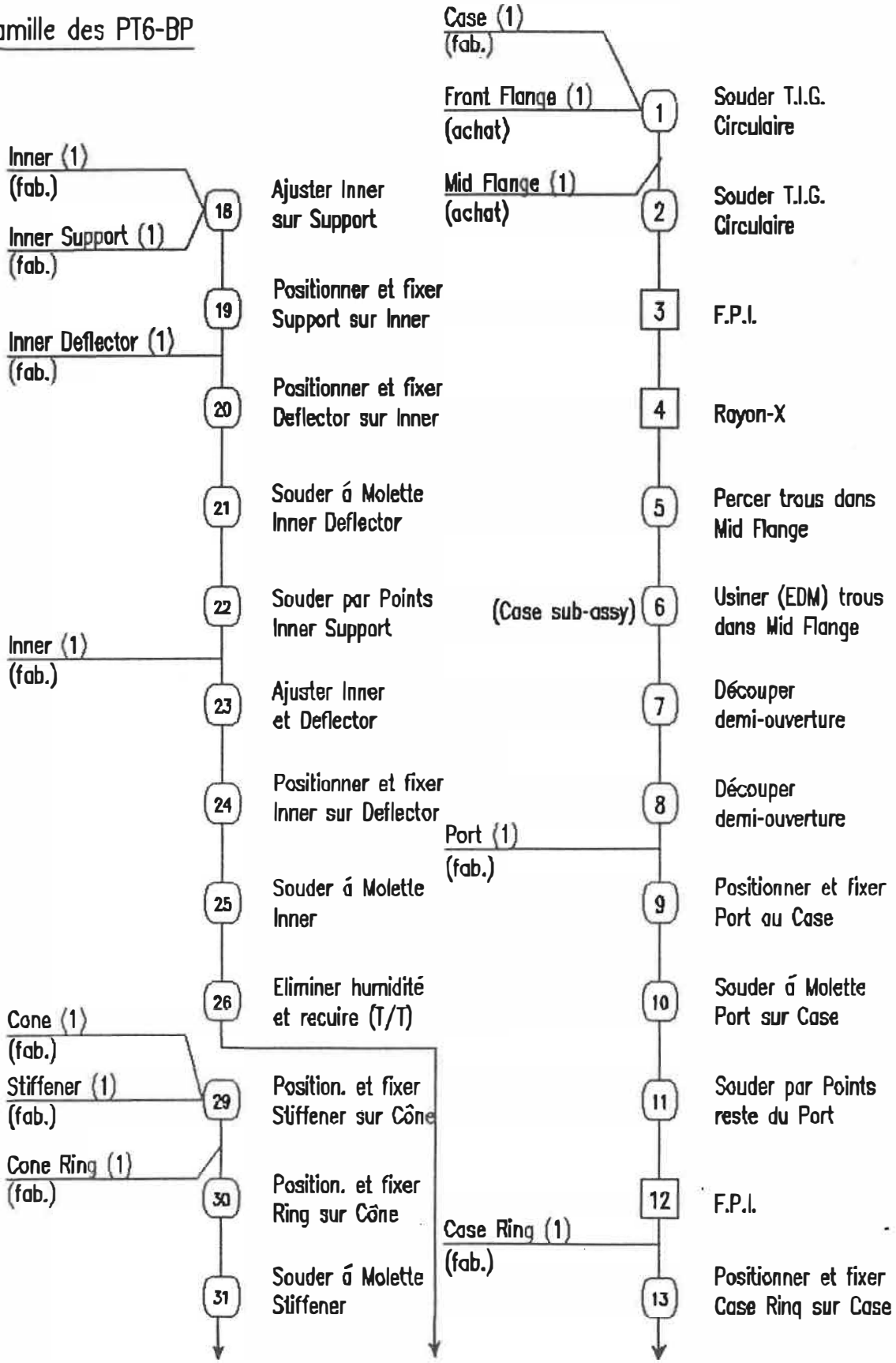


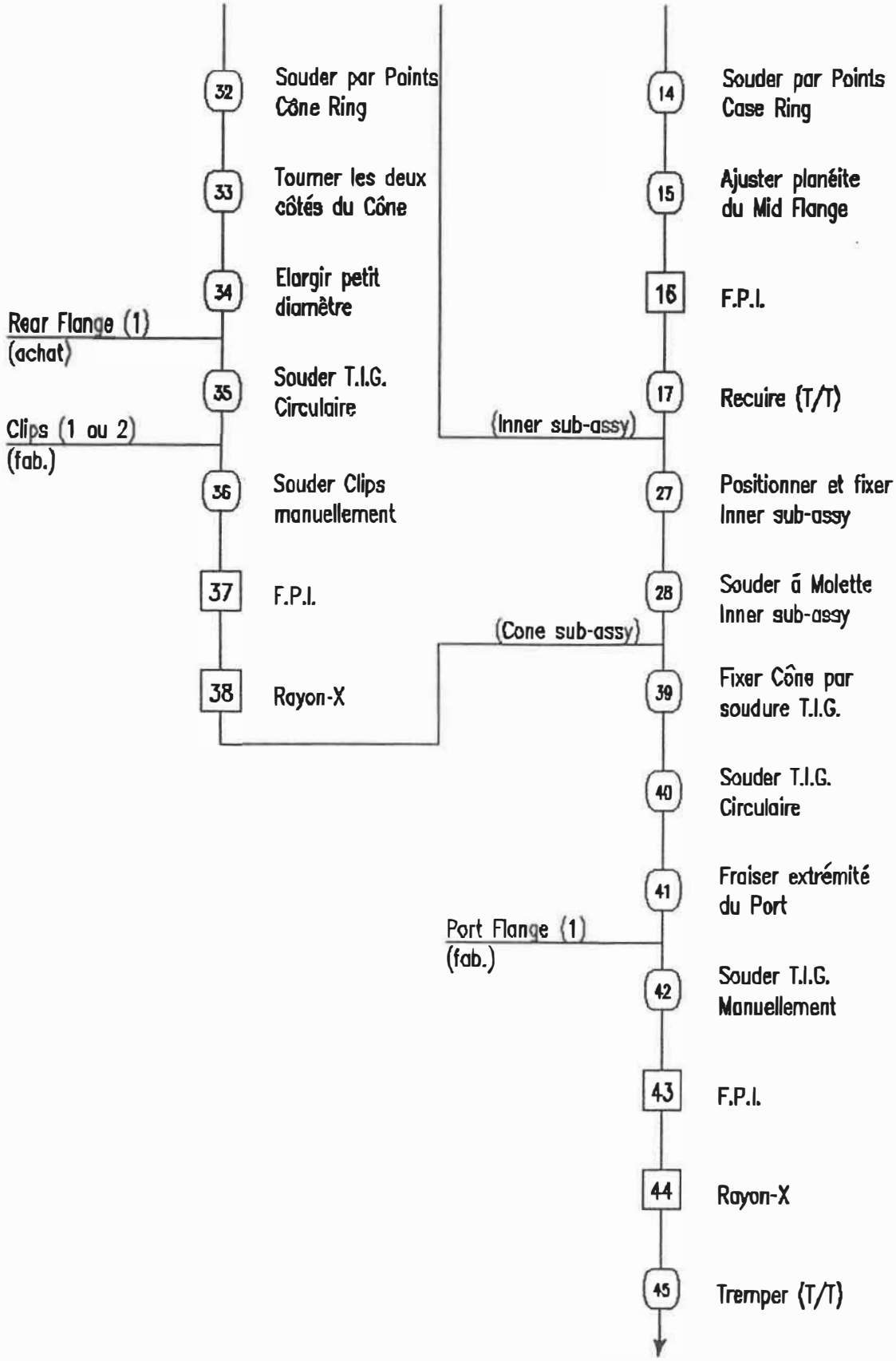

Mid Flange (1)
(achat)
20
Souder T.I.G.
Circulaire
21
Positionner et Fixer
Ducts dans Ports
22
Souder á Molette
Ducts dans Ports
23
F.P.I.
24
Rayon-X
(Case & Duct sub-assy)
25
Recuire (T/T)
26
Tourner Inner
et Outer Ducts
Inner Ring (1)
(fab.)
Port Flange (2)
(fab.)
27
Souder T.I.G.
Circulaire
Inner Support (1)
(fab.)
28
Elargir pour
s'ajuster
29
Positionner et Fixer
30
Souder á Molette
Port Flange et
Inner Support
(Cone sub-assy)
35
Percer trou pour
Tube dans Cone
36
Percer trou pour
Boss dans Case
Cone (1)
(fab.)
Rear Flange (1)
(achat)
31
Souder T.I.G.
Circulaire
32
F.P.I.
33
Rayon-X
34
Tourner Cone

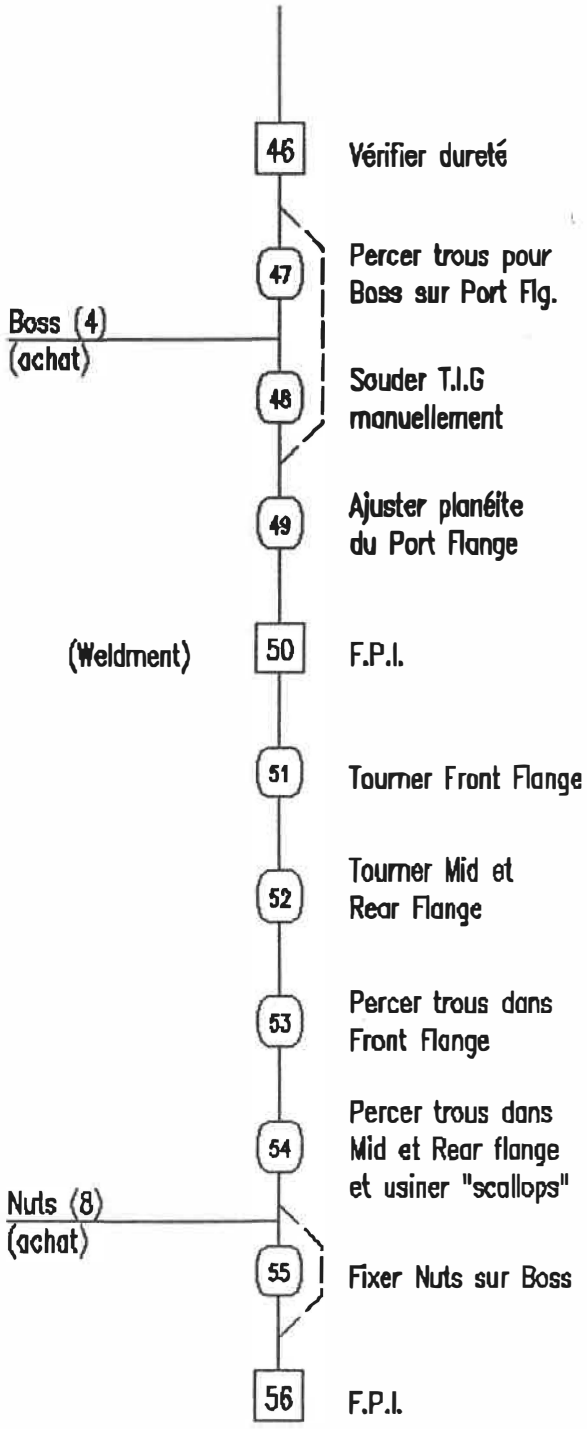

Boss (1)
(achat)
37
Souder T.I.G. Manuellement
38
F.P.I.
39
Rayon-X
40
Souder Circulaire Cône sur Case
41
Percer trou pour Tube dans Case
Tube (1)
(achat)
42
Souder Tube manuellement
Tube Flange (1)
(achat)
43
Souder Tube Flange manuellement
44
F.P.I.
45
Rayon-X
46
Tremper (T/T)
47
Vérifier dureté
(Weldment)
48
F.P.I.
49
Protéger avec de la cire


50
Tourner Front Flange
51
Tourner Mid et Rear Flange
52
Percer trous dans Front Flange
53
Percer trous dans Mid et Rear Flange et usiner "scallops"
54
Enlever cire
55
Usiner Boss
56
Revêtement en Sous-traitance
Outer Support (1)
(achat)
57
Elargir Support pour s'adapter au Duct
58
Positionner et fixer Support sur Duct
59
Souder á Molette Support sur Duct
60
F.P.I.
Nuts (12)
(achat)
61
Fixer Nuts

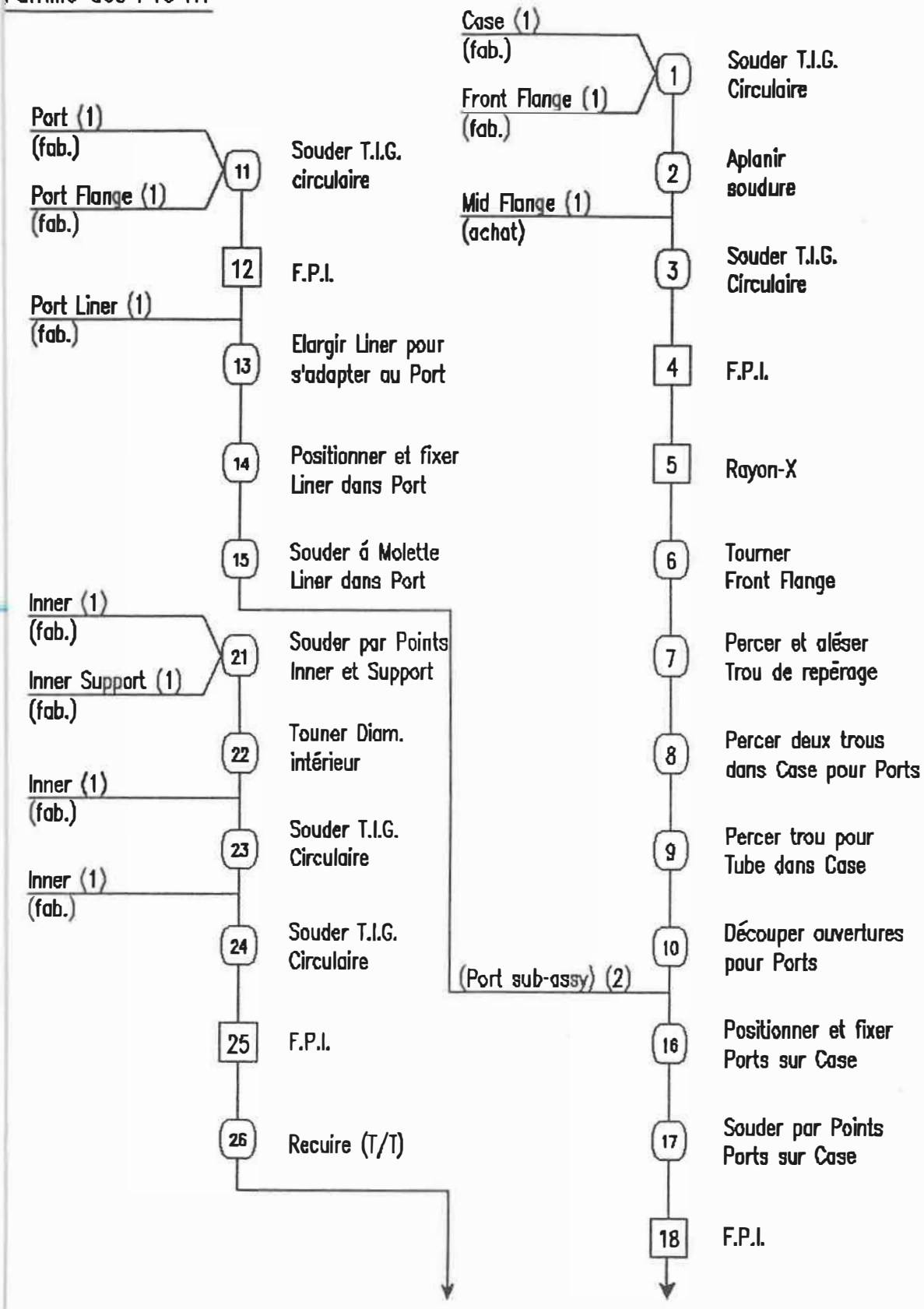
Famille des PT6-BP

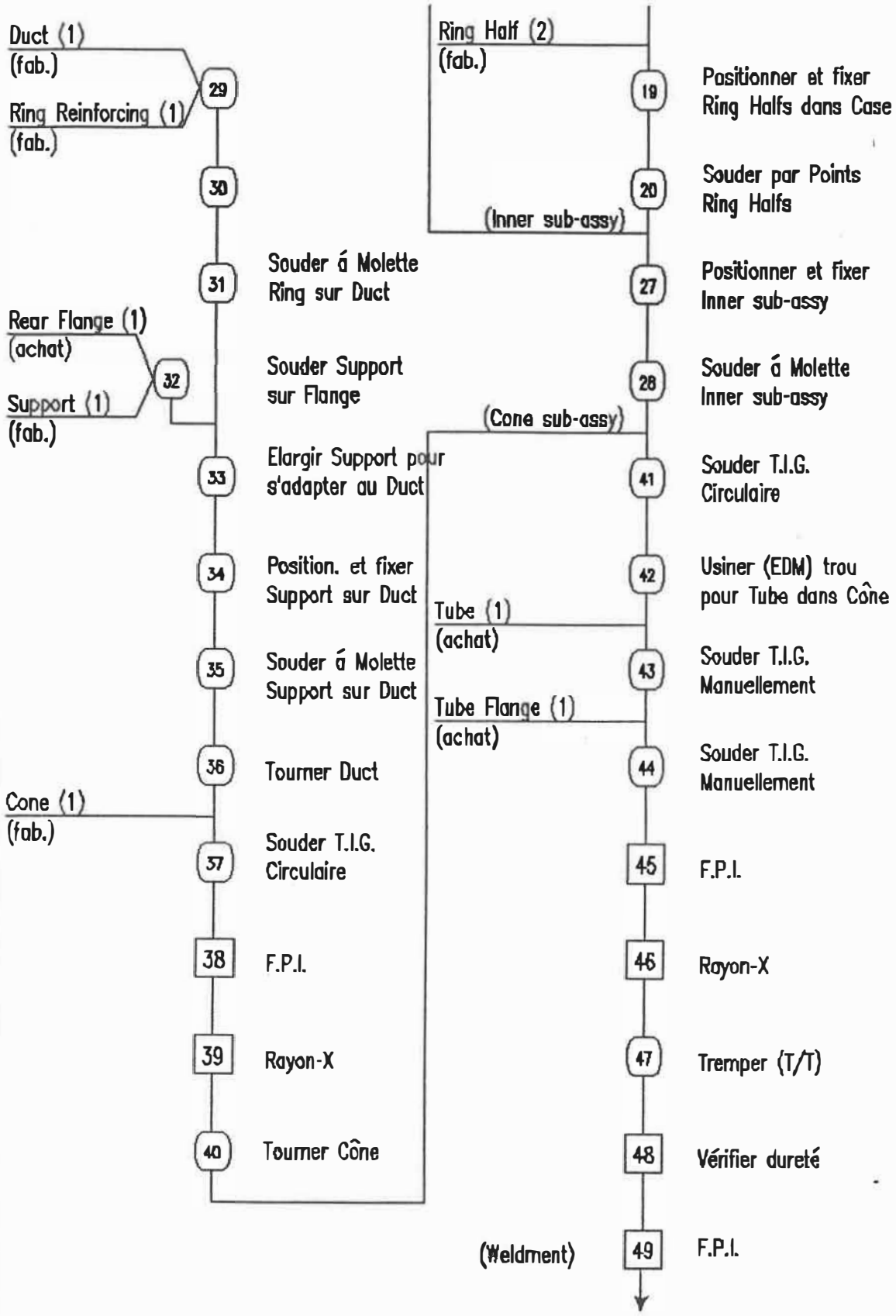


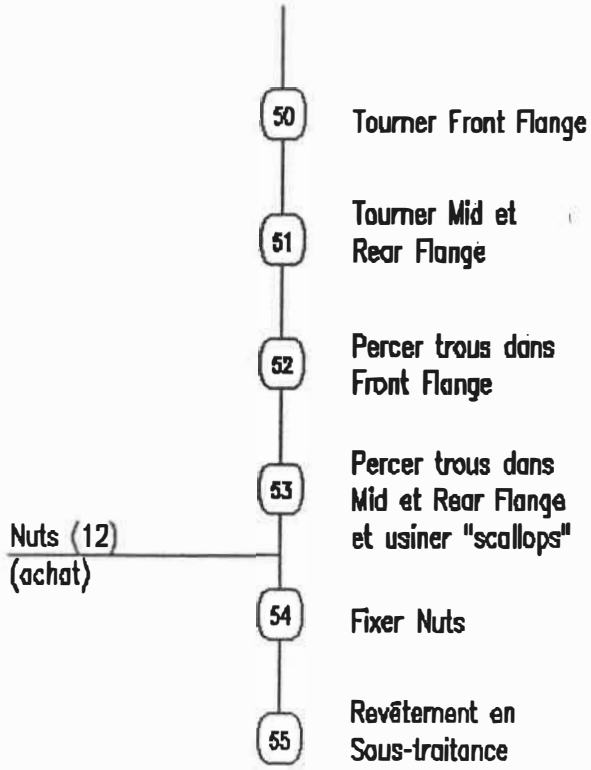

32
Souder par Points
Cône Ring
33
Tourner les deux
côtés du Cône
34
Elargir petit
diamètre
Rear Flange (1)
(achat)
35
Souder T.I.G.
Circulaire
Clips (1 ou 2)
(fab.)
36
Souder Clips
manuellement
37
F.P.I.
38
Rayon-X
14
Souder par Points
Case Ring
15
Ajuster planéite
du Mid Flange
16
F.P.I.
17
Recuire (T/T)
(Inner sub-assy)
27
Positionner et fixer
Inner sub-assy
28
Souder à Molette
Inner sub-assy
(Cone sub-assy)
39
Fixer Cône par
soudure T.I.G.
40
Souder T.I.G.
Circulaire
41
Fraiser extrémité
du Port
Port Flange (1)
(fab.)
42
Souder T.I.G.
Manuellement
43
F.P.I.
44
Rayon-X
45
Tremper (T/T)


46
Vérifier dureté
47
Percer trous pour Boss sur Port Flg.
Boss (4) (achat)
48
Souder T.I.G manuellement
49
Ajuster planéite du Port Flange
(Weldment)
50
F.P.I.
51
Tourner Front Flange
52
Tourner Mid et Rear Flange
53
Percer trous dans Front Flange
54
Percer trous dans Mid et Rear flange et usiner "scallops"
Nuts (8) (achat)
55
Fixer Nuts sur Boss
56
F.P.I.

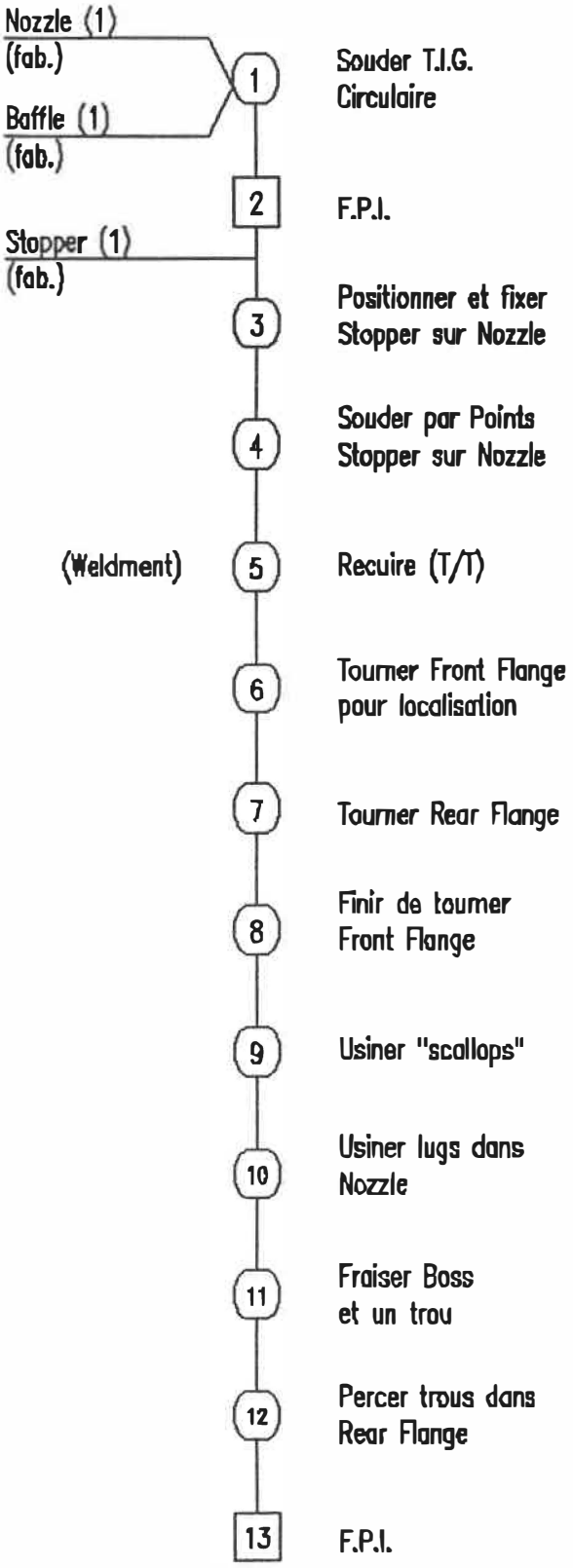
Famille des PT6-HY



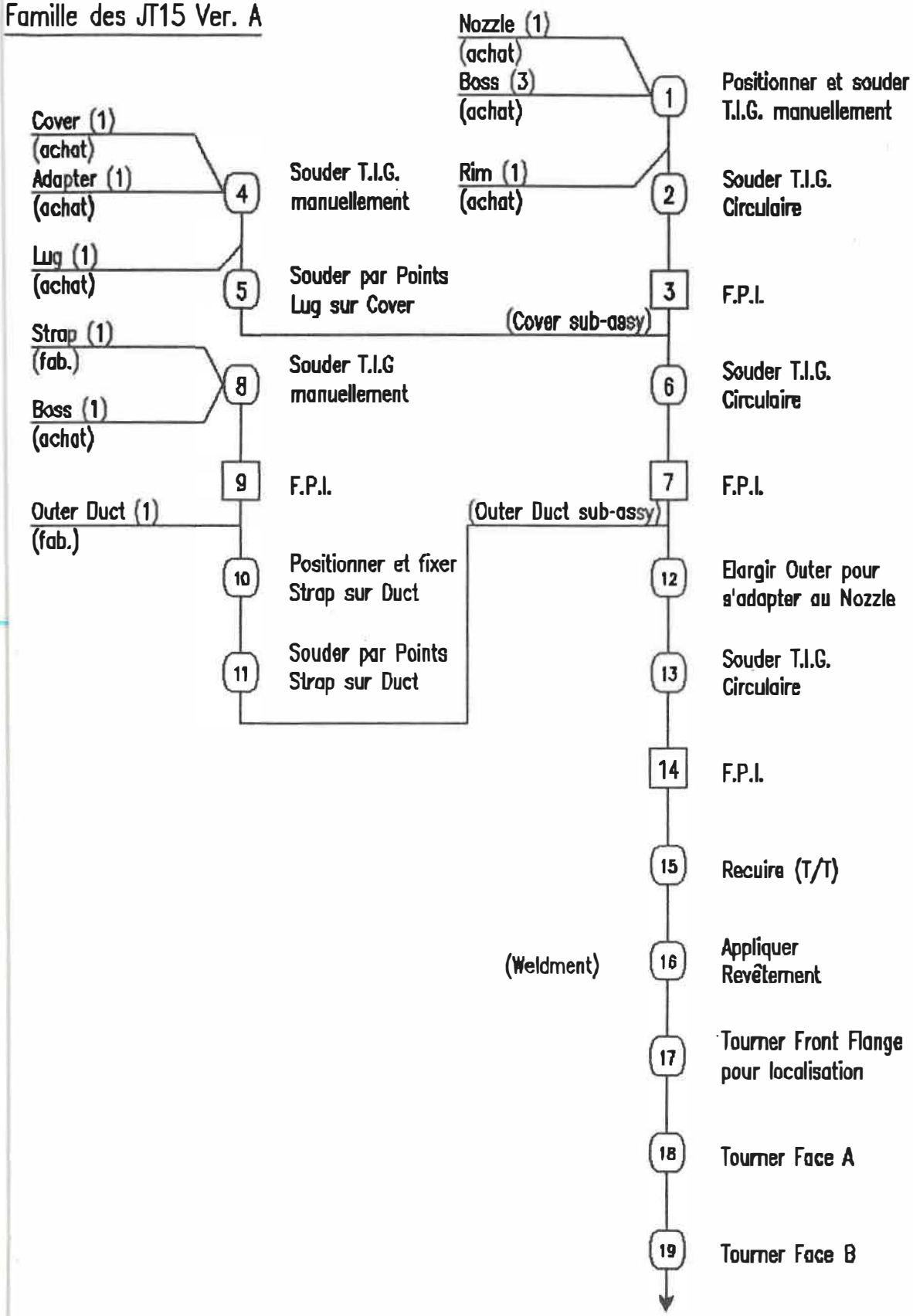

Duct (1)
(fab.)
Ring Reinforcing (1)
(fab.)
29
30
31
Souder á Molette
Ring sur Duct
Rear Flange (1)
(achat)
Support (1)
(fab.)
32
Souder Support
sur Flange
33
Elargir Support pour
s'adapter au Duct
34
Position. et fixer
Support sur Duct
35
Souder á Molette
Support sur Duct
36
Tourner Duct
Cone (1)
(fab.)
37
Souder T.I.G.
Circulaire
38
F.P.I.
39
Rayon-X
40
Tourner Cône
Ring Half (2)
(fab.)
19
Positionner et fixer
Ring Halfs dans Case
20
Souder par Points
Ring Halfs
(Inner sub-assy)
27
Positionner et fixer
Inner sub-assy
28
Souder á Molette
Inner sub-assy
(Cone sub-assy)
41
Souder T.I.G.
Circulaire
42
Usiner (EDM) trou
pour Tube dans Cône
Tube (1)
(achat)
43
Souder T.I.G.
Manuellement
Tube Flange (1)
(achat)
44
Souder T.I.G.
Manuellement
45
F.P.I.
46
Rayon-X
47
Tremper (T/T)
48
Vérifier dureté
(Weldment)
49
F.P.I.

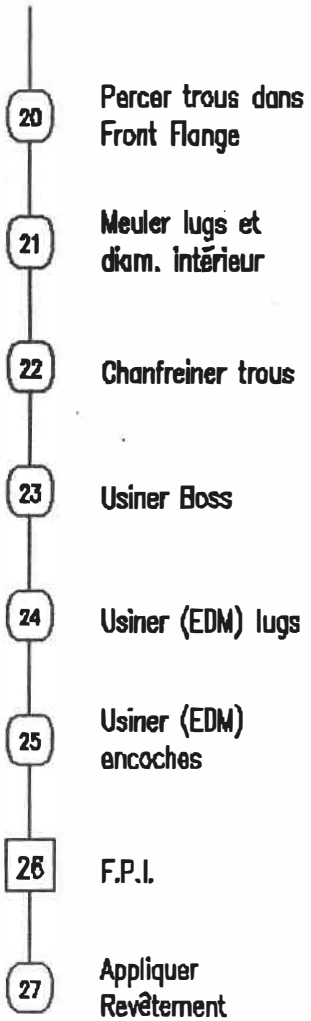

50
Tourner Front Flange
51
Tourner Mid et
Rear Flange
52
Percer trous dans
Front Flange
53
Percer trous dans
Mid et Rear Flange
et usiner "scallops"
Nuts (12)
(achat)
54
Fixer Nuts
55
Revêtement en
Sous-traitance

Famille des PW100

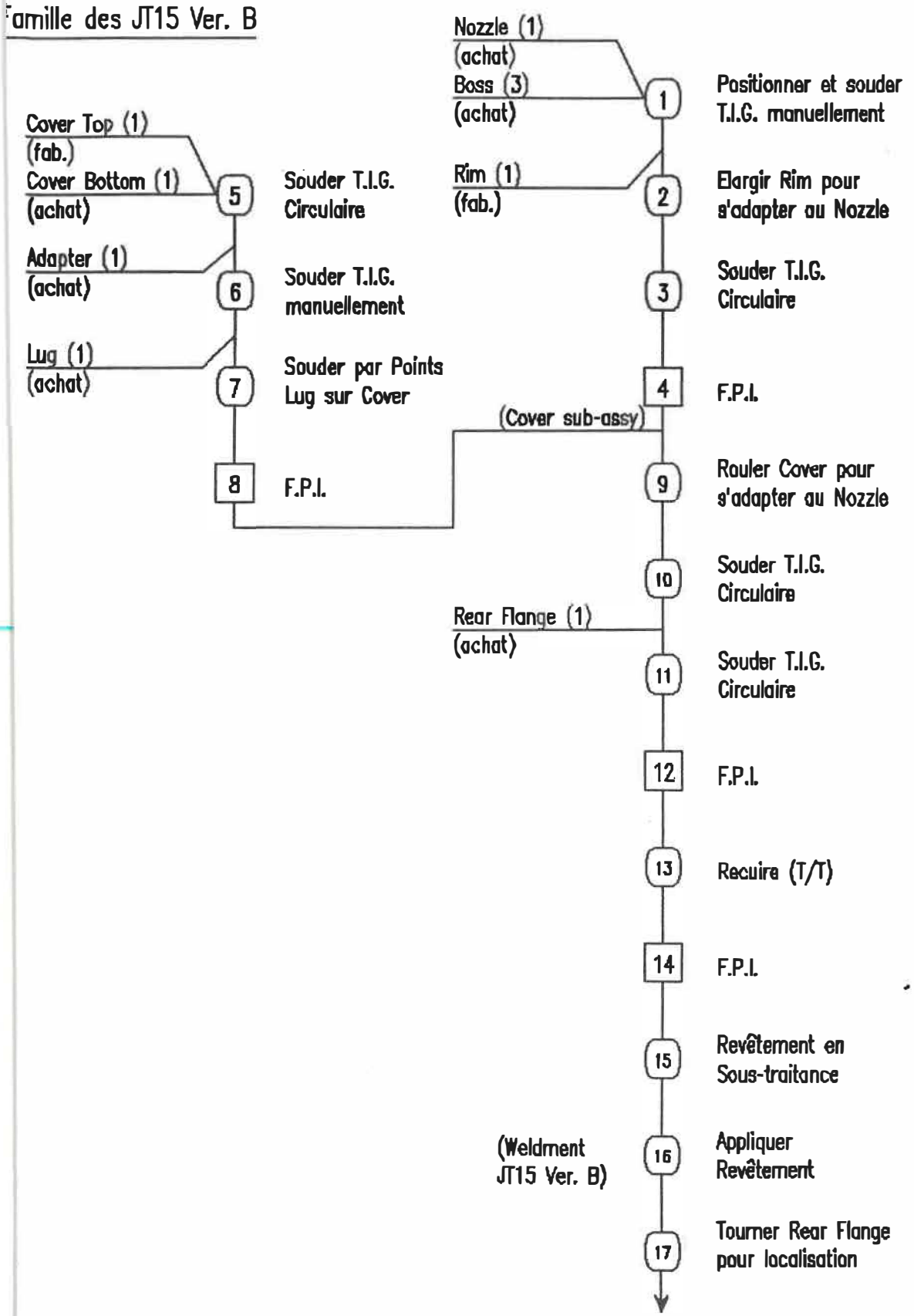


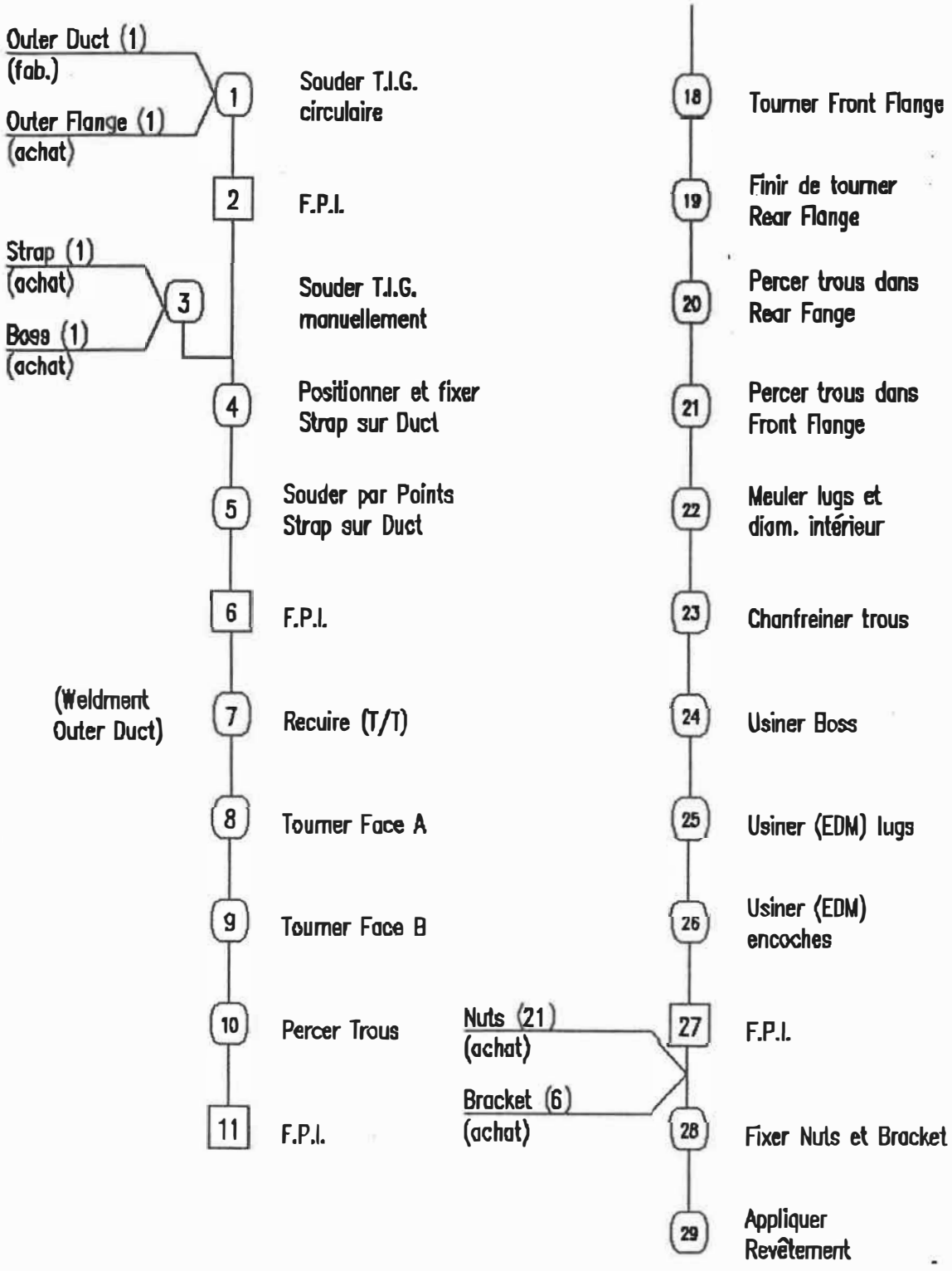
Famille des JT15 Ver. A




20
Percer trous dans Front Flange
21
Meuler lugs et diam. intérieur
22
Chanfreiner trous
23
Usiner Boss
24
Usiner (EDM) lugs
25
Usiner (EDM) encoches
26
F.P.I.
27
Appliquer Revêtement

Famille des JT15 Ver. B




Outer Duct (1)
(fab.)
Outer Flange (1)
(achat)
1
Souder T.I.G.
circulaire
2
F.P.I.
Strap (1)
(achat)
Boss (1)
(achat)
3
Souder T.I.G.
manuellement
4
Positionner et fixer
Strap sur Duct
5
Souder par Points
Strap sur Duct
6
F.P.I.
(Weldment
Outer Duct)
7
Recuire (T/T)
8
Tourner Face A
9
Tourner Face B
10
Percer Trous
11
F.P.I.
18
Tourner Front Flange
19
Finir de tourner
Rear Flange
20
Percer trous dans
Rear Fange
21
Percer trous dans
Front Flange
22
Meuler lugs et
diam. intérieur
23
Chanfreiner trous
24
Usiner Boss
25
Usiner (EDM) lugs
26
Usiner (EDM)
encoches
Nuts (21)
(achat)
Bracket (6)
(achat)
27
F.P.I.
28
Fixer Nuts et Bracket
29
Appliquer
Revêtement

ANNEXE 3. Liste des machines de l'usine projetée par l'entreprise

Numéro de machine	Description	Unitaire		Usine projetée		
		Espace	Coût	Quantité	Coût	Espace
100	Tour vertical	250	400,000	1	400,000	250
143	Tour vertical à C.N.	565	800,000	2	1,600,000	1130
1027	Perceuse radiale	190	35,000	3	105,000	570
1405	Perceuse verticale	100	15,000	2	30,000	200
1830	EDM 4 axes	195	250,000	2	500,000	390
3218	Rectifieuse intérieure	210	150,000	1	150,000	210
3905	Fraiseuse 4 axes	285	700,000	1	700,000	285
3908	Fraiseuse 5 axes	285	800,000	2	1,600,000	570
4249	Tour horizontal	220	200,000	2	400,000	440
4272	Tour horizontal à C.N.	450	500,000	2	1,000,000	900
5131	Perceuse à C.N.	440	450,000	1	450,000	440
5916	Cabine de vaporisation	117	20,000	2	40,000	234
5997	Nettoyeur à pression	235	45,000	2	90,000	470
6083	Réservoir à cire	40	5,000	1	5,000	40
6106	Presse manuelle	25	3,000	3	9,000	75
6128	Presse 40 t	160	80,000	3	240,000	480
6136	Presse 110 t	215	150,000	1	150,000	215
6145	Presse hydraulique	180	400,000	1	400,000	180
6149	Presse manuelle	45	5,000	1	5,000	45
6307	Rouleau	90	8,000	2	16,000	180
6413	Sableuse à courroie	45	1,000	1	1,000	45
6606	Cisaille manuelle	55	1,000	1	1,000	55
6611	Cisaille circulaire	210	8,000	1	8,000	210
6614	Presse à membrane	265	750,000	1	750,000	265
6628	Cisaille droite	245	45,000	1	45,000	245
6800	Surfaceuse	85	10,000	1	10,000	85
7012	Fournaise	100	5,000	1	5,000	100
7095	Four à vide vertical	750	700,000	2	1,400,000	1500
7102	Etendeur	90	100,000	2	200,000	180
7103	Rouleau formeur	145	10,000	1	10,000	145
7308	Soudeuse à molette	225	200,000	2	400,000	450
7322	Soudeuse T.I.G. manuelle	100	40,000	4	160,000	400
7323	Soudeuse par points	218	150,000	3	450,000	654
7324	Machine à aplanir	195	25,000	1	25,000	195
7328	Soudeuse T.I.G. circulaire	450	180,000	3	540,000	1350
7329	Soudeuse T.I.G. longit.	415	100,000	1	100,000	415
7339	Soudeuse par points à B/V	180	125,000	2	250,000	360
16115	Découpeuse laser	1000	950,000	1	950,000	1000
17470	Monteur d'outils	250	70,000	1	70,000	250
25944	Dégraisseur	516	90,000	2	180,000	1032
90010	Banc de travail	75	200	12	2,400	900
90012	Banc à ébavurer	75	400	12	4,800	900
90013	Banc d'inspection	75	250	6	1,500	450

90014	Banc d'identification	75	250	6	1,500	450
90038	Inspection vis. des soud.			1	2,000	150
90040	Inspection en cours			1	4,000	0
90041	Inspection finale			1	20,000	1000
90043	Rayon-X			1	500,000	1600
90050	Travail en cours			1	39,500	1500
90059	F.P.I.			1	250,000	1300

INVESTISSEMENT TOTAL: $14,270,700

ESPACE POUR LES MACHINES: 24,490
ESPACE POUR LES PRODUITS EN COURS: 2,841
27,331 pieds carrés

ANNEXE 4. Codification des machines et routes suivies par les composantes

Code machine	Description
1	Cisaille droite
2	Presse mécanique 110 t
3	Cisaille circulaire
4	Presse mécanique 40 t
5	Four à vide
6	Tour horizontal à C.N.
7	Rouleau
8	Laser 6 axes
9	Poinçonneuse au laser
0	Sableuse à couroie
A	Tour horizontal
B	Presse à membrane
C	Soudeuse T.I.G. manuelle
D	Soudeuse T.I.G. longitudinale
E	Presse hydraulique
F	Finition au baril
G	Fraiseuse 4 axes
H	Machine à aplanir
I	Etendeur
K	Presse manuelle
L	Tour vertical
M	Rouleau formeur

NUMERO PAQUET	SEQUENCE SUIVIE	NOMBRE DE COMPOSANTES
20	1,2,E	2
25	1,4	1
1	1,4,F	2
17	1,7,C,H	1
32	1,7,D,C,H,A,B	2
12	1,0,7,C,5,I	1
24	2	1
19	2,7	1
4	2,7,D,C,H,E,5,A	3
10	2,7,D,C,H,E,I,A	2
14	2,7,D,C,H,I,E,A	1
3	2,7,D,C,H,L	1
3A	2,7,D,C,I,L	1
2	2,7,D,H,K,5,E,0	1
4AA	2,7,D,H,K,E,5,A	1
18	2,7,D,H,K,I,M,A	1
28	2,A	1
30	2,B,5,A,4	2
11	2,B,5,A	1
26	2,C,7,A	1
35	3,B,4	2
11A	3,B,5,A,4	1
16A	3,B,A,E,5	1
5	3,B,E,5,A	2
33	4	2
6	4,2,5,A	1
37	4,B,5,A,2	1
13	5,2,G	2
7	5,2,A,I	2
8	6	2
15	7,D,C,H,I,A	1
15A	7,D,C,H,A,I	1
9	7,C,I,M,4	2
23	8	1
21	8,4	1
36	9,1,0,2	1
22	9,2,7	2
29	9,2,7,D,H,K,5,B,E,M,L	1
18B	9,2,7,D,H,K,I,A	1
18A	9,2,7,D,H,K,I,A,L	2
38	A	1
Nombre de composantes total:		57

ANNEXE 5. Matrices paquets/machines pour le Group Analysis

Matrice initiale

	PAQUETS																					
MACHINE	20	25	1	17	32	12	24	19	4	10	14	3	3A	2	4AA	18	28	30	11	26	35	
1	1	1	1	1	1	1																
2	1						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
3																					1	
4		1	1															1			1	
5						1			1					1	1			1	1			
6																						
7				1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1				1		
B																						
9																						
Ø						1								1								
A					1				1	1	1				1	1	1	1	1	1		
B					1													1	1		1	
C				1	1	1			1	1	1	1	1							1		
D					1				1	1	1	1	1	1	1	1						
E	1								1	1	1			1	1							
F			1																			
G																						
H				1	1				1	1	1	1		1	1	1						
I						1				1	1		1			1						
K														1	1	1						
L												1	1									
M																1						

Matrice initiale (suite)

MACHINE	PAQUETS																							
	11A	16A	5	33	6	37	13	7	8	23	21	36	22	29	18B	18A	38	15	15A	9				
1												1												
2					1	1	1	1				1	1	1	1	1								
3	1	1	1																					
4	1			1	1	1					1									1				
5	1	1	1		1	1	1	1						1										
6									1															
7													1	1	1	1		1	1	1				
8										1	1													
9												1	1	1	1	1								
Ø												1												
A	1	1	1		1	1		1							1	1	1	1	1					
B	1	1	1			1								1										
C																		1	1	1				
D														1	1	1		1	1					
E		1	1											1										
F																								
G							1																	
H														1	1	1		1	1					
I								1							1	1		1	1	1				
K														1	1	1								
L														1		1								
M														1						1				

Matrice finale de l'algorithme de King

	PAQUETS																					
MACHINE	20	36	12	32	17	1	25	2	29	4	10	14	4AA	18A	18B	22	3A	3	26	18	19	
1	1	1	1	1	1	1	1															
2	1	1						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E	1							1	1	1	1	1	1									
0		1	1					1														
9		1							1					1	1	1						
7			1	1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C			1	1	1					1	1	1					1	1	1			
5			1					1	1	1			1									
I			1								1	1		1	1		1			1		
H				1	1			1	1	1	1	1	1	1	1			1		1		
D				1				1	1	1	1	1	1	1	1		1	1		1		
B				1					1													
A				1						1	1	1	1	1	1				1	1		
4						1	1															
F						1																
K								1	1				1	1	1					1		
L									1					1			1	1				
M									1											1		
G																						
3																						
8																						
6																						

Matrice finale de l'algorithme de King (suite)

MACHINE	PAQUETS																			
	7	30	37	11	6	13	28	24	16A	5	15A	15	9	11A	35	38	21	23	33	8
1																				
2	1	1	1	1	1	1	1	1												
E									1	1										
Ø																				
9																				
7											1	1	1							
C											1	1	1							
5	1	1	1	1	1	1			1	1				1						
I	1										1	1	1							
H											1	1								
D											1	1								
B		1	1	1					1	1				1	1					
A	1	1	1	1	1		1		1	1	1	1		1		1				
4		1	1		1								1	1	1		1		1	
F																				
K																				
L																				
M													1							
G						1														
3									1	1				1	1					
8																	1	1		
6																				1

Matrice modifiée

	CONES																			AUTRES INCORPORES							
MACHINE	12	32	17	2	29	4	10	14	4AA	18A	18B	3A	3	26	18	15A	15	9		120	36	1	25	22	19	7	
1	1	1	1																	1	1	1	1				
0	1			1																	1						
9					1					1	1										1			1			
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1					1	1		
C	1	1	1			1	1	1				1	1	1		1	1	1	1								
I	1						1	1		1	1	1			1	1	1	1	1							1	
H		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1		1	1	1										
D		1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1										
F																						1					
K				1	1				1	1	1				1												
L					1					1		1	1														
M					1										1				1								
A		1				1	1	1	1	1	1			1	1	1	1									1	
2				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				1	1	1	1	1	1	1	1	
E				1	1	1	1	1	1											1							
5	1			1	1	1			1																	1	
B		1			1																						
4																											
3																											
G																											
8																											
6																											

Matrice modifiée (suite)

	FORMES CIRCULAIRES							AUTRES INCORPORES								
MACHINE	30	37	11	16A	5		11A	35	13	21	23	8	6	28	24	38	33
1																	
0																	
9																	
7																	
C																	
I																	
H																	
D																	
F																	
K																	
L																	
M																	
A	1	1	1	1	1		1						1	1		1	
2	1	1	1						1				1	1	1		
E				1	1												
5	1	1	1	1	1		1		1				1				
B	1	1	1	1	1		1	1									
4	1	1					1	1		1			1				1
3				1	1		1	1									
G									1								
8										1	1						
6												1					

ANNEXE 6. Taux d'utilisation des machines pour la fabrication des composantes

Code Machine	Description	Taux d'utilisation (%)	Coût d'acquisition ($)
1	Cisaille droite	0.34	45,000
2	Presse mécanique 110 t	6.12	150,000
3	Cisaille circulaire	1.27	8,000
4	Presse mécanique 40 t	3.37	80,000
5	Four à vide	19.02	700,000
6	Tour horizontal à C.N.	35.24	500,000
7	Rouleau	5.41	8,000
8	Laser 6 axes	1.93	1,000,000
9	Poinçonneuse laser	8.08	950,000
0	Sableuse à courroie	1.20	1,000
A	Tour horizontal	38.16	200,000
B	Presse à membrane	9.23	750,000
C	Soudeuse T.I.G. manuelle	5.93	40,000
D	Soudeuse T.I.G. longit.	4.04	100,000
E	Presse hydraulique	4.72	400,000
F	Finition au baril	0.01	5,000
G	Fraiseuse	5.07	700,000
H	Machine à aplanir	0.93	25,000
I	Etendeur	3.80	100,000
K	Presse manuelle	1.10	5,000
L	Tour vertical	2.23	400,000
M	Rouleau formeur	2.63	10,000

Note: les taux d'utilisation sont basés sur une journée de 22.5 heures, 237 jours par an.

ANNEXE 7. Cheminement des composantes pour le Line Analysis

Code machine	Numéro de machine	Description
1	6628	Cisaille droite
2	6136	Presse mécanique 110 t
3	6611	Cisaille circulaire
4	6128	Presse mécanique 40 t
5	7095	Four à vide
6	4272	Tour horizontal à C.N.
7	6307	Rouleau
0	6413	Sableuse à couroie
A	4249	Tour horizontal
B	6614	Presse à membrane
C	7322	Soudeuse T.I.G. manuelle
D	7329	Soudeuse T.I.G. longitudinale
E	6145	Presse hydraulique
G	3905	Fraiseuse
H	7324	Machine à aplanir
I	7102	Etendeur
J	6606	Cisaille manuelle
K	6149	Presse manuelle
L	100	Tour vertical
M	7103	Rouleau formeur
N	90059 90043	Inspection non-destructive (FPI ou rayon-X)
U	90010	Opération manuelle
V	90020	Dégraissage
W	90012	Ebavurage
X	90013	Inspection finale
Y	90038	Inspection visuelle des soudures
Z	90014	Identification

CHEMINEMENTS INITIAUX

FAMILLE 1	NOMBRE DE COMPOSANTES
1,U,0,7,V,C,5,Z,W,I,W,X	1
1,W,2,2,W,V,Z,X	1
1,W,2,W,Z,X	2
1,W,7,V,Z,D,C,Y,W,H,A,W,B,A,W,N,X	2
1,W,V,2,W,V,E,Z,X	2
1,W,V,7,C,Z,W,H,W,X	1
2,K,W,7,V,Z,X	1
2,W,7,U,V,Z,X	2
2,W,7,V,D,C,Y,Z,W,H,L,W,V,X	1
2,W,7,V,D,C,Y,Z,W,H,W,E,I,A,W,N,X	2
2,W,7,V,D,C,Z,Y,W,H,W,E,V,5,E,V,A,W,A,V,X	1
2,W,7,V,D,C,Z,W,H,W,E,V,5,E,V,A,W,V,X	1
2,W,7,V,D,C,Z,W,I,L,W,V,X	1
2,W,7,V,D,Z,H,K,W,E,E,V,5,E,A,W,V,X	1
2,W,7,V,D,Z,H,K,W,I,M,I,A,W,X	1
2,W,7,V,D,Z,Y,H,K,W,V,5,2,E,V,U,W,E,V, U,V,5,E,V,U,O,W,V,N,X	1
2,W,7,V,D,Z,Y,H,K,W,V,I,N,A,W,X	1
2,W,7,V,Z,D,C,Y,W,H,W,E,E,V,5,E,V,A,W,V,N,X	1
2,W,7,V,Z,D,Y,H,K,W,5,B,V,5,B,V,5,B,V, 5,E,V,N,M,E,W,Z,L,W,V,X	1
2,W,7,Z,V,D,Y,H,K,W,I,A,W,L,W,V,X	2
2,W,V,2,2,Z,X	1
2,W,V,7,D,C,Z,W,H,W,I,E,I,2,W,A,W,N,X	1
2,W,V,C,W,7,V,C,Z,W,U,A,W,V,X	1
5,2,W,A,V,W,I,Z,X	2
7,V,C,Z,Y,W,I,M,I,2,W,2,W,V,X	2
W,7,V,D,C,Z,W,H,W,I,A,W,X	1
W,7,V,D,C,Z,W,H,A,W,I,N,X	1
TOTAL	35

FAMILLE 2	NOMBRE DE COMPOSANTES
2,2,V,W,V,A,W,V,Z,X	1
2,V,Z,N,X	1
2,W,B,V,5,B,V,5,V,A,W,2,W,Z,X	1
2,W,V,B,V,5,A,W,V,4,W,V,Z,X	1
2,W,V,B,V,5,B,V,A,W,2,W,4,V,Z,X	1
3,W,B,4,W,V,Z,X	2
3,W,B,A,W,E,A,W,V,5,B,A,W,Z,X	1
3,W,B,E,V,5,A,A,W,V,Z,X	1
3,W,B,E,V,5,A,W,B,A,W,Z,X	1
3,W,B,V,5,B,A,W,4,W,Z,V,X	1
4,W,2,V,5,2,2,2,V,W,A,W,V,Z,X	1
4,W,B,V,5,A,W,2,W,V,Z,X	1
4,W,V,Z,X	2
6,6,W,Z,V,X	1
A,W,V,Z,X	1
V,5,2,2,U,G,W,2,W,Z,X	1
V,5,2,2,V,5,G,W,V,2,W,Z,X	1
Z,2,W,G,W,V,X	1
Z,6,6,W,N,X	1
Z,U,J,G,W,V,X	1
TOTAL	22

APRES MODIFICATION DES PROCESSUS DE FABRICATION

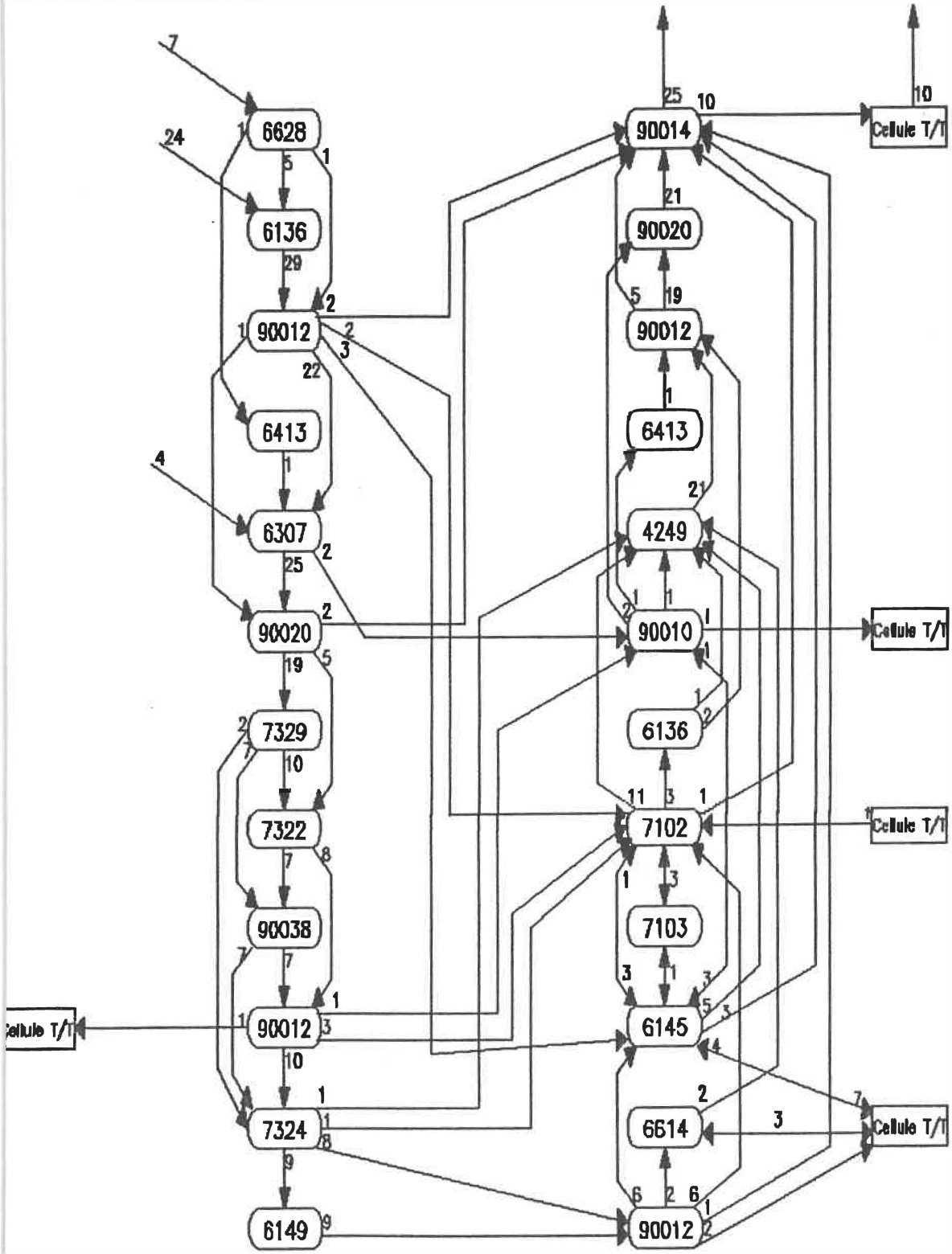
FAMILLE 1	NOMBRE DE COMPOSANTES
1,0,7,V,C,W,V,5,I,Z	1
1,2,W,V,Z	1
1,2,W,E,Z	2
1,2,W,Z	2
1,W,7,V,C,W,H,W,Z	1
2,W,7,V,D,Y,H,K,W,B,A,W,Z,N	2
2,W,7,U,V,Z	2
2,W,7,V,C,W,U,A,W,V,Z	1
2,W,7,V,D,C,Y,W,H,W,E,E,V,5,E,A,W,V,Z,N	1
2,W,7,V,D,C,W,H,W,E,V,5,E,A,W,V,Z	1
2,W,7,V,D,C,W,H,W,I,E,I,2,A,W,V,Z,N	1
2,W,7,V,D,C,W,I,A,W,V,Z	1
2,W,7,V,D,C,Y,W,H,A,W,V,Z	1
2,W,7,V,D,C,Y,W,H,W,E,I,A,W,V,Z,N	2
2,W,7,V,D,C,Y,W,H,W,E,V,5,E,A,W,V,Z	1
2,W,7,V,D,H,K,W,E,E,V,5,E,A,W,V,Z	1
2,W,7,V,D,H,K,W,I,M,I,A,W,V,Z	1
2,W,7,V,D,Y,H,K,W,V,5,B,V,5,B,V,5,B,V,5, E,M,E,A,W,V,Z,N	1
2,W,7,V,D,Y,H,K,W,I,A,W,V,Z	2
2,W,7,V,D,Y,H,K,W,V,5,E,E,U,E,U,V,5,E,U, O,W,V,Z,N	1
2,W,7,V,D,Y,H,K,W,I,A,W,Z,N	1
2,W,7,V,Z	1
2,2,W,E,Z	1
V,5,2,W,I,A,W,V,Z	2
7,V,C,Y,W,I,M,I,2,2,W,V,Z	2
7,V,D,C,W,H,W,I,A,W,Z	1
7,V,D,C,W,H,W,I,A,W,Z,N	1
TOTAL	35

FAMILLE 2	NOMBRE DE COMPOSANTES
V,5,2,2,W, U, G,W, V,Z	2
2, V,Z,N	1
2, W,V,Z	2
2, W, 6,W, V,Z	2
2, W, G,W, V,Z	1
3,W,B,E,A,W,V,5,B, 6,W, V,Z	2
3,W,B,E, V,5, 6,6,W, V,Z	1
3,W,B, V,5, 6,W,2,W,V,Z	1
3,W,B, V,5, 6,W,2,W,V,Z	1
3,W,B, V,5,B,V,5,6,W,2,W,V,Z	1
3,W,B, V,5,B, 6,W,2,W,V,Z	2
3,W,B, 2,W,V,Z	2
6,6,W, V,Z	1
6,6,W, V,Z,N	1
6,W, V,Z	1
U,J,G,W, V,Z	1
TOTAL	22

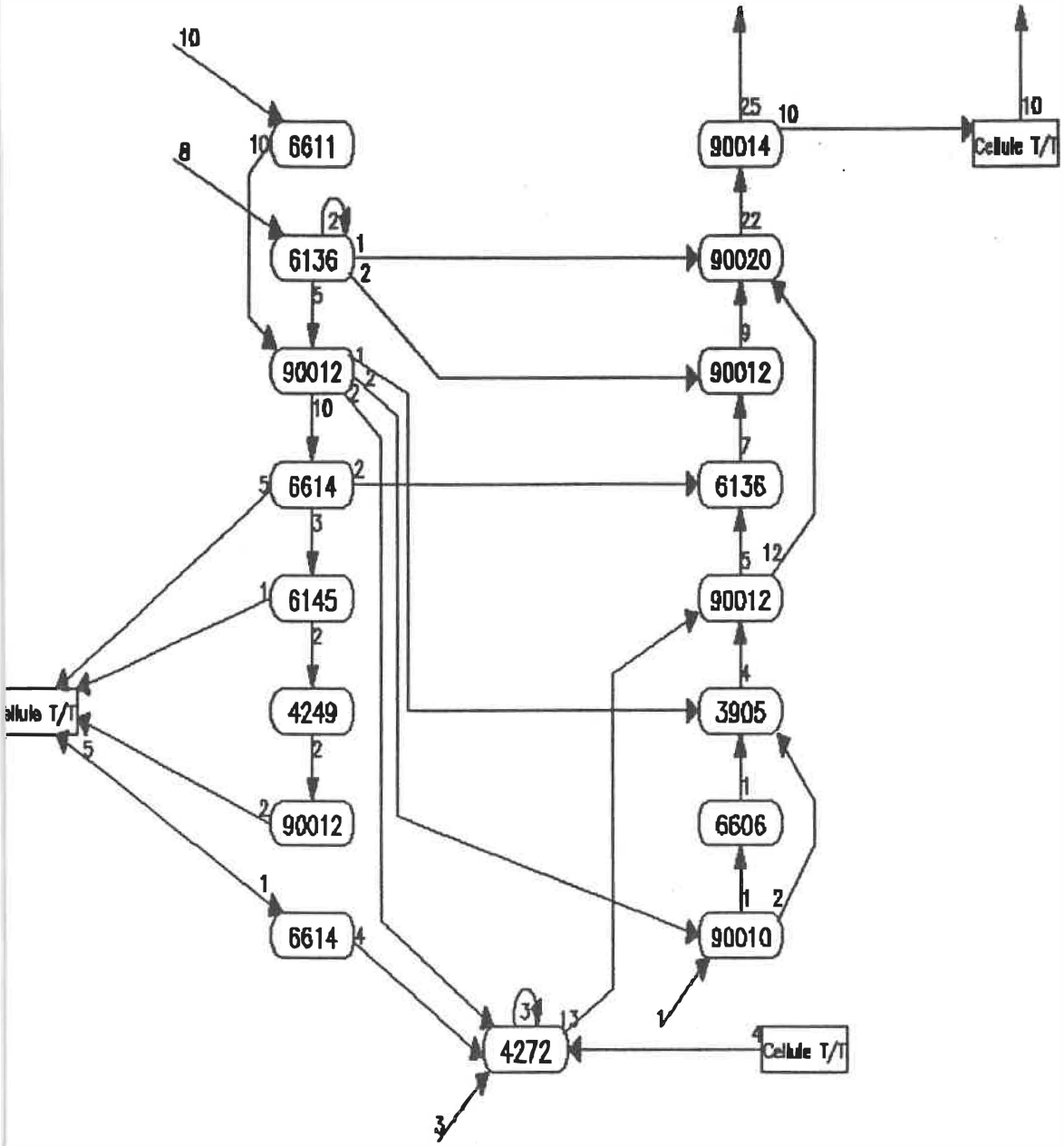
ANNEXE 8. Diagrammes des cellules de fabrication

Les numéros de machines utilisés dans cette annexe sont expliqués à l'annexe 7. En plus de ces machines, on retrouve aussi les points d'interaction avec la cellule de traitement thermique (cellule T/T).

Cellule de fabrication 1



Cellule de fabrication 2



ANNEXE 9. Taux d'utilisation des machines pour l'assemblage et l'usinage final des tuyères

Numéro de machine	Description	Taux d'utilisation (%)	Coût d'acquisition ($)
100	Tour vertical	20.5	400,000
143	Tour vertical à C.N.	86.8	800,000
1027	Perceuse radiale	26.2	35,000
1405	Perceuse verticale	13.3	15,000
1837	EDM 4 axes	21.2	250,000
1842	Laser 6 axes	5.7	1,000,000
1845	EDM 5 axes	8.1	350,000
3218	Rectifieuse intrieure	2.4	50,000
3905	Fraiseuse 4 axes	30.4	700,000
3908	Fraiseuse 5 axes	2.6	800,000
4249	Tour horizontal	2.1	200,000
4268	Tour horizontal à C.N.	22.5	600,000
4272	Tour horizontal à C.N.	69.4	500,000
5131	Perceuse à C.N.	49.6	450,000
6083	Réservoir à cire	0.9	5,000
6106	Presse manuelle	3.5	3,000
6128	Presse 40 t	0.4	80,000
6800	Surfaceuse	2.1	10,000
7012	Fournaise	0.1	5,000
7095	Four à vide horizontal	119.9	700,000
7097	Four à vide vertical	0.9	600,000
7102	Etendeur	33.7	100,000
7103	Rouleau formeur	2.7	10,000
7308	Soudeuse à molettes	46.1	200,000
7322	Soudeuse T.I.G. manuelle	65.1	40,000
7323	Soudeuse par points	35.8	150,000
7324	Machine à aplanir	0.2	25,000
7328	Soudeuse T.I.G. circulaire	36.7	180,000
7329	Soudeuse T.I.G. longit.	0.4	100,000
7339	Soudeuse par points à B/V	53.1	125,000
7348	Soudeuse T.I.G. à C.N.	27.2	350,000

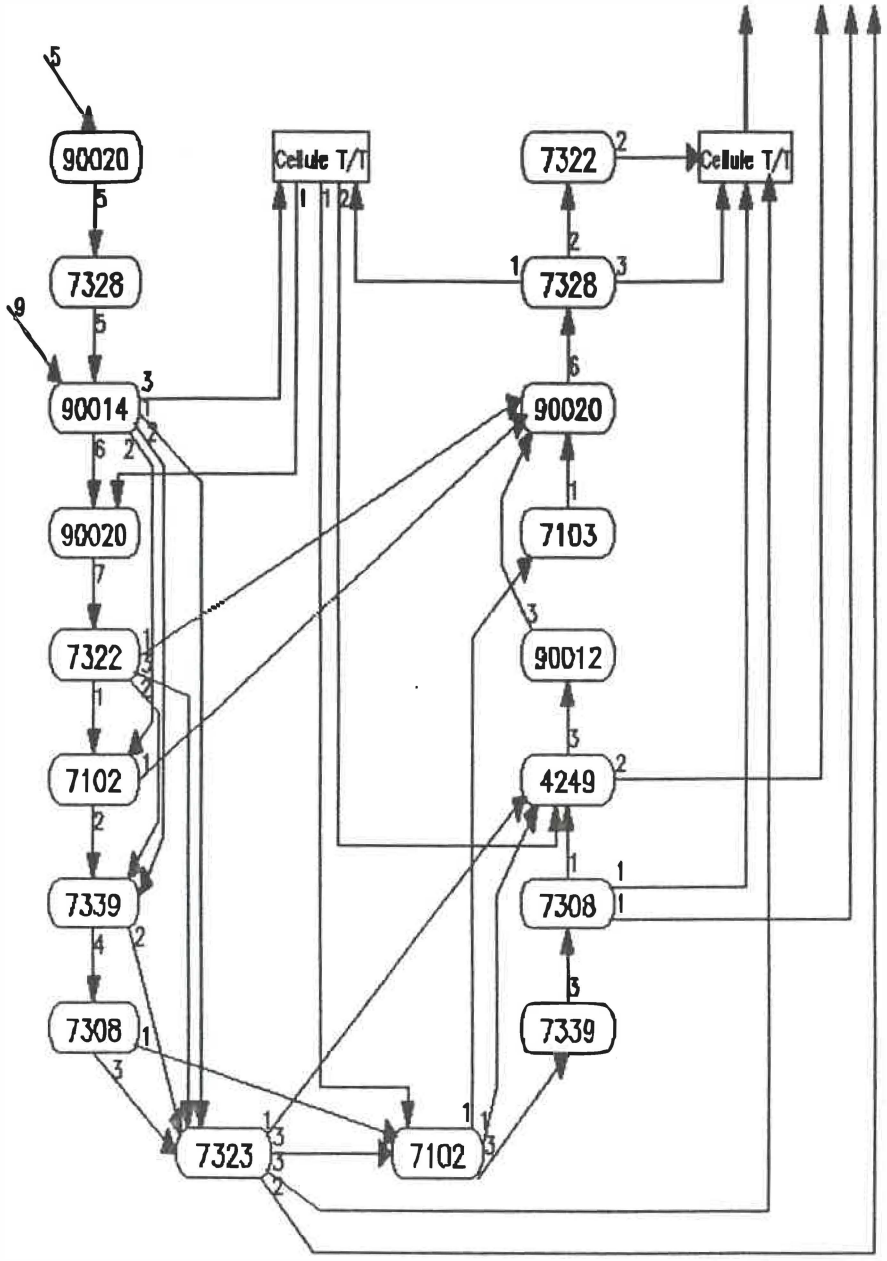
Note: les taux d'utilisation sont basés sur une journée de 22.5 heures, 237 jours par an.

ANNEXE 10. Diagrammes des cellules de sous-assemblage et d'assemblage

Les numéros de machine utilisés dans cette annexe sont expliqués à l'annexe 9. En plus de ces machines, on retrouve aussi les stations suivantes:

90010	Banc de travail manuel
90012	Banc d'ébavurage
90014	Banc d'identification
90020	Station de dégraissage
90038	Inspection visuelle des soudures
F.P.I	Inspection par F.P.I.
Rayon-X	Inspection par Rayon-X
Vendor coat	Application d'un revêtement exécuté par un sous-traitant

ellule de sous-assemblage



Cellule d'assemblage

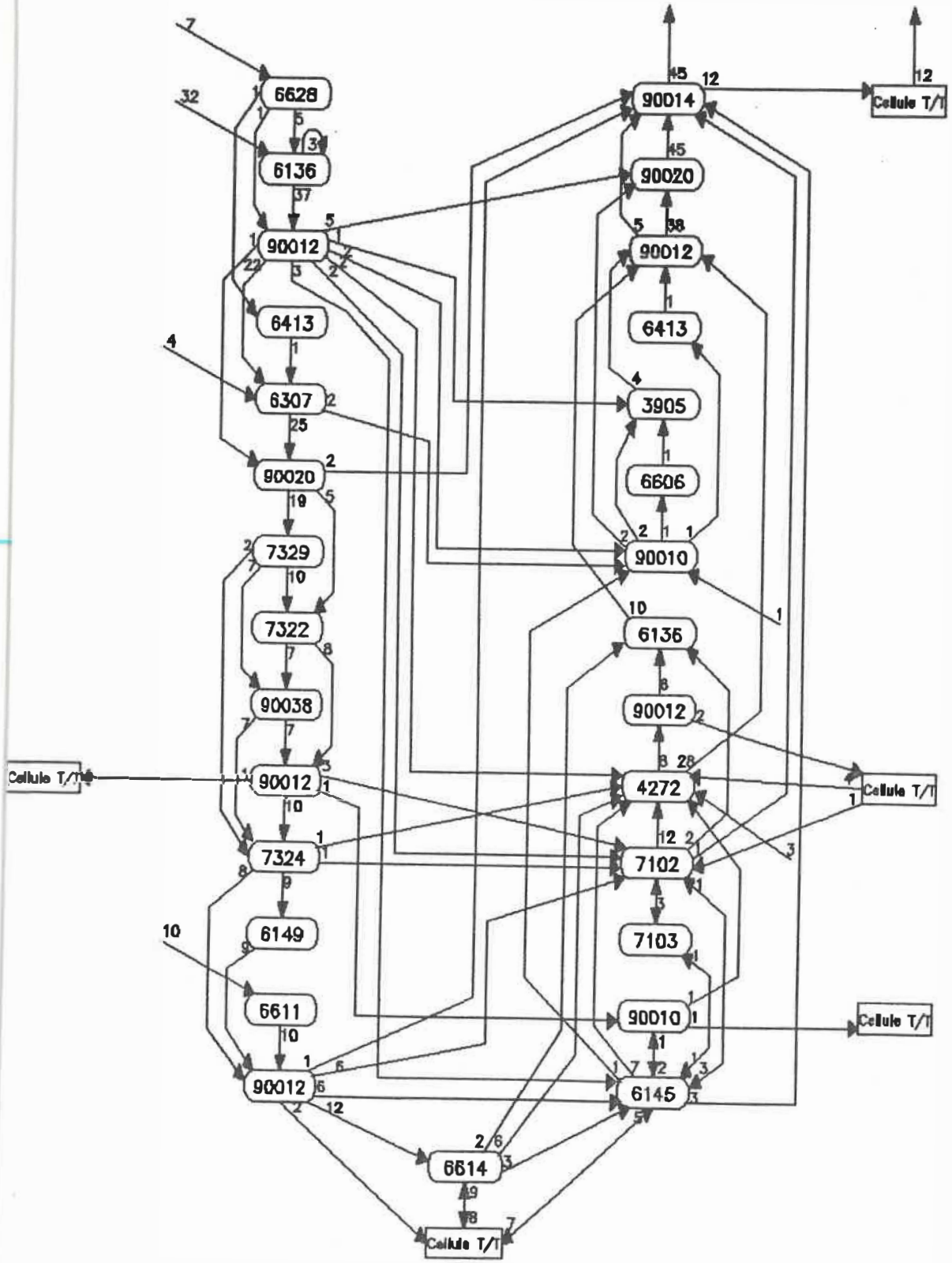
Le diagramme représentant la cellule d'assemblage est présenté dans la pochette numéro 1.

ANNEXE 11. Diagrammes des cellules modifiées

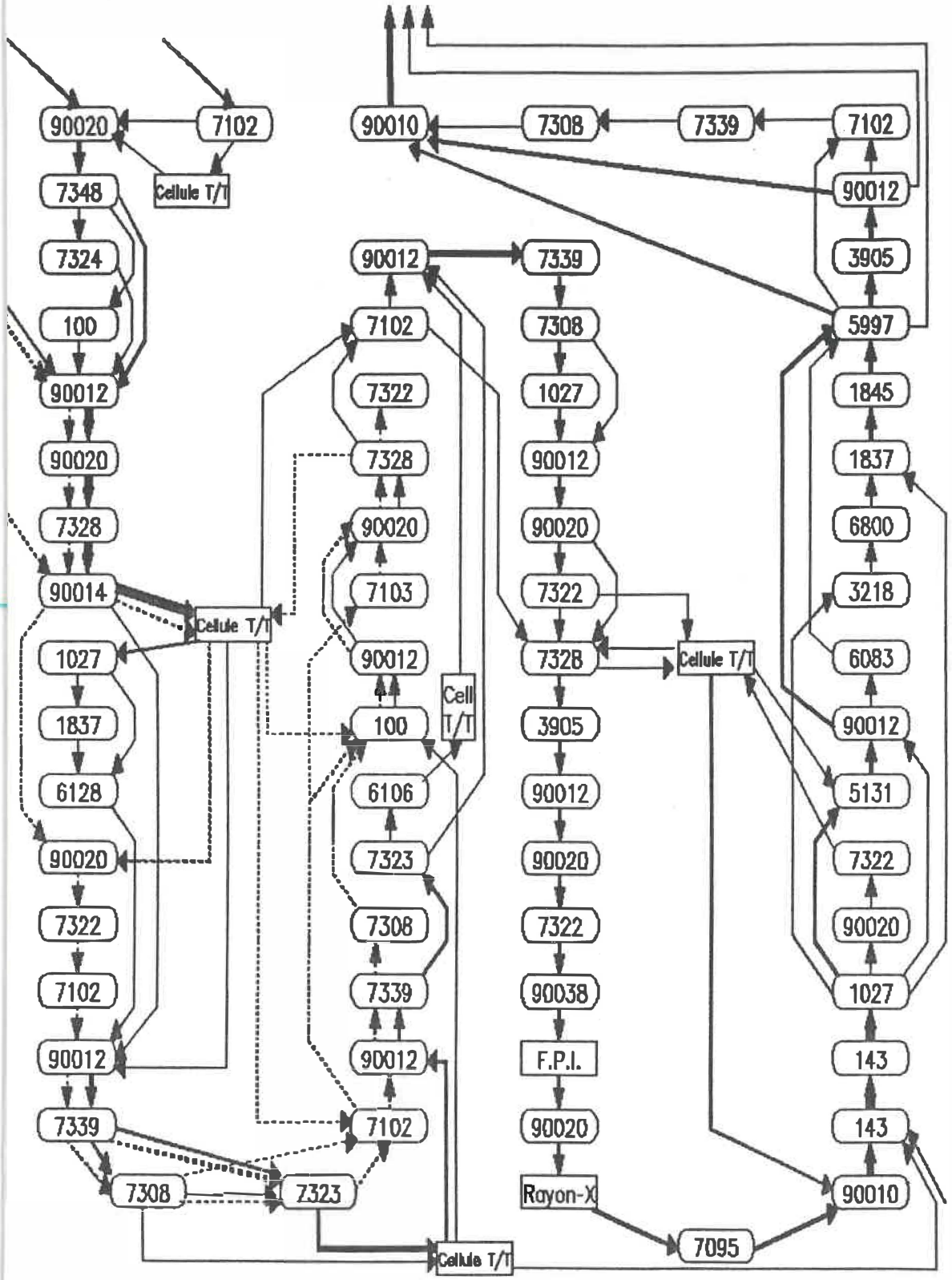
Pour la cellule de fabrication, les conventions adoptées à l'annexe 8 ont été conservées.

Dans le cas de la cellule d'assemblage, les trajets empruntés par les sous-assemblages ont été représentés par des pointillés. L'assemblage final est représenté par un trait plein de largeur variable correspondant au nombre de produits finis différents qui suivent le trajet.

Cellule de fabrication combinee (1+2)



Cellule d'assemblage combinee



ANNEXE 12. Liste des machines pour les usines idéale et proposée

Numéro de machine	Description	Usine idéale			Usine proposée		
		Quantité	Coût	Espace	Quantité	Coût	Espace
100	Tour vertical	2	800,000	500	2	800,000	500
143	Tour vertical à C.N.	2	1,600,000	1130	2	1,600,000	1130
1027	Perceuse radiale	3	105,000	570	3	105,000	570
1830	EDM 4 axes	2	500,000	390	2	500,000	390
1845	EDM 5 axes	1	350,000	195	1	350,000	195
3218	Rectifieuse intérieure	1	150,000	210	1	150,000	210
3905	Fraiseuse 4 axes	3	2,100,000	855	3	2,100,000	855
4249	Tour horizontal	3	600,000	660	0	0	0
4272	Tour horizontal à C.N.	1	500,000	450	1	500,000	450
5131	Perceuse à C.N.	1	450,000	440	1	450,000	440
5916	Cabine de vaporisation	4	80,000	468	2	40,000	234
5997	Nettoyeur à pression	1	45,000	235	1	45,000	235
6083	Réservoir à cire	1	5,000	40	1	5,000	40
6106	Presse manuelle	1	3,000	25	1	3,000	25
6128	Presse 40 t	1	80,000	160	1	80,000	160
6136	Presse 110 t	4	600,000	860	2	300,000	430
6145	Presse hydraulique	2	800,000	360	1	400,000	180
6149	Presse manuelle	1	5,000	45	1	5,000	45
6307	Rouleau	1	8,000	90	1	8,000	90
6413	Sableuse à courroie	2	2,000	90	2	2,000	90
6606	Cisaille manuelle	1	1,000	55	1	1,000	55
6611	Cisaille circulaire	1	8,000	210	1	8,000	210
6614	Presse à membrane	3	2,250,000	795	1	750,000	265
6628	Cisaille droite	1	45,000	245	1	45,000	245
6800	Surfaceuse	1	10,000	85	1	10,000	85
7012	Fournaise	1	5,000	100	1	5,000	100
7095	Four à vide vertical	2	1,140,000	1500	2	1,400,000	1500
7102	Etendeur	6	600,000	540	6	600,000	540
7103	Rouleau formeur	2	20,000	290	2	20,000	290
7308	Soudeuse à molette	5	1,000,000	1125	4	800,000	900
7322	Soudeuse T.I.G. manuelle	7	280,000	700	6	240,000	600
7323	Soudeuse par points	3	450,000	654	2	300,000	436
7324	Machine à aplanir	2	50,000	390	2	50,000	390
7328	Soudeuse T.I.G. circulaire	4	720,000	1800	3	540,000	1350
7329	Soudeuse T.I.G. longit.	1	100,000	415	1	100,000	415
7339	Soudeuse par points à B/V	6	750,000	1080	4	500,000	720
7348	Soudeuse T.I.G. à C.N.	1	350,000	450	1	350,000	450
17470	Monteur d'outils	1	70,000	250	1	70,000	250
25944	Dégraisseur	1	90,000	516	1	90,000	516
90010	Banc de travail	4	800	300	4	800	300
90012	Banc à ébavurer	19	7,600	1425	14	5,600	1050
90014	Banc d'identification	4	1,000	300	2	500	150
90020	Cabine de dégraissage	13	325,000	1521	10	250,000	1170

90038	Inspection vis. des soud.	3	6,000	300	3	6,000	300
90040	Inspection en cours	1	4,000	0	1	4,000	0
90041	Inspection finale	1	5,000	250	1	5,000	250
90043	Rayon-X	2	750,000	2000	2	750,000	2000
90050	Travail en cours	1	51,000	600	1	51,000	600
90059	F.P.I.	2	375,000	1800	2	375,000	1800

INVESTISSEMENT TOTAL:	**$18,507,400**	**$14,769,900**
ESPACE POUR LES MACHINES:	27,469	23,206
ESPACE POUR LES PRODUITS EN COURS:	423	423
	27,892	23,629

ANNEXE 13. Coût des changements de méthode de mise en course

A/ Presse 110t

Standardiser les dimensions des matrices	$200/matrice
2 serres fonctionnelles ($5/un.)	$10
Pont roulant gerbeur	$10,000
Table à rouleaux	$700

B/ Soudeuse à molettes

Modifier les roues	$200/paire
Scie et microscope	$18,000

C/ Soudeuse T.I.G. circulaire

2ième table	$20,000
2ième rouleau de fil d'apport	$200
Contrôleur	$30,000
Standardiser les gabarits	$200/gabarit
6 serres fonctionnelles ($5/un.)	$30

D/ Tour vertical à contrôle numérique

Sytème de positionnement	$2,000
2 butées	$100
Standardiser les gabarits	$200/gabarit
Table à rouleaux	$700
4 serres fonctionnelles ($5/un.)	$20

Dans les cellules, 44 des 98 machines doivent exécuter des mises en course. Elles sont séparées en 6 catégories, les quatre premières contiennent les machines qui ressemblent aux quatre détaillées dans le texte, la cinquième contient celles qui nécessitent très peu de modifications et la dernière regroupe le reste.

Catégorie 1:

Elle contient deux presses 110t, une presse 40t, une presse hydraulique et une presse à membrane. Trois de ces machines traitent beaucoup de composantes différentes ce qui justifie l'utilisation d'un pont roulant pour ramasser les gabarits dans les étagères. Pour les deux autres, l'entreposage peut être fait sur deux niveaux accessibles directement avec le table à rouleaux. De plus, deux des presses qui utilisent un pont roulant sont situées une à côté de l'autre, il sera donc possible d'utiliser le même pont roulant. Finalement, étant donné que la nouvelle méthode ne fait pas appel au chariot élévateur, cette dépense peut être déduite des coûts.

Catégorie 2:

Cette catégorie contient trois soudeuses à molettes et une soudeuse par points. Puisque la soudeuse par points est située à côté d'une des soudeuses à molettes, elles pourront partager le microscope et le scie. De plus, la modification

du systéme d'attache des électrodes pour la soudeuse par points à été évalué à $100 (modification de deux boulons).

Catégorie 3:

Dans ce groupe, il y a trois soudeuses circulaires, une autre à contrôle numérique, une soudeuse longitudinale et cinq soudeuses manuelles. Une des trois soudeuses circulaires ainsi que la soudeuse à C.N. possèdent déjà une seconde table, tandis que la soudeuse longitudinale et les soudeuses manuelles n'en ont pas besoin.

Catégorie 4:

Cette catégorie regroupe trois tours à contrôle numérique, un tour vertical, une perceuse à C.N., trois fraiseuses et deux E.D.M.. Seuls les deux tours utilisés pour l'usinage final ont besoin du système de positionnement.

Catégorie 5:

On retrouve ici toutes les machines manuelles telles deux cisailles (droite et circulaire), deux ensembles de rouleaux, une surfaceuse, une machine à aplanir les soudures et trois soudeuses par points à bas voltage. En général, les modifications à ces machines coûtent $150.

Catégorie 6:

Les machines restantes sont les cinq étendeurs et une perceuse. Les gabarits des étendeurs doivent être modifier pour qu'on n'ait pas à ajuster la course du vérin et les forets de la perceuse seront montés sur des porte-forets calibrés pendant que la machine est en opération.

COUTS

Catégorie 1		2	machines	@ $10,710
	+	3	machines	@ $710
	+	91	gabarits	@ $200
	-	1	chariot	$18,000
				$23,750
Catégorie 2		3	machines	@ $18,000
	+	1	machine	@ $100
	+	10	paires	@ $200
				$56,100
Catégorie 3		2	machines	@ $50,230
	+	2	machines	@ $30,230
	+	6	machines	@ $230
	+	53	gabarits	@ $200
				$172,900

Catégorie 4		2 machines	@	$2,820
	+	8 machines	@	$820
	+	76 gabarits	@	$200
				$27,400
Catégorie 5		9 machines	@	$150
				$1,350
Catégorie 6		31 gabarits	@	$300
	+	1 machine	@	$1,000
	+	7 ensembles	@	$100
				$11,000
GRAND TOTAL				$292,500

Ce montant a été arrondi à $300,000.

ANNEXE 14. Calcul de la taille d'un lot suite à une réduction des temps de mise en course de 80%

D'après T. E. Vollmann (12):

$$TC = (A/Q)Cp + (Q/2)Ch$$

où TC = Coût total incrémentaire

Q = taille d'un lot

Cp = coût de mise en production d'un lot

A = Demande annuelle

Ch = Coût d'entreposage unitaire annuel

A/ Si le lot était un lot économique (EOQ)

alors $Q = EOQ = \sqrt{(2CpA/Ch)}$ tel que TC est minimisé

dans ce cas $Cp = Q^2Ch/2A$

Posons Cp', le nouveau coût de mise en production égal à 1/5 de Cp et Q' la nouvelle taille de lot. Si on veut le même coût total on a:

$$(A/Q')Cp' + (Q'/2)Ch = (A/Q)Cp + (Q/2)Ch$$

$$\Leftrightarrow \quad ACp' + Q'^2/2Ch = Q'((A/Q)Cp + (Q/2)Ch)$$

$$\Leftrightarrow \quad ChQ'^2/2 - ((A/Q)Cp + (Q/2)Ch)Q' + ACp' = 0$$

le déterminant sera égal à:

$((A/Q)Cp + (Q/2)Ch)^2 - 4(Ch/2)(ACp')$ or $Cp' = 1/5\ Cp$

<=> $((A/Q)Cp + (Q/2)Ch)^2 - 4(Ch/2)(ACp/5)$ or $Cp = Q^2Ch/2A$

<=> $((A/Q)(Q^2Ch/2A) + (Q/2)Ch)^2 - 4(Ch/2)(A/5)(Q^2Ch/2A)$

<=> $(QCh/2 + QCh/2)^2 - 4(Q^2Ch^2/20)$

<=> $4/5(Q^2Ch^2)$

Puisque ni Q ni Ch ne sont nul, on a deux solutions:

$$S1 = \frac{((A/Q)Cp + (Q/2)Ch) + \sqrt{(4/5(Q^2Ch^2))}}{Ch}$$

$$S2 = \frac{((A/Q)Cp + (Q/2)Ch) - \sqrt{(4/5(Q^2Ch^2))}}{Ch}$$

en remplaçant Cp par $Q^2Ch/2A$ on obtient:

$S1 = (1 + 2/\sqrt{5})Q = 1.894 * Q$

$S2 = (1 - 2/\sqrt{5})Q = 0.106 * Q$

<u>B/ si le lot n'était pas un lot économique</u>

Cp' est égal à 1/5 de Cp et on pose:

$Q' = nQ$ où $0 < n < 1$

on cherche n tel que, quelque soit Q:

$TC = (A/Q)Cp + (Q/2)Ch \geq (A/Q')Cp' + (Q'/2)Ch$

En remplaçant Q' par nQ et Cp' par Cp/5 on obtient

$(A/Q)Cp + (Q/2)Ch \geq (A/nQ)Cp/5 + (nQ/2)Ch$

$(A/Q)Cp + (Q/2)Ch \geq ACp/5nQ + QnCh/2$

$Q(nCh/2 - Ch/2) + (1/Q)(ACp/5n - ACp) \leq 0$

en multipliant par Q

$$Q^2(nCh/2 - Ch/2) + (ACp/5n - ACp) \leq 0$$

le déterminant est:

$$0 - 4(nCh/2 - Ch/2)(ACp/5n - ACp)$$

$$\Leftrightarrow \quad -2ACpCh(n - 1)(1/5n - 1)$$

Donc si n est entre 0.2 et 1, le déterminant est ≥ 0 et l'inéquation est vérifiée pour tout Q plus grand que 0. Puisque l'on veut réduire la taille des lots, on choisit $n = 0.2$

Le coût total incrémentaire devient donc:

$$TC' = (A/Q')*Cp' + (Q'/2)*Ch$$
$$= (A/0.2Q)*Cp/5 + (0.2Q/2)*Ch$$
$$= (A/Q)*Cp + 0.2(Q/2)*Ch$$

La différence de coût entre la production actuelle et celle proposée est:

$$TC - TC' = (A/Q)*Cp + (Q/2)*Ch - [(A/Q)*Cp + 0.2(Q/2)*Ch]$$
$$= -0.8(Q/2)*Ch$$
$$= -0.4(QCh)$$

ANNEXE 15. Prévision des besoins en tuyères pour l'année 1990

FAMILLE	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
PT6-HP	36	39	49	48	55	43	4	44	37	34	29	27
PT6-BP	22	27	28	33	36	30	2	22	23	26	22	15
PT6-HY	10	8	8	7	6	14	4	13	6	9	8	0
PW100	52	54	55	47	49	46	12	50	51	60	58	31
JT15-A	6	7	9	8	7	2	2	7	7	8	5	4
JT15-B	14	10	13	9	10	11	0	10	9	13	15	8
TOTAL	140	145	162	152	163	145	24	146	133	150	137	85
Jours	21	20	22	20	22	20	11	23	19	22	22	15
Unités /jour	6.67	7.25	7.36	7.60	7.40	7.25	2.18	6.35	7.00	6.82	6.23	5.60

ANNEXE 16. Temps d'opération et de mise en course et nombre de transports pour les six familles de tuyères

A/ Temps d'opération

Les temps sont exprimés en minutes pour exécuter une unité:

Famille	Fabrication	Sous-assemblage	Assemblage	Traitement thermique
PT6-HP	206.50	354.61	751.22	172.42
PT6-BP	225.35	162.50	570.11	213.49
PT6-HY	263.76	258.04	516.25	191.58
PW100	35.79	-	164.88	36.12
JT15-A	26.57	78.07	342.04	69.48
JT15-B	41.23	107.07	403.59	74.97

B/ Temps de mise en course

Les temps sont exprimés en minutes pour exécuter une unité (en tenant compte des lots):

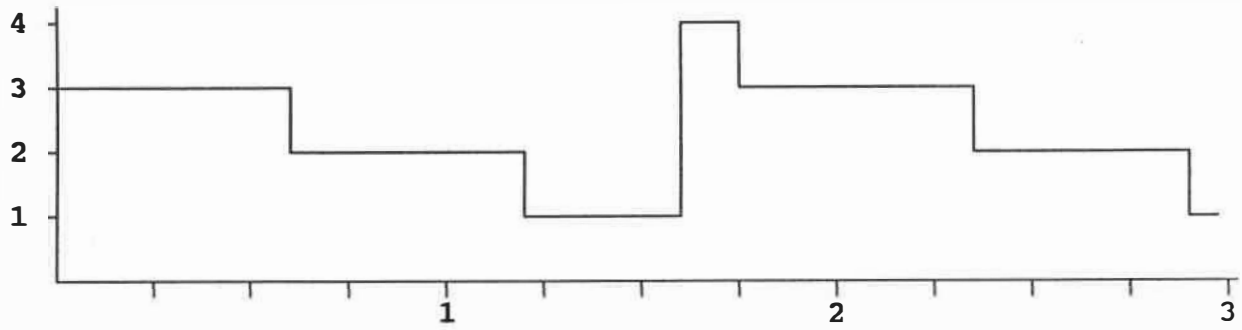
Famille	Fabrication	Sous-assemblage	Assemblage	Traitement thermique
PT6-HP	56.87	27.29	327.00	-
PT6-BP	90.21	96.00	371.00	-
PT6-HY	111.43	129.50	325.00	-
PW100	9.29	-	146.00	-
JT15-A	10.50	77.25	293.00	-
JT15-B	16.07	107.25	435.50	-

C/ Nombre de transports

Les transports traités ici sont ceux entre la cellule en question et la cellule de traitement thermique ou l'entreposage de l'item fini:

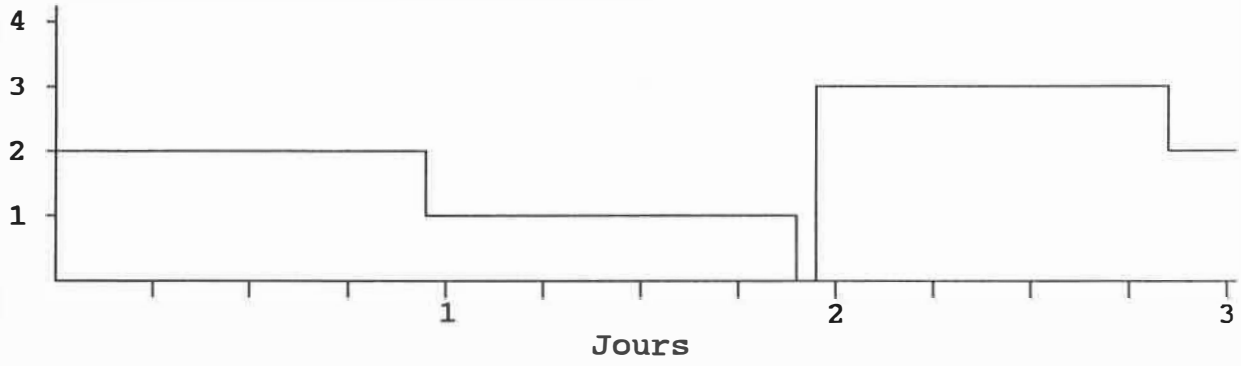
Famille	Fabrication	Sous-assemblage	Assemblage	Total
PT6-HP	3.14	1.25	3	7.39
PT6-BP	3.00	1.00	4	8.00
PT6-HY	3.29	3.50	3	9.79
PW100	0.43	-	1	1.43
JT15-A	0.29	1.50	3	4.79
JT15-B	0.57	1.50	2	4.07

ANNEXE 17. Variation du niveau d'inventaire de sous-assemblages finis en fonction du temps



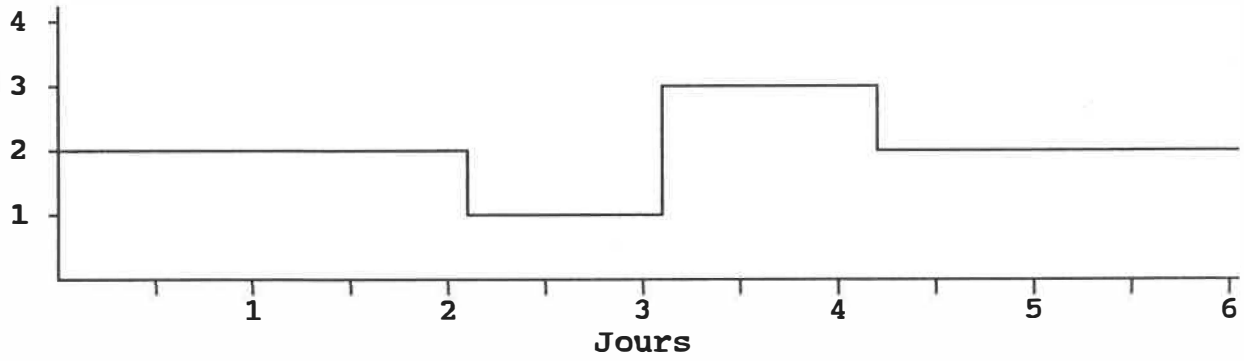
Demande: 1.71 unités/jour
Fabrication en lots de 3
Cycle: 1.755 jours
Inventaire moyen: 2.29 unités

Sous-assemblages de la famille PT6-HP



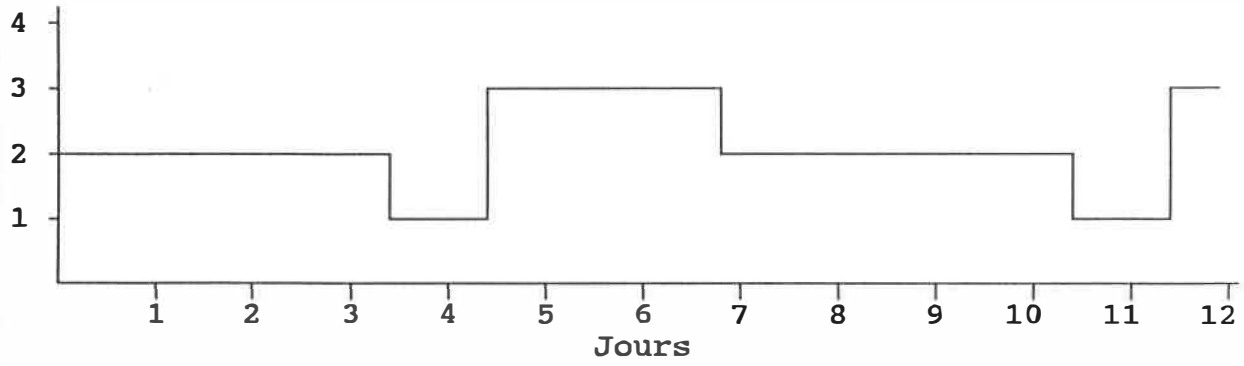
Demande: 1.05 unités/jour
Fabrication en lots de 2
Cycle: 1.9 jours
Inventaire moyen: 1.45 unités

Sous-assemblages de la famille des PT6-BP



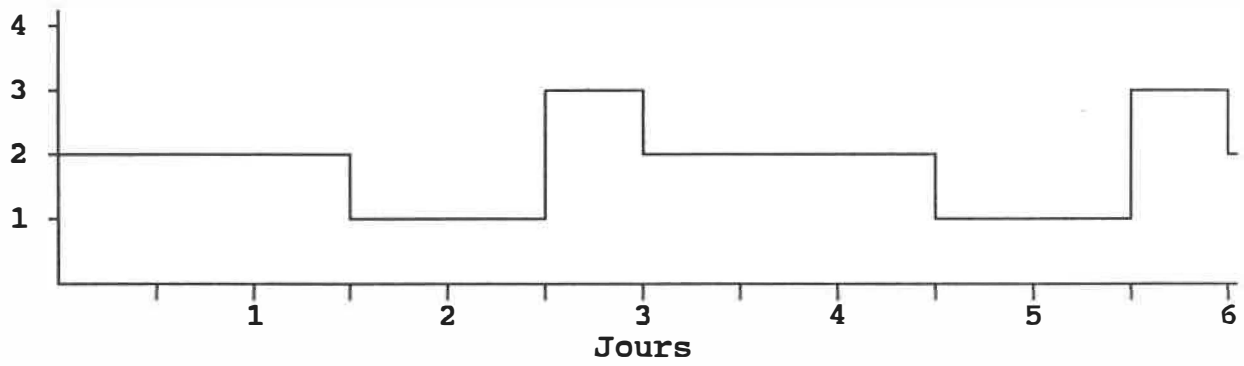
Demande: 0.48 unités/jour
Fabrication en lots de 2
Cycle: 4.16 jours
Inventaire moyen: 2.02 unités

Sous-assemblages de la famille des PT6-HY



Demande: 0.29 unités/jour
Fabrication en lots de 2
Cycle: 6.90 jours
Inventaire moyen: 2.21 unités

Sous-assemblages de la famille des JT15-A



Demande: 0.67 unités/jour
Fabrication en lots de 2
Cycle: 2.99 jours
Inventaire moyen: 1.82 unités

Sous-assemblages de la famille des JT15-B

ANNEXE 18. Application du Goal-Chasing pour déterminer la séquence d'assemblage

Pour les deux premières semaines de janvier 1990, les tuyères à produire sont les suivantes:

	Famille (lots)					
	PT6-HP (A)	PT6-BP (B)	PT6-HY (C)	PW100 (D)	JT15-A (E)	JT15-B (F)
Quantité (Qi)	17	10	5	12	3	7

En codifiant les composantes[1], on dresse la matrice Composantes/Tuyères suivante:

Composantes

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C4	C5	C6	D1	D2	D3	E1	E2	E3	F1	F2	F3
A	2	1	1	2	1	1																					
B							1	1	1	1	1	1															
C													1	1	2	2	1	1									
D																			2	2	2						
E																						1	1	1			
F																									1	1	1

PT6-HP
A1 = Case sub-assy
A2 = Duct sub-assy
A3 = Inner ring
A4 = Port flange
A5 = Inner support
A6 = Cone sub-assy

PT6-BP
B1 = Case
B2 = Port
B3 = Case ring
B4 = Inner sub-assy
B5 = Cone sub-assy
B6 = Port flange

PT6-HY
C1 = Case
C2 = Front flange
C3 = Port sub-assy
C4 = Ring half
C5 = Inner sub-assy
C6 = Cone sub-assy

PW100
D1 = Nozzle
D2 = Baffle
D3 = Stopper

JT15-A
E1 = Nozzle sub-assy
E2 = Cover sub-assy
E3 = Outer sub-assy

JT15-B
F1 = Nozzle sub-assy
F2 = Cover sub-assy
F3 = Outer sub-assy

[1] Le terme composante se réfère dans cette annexe autant aux sous-emblages qu'aux composantes constituants une tuyère

On détermine la quantité total nécessaire des composantes (Nj où j correspond au code d'une composante) en multipliant ces deux matrices. Ceci donne:

Nj = [34,17,17,34,17,17,10,10,10,10,10,10,
5,5,10,10,5,5,24,24,24,3,3,3,7,7,7]

Q = quantité totale de tous les produits à fabriquer
= Σ Qi
= 54

Définissons les variables suivantes:

Nj/Q = Quantité moyenne de composante j nécessaire par lot de production

K*Nj/Q = Quantité moyenne de composante j nécessaire pour produire K lots

Xj,k = Quantité totale de composante j utilisées pour produire les K premiers lots de la séquence d'assemblage

Bij = Quantité nécessaire d'une composante j pour fabriquer une tuyère i (matrice Composantes/Tuyères)

Puisque le but de l'algorithme est de consommer les composantes à un taux constant, on veut que Xj,k soit le près possible de K*Nj/Q. La distance entre ces points est notée Dk.

étape 1: On commence par établir le premier lot à assembler

K = 1, Xj0 = 0 pour tout j

étape 2: On calcul la distance Dk pour chaque tuyère i et on choisit la tuyère qui minimise cette distance.

Pour chaque tuyère i,

$$Dki = \sqrt{[\Sigma(K*Nj/Q - Xj,k-1 - Bij)^2]}$$

étape 3: Si tous les lots de la tuyère i sont incorporés dans la séquence, on l'exclut de l'algorithme.

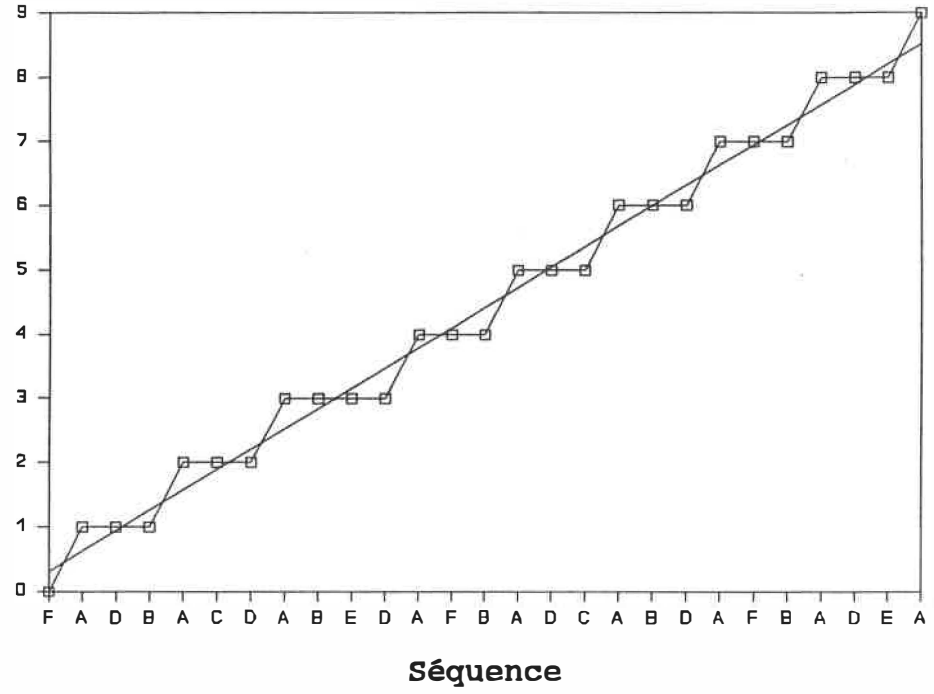
étape 4: S'il n'y a plus de lots à placer, l'algorithme est terminé.
S'il reste des lots, on calcule Xj,k = Xj,k-1 + Bij pour le i choisit, on pose K = K + 1 et on retourne à l'étape 2.

Cet algorithme a généré la séquence suivante:

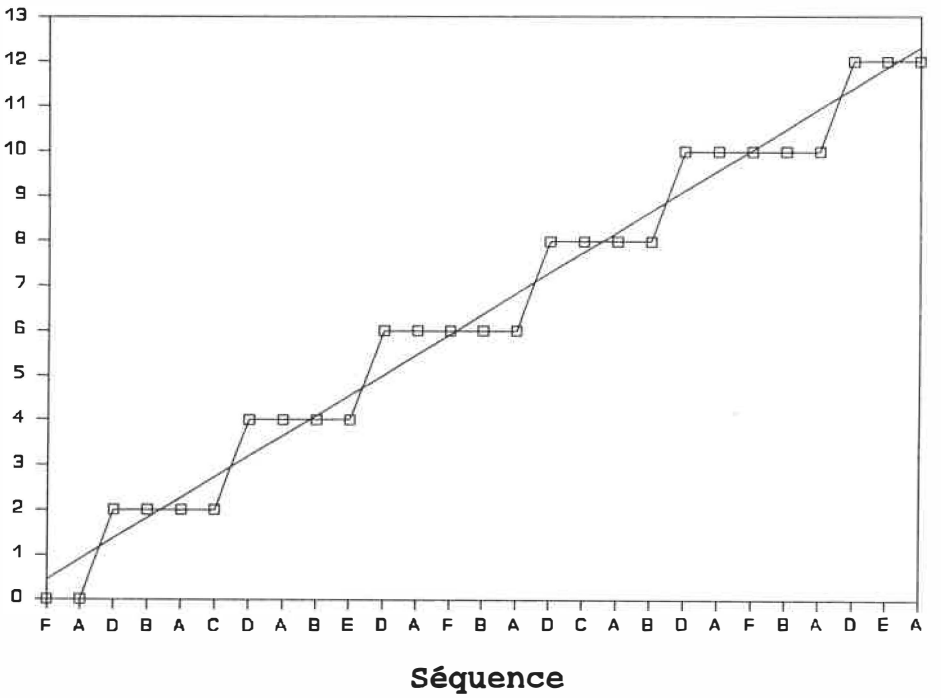
F,A,D,B,A,C,D,A,B,E,D,A,F,B,A,D,C,A,B,D,A,F,B,A,D,E,A,
F,D,B,A,C,D,A,B,F,A,D,B,A,C,D,A,B,F,A,D,E,B,A,D,C,A,F.

A la page suivante, deux exemples de diagramme de consommation de composantes sont présentés pour les tuyères PT6-HP et PW100. On peut constater comment la consommation réelle Xj,k tend vers la consommation moyenne Nj dans les deux cas.

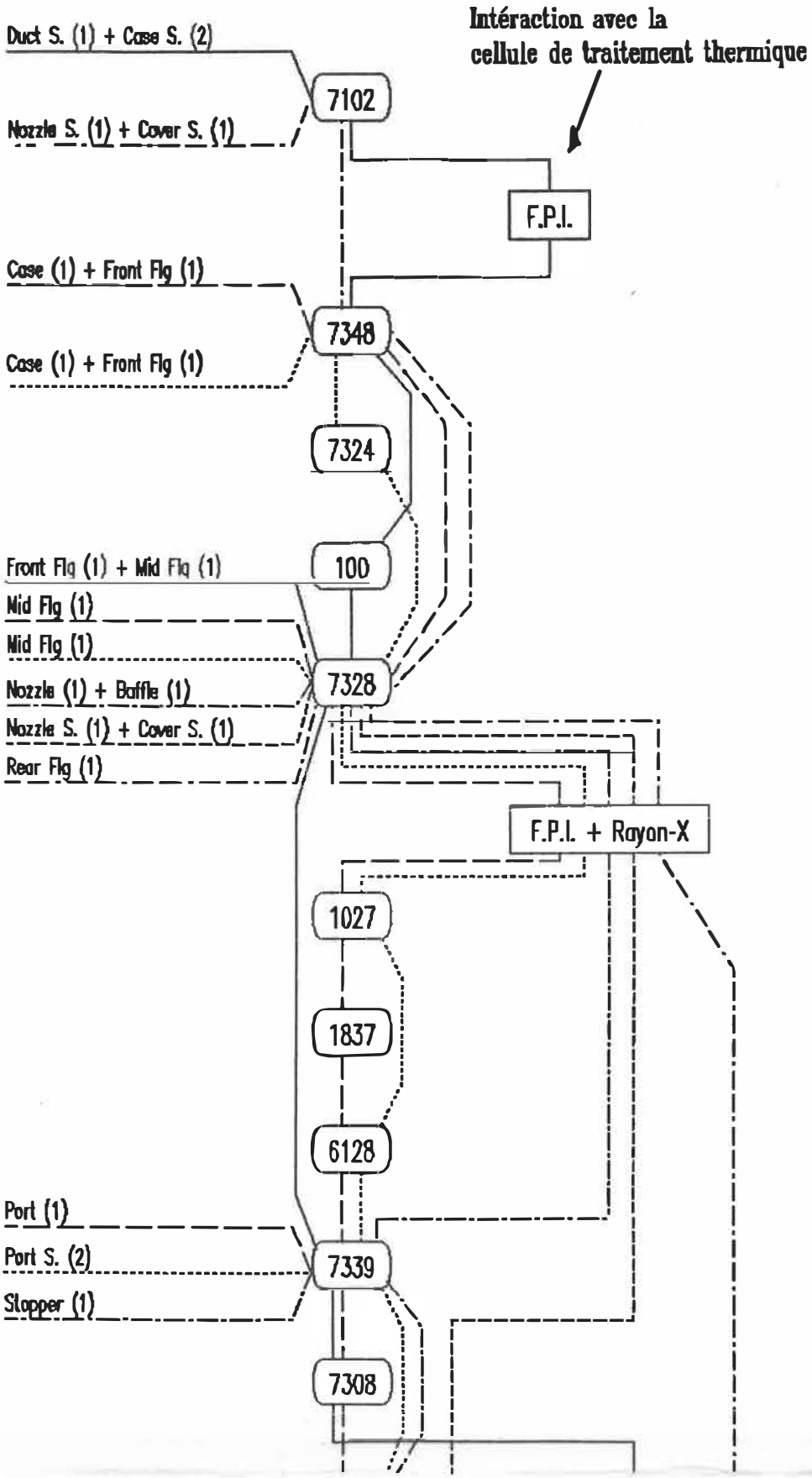
Composante A1

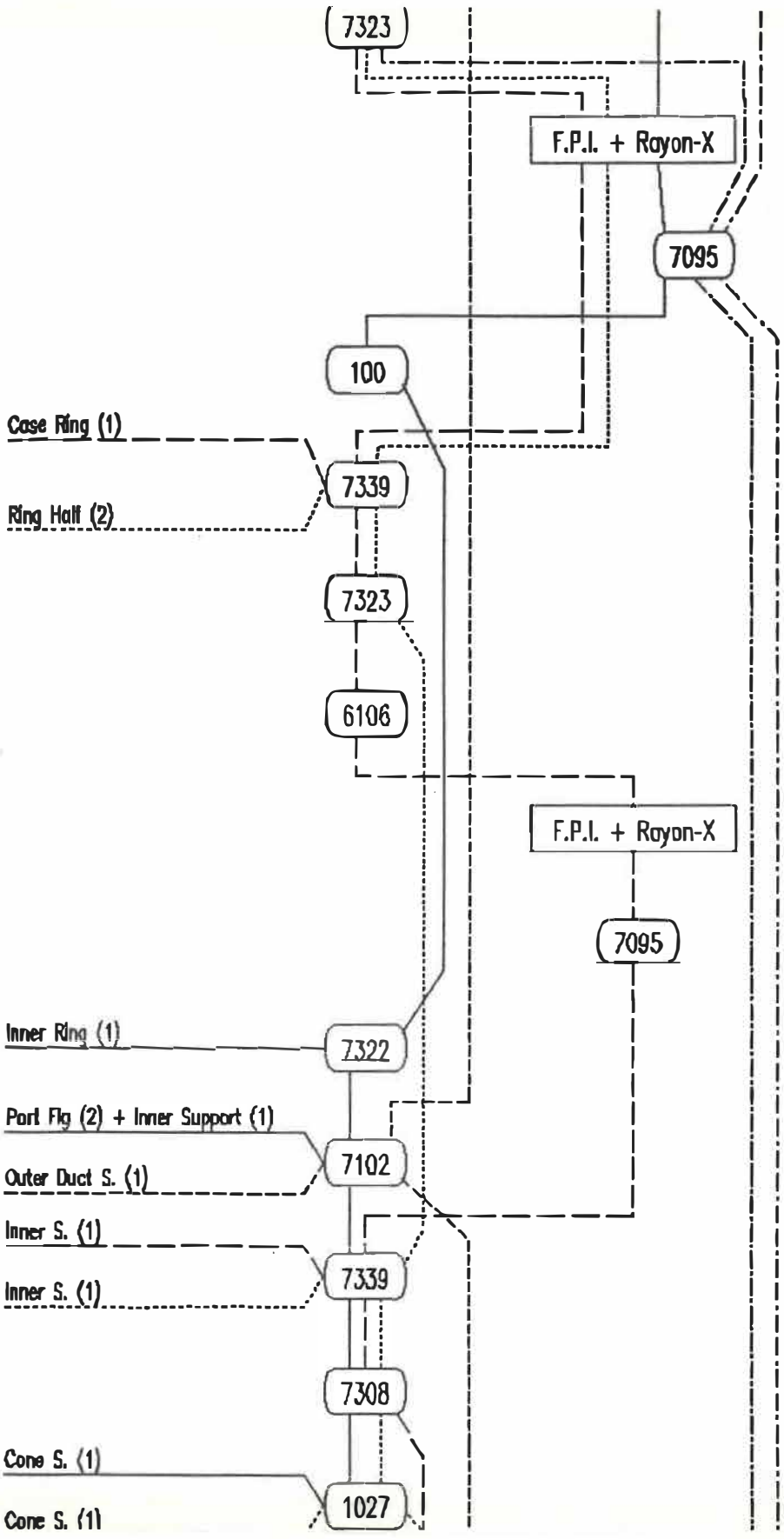


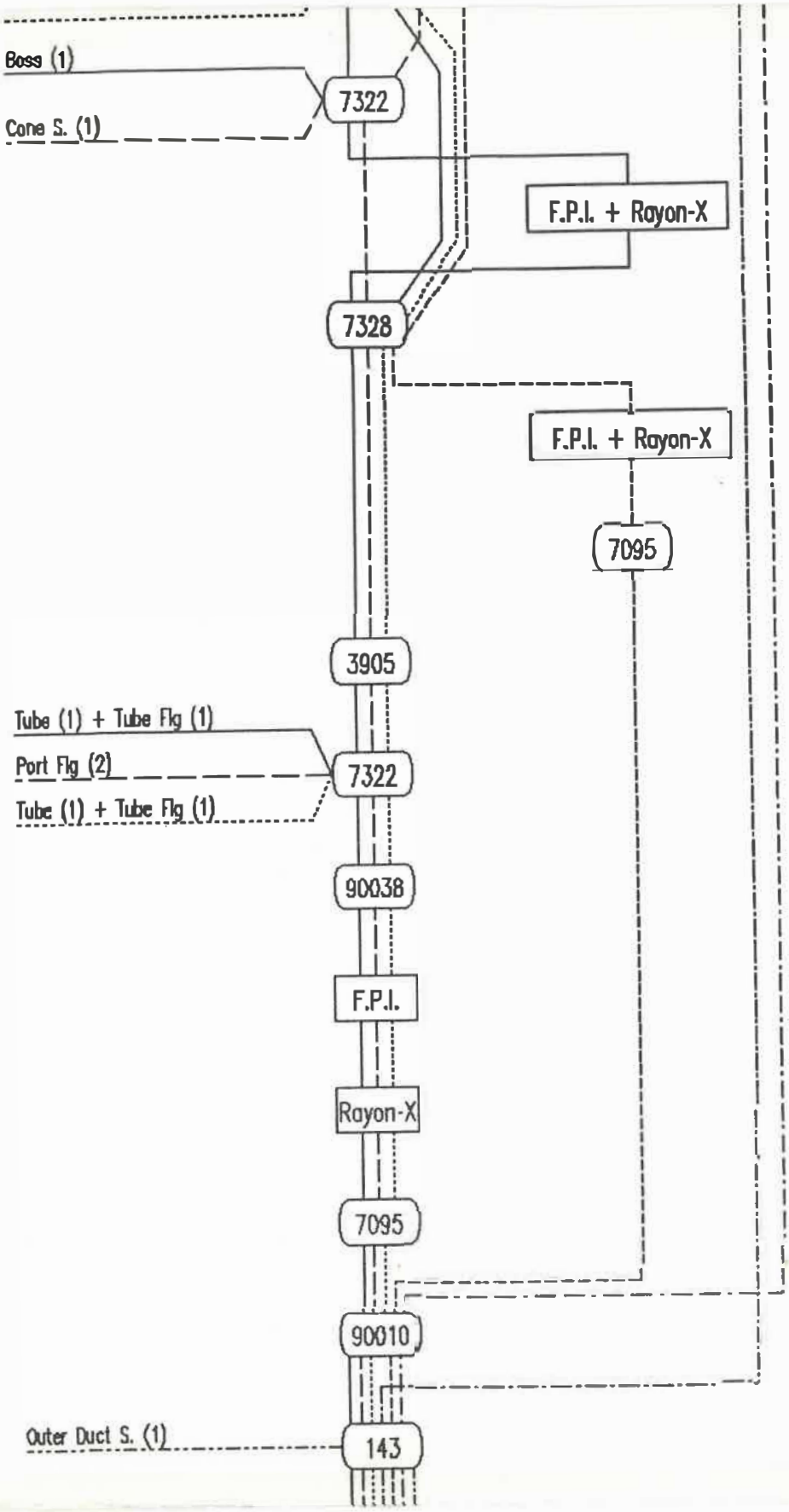
Composante D1

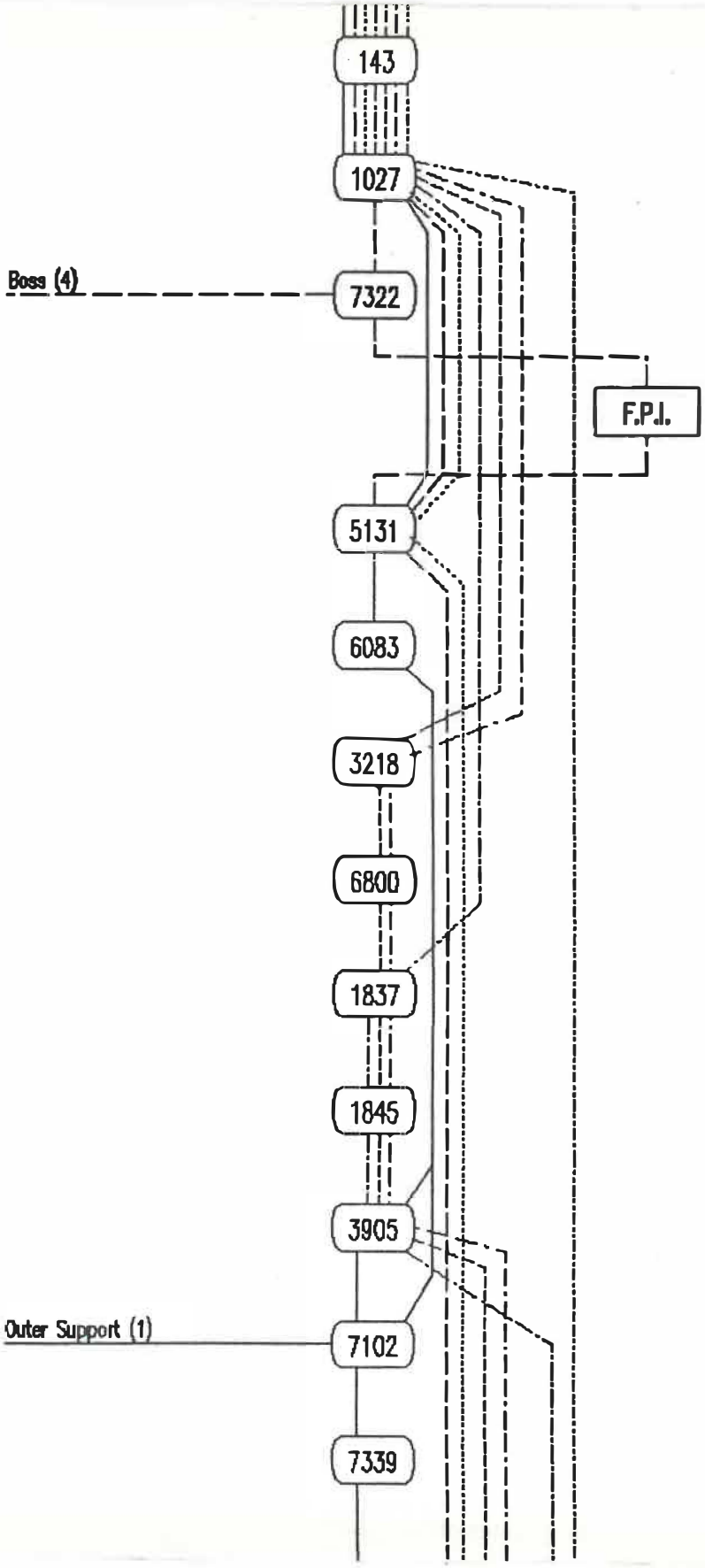


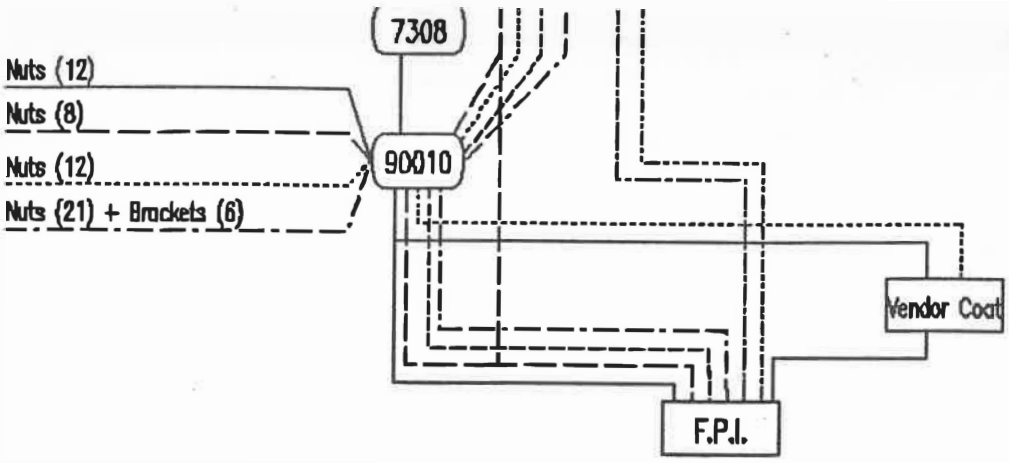
Cellule d'assemblage




7323
F.P.I. + Rayon-X
7095
100
Case Ring (1)
7339
Ring Half (2)
7323
6106
F.P.I. + Rayon-X
7095
Inner Ring (1)
7322
Port Flg (2) + Inner Support (1)
7102
Outer Duct S. (1)
Inner S. (1)
7339
Inner S. (1)
7308
Cone S. (1)
1027
Cone S. (1)


Boss (1)
Cone S. (1)
7322
F.P.I. + Rayon-X
7328
F.P.I. + Rayon-X
7095
3905
Tube (1) + Tube Flg (1)
Port Flg (2)
Tube (1) + Tube Flg (1)
7322
90038
F.P.I.
Rayon-X
7095
90010
Outer Duct S. (1)
143


143
1027
Boss (4)
7322
F.P.I.
5131
6083
3218
6800
1837
1845
3905
Outer Support (1)
7102
7339



PT6-HP

PT6-BP

PT6-HY

PW100

JT15 Ver A

JT15 Ver. B

Outer Duct JT15 Ver. B

Note: Les sous-assemblages sont identifies
par leur nom suivi de "S."

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
3 9334 00290751 5